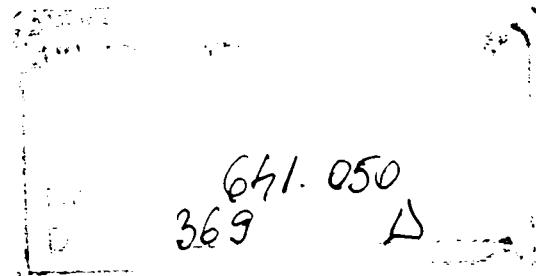


**LILIANA RODICA RUSU**

**TEZĂ DE DOCTORAT**



**CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:**

Prof. dr. ing. **IOAN GH. CARTIȘ**

**2003**

**UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE MECANICĂ**

**LILIANA RODICA RUSU**

**TEZĂ DE DOCTORAT**

**Creșterea fiabilității  
reperelor de la autoturisme  
prin nitrurare în plasmă**

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

**CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:**

**Prof. dr. ing. IOAN GH. CARTIȘ**

**2003**

# CUPRINS

Cap. 1 INTRODUCERE	1
Cap. 2 PROCESE FIZICO – CHIMICE CE STAUA LA BAZA NITRURĂRII ÎN PLASMĂ	6
2.1 Fizica plasmei	6
2.2 Aspecte metalurgice ale nitruării ionice	12
2.3 Modelul matematic al nitruării ionice	20
2.3.1 Modelul gazului	21
2.4 Model numeric al nitruării în plasmă a oțelurilor slab aliate	24
Cap. 3 INSTALAȚII INDUSTRIALE PENTRU NITRURARE ÎN PLASMĂ	33
3.1 Particularitățile instalațiilor de nitruare în plasmă	33
3.2 Utilaje de nitruare pentru producția de serie	36
3.3 Utilizarea industrială, capacitatea de adaptare a procedeelor de nitruare	63
3.4 Criterii suplimentare de alegere a procedeelor de nitruare	72
3.5 Comportamentul la uzare al suprafețelor nitruate în plasmă în comparație cu suprafețele nitruate convențional în cazul angrenajelor elicoidale din industria auto	74
3.6 Costuri	81
Cap. 4 STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA DIFERIȚILOR FACTORI ASUPRA STRUCTURII ȘI PROPRIETĂȚILOR STRATURILOR NITRUATE ÎN PLASMĂ	89
4.1 Structura și compoziția chimică a straturilor exterioare nitruate	89
4.2 Rezistența și grosimea stratului	92
4.3 Tenacitatea	96
4.4 Rezistența la uzare	98

4.5 Rezistența la oboseală	100
4.6 Rezistența la coroziune	101
4.7 Tehnologii de obținere a straturilor nitrurate multiple	102
<b>Cap. 5 FONTE ȘI OȚELURI NITRURATE UTILIZATE ÎN CONSTRUCȚIA REPERELOR DE AUTOMOBILE</b>	109
5.1 Fonte cenușii	109
5.1.1 Fonte cu grafit nodular pentru repere de autoturisme	103
5.1.2 Proprietăți mecanice	111
5.2 Fonte cu grafit nodular aliate	120
5.3 Fonte tratate termomecanic (fonte ADI)	122
5.4 Oțeluri nitrurate	128
<b>Cap. 6 CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA REPERELOR DE AUTOTURISME NITRURATE IONIC</b>	134
6.1 Comportarea cămășilor de cilindru și a segmentilor după nitrurare ionică	134
6.1.1 Considerații asupra fenomenelor de uzare semnalate la cămăși de cilindru și segmenti	135
6.1.2 Program de experimentări, metodologie, utilaje, aparatură și epruvete folosite	139
6.1.3 Experimentări privind durificarea superficială a cămășilor de cilindru	141
6.1.4 Experimentări privind durificarea superficială a segmentilor	151
6.1.5 Determinarea experimentală a vitezei de uzare	156
6.1.6 Experimentări pe motoare de autoturisme Dacia	162
6.2 Cercetări experimentale privind creșterea rezistenței la uzare a ansamblului arbore cu came – tchet	168
6.2.1 Tehnologia de fabricare și tratamentele superficiale ale arborilor cu came	169
6.2.2 Tehnologia de fabricare și tratamentele superficiale ale tacheților	172
6.2.3 Încercarea la uzură pe stand și pe autoturism a axelor cu came și a tacheților	175



Cap. 7. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE	191
7.1 Rezultate teoretice și experimentale	191
7.2 Contribuții originale	193
7.2.1 Contribuții generale	193
7.2.2 Contribuții în plan tehnologic	193
7.2.3 Contribuții la interpretarea structurilor, a cineticii și mecanismului de formare a straturilor superficiale prin nitrurare ionică	194
<i>Bibliografie</i>	196



## **Cap. 1 INTRODUCERE**

Dinamica deosebită a industriei constructoare de automobile impune găsirea unor soluții tehnologice care să permită obținerea unor durabilități cât mai ridicate pentru piese. simultan cu reducerea duratei de producției și a prețului de cost.

În acest context, aplicarea unor tratamente termice și termochimice moderne reprezintă preocupări importante pentru proiectanții și constructorii de autoturisme.

Tratamentele termice și termochimice de suprafață s-au dezvoltat mult în ultimii ani. Studiile elaborate și prognozele pentru începutul de mileniu arată că ele vor evolua incomparabil mai rapid decât tratamentele termice volumice. Aceasta se explică și prin faptul că majoritatea pieselor și sculelor au nevoie de proprietăți deosebite (duritate, rezistență la uzare, rezistență la coroziune), în special, pe suprafața lor.

În general, tratamentele termice și termochimice sunt mari consumatoare de energie, dar, în cazul tratamentelor superficiale, datorită volumului relativ redus de material afectat și creșterii însemnate a rezistenței și durabilității în exploatare a reperelor tratate, conduc la mari economii de material și implicit de energie. Se poate astfel formula așa numitul paradox al tratamentelor termice, conform căruia, prin aplicarea de tratamente termice și termochimice se economisește energie.

Dintre tratamentele de suprafață care promet să se dezvolte mai mult în perioada următoare fac parte: tratamentele termice cu laser și fascicul de electroni, carburarea și nitrurarea ionică, călirea prin inducție, călirea în pat fluidizat și depunerile de straturi subțiri cu proprietăți adaptate condițiilor de lucru ale pieselor și sculelor. Dintre aceste tehnologii, nitrurarea ionică are mari șanse să se dezvolte în anii următori datorită avantajelor sale evidente. Majoritatea firmelor tind să investească în această tehnologie modernă.

Nitrurarea ionică reprezintă o variantă modernă a procedurilor de nitrurare, realizată prin intermediul unei descărcări luminescente anormale, într-un amestec de azot și hidrogen



(în general, amoniac disociat), în care piesele care constituie șarja formează catodul, iar recipientul metalic care conține șarja constituie anodul.

Efectele nitrurării par a fi cunoscute încă din antichitate. Astfel, rezistența mare la coroziune a coloanei de fier de la Delhi (anul 405 ÎHr) se poate explica prin acoperirea acesteia cu o peliculă subțire de nitruri. Se presupune că atmosfera, cu un conținut mare de amoniac din această zonă geografică și clima subtropicală a Indiei, au creat condițiile ce au permis formarea pe suprafață a unui strat subțire de nitruri de fier.

Istoria procesului de nitrurare, în general, este apropiată istoriei amoniacului. Carbonatul de amoniu a fost primul care a dobândit numele de „salmiac clorură de amoniu”, dat de arabii din oaza Ammon (astăzi Siwa). Amoniacul a fost prezentat în forma lui chimică liberă de către Priestley în 1774 și apoi, 10 ani mai târziu, ca element de legătură al azotului și hidrogenului de către Berthollet. Prelucrarea tehnică a amoniacului a început în 1913 de către Haber și Bosch. Aceștia au început folosirea industrială a amoniacului.

Pe parcursul dezvoltării devreme a sintezei amoniacului, a fost observată și studiată interacțiunea amoniacului cu oțelul și s-a stabilit posibilitatea interacțiunii fierului cu amoniacul, constatându-se creșterea durității superficiale și a rezistenței la coroziune a oțelurilor nitrurate într-o atmosferă formată din amoniac. A. Machlet din USA a brevetat folosirea amoniacului la nitrurarea oțelului și a fontei turnate în 1913. Se pare că, primul care a studiat cinetica procesului, structura și proprietățile aliajelor de fier cu conținut de azot a fost N. P. Cijevski, care a publicat lucrări pe această temă în anii 1907 – 1914.

Utilizarea nitrurării în procesele de tratamente termice (pentru a crea un strat superficial dur) a fost posibilă doar după dezvoltarea oțelurilor speciale nitrurate de către A. Fry. Această dezvoltare, în anii 1922 – 1923, a fost considerată, prin urmare, nașterea procesului de nitrurare. În 1930 Lehrer a publicat studiile sale referitoare la fazele de echilibru dintre fier și azot în amestec gazos de amoniac – hidrogen. Sfatul pe care el la dat în acele timpuri în ceea ce privește utilizarea fazelor de echilibru specifice în procesul nitrurării, a fost pus în practică în ultimele două decenii.

În anii 1920 și 1930, nitrurarea în gaz a fost exclusiv utilizată pentru creșterea rezistenței mecanice în regiunea suprafeței [1]. S-a dovedit că este necesară o temperatură în jur de 500 °C pentru a crea proprietățile cerute de rezistență ridicată și suprafață dură. Pentru ca această temperatură să rămână constantă, este necesară o durată lungă de încălzire pentru a obține adâncimea de nitrurare cea mai bună. Metalurgii au început să investigheze moduri de a reduce durata de nitrurare, în timp ce obțin aceeași adâncime de nitruri.



Cercetări sistematice asupra nitrurării în gaz au fost efectuate în anii 1905 – 1923. La firma Krupp, cercetări cu privire la efectele azotului asupra oțelului au fost efectuate începând cu 1918 de către Adolf Fry. Cercetările efectuate de acesta au fost publicate în 1923 și au propus fabricarea unor oțeluri speciale de niturare. Tot Fry a construit prima diagramă Fe-C și a publicat date referitoare la solubilitatea azotului de fier, a stabilit domeniile de existență ale nitrurilor  $Fe_4N$ ,  $Fe_2N$  și a pus în evidență transformările magnetice și eutectoide în aliajele Fe-N. Diagramele propuse mai târziu de Lehrer, Eissenhut și Kaup au preluat în mare parte diagrama lui Fry.

Procedeul de niturare în gaz a fost dezvoltat pe scară industrială începând cu anul 1924 de către de firma franceză care a cumpărat licența uzinelor Krupp. În timpul celui de-al doilea război mondial acest procedeu a cunoscut un grad înalt de dezvoltare.

O tehnologie de niturare ionică (ion nitriding) a fost brevetată în 1931 de J. J. Egan în SUA și în 1932 de Berghaus în Germania, dar a fost propusă pentru întâia oară de germanul Bernhard Berghaus în anul 1932, procedeul a devenit uzual după 1960.[2,3]

Primele utilizări practice au apărut încă înaintea celui de-al doilea război mondial. Din păcate, utilizarea procedeuului pentru nitrurarea țevelor de tun de mare lungime a condus la un sever secret militar și ca atare, nu au rămas multe informații asupra cercetărilor și rezultatelor respective, cu excepția unor brevete publicate de aliați în 1945.

Pe baza brevetelor lui Berghaus, o societate siderurgică germană a construit prima instalație industrială de 10 kW, care a funcționat din anul 1958 până în anul 1983, într-o uzină franceză din Argentină. În anul 1959 germanii cedează brevetele și instalația societății franceze Partiot, care efectuează cercetări asupra nitrurării ionice până în anul 1964. Cercetările vor fi continuate de societatea Aciers de Pompei, societate care va colabora începând cu anul 1968 cu L'Ecole des Mines de Nancy pentru dezvoltarea unor aspecte metalurgice ale procesului.

În aceeași perioadă, în Germania, firma Klockner reia unele brevete ale lui Berghaus și beneficiind de sprijin financiar guvernamental pune la punct rapid (1966 – 1970) cele mai moderne instalații de niturare ionică, unele dintre acestea fiind achiziționate și de către firme din România.

Iată că, deși nitrurarea ionică a fost propusă încă de acum 70 de ani, utilizarea industrială a acestui procedeu a început practic după 1970, când au fost create dispozitivele semiconductoare de mare putere. În prezent, nitrurarea ionică se aplică pe scară largă în deosebi în țările industrializate (Germania, Franța, Japonia, Anglia), care sunt cunoscute și



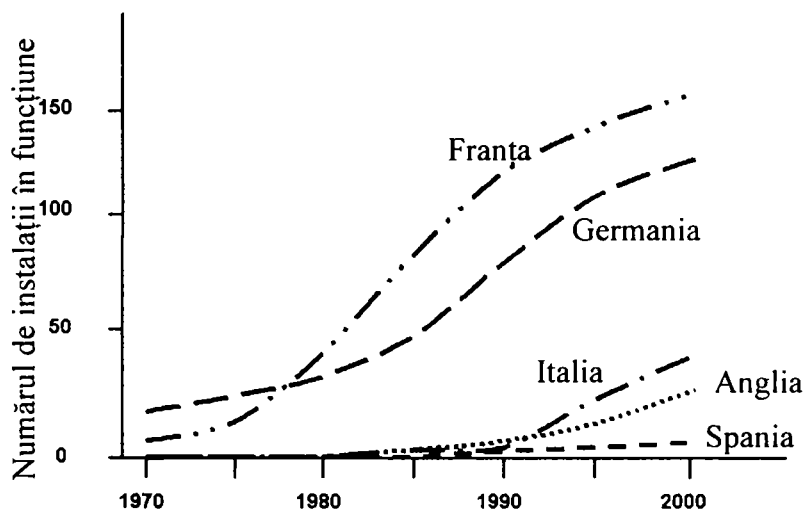
pentru amploarea și nivelul cercetărilor din domeniu. În ultimii ani, Statele Unite investesc mult în acest sector încercând să reducă decalajul ce le separă de Europa și Japonia.

În 1973 existau în lume 65 de instalații de nitrurare ionică, dintre care 32 în Germania Occidentală, 10 în Japonia, 9 în Germania de Est, 5 în Elveția, 2 în Polonia, 2 în Spania, 1 în România, 1 în Austria și 1 în Franța.[4] Acest număr a crescut până la aproximativ 1500 în 1992,[5] dintre care, în jur de 100 în SUA.

Interesul pentru nitrurarea ionică a pieselor și sculelor a crescut mult în întreaga lume în ultimul deceniu, dar există încă numeroase fenomene fizico – chimice mai puțin cunoscute și înțelese.

În România, prima instalație de nitrurare ionică a fost construită și omologată în anul 1978 la Târgu Mureș, având o putere de 10 kW și o retortă de  $\phi 520 \times 2000$  mm. Începând din anul 1979, Institutul de Fizica și Tehnologia Aparatelor cu Radiații din București montează și pune în funcțiune o serie de instalații la Întreprinderea de Autoturisme Pitești, Întreprinderea de Autocamioane Brașov, Întreprinderea Faur București. În prezent, în țara noastră funcționează peste 100 de instalații de nitrurare ionică.

Avantajele nitrurării ionice, față de alte metode de nitrurare, au produs o creștere continuă a numărului de instalații aflate în exploatare după anul 1970 (figura 1.1).[6]



**Figura 1.1** Evoluția numărului agregatelor de nitrurare în plasmă din industrie

Nitrurarea ionică a devenit astăzi un procedeu larg utilizat pe scară industrială, această dezvoltare fiind favorizată de numeroasele sale avantaje comparativ cu alte procedee de nitrurare. Astfel, față de nitrurarea clasică în gaz, nitrurarea ionică oferă:



- posibilități mai largi de reglare a compoziției fazice și a structurii stratului nitrurat (ce determină o serie de avantaje privind comportarea în exploatare a pieselor respective);
- un consum energetic redus cu 50 – 75%;
- o durată de tratament de 2 – 5 ori mai redusă;
- un interval mai extins al temperaturilor la care se poate realiza tratamentul;
- o inerție termică mai redusă a incintei de lucru.

Nitrurarea ionică a atins, în ultimul timp, o mare extindere, iar cercetările de înalt nivel în domeniu, numărul și calitatea instalațiilor industriale realizate în țară, tehnologiile elaborate, precum și volumul reperelor nitrurate ionic, situează România în rândul țărilor cu importante realizări în domeniu.

Lărgirea continuă a gamei de aplicații industriale ale nitrurării ionice (atât în privința materialelor metalice luate în considerare, cât și a tipului și destinației pieselor nitrurate), determină concomitent și modificări spectaculoase ale tehnologiilor de fabricație actuale prin înlocuirea unor procedee clasice de nitrurare, carburare, carbonitrurare sau acoperire superficială, precum și prin înlocuirea unor materiale cu altele.



## Cap. 2 PROCESE FIZICO – CHIMICE CE STAU LA BAZA NITRURĂRII ÎN PLASMĂ

### 2.1 Fizica plasmei

Termenul de „plasmă”, „descărcare electrică”, „descărcare în gaz”, „descărcare luminescentă” definește un gaz care conține particule neutre, ioni pozitivi, ioni negativi și electroni.[7] În medie, un volum care conține plasmă este neutru din punct de vedere electric, ceea ce înseamnă că densitatea de electroni și ioni negativi este egală cu densitatea de ioni pozitivi.

Un parametru important al plasmei este gradul de ionizare, care reprezintă proporția de particule ionizate. Plasma cu un grad redus de ionizare (plasmă rece) este cea utilizată pentru nitrurarea ionică.

Nitrurarea ionică are la bază fenomenele fizico – chimice caracteristice descărcărilor de gaze rarefiate și se efectuează prin intermediul unei descărcări luminescente anormale (figura 2.1) [8] într-o atmosferă formată din gaze active și respectiv inerte din punct de vedere chimic, în general, azot și hidrogen, provenite din disocierea amoniacului, piesele ce se nitrurează constituind catodul, iar recipientul metalic, anodul descărcării.

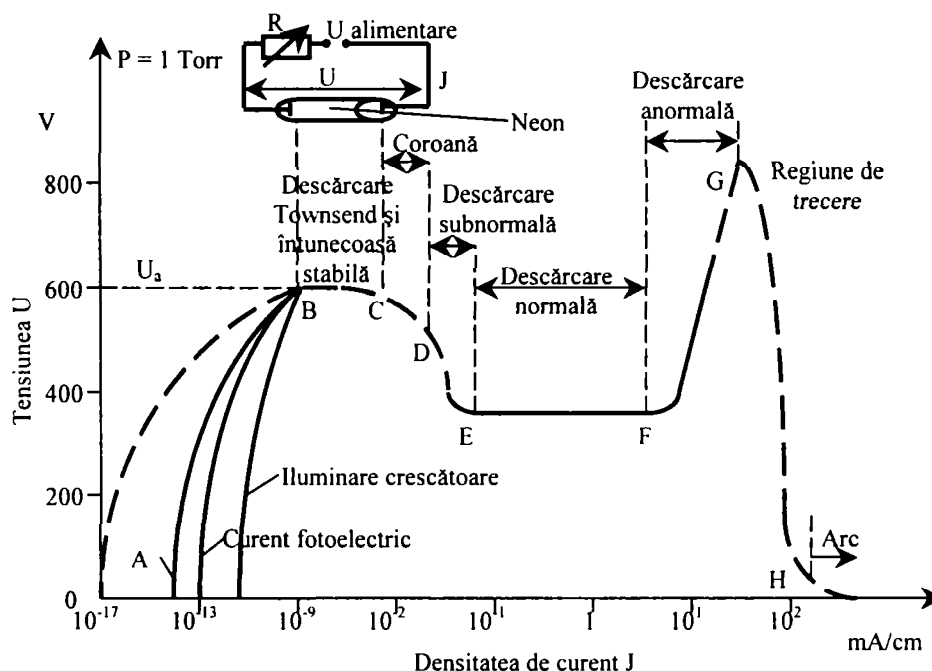


Figura 2.1 Caracteristica tensiune – curent a unei descărcări în gaze la presiune constantă

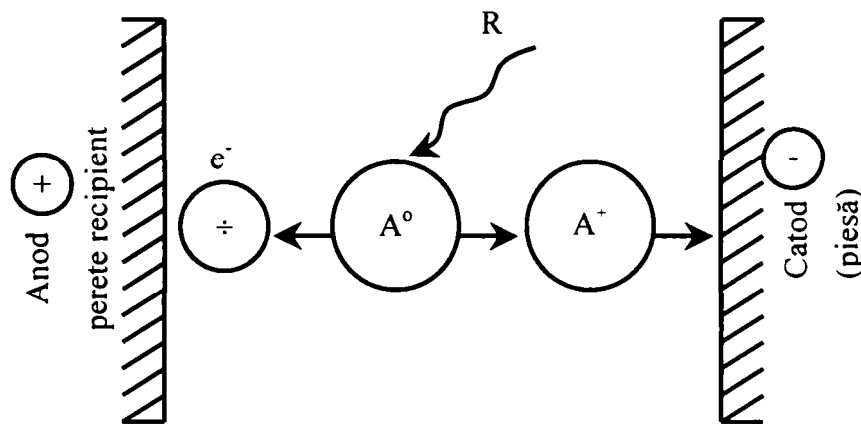


Nitrurarea ionică poate fi definită, similar celorlalte procedee de nitrurare, ca un proces complex de pătrundere a azotului în stratul superficial al pieselor și fixarea interstițială a acestuia (inclusiv prin substituirea unor atomi de carbon), formând astfel o soluție solidă cu fierul, iar în unele situații dând naștere chiar la compuși chimici.

Unele faze aferente acestui proces, de exemplu, adsorbția și difuzia azotului spre interiorul piesei, se regăsesc la toate procedeele de nitrurare, dar la nitrurarea ionică presiunea de lucru este foarte scăzută, astfel că, mecanismele proceselor respective prezintă o serie de particularități. Mai mult chiar, condițiile fizico – chimice mult diferite în care are loc nitrurarea ionică, determină o serie de procese caracteristice și de mare complexitate, menționând însă că, unele mecanisme ale acestor procese se află încă în faza ipotezelor.

Dacă între piesele (catod) ce se niturează și recipientul (anod) se aplică o diferență de potențial  $U$  continuă (300...1200 V), la o presiune scăzută (2...15 mbar) a unui amestec de gaze  $N_2 + H_2$ , de exemplu, unii atomi (moleculele) vor pierde câte un electron, adică se ionizează, ca urmare a radiațiilor ionizante care traversează spațiul de lucru și care provin din radiația cosmică sau de la elementele radioactive ale Pământului sau ale atmosferei.

Rezultă astfel electroni și ioni pozitivi ce se vor deplasa accelerat în câmpul electric existent spre anod și respectiv catod (figura 2.2) sub acțiunea unor forțe coulombiene.



**Figura 2.2** Schema de principiu a ionizării inițiale

Dacă diferența de potențial dintre anod și catod este suficient de mare, iar presiunea din recipient suficient de scăzută pentru ca electronul să ajungă prin accelerarea între două ciocniri la o energie cinetică mai mare sau cel puțin egală cu energia de ionizare a atomilor (moleculelor) din spațiul de lucru, acesta va ioniza la rândul lui atomul (molecula) cu care interacționează, rezultând astfel un nou ion pozitiv și un nou electron ce va fi accelerat spre





anod. Deoarece mobilitatea electronilor este mult mai mare decât cea a ionilor, viteza lor de antrenare este cu cca. două ordine de mărime mai mare decât cea a numărului de electroni și ioni pozitivi (numărul mediu de ionizări efectuate de un electron pe unitatea de lungime de drum, pe direcția câmpului electric, se numește coeficient de ionizare  $\alpha$  sau coeficient Townsend).

Concomitent, apare însă și un proces invers de recombinare, prin care un ion pozitiv astfel format, captează un electron și devine neutru, iar energia suplimentară a electronului se emite sub formă de radiație electromagnetică. În funcție de presiunea din recipient, tensiunea la care descărcarea se autoîntreține prin atingerea regimului staționar se numește tensiune de aprindere.

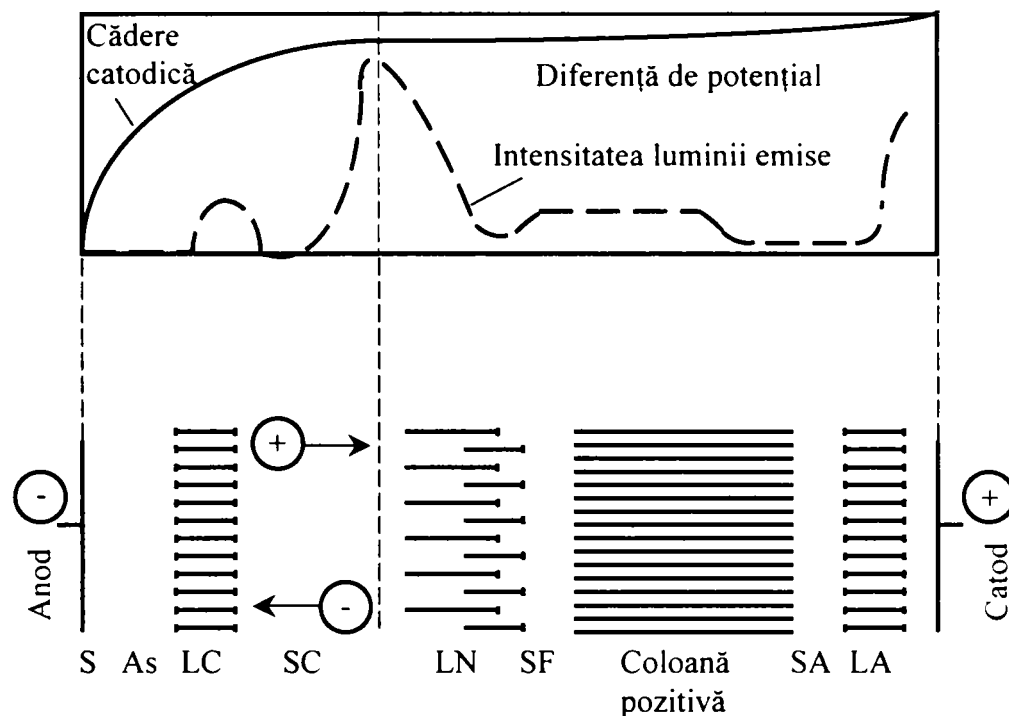
În situația în care, între două ciocniri, electronul nu a ajuns la energia de ionizare a unui atom (moleculă) de gaz, are loc doar un transfer de energie, care determină excitarea particulei lovite, energia de excitare fiind ulterior emisă sub formă de radiație electromagnetică.

Un alt proces important este cel de interacțiune cu transfer de sarcină, determinat de interacțiunea unui atom pozitiv cu un atom (moleculă) de aceeași sau de altă natură. Ionul poate astfel să capteze un electron și să devină neutru, ionul deplasându-se accelerat spre catod.

De asemenea, în volumul de gaze mai au loc, ca urmare a interacțiilor cu electroni, ioni sau neutroni, procese de disociere a moleculelor  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  în atomi sau radicali  $\text{N}_i\text{H}_j$ , precum și procese inverse, de disociere.

Mobilitatea (viteza) ridicată a electronilor face ca, în fața catodului, să apară un „exces” de sarcină spațială negativă. Datorită diferenței mari dintre mobilitatea electronilor și cea a ionilor, grosimea stratului pozitiv și mărimea câmpului electric din fața catodului va fi mult mai mare decât grosimea stratului negativ și mărimea câmpului din fața anodului. Câmpul creat de această sarcină spațială pozitivă se suprapune peste câmpul electric determinat de diferența de potențial dintre anod și catod, rezultând o intensificare sensibilă a câmpului electric dintre catod și sarcina spațială.

Se ajunge astfel la situația în care cea mai mare parte a diferenței de potențial dintre anod și catod se regăsește în apropierea acestuia din urmă, fenomen cunoscut sub numele de cădere catodică (de potențial) (figura 2.3).



**Figura 2.3** Caracteristici ale descărcărilor luminescente (As – spațiu întunecos Aston; LC – lumină catodică; SF – spațiu întunecos Faraday; SA – spațiu întunecos anodic; LA – lumină anodică)

Ca urmare a efervescentei deosebite determinate în apropierea catodului, diferența relativ ridicată de potențial conduce la radiații în spectrul vizibil (lumină catodică LC), relativ mai slabă și lumină negativă LN mai puternică și cu o grosime mai mare, ce apare ca o aureolă în jurul piesei catod. Acest regim de descărcare a primit numele de descărcare luminescentă.

Lumina negativă LN este delimitată net de spațiul catodic întunecos SC învecinat (spațiul cu Hittorf – Crookes) și se diminuează treptat, odată cu scăderea energiei electronilor primari, spre spațiul întunecos Faraday (SF). Aceste spații întunecoase apar datorită faptului că, în primul (Hittorf – Crookes), electronii dispun de o energie mai mare decât cea corespunzătoare maximului secțiunii eficace de ionizare și excitare, în timp ce în al doilea spațiu (Faraday), energia electronilor este mai mică.

Procesele cele mai importante ale descărcării la nitrurare ionică au loc în spațiul dintre catod și lumina negativă LN. În zona luminii negative, puternic ionizată și practic lipsită de câmp electric, există o mare densitate de electroni și ioni pozitivi, numeric egali, ce formează așa numita plasmă a luminii negative.

Grosimea zonei luminii negative se reduce odată cu creșterea presiunii gazelor. În legătură cu caracteristicile acestei zone este de menționat un aspect cu implicații practice: la o eventuală apropiere continuă a anodului și catodului unei descărcări luminescente (de



exemplu, experimental, într-un tub de sticlă) se poate constata că zonele catodice ale descărcării își păstrează, practic, lungimea și poziția până la apropierea anodului de marginea catodică a luminii negative. De aceea, la nitrurarea ionică, se pot nitrura piese cu geometrie complexă sau mai multe piese simultan; datorită intensei scăderi de potențial în intervalul catod – lumină negativă, marginea catodică a luminii negative se comportă ca un „pseudocatod” ce urmărește configurația suprafeței ce se nitrurează.

În cursul procesului de nitrurare, în zona luminii negative au loc o serie de fenomene fizice [9]:

- Ionizarea – electronii cu energie mare lovesc moleculele de gaz provocând desprinderea unui electron și formarea de ioni pozitivi:



Potențialul de ionizare este de aproximativ 10 eV, suficient pentru ca o parte din electronii formați să dobândească o energie care să permită o nouă ionizare (multiplicare de electroni).

- Excitarea – dacă energia cinetică a electronilor este inferioară celei necesare ionizării, se produce doar o excitare a moleculelor:



unde:

\* - starea excitată

- Relaxarea sau emisia – reprezintă revenirea particulelor excitate la un nivel energetic inferior prin emisia de fotoni:





- Disocierea – apare ca urmare a coliziunii dintre molecule și electroni cu energie mare. În funcție de energia electronilor, din moleculele de azot se pot forma atomi neutri, excitați sau ionizați:



- Recombinarea – când particulele ionizate se ciocnesc cu electroni, are loc neutralizarea prin procese de recombinare:



Când particulele bombardează suprafața piesei, o parte din energia acestor particule (90%) se transformă în energie calorică.[10] Energia calorică totală eliberată de particulele neutre sau ionizate care lovesc suprafața catodului poate fi exprimată cu relația [11]:

$$Q_t = mc\Delta T + Q_c + Q_{cv} + Q_r \quad (2.16)$$

unde:

$\Delta T$  – creșterea temperaturii catodului;

$Q_c$  – energia pierdută prin conducție;

$Q_{cv}$  – energia pierdută prin convecție;

$Q_r$  – energia pierdută prin radiație.

Se poate calcula randamentul încălzirii catodului cu relația:[12]

$$\eta = \frac{Q}{W} \quad (2.17)$$

unde:

$Q$  – cantitatea de căldură primită de către catod;

$W$  – energia totală a descărcărilor, care depinde de tensiunea aplicată, de presiune și de natura gazului.



## 2.2 Aspecte metalurgice ale nitrurării ionice

Structura microscopică a stratului obținut prin nitrurarea ionică a aliajelor feroase evidențiază în cele două zone caracteristice (stratul de compuși și stratul de difuzie) prezența compușilor definiți ( $\gamma'$ ,  $\epsilon$ ) și a soluției solide aliate cu azot.

Compoziția chimică a acestor straturi pentru cazul nitrurării fierului [13] se poate deduce din diagrama de echilibru Fe-N (figura 2.4).

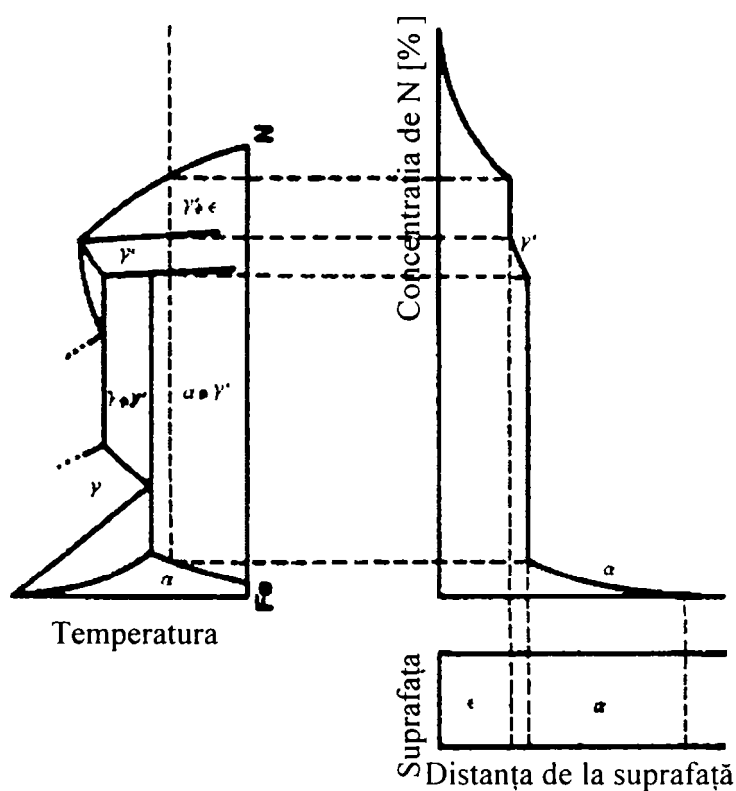


Figura 2.4 Diagrama de echilibru Fe-N și variația concentrației

Pentru 20% at N, structura este formată din nitrura  $\gamma$  -  $\text{Fe}_4\text{N}$ . Celula elementară a acestui compus este obținută prin introducerea unui atom de N în interstițiul octaedric din centrul rețelei CFC a  $\text{Fe}_\gamma$  (figura 2.5 a).

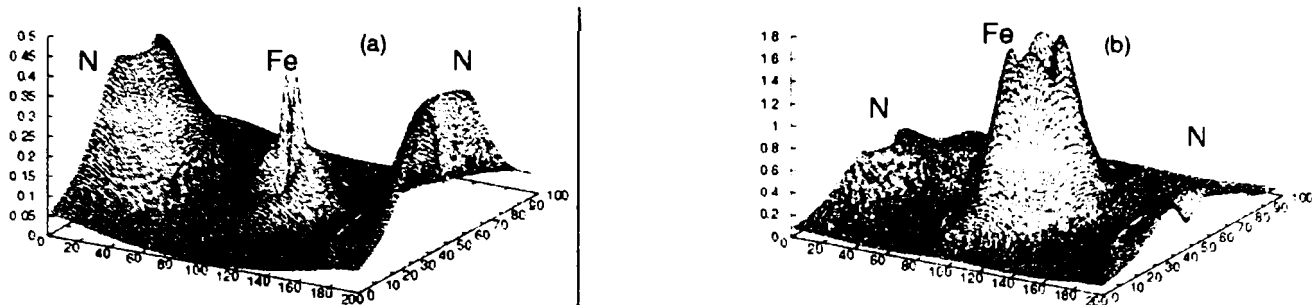


Figura 2.5 Distribuția încărcării de N-2p (a) și N-2pFe3d (b), regiunea energiei pentru nitrura de fier  $Fe_4N$  e/(u. a.)<sup>3</sup>

Prin calculul energiei minime și analiza spectrului Mössbauer s-a stabilit că structura reală a  $Fe_4N$  este, de fapt, una dezordonată [14], atomii de azot ocupând alternativ interstițiile octaedrice la jumătatea muchiilor celulei CFC (figura 2.5 b).

Valorile constantelor reticulare ale rețelei pentru cele două tipuri de structuri comparativ cu cele ale  $Fe_\gamma$  sunt prezentate în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1 Parametrii rețelei (a, b, c) pentru  $Fe_\gamma$  și structura modelului nitrurii de fier  $Fe_4N$

Structura	a, b, c (u.a.) teoretic	a, b, c (u.a.) experimental
Fe (CFC)	a = 6,58	a = 6,89 <sup>a</sup>
$Fe_4N$	a = 7,164	a = 7,171 <sup>b</sup>
$Fe_4N$ (model)	a = 7,114 c = 14,266	

[15]<sup>a</sup>, [16]<sup>b</sup>

Nitrurarea  $\epsilon$  -  $Fe_{2,3}N$  are o structură hexagonală (figura 2.6).

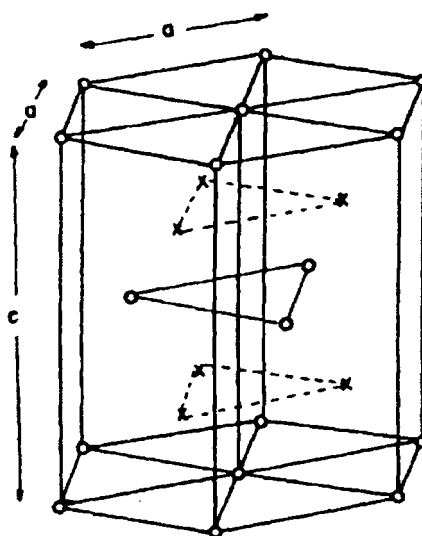


Figura 2.6 Structura cristalină a fazei  $\epsilon$  -  $Fe_{2,3}N$



Atomii de azot ocupă pozițiile după planele perpendiculare pe direcția  $c$  la distanța  $c/4$  de cele două baze. Valorile parametrilor  $a$  și  $c$  în funcție de conținutul de  $N$  sunt prezentate în figura 2.7.

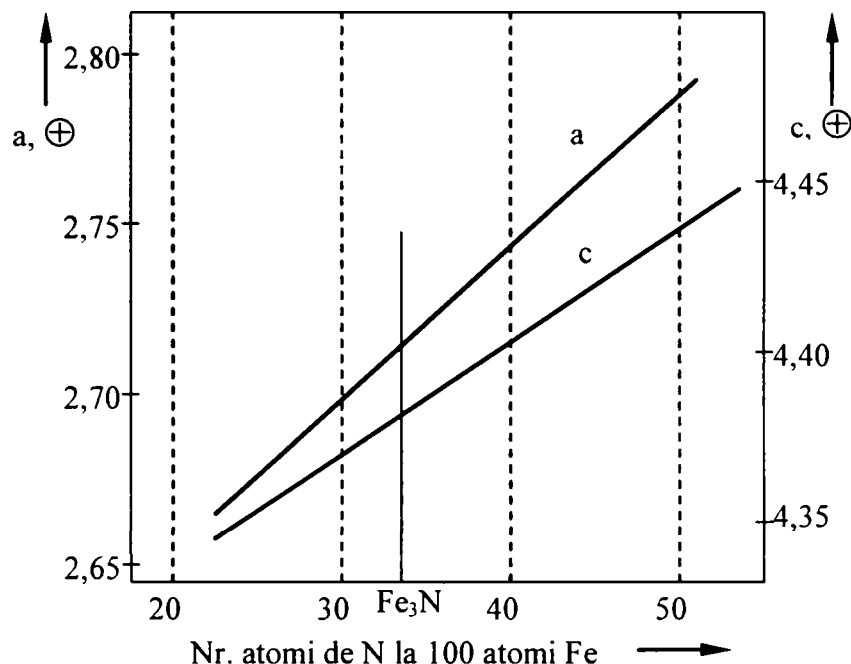


Figura 2.7 Variația parametrilor rețelei  $a$  și  $c$  în funcție de concentrația de  $N$  a fazei  $\varepsilon$

Pentru valori ale concentrației atomice a azotului de 33,3 – 33,9%, structura cristalină  $Fe_2N$  (faza  $\xi$ ) are o rețea ortorombică ( $a = 2,76 \text{ \AA}$ ,  $b = 4,82 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,42 \text{ \AA}$ ) în care atomii de azot sunt situați în planuri alternative, ocupând  $1/3$  până la  $2/3$  din interstiții.

Această structură suferă o transformare ordine – dezordine în urma căreia are loc precipitarea fazei  $\alpha''$  –  $Fe_{16}N_2$  a cărei structură tetragonală poate fi asimilată cu o structură CFC distorsionată, ceea ce conduce la ideea că faza  $\alpha''$  este o fază de tranziție între  $\gamma$  și martensită.

Tipurile de rețele cristaline din sistemul Fe-N sunt indicate în tabelul 2.2 [17].

Tabelul 2.2 Fazele prezente în sistemul Fe-N

Faze	Formula	% masice N	% at. N	Tipul rețelei
Ferită ( $\alpha$ )	Fe	0,10	0,40	CVC
Austenită ( $\gamma$ )	Fe	2,80	11	CFC
Martensită ( $\alpha'$ )	Fe	2,6	10	TC
$\alpha''$	$Fe_{16}N_2$	3,0	11,1	TC
$\gamma''$	$Fe_4N$	5,9	20	cubică
$\varepsilon$	$Fe_{2+x}N_{1-x}$	4,5 – 11,0	18 – 32	hexagonală
$\xi$	$Fe_2N$	11,14	33,3	ortorombică



Sistemul Fe-C-N

Diagrama binară Fe-N (figura 2.8) poate fi utilizată doar pentru studiul teoretic al structurii la nitrurarea ionică a fierului pur.

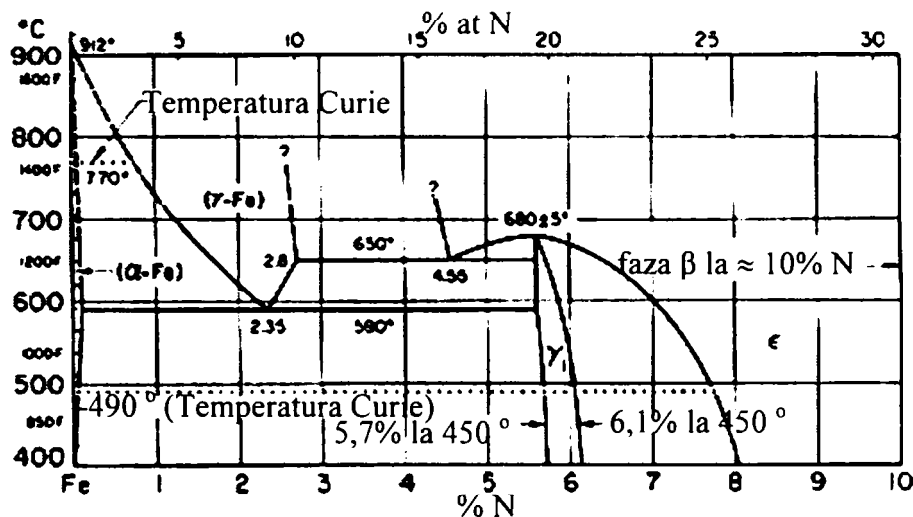


Figura 2.8 Diagrama de faze Fe-N

Pentru cazurile practice prezintă interes diagrama ternară Fe-C-N și eventual diagramele cuaternare Fe-C-N-E (E – elementul de aliere predominant din oțel). O asemenea diagramă în coordonate carteziene este prezentată în figura 2.9.[18]

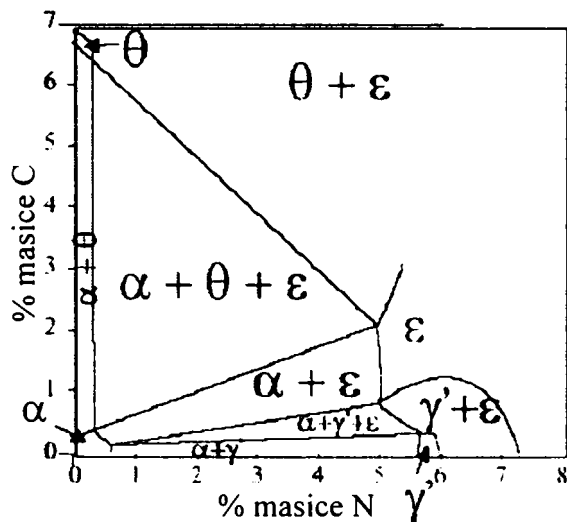


Figura 2.9 Diagrama ternară Fe-C-N

Structura pentru diferite compoziții din sistemul Fe-C-N poate fi determinată pe secțiuni izoterme din diagramă, la temperaturi situate în jurul temperaturii de nitrurare







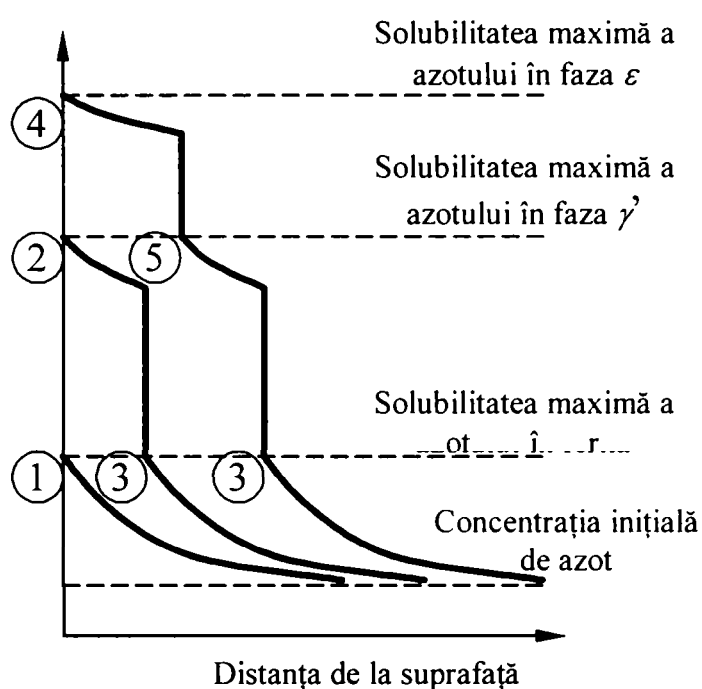
Morfologia formării diferitelor faze în stratul nitrurat poate fi analizată pornind de la reacțiile ce au loc în suprafață în timpul nitrurării.

Se pot identifica două stadii succesive:

- 1 – difuzia azotului și reacția acestuia cu fierul până la formarea stratului de nitruri;
- 2 – creșterea stratului de nitruri din suprafață și difuzia azotului înspre interior.

Fenomenul are ca bază adsorbția azotului în suprafață, creșterea nitrurilor în stratul superficial și difuzia azotului înspre interior.

Stadiile de formare a structurilor caracteristice la nitrurarea ionică sunt prezentate în figura 2.11.



**Figura 2.11** Stadii de formare a structurilor caracteristice la nitrurarea ionică

Stadiul 1 – După adsorbția azotului în suprafață, acesta intră în soluția solidă ( $\alpha$  ferită) până la atingerea solubilității maxime (punctul 1).

Stadiul 2 – Azotul care nu mai poate fi dizolvat în ferită reacționează cu fierul, formând nitrura  $\gamma'$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ). Conținutul maxim de azot al acestei faze corespunde punctului 2.

Stadiul 3 – Creșterea concentrația de azot conduce la transformarea nitrurii  $\gamma'$  în nitrura  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ ) al cărui conținut maxim de azot corespunde punctului 4. Punctul 5 este punctul de echilibru între nitrura  $\gamma'$  și  $\epsilon$  care, în timpul procesului, se deplasează înspre interiorul piesei.

641.050

369 Δ



Caracteristicile geometrice ale stratului nitrurat pot fi exprimate pornind de la distribuția concentrației de azot, respectiv de la natura fazelor prezente în structură (figura 2.12).

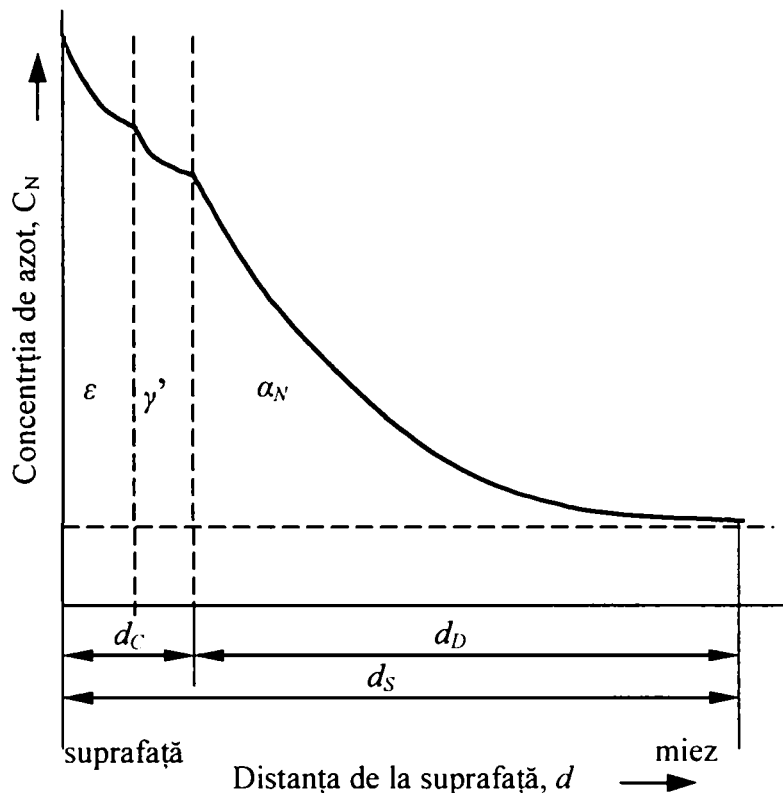


Figura 2.12 Caracteristicile geometrice ale stratului nitrurat definite după conținutul de azot

Conform notațiilor din figura 2.12:

- $d_C$  este grosimea stratului de compuși sau grosimea stratului alb;
- $d_D$  este grosimea stratului de difuzie (grosimea stratului de ferită aliată cu azot);
- $d_S$  este grosimea totală a stratului nitrurat.

Dacă se are în vedere evoluția durității pe adâncime, parametrii caracteristici ai stratului nitrurat sunt cei indicați în figura 2.13.

- $H_S$  – duritatea suprafeței piesei nitrurate;
- $H_M$  – duritatea miezului piesei nitrurate;
- $\Delta H$  – creșterea de duritate realizată prin nitrurare;
- $\Delta h/100\mu\text{m}$  – gradientul maxim al durității (corespunzător zonei în care a apărut o creștere de duritate egală cu jumătate din valoarea totală);
- $d_S$  – grosimea stratului nitrurat (stratul a cărui duritate este cu cel puțin 50 HV mai mare decât cea a miezului).

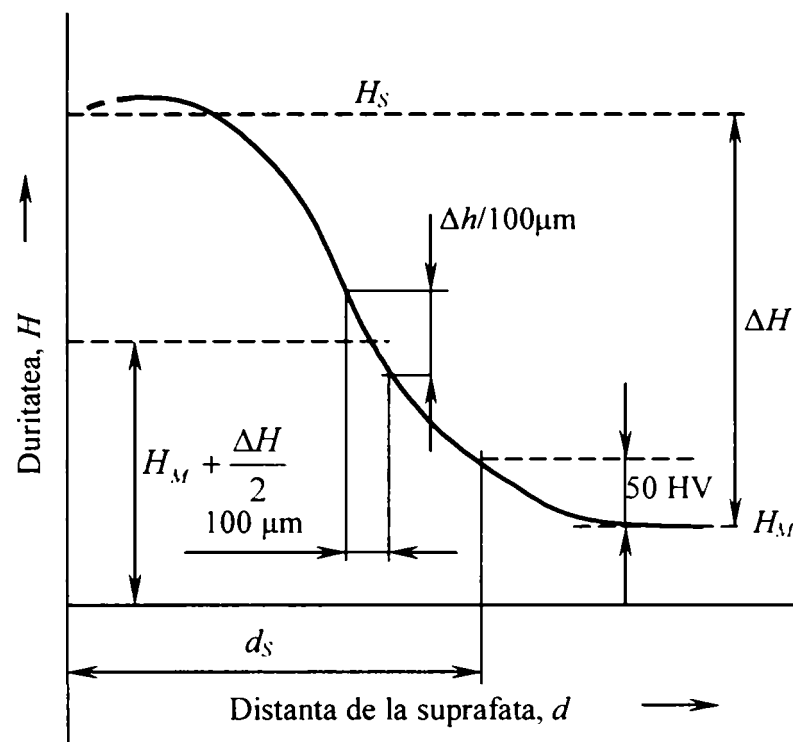


Figura 2.13 Evoluția durității pe adâncimea stratului nitrurat

### 2.3 Modelul matematic al nitrurării ionice

O înțelegere deplină a acestui fenomen complex implicat pe parcursul procesului nu este încă la îndemână, iar influența unor parametri cum sunt cei geometrici, viteza fluxului de gaz și compoziția acestuia, presiunea, caracteristicile electrice, determinarea nivelului de sensibilizare a plasmii, nu au fost încă cuantificate. Este evident că acești parametri sunt în strânsă legătură. Bazată pe înțelegerea fizică a procesului, simularea matematică [19] poate fi aptă să evalueze importanța fiecăruia dintre acești parametri și să obțină o mai bună reprezentare a întregului proces.

În prezentarea următoare se va considera modelul procesului de nitrurare ionică.[20,21] Complexitatea creerii a numeroase particule excitate și încărcate în plasmă va fi simplificată prin considerarea unui singur proces de generare principală a celor mai multe particule reactive.

Analiza interacțiunii plasmă – solid se va face pentru a propune o cale de determinare a activității azotului în solid.



### 2.3.1 Modelul gazului

Pentru formularea matematică, gazul folosit va fi azot pur la o presiune de 130...600 Pa, cu o viteză de curgere de 200 Nl/h. Erpuveta de nitrurat va fi un cilindru de oțel 1010 – A510/2000 (C10E – EN 10084/1998) și va juca rolul catodului, în timp ce anodul va fi peretele incintei. Încălzirea epruvetei peste temperatura critică (823 K) a transformărilor metalurgice (de faze), va fi asigurată prin bombardarea ionilor și bombardarea particulelor neutre energetic rezultate din transferul încărcării dintre ioni și particulele neutre din vecinătatea catodului.

Când începe descărcarea electrică luminiscentă, ionii și electronii sunt generați și accelerați de câmpul electric. Condițiile de presiune scăzută îngreuiază atingerea echilibrului termodinamic local, așa că temperatura electronilor este mult mai mare decât temperatura particulelor grele.

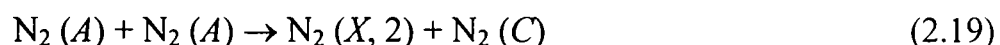
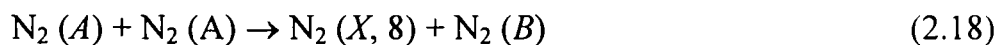
A fost stabilit că cele mai reactive particule sunt moleculele de azot în stare fundamentală electronică, dar excitate prin vibrații  $N_2(X, v)$  și atomii de azot.[22]

*Pentru  $N_2(X, v)$*

Pot fi revizuite patru procese diferite:

- a) Coliziunea electroni – vibrație (e-V);
- b) Coliziunea vibrație – vibrație (V-V);
- c) Coliziunea vibrație – translație (V-T);
- d) Auto stingerea luminiscentei a  $N_2(A)$ :

$N_2(A)$ ,  $N_2(B)$ ,  $N_2(C)$  sunt stări electronice diferite ale moleculelor de azot



S-a considerat că populația stării electronice  $N_2(A)$  a fost destul de mică, așa încât procesul d) a putut fi neglijat.

O scară a timpului caracteristic a proceselor de relaxare V-V, e-V și V-T este [23]:

$$\tau_{V-V} < \tau_{e-V} < \tau_{V-T} \quad (2.20)$$

Pentru o reducere a câmpului electric egal cu:



$$\frac{E}{N} = 3 \cdot 10^{-16} \text{ Volt} \cdot \text{cm}^2 \quad (2.21)$$

unde:

$E$  – câmpul electric;

$N$  – densitatea totală a particulelor,

Se consideră:

$$\tau_{V-V} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ sec};$$

$$\tau_{e-V} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ sec};$$

$$\tau_{V-T} = 2,5 \cdot 10^2 \text{ sec}.$$

Timpul de relaxare pentru coliziunile V-T este mult mai mare decât durata de reținere a particulelor din sistem (care este de cca. 25 sec). De asemenea, se va neglija procesul c).

Prin folosirea funcției de distribuție vibrațională (Gordiets și alții [24]) se poate simplifica problema prin rezolvarea ecuației pentru  $v = 1$ . Se va face presupunerea că  $N_2(X, 1)$  este populată numai de starea fundamentală a coliziunii electronice.

Nu se ia în considerare astfel coliziunea V-V dintre  $N_2(X, 1)$  și  $N_2(X, w)$  cu  $w > 1$ , dar se consideră că populația nivelului  $w > 1$  este destul de mică, astfel încât contribuția lor la sursa termică rămâne mică.

Cu aceste simplificări, se poate exprima  $S_1$  pentru proces:



Ecuația de rezolvat este:

$$\nabla \cdot (\rho \omega_1 \vec{V} - D_1 \nabla \omega_1) = S_1 = n_e [k_{0,1} [N_2(v=0)] - k_{1,0} [N_2(v=1)]] \quad (2.23)$$

$k_{0,1}$  și  $k_{1,0}$  sunt coeficienți cinetici ai procesului  $0 \rightarrow 1$  și  $1 \rightarrow 0$ . Aici,  $k_{0,1}$  ia, de obicei, forma următoare în plasmă fizică:

$$k_{0,1} = \int_0^\infty \left( \frac{2\varepsilon}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} g(\varepsilon) \cdot \sigma_{0,1}(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.24)$$

unde:

$m_e$  – este masa electronului;



$g(\varepsilon)$  – funcția de distribuție a energiei electronului;[8]

$\sigma_{0,1}$  este secțiunea transversală a reacției  $0 \rightarrow 1$ .  $\sigma_{1,0}$  este conectată la  $\sigma_{0,1}$  prin principiul microreversibilității:

$$\sigma_{1,0}(\varepsilon) = \sigma_{0,1}(\varepsilon + (E_1 - E_0)) \cdot \left(1 + \frac{E_1 - E_0}{\varepsilon}\right) \quad (2.25)$$

unde:

$E_0$  și  $E_1$  sunt nivele de energie ale moleculelor de azot în starea  $N_2(X, 0)$  și  $N_2(X, 1)$ . ( $E_0 = 0$  eV și  $E_1 = 0,29$  eV).

Densitatea electronilor  $n_e$  va fi un parametru ajustabil în timp al problemei.

Dacă se ia în considerare azotul atomic, se poate face aceeași presupunere. de exemplu, coliziunea electronilor este generată de aceste specii:



Coliziunile V-V sunt de mare importanță la disocierea azotului. Mai mult, condițiile limită nu sunt ușor de determinat. De asemenea, se va reprezenta numai densitatea particulelor  $N_2(X, \nu = 1)$ .

Pentru rezolvarea ecuației 2.23 este necesar să se cunoască distribuția câmpului de gaz. Este dată de ecuația momentului scrisă pentru regimurile staționare:

$$(\rho \cdot \vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \bar{\nabla}(\mu \cdot \nabla \cdot \vec{V}) - \nabla \cdot \vec{P} + \rho \cdot \vec{g} \quad (2.27)$$

unde:

$P$  – presiunea;

$\vec{g}$  - accelerația gravitațională;

$\mu$  - vâscozitatea.

Ecuația energiei gazului permite calcularea valorilor proprietăților fizice ca vâscozitatea și densitatea. De obicei, la acest tip de descărcare, se consideră efectul Joule mic, așa că sursa termică în această ecuație este zero (coliziunile V-T pentru încălzirea gazului sunt neglijate, ca mai înainte):

$$\nabla(\rho \cdot C_p \cdot \vec{V} \cdot T - k \cdot \nabla \cdot \vec{T}) = 0 \quad (2.28)$$



unde:

$C_p$  – capacitatea termică;

$T$  – temperatura;

$k$  – conductivitatea termică.

Deoarece populația stărilor excitate și ionizate este mică în comparație cu densitatea particulelor neutre în stare fundamentală pentru plasmă, vâscozitatea, capacitatea termică și coeficientul conductivității termice vor fi singurele pentru azot.

Câmpul electric, fiind necesar de determinat  $g(\varepsilon)$  [25], a fost obținut prin rezolvarea ecuației lui Poisson, presupunând neutralitatea plasmei:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.29)$$

Curgerea este laminară, așa încât viteza pe pereți este zero. Temperatura epruvetei și a peretelui sunt constante (respectiv 823 K și 300 K).

Deoarece gradele de dezexcitație și reacție ale speciilor active pe suprafața solidului nu sunt cunoscute, concentrația  $N_2(X, 1)$  lângă epruvetă și lângă pereții recipientului vor fi determinate experimental. Se va folosi spectroscopia adsorbției pentru a obține aceste condiții experimentale.

Condițiile limită pentru  $N_2(X, 1)$  sunt corespunzătoare cu temperatura de vibrație (la funcția de distribuție Gordiets [24]), egală cu 2000 K lângă epruvetă și 1000 K lângă peretele incintei.

Densitatea electronilor este  $10^{16} \text{ m}^{-3}$  în aceste calcule, în timp ce presiunea totală,  $P_{tot} = 330 \text{ Pa}$ .

Densitatea calculată a  $N_2(X, 1)$  presupune că, crearea procesului acestei specii a fost în coliziune electronică cu starea fundamentală a moleculelor de azot. Rezoluția ecuației de masă este cuplată cu ecuația de transport a gazului. Ordinea găsită a mărimii este în acord cu măsurătorile experimentale ale lui A. Richard.[26] Condițiile limită au fost determinate experimental.

Analiza cinetică cuplată cu aproximarea termodinamică a fenomenului la interfața solid – plasmă, permite stabilirea corelației dintre activitatea azotului în solid și distribuția de vibrație a stării fundamentale electronice.

Spectroscopia adsorbției trebuie să permită determinarea distribuției de vibrație și deci, verificarea validității acestui model.





## 2.4 Modelul numeric al nitrurării în plasmă a oțelurilor slab aliate

Formarea reacțiilor combinate strat de compuși/ precipitare/ difuzie face dificilă modelarea procesului de nitrurare.[27]

S-au făcut câteva încercări de unii autori [28,29] pentru a descrie procesul nitrurării în gaz fără formarea unui strat de compuși, folosind modelul difuziei, dezvoltat inițial pentru procesul cementării în gaz.[30] Aceste încercări au avut succes în explicarea cantitativă a timpului de incubare pentru formarea stratului de compuși în timpul nitrurării în gaz și influența parametrilor procesului asupra dezvoltării distribuției de N în  $Fe_\alpha$  (fier pur), dar nu corespund precipitării nitrurilor în cazul nitrurării oțelurilor aliate.[31] Curba 1 din figura 2.14 ilustrează rezultatele tipice ale unor asemenea încercări bazate pe difuzia azotului în  $Fe_\alpha$ .

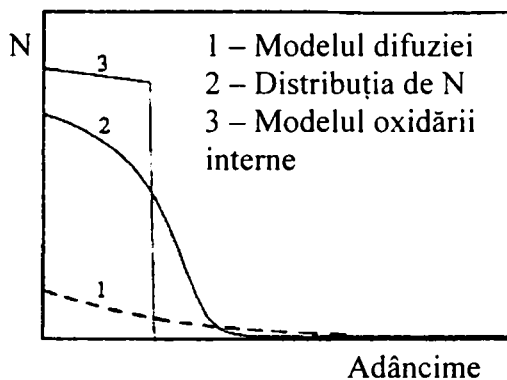


Figura 2.14 Diagrama schematică a distribuției de N prezise și măsurate

Conform diagramei de faze Fe-N, conținutul maxim de azot care poate fi dizolvat în  $Fe_\alpha$  este de cca. 0,1% vol. În realitate, funcție de elementele de aliere și concentrațiile lor în oțel, la nitrurarea oțelurilor aliate se poate obține un conținut mai mare de azot decât 1,0% vol. în cazul nitrurilor și distribuția de azot similară curbei 2 din figura 2.14. Evident, aceasta nu poate fi explicată prin modelul difuziei.

Pe de altă parte, modelul cel mai acceptat, modelul nitrurării interne [32], de asemenea, prezice cu succes adâncimea stratului în cazul nitrurării oțelurilor înalt aliate cum sunt cele inoxidabile [33], prezice distribuția azotului similară curbilor 3 din figura 2.14. Acest model, bazat pe modelul oxidării interne [34], presupune că solubilitatea la echilibru a azotului și elementelor de aliere nu influențează precipitarea nitrurilor aliate și azotul nu difuzează de-a lungul stratului nitrurat până când toate elementele de aliere au fost combinate



cu azot pentru a forma precipitate de nitruri. Ca rezultat, se așteaptă o interfață strat/ miez (vezi figura 2.14).

Difuzia convențională și modelele nitrurării interne sunt departe de realitate, pentru cazul oțelurilor slab și mediu aliate (figura 2.14). Situația este mult mai complicată în cazul nitrurării în plasmă, datorită fenomenului complex al descărcării luminescente în plasmă. S-au făcut, de asemenea, câteva presupuneri [35,36] pentru dezvoltarea modelelor empirice și semiempirice pentru a prezice grosimea stratului de compuși și a zonei de difuzie a oțelurilor aliate nitrurate în plasmă și gaz, bazate pe date experimentale ale nitrurării și analizele difuziei. Modelele empirice s-au dovedit necorespunzătoare în considerarea reacțiilor de detaliu ce au loc în timpul procesului de nitrurare și deci nu au nici un sens fizic semnificativ.

La construcția modelelor de nitrurare în plasmă, se fac presupuneri sigure pentru simplificarea calculelor și se folosesc date termodinamice disponibile. În primul rând, nitrurarea în plasmă este considerată ca un proces de echilibru implicând solubilitatea azotului în diferite faze.

A doua presupunere făcută este aceea că, toți coeficienții de difuzie ai azotului din diferite faze sunt independenți de concentrație.

Altă presupunere făcută este că precipitatele de nitruri din zona de difuzie sunt stabile și stoechiometrice.

Următoarea presupunere făcută este că echilibrul termodinamic local este atins repede în fiecare punct din material.

În final, toate elementele formate de nitruri din oțeluri se presupun a fi nelegate, de exemplu, dizolvate în ferită și interacțiunile dintre carbon și elementele de aliere sau azot sunt ignorate.

Conform celor prezentate în subcapitolul anterior, transferul masic de azot din plasmă către solid are loc ca rezultat al reacțiilor la interfața plasmă – solid, unde particulele reactive generate în catod reduc regiunea descărcării luminescente ce reacționează cu matricea. Reacțiile la transferul de masă determină condiția de limită a suprafeței în timpul procesului. Reacțiile ce au loc în plasmă determină activitatea azotului din plasmă și produc particule de azot active, care apoi se transferă la suprafața componentelor. Sunt identificate multe tipuri de reacții implicate (ionizarea indusă de plasmă, neutralizare, coliziune, activare, schimb de sarcină, excitare, descompunere și recombinație a particulelor diferite) pentru a genera diferite particule purtătoare de azot ca  $N^+$ ,  $N_2^+$ ,  $NH_j^+$ ,  $N$ ,  $N_2$ ,  $NH_j$ , etc.[37] Au fost propuse câteva mecanisme de transfer masic de azot referitoare la generarea tipurilor de nitruri și al



interacțiunilor dintre ioni, conductorii de nul și suprafața oțelului. Aceasta include mecanismul difuziei parazite [38], mecanismul bombardării cu ioni [39], mecanismul adsorbției de gaz [40] și mecanismul difuziei prin vacanțe a ionilor [41].

Diferitele mecanisme implicate la nitrurarea în plasmă arată complexitatea procesului. Mecanismele propuse sugestionează, de asemenea, că transferul masic de azot în timpul nitrurării în plasmă este efectul cumulat al diferitelor reacții.

Ecuția dedusă a transferului de masă [42] este:

$$\rho \frac{dN_s}{dt} = A - BN_s \quad (2.30)$$

unde:

$N_s$  – concentrația azotului din suprafață;

$A$  – o constantă determinată de reacții diferite și este funcție de condițiile de nitrurare și compoziția materialului;

$B$  – o constantă determinată de reacțiile în sens invers;

$\rho$  - densitatea materialului.

S-au efectuat experimente pentru evaluarea valorilor  $A$  și  $B$ , prin măsurarea cantității totale de azot transferat din plasmă către oțel în condiții de nitrurare diferite. Cantitatea totală de azot din oțel a fost evaluată prin măsurarea concentrației de azot prin analize cu emisie optică.

Figura 2.15 [27] ilustrează unele măsurători ale distribuției azotului la oțelul slab aliat En40B – 970 Part 1/1996 (32CrMo12 – 10250-3/1999) cu 0,25% C, 0,159% Mn, 3,2% Cr, 0,49% Mn, produse în condiții diferite de nitrurare.

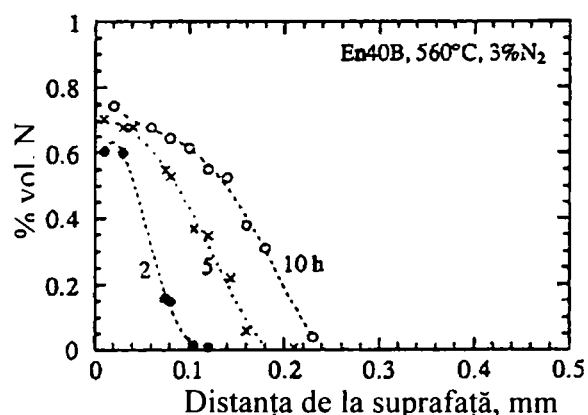


Figura 2.15 Distribuția pe adâncime a concentrației măsurate de N a oțelului En40B nitrurat în plasmă la 560 °C, în amestec de 3% N<sub>2</sub> + 97% H<sub>2</sub>, în timpuri diferite



Figura 2.16 prezintă cantitatea totală de azot funcție de timp pentru două concentrații de azot ale atmosferei.

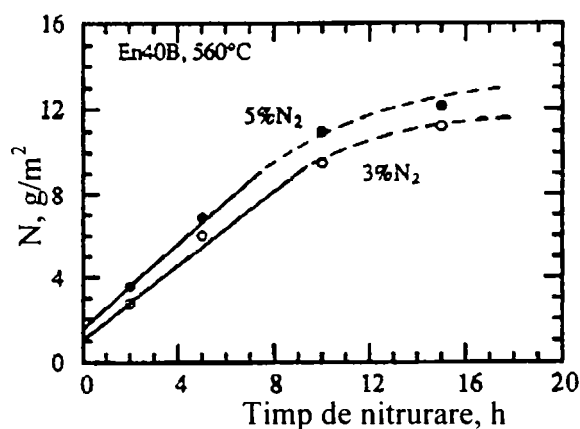


Figura 2.16 Curbele de N transferat complet funcție de timpul de nitrurare pentru oțelul En40B, calculate din măsurătorile distribuției adâncimii de N

S-a găsit că, reprezentând grafic cantitatea totală de azot transferat, funcție de timpul de nitrurare, curbele au o formă liniară și apoi una parabolică. Tranziția de la forma liniară la cea parabolică corespunde începerii formării fazei  $\gamma'$  pe suprafață. Liniaritatea curbei la faza de început a nitrurării indică faptul că s-a transferat un flux constant de azot către probă, iar panta porțiunii liniare este fluxul de azot. Măsurătorile la temperaturi și conținut de azot diferite pentru diferite materiale arată că fluxul de azot este dependent de condițiile de nitrurare și de compoziția chimică a materialului.

Ca rezultat al transferului masic de azot din plasmă la suprafața componentului, se formează un gradient al concentrației de azot, care este forța de antrenare pentru difuzia azotului în  $Fe_\alpha$  în strat. Difuzia azotului în rețeaua  $Fe_\alpha$  satisface, în mod evident, condițiile legii lui Fick [43]:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N(x,t)}{\partial x^2} \quad (2.31)$$

unde:

$N(x,t)$  – azot în soluție la adâncimea  $x$  și timpul  $t$ ;

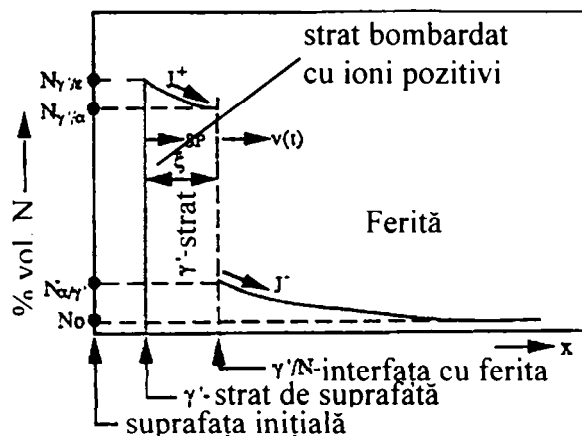
$D$  – coeficientul de difuzie al azotului în ferită.

După ce suprafața este saturată cu azot, vor avea loc reacțiile chimice pe suprafață pentru a forma un strat de compuși de fază  $\gamma'$  al structurii CFC. Nitrurarea este un proces



multifazic: concentrația de azot din suprafață crește gradual cu timpul, iar după un timp fix,  $t_1$ , suprafața este saturată cu azot până la limita solubilității, însoțită de începerea formării nitrurii de fier pe suprafață. Prin urmare, este generată o nouă limită, de exemplu, interfața stratul de compuși/ zona de difuzie. Din nou trebuie menținut echilibrul masic la interfață.

Figura 2.17 ilustrează procesul de dezvoltare a stratului de compuși, prezentat schematic în subcapitolul anterior.



**Figura 2.17** Ilustrarea schematică a creșterii stratului  $\gamma'$ , luând în considerare bombardarea catodului cu ioni pozitivi

Datorită efectului de bombardare a catodului cu ioni pozitivi, creșterea stratului de compuși nu este determinată numai de mișcarea interioară a interfeței strat/ zonă de difuzie, ci și de efectul bombardării catodului cu ioni pozitivi. O analiză mai detaliată [44] conduce la următoarea ecuație a echilibrului masic la interfață:

$$D' \cdot \frac{\partial N'(x, t > t_1)}{\partial x} \Big|_{x=0} \cdot \rho' - D \frac{\partial N(x, t > t_1)}{\partial x} \Big|_{x=0} \cdot \rho = (N_{\gamma/\alpha} \cdot \rho' - N_{\alpha/\gamma} \cdot \rho) \cdot \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} + SR \right) \quad (2.32)$$

unde:

$D'$  și  $N'$  – coeficient de difuzie, respectiv concentrația azotului în stratul  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N;

$\rho'$  – densitatea fazei  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N;

$N_{\gamma/\alpha}$  - concentrația la echilibru a azotului în  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N la interfața strat  $\gamma'$ / zonă de difuzie;

$N_{\alpha/\gamma}$  – limita de solubilitate a N în Fe<sub>α</sub> la temperatura de nitrurare;

$SR$  – viteza de bombardare a catodului cu ioni pozitivi;

$\xi$  - grosimea stratului de compuși (de exemplu,  $\partial \xi / \partial t$  indică viteza de creștere a stratului de compuși).



Din moment ce stratul  $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>N s-a dezvoltat în timpul nitrurării în plasmă, fiind, de obicei, foarte fin (< 10 μm) și are un grad de omogenitate slabă pentru azot, este rezonabil de presupus că azotul difuzează liniar în strat, iar concentrația azotului ( $N_{\gamma/\varepsilon}$ ) la suprafața stratului  $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>N este în echilibru cu faza  $\varepsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N. Astfel, ecuația 2.32 poate fi simplificată:

$$D \cdot \frac{N_{\gamma/\varepsilon} - N_{\gamma/\alpha}}{\xi} \cdot \rho - D \left. \frac{\partial N(x, t > t_1)}{\partial x} \right|_{x=0} \cdot \rho = (N_{\gamma/\alpha} \cdot \rho - N_{\alpha/\gamma} \cdot \rho) \cdot \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} + SR \right) \quad (2.33)$$

Presupunând că cantitatea de azot la echilibru și elementele de aliere dizolvate în Fe<sub>α</sub> în poziția  $x$  și la timpul  $t$  sunt  $N(x, t)$ , respectiv  $M(x, t)$ , iar precipitatul de nitrură este stoechiometric  $M_x N_y$ , poate fi scrisă următoarea aproximare simplă termodinamică:



iar constanta de echilibru a reacției de deasupra este dată de:

$$K_c = \frac{1}{[\alpha_N]^y \cdot [\alpha_M]^x} \quad (2.35)$$

unde:

$[\alpha_N]$  și  $[\alpha_M]$  sunt activitatea azotului, respectiv a elementelor de aliere în Fe<sub>α</sub>.

Legea lui Henry poate fi aplicată și la oțelurile slab aliate. De aici,  $[\alpha_N]$  și  $[\alpha_M]$  pot fi approximate cu  $N(x, t)$ , respectiv  $M(x, t)$ , iar solubilitatea la echilibru a nitrurii este:

$$K_{M_x N_y} = \frac{1}{K_c} = [N(x, t)]^y \cdot [M(x, t)]^x \quad (2.36)$$

Oțelurile selectate pentru evaluare sunt oțeluri cu 1,0% Cr, 3,2% Cr, 5,0% Cr și 3,2% Cr + 0,5% Ti. Acestea reprezintă cele mai obișnuite oțeluri structurale folosite pentru durificarea prin nitrurare.

Figura 2.18 prezintă distribuția concentrației calculată în cazul nitrurării oțelurilor cu 1,0% Cr, 3,2% Cr și 5% Cr, produsă la 560 °C timp de 10 h în amestec de gaz cu fluxul de azot  $A = 0,00045 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ .

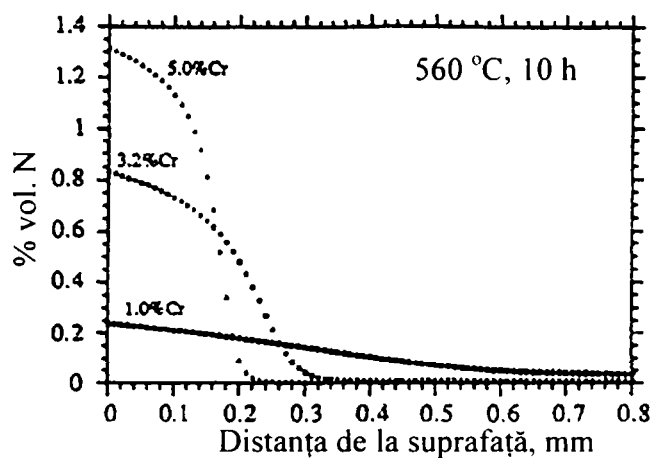


Figura 2.18 Distribuția concentrației totale de N calculată pentru diferite oțeluri aliate cu Cr

Calcululele următoare s-au efectuat presupunând un oțel cu 3,2% Cr și 5% Ti. Figura 2.19 prezintă distribuția totală de azot calculată, produsă la 560 °C timp de 10 h.

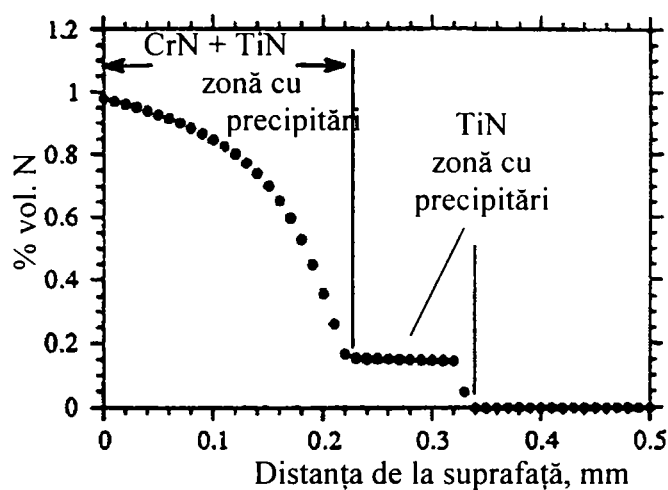


Figura 2.19 Distribuția totală de N calculată a unui oțel cu 3,2% Cr + 0,5% Ti, nitrurat în plasmă cu fluxul de N de  $0,00005 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

În figura 2.20 se poate vede, de asemenea, că activitatea azotului în plasmă are o influență semnificativă asupra dezvoltării concentrației azotului la suprafață.

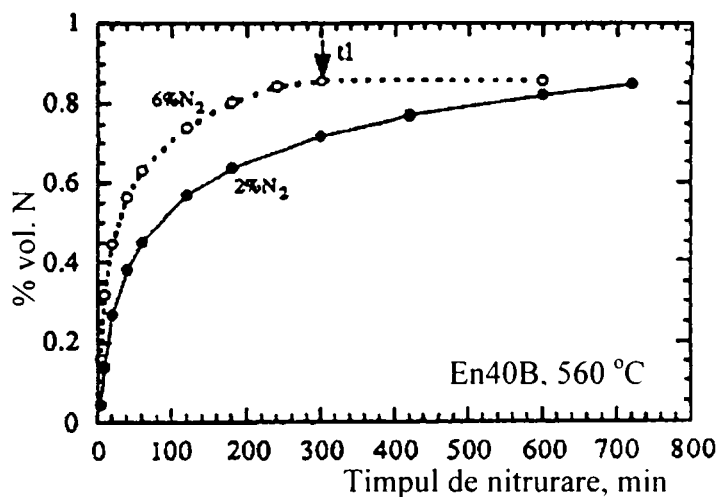


Figura 2.20 Concentrația calculată de N din suprafață în funcție de timpul de nitrurare

La reducerea activității azotului, concentrația de echilibru de pe suprafață se realizează mult mai încet, astfel încât, când atmosfera de nitrurare conține 2% N<sub>2</sub>, conținutul de azot de echilibru de pe suprafață nu va fi obținut nici după mai mult de 10 h de nitrurare.

Acest model poate să prezică nu numai începerea formării stratului  $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>N pe suprafață, dar și cinetica creșterii fazei prin încorporarea ecuației 2.33 în model, luând în considerare efectul bombardării catodului cu ioni pozitivi, folosind conceptul lui Marciniak [44].

Figura 2.21 prezintă grosimea stratului Fe<sub>4</sub>N calculată ca funcție a rădăcinii pătrate a timpului de nitrurare pentru oțelul En40B nitrurat la 500 °C în atmosferă cu 25% N<sub>2</sub>, presupunând viteze constante diferite de bombardare a catodului cu ioni pozitivi.

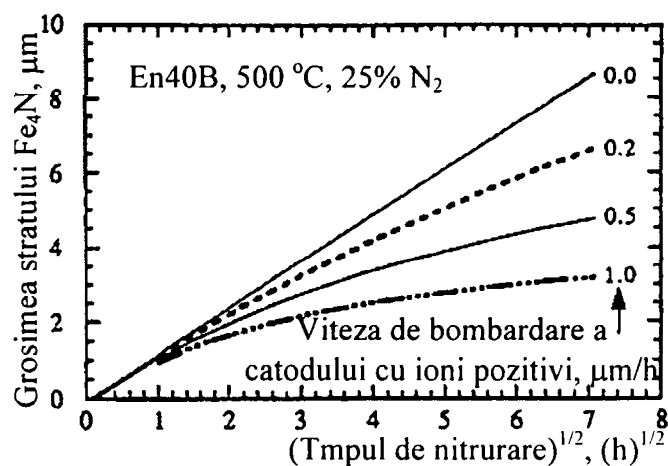
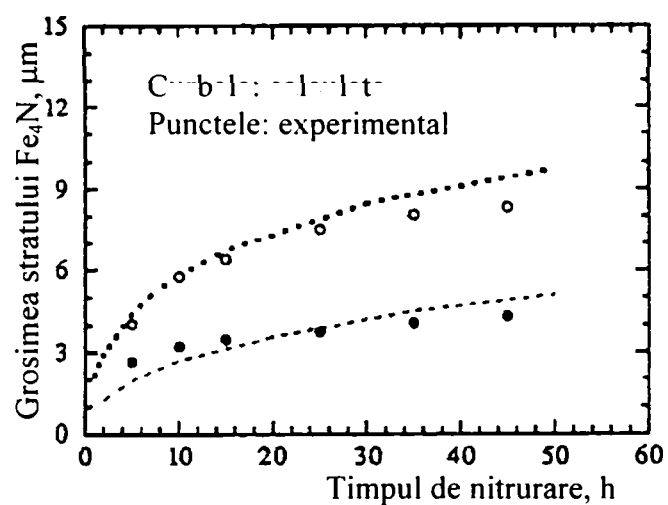


Figura 2.21 Grosimea calculată a stratului Fe<sub>4</sub>N în funcție de rădăcina pătrată din timp la 500 °C, presupunând diferite viteze de bombardare a catodului cu ioni pozitivi





Figura 2.22 prezintă variația grosimii calculate a stratului  $Fe_4N$  în funcție de timpul de nitrurare pentru oțelul En19 (42CrMo4 – EN 10269/1999) la 450 și 530 °C. Rezultatele experimentale ale lui Edenhofer și Bewley sunt, de asemenea, incluse în figură.[45]



**Figura 2.22** Grosimea stratului  $Fe_4N$  în funcție de timpul de nitrurare pentru oțelul En19 nitrurat la 450 și 530 °C; punctele sunt date experimentale preluate din ref. [45]

Se constată o bună corespondență între rezultatele obținute prin calcul conform modului prezentat și rezultatelor experimentale.



## **Cap. 3 INSTALAȚII INDUSTRIALE PENTRU NITRURARE ÎN PLASMĂ**

### **3.1 Particularitățile instalațiilor de nitrurare în plasmă**

Tratamentele termice de cementare (cementare cu carbon, nitrurare și carbonitrurare) se efectuează în atmosferă reactivă, ceea ce le distinge de tratamentele convenționale. Se pot regăsi în tipurile de instalații ce se vor analiza, elemente care sunt compatibile cu cele utilizate la tratamentele termice tradiționale. Analizând tipurile de tratamente termochimice și procedeele lor de realizare și luând în considerare doar cementarea cu carbon, nitrurarea și carbonitrurarea, pot fi menționate următoarele categorii de cuptoare:

#### **a) În mediu solid (în cutii)**

Această tehnică nu mai este utilizată în ultimii ani.

Procedeul presupune așezarea pieselor împreună cu un component solid în containere etanșe, după care sunt introduse într-un cuptor clasic cu aer. Operația cere o permanentă monitorizare de către operator, trebuind să se caracterizeze printr-o mare atenție și o practică solidă, constând din:

- prepararea (pregătirea) pieselor;
- prepararea mediului de lucru;
- poziția în interiorul cuptorului, ținând cont de cunoștințele de cartografie termică din incinta de încălzire, deținute de operator;
- durata de menținere.

#### **b) În mediu lichid (în baie de săruri)**

Procedeul se aplică tuturor tratamentelor supuse analizei comparative: cementării cu carbon, nitrurării, carbonitrurării, dar și procedeele mai moderne, precum nitrocarburarea și sulfonitrocarburarea. Cuptoarele cu băi de săruri sunt precise și permit obținerea unor piese de calitate. Utilizarea lor este simplă, însă operațiile de pregătire fac ca această tehnică să fie practic dispărută în industria modernă. Fluxul include:

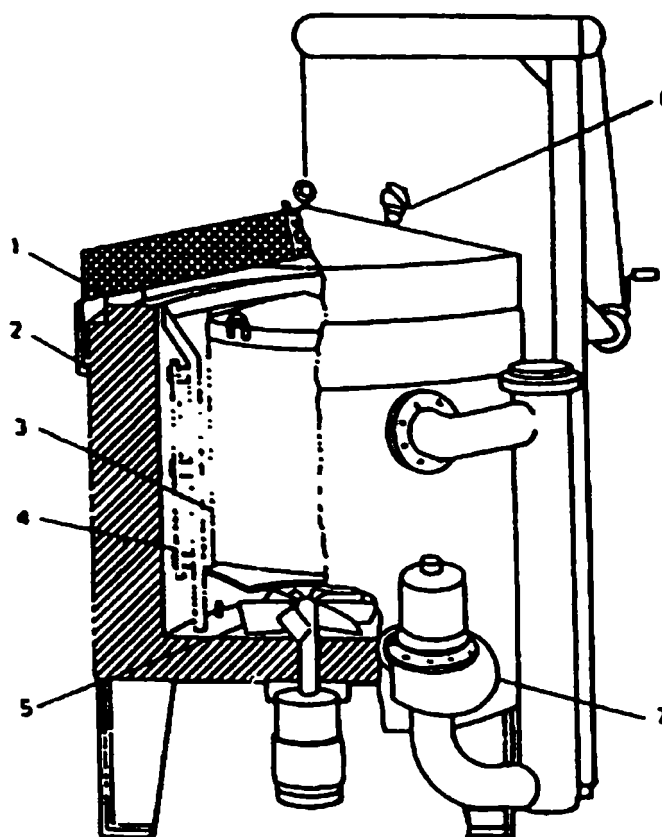
- curățirea băilor;



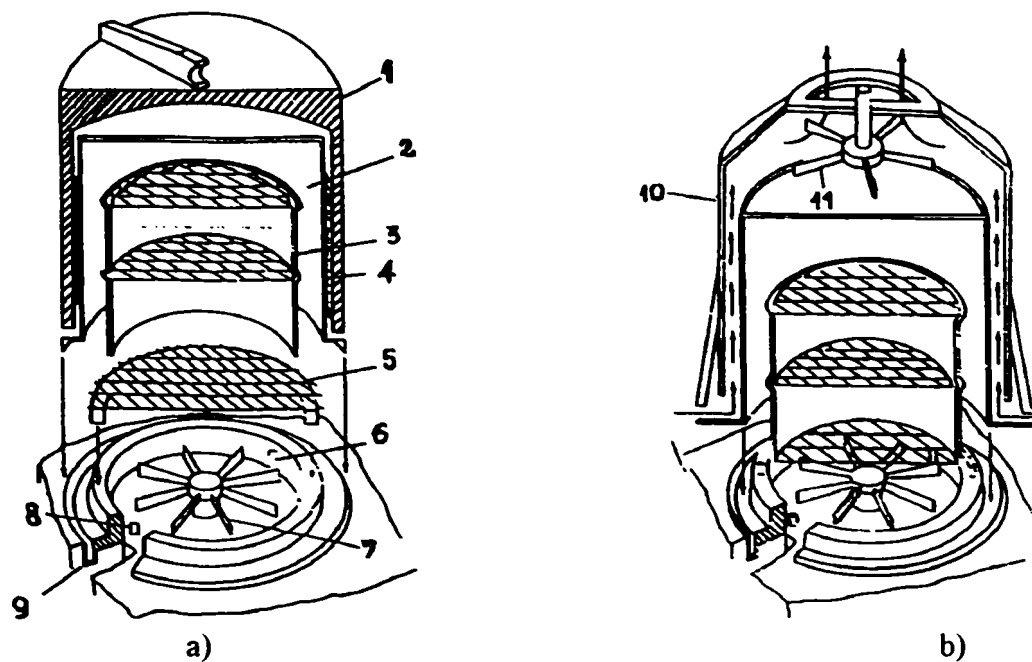
- urmărirea compoziției;
- neutralizarea cianurilor.

**c) În mediu gazos (clasică)**

Acestui procedeu i se pot supune atât cementarea cu carbon, niturarea, carboniturarea, cât și nitrocarbura. Tehnologiile utilizate pentru realizarea acestor cuptoare țin cont de prezența gazelor, aceasta presupunând că sunt necesare mijloace de securitate privind introducerea atmosferei, echipamente de supraveghere a flăcării, rampa de flacără. Acest tip de procedeu se execută în cuptoare de tratament clasic în mediu gazos (figurile 3.1 și 3.2).



**Figura 3.1** Schiță cuptor cu retortă verticală: 1 – manșon; 2 – garnitură pentru ulei; 3 – recipient; 4 – element pentru încălzire; 5 – ventilator pentru circulare aer; 6 – termocuplă; 7 – sistem de răcire;



**Figura 3.2** Schema de funcționare a unui cuptor tip clopot;  
a) Cuptor cu clopot de încălzire: 1 – clopot de încălzire; 2 – retortă; 3 – recipient de lucru; 4 – element de încălzire; 5 – suport de lucru; 6 – orificiu pentru adaos gaz de încălzire; 7 – ventilator pentru circulare aer; 8 – orificiu evacuare gaze; 9 – garnitură ulei;  
b) Cuptor cu clopot de răcire: 10 – clopot de răcire; 11 – ventilator evacuare

În figura 3.3 se prezintă imaginea unui cuptor tip clopot produs de firma Nitavid – France.[6]



**Figura 3.3** Imaginea unui cuptor tip clopot



### **3.2 Utilaje de nitrurare pentru producția de serie**

- *Cuptoare pentru producție de serie cu pod încorporat*

Aceste cuptoare sunt curent utilizate. Cu excepția operației de încărcare – descărcare, operatorul are doar atribuții de urmărire și control, ciclul de tratament efectuându-se, în general, automatizat.

În cazul mai multor unități, se poate automatiza complet linia de tratament, mecanizând cărucioarele de transfer, posturile de stocaj și administrând ansamblul cu un microprocesor.

- *Cuptoare continue cu transportor*

Acest tip de cuptoare nu este utilizat decât la tratamentul pieselor mici și atunci când adâncimile de cementare sunt mici.

Există următoarea variantă a acestor soluții:

- cuptoare cu oscilații, care sunt mai simple și nu permit obținerea unei regularități a tratamentului, deoarece timpul de menținere poate varia într-o manieră importantă de la o piesă la alta.

Pe de altă parte, sistemul de avansare al produselor nu este întotdeauna compatibil cu anumite piese.

- *Cuptoare cu retortă rotativă*

La acest tip de cuptoare piesele sunt vehiculate prin rotația retortei. Ele sunt rotite, însă această tehnică nu poate fi utilizată la piese fragile. Trebuie subliniat că acest procedeu este mai puțin costisitor decât cel al cuptoarelor cu transportator.

- *Cuptoare continue cu platouri împinse*

Acestea sunt cuptoarele care au cunoscut dezvoltare după al doilea război mondial și care au asigurat descoperirea operațiilor de cementare și nitrurare. Creșterea sectorului automobilistic a permis să se aibă în vedere unități de mare productivitate, lucrându-se continuu în serie și urmărindu-se productivitatea acestora. Datorită reproductibilității procesului, ele au permis reducerea costurilor de tratament, însă interesul lor nu este real, decât pentru producții superioare de 300 kg/h.

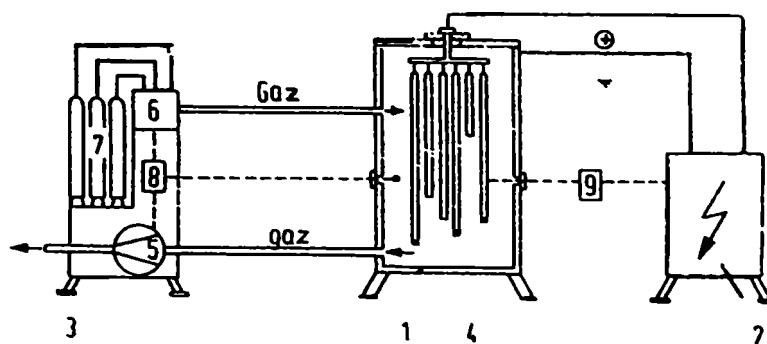


În funcție de criteriile de utilizare, ele pot fi amenajate în diferite variante:

- camera de încălzire și cea de cementare prin difuzie sunt separate, permițând obținerea unei atmosfere distincte;
- cuptor cu multe rânduri, cu cadențe variabile;
- cuptor cu placă turnantă, permițând, grație gestionării informatice, să se obțină timpi de menținere diferiți.

Pentru a se goli cuptoarele de încărcătura lor este necesar să se utilizeze platouri goale, fiind necesar să se lucreze continuu cu acest tip de instalație, pentru asigurarea rentabilității lor la nivel ridicat.

Cementarea “avansată”, ca terminologie, poate fi discutabilă, însă ea permite să se diferențieze procedeele foarte evoluat de procedeele “clasice” de cementare cu carbon, nitrurare și carbonitrurare. Dintre acestea, nitrurarea ionică se realizează în cuptoare sub vid, clasice, echipate cu generatoare ionice, după principiul prezentat în figura 3.4.



**Figura 3.4** Schema unei instalații de nitrurare ionică: 1 – cuptor sub vid; 2 – dulap electric; 3 – instalație de gaz; 4 – piesă pentru tratare; 5 – pompă de vid; 6 – dozator de gaze; 7 – rezervoare de gaz; 8 – regulator de presiune; 9 – regulator de temperatură

Piesele sunt aduse și menținute la temperatură prin elemente de încălzire care echipează laboratorul de tratament și prin descărcare ionică. În continuare, se va pune accent pe posibilitatea de integrare a unei astfel de instalații prin adaptări în linii de fabricație.

În figura 3.5 se prezintă o linie de fabricație a firmei Kloeckner Ionon [10], linie ce conține montate două cuptoare orizontale. Dimensiunile utile ale unui cuptor sunt: 1300 mm diametru și o adâncime de montaj de 2800 mm. Pentru o astfel de linie, un ciclu de încărcătură se derulează în aproximativ 8 ore, nitrurând până la 2800 de piese cu pereți subțiri la toate cotele lor.

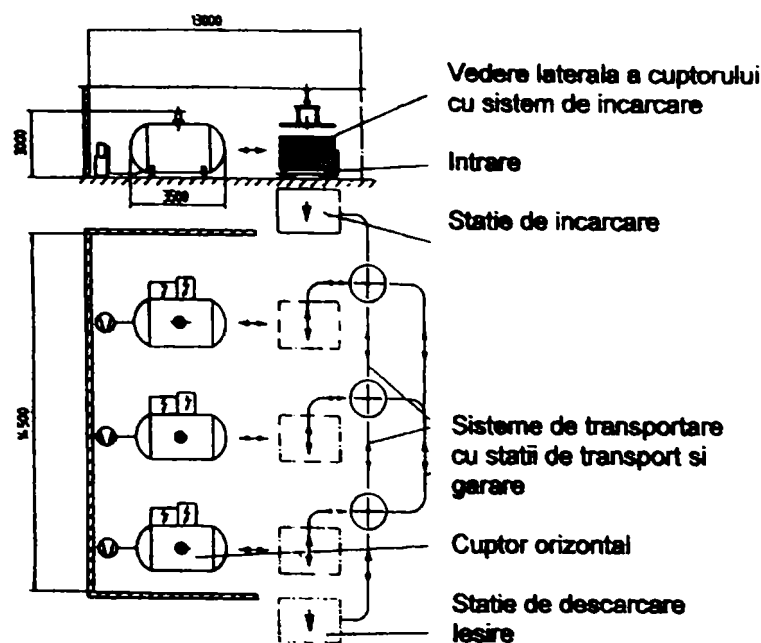


Figura 3.5 Instalație de nitrurare ionică integrată în producția de serie

Necesitatea integrării în fluxul de producție al instalațiilor de nitrurare ionică a condus, din ce în ce mai mult, la completarea instalațiilor cu componente, care servesc tot mai puțin tratamentului propriu – zis. Din aceste componente periferice fac parte, spre exemplu, dispozitivele automate de încărcare și descărcare, instalațiile de spălare, precum și instalațiile de transport.

Concepția instalației din figura 3.6 este realizată la un constructor de motoare Diesel.[46] Piesele netratate sunt încărcate pe platouri individuale de așezare ale unui șasiu de încărcare, compus din 13 platouri, astfel că tabla de încărcare se rotește în cadență. În același mod, piesele tratate sunt descărcate în poziția lor anterioară. Șasiul complet, cu 1300 de piese, este preluat de către căruciorul de încărcare și trece în unul din cuptoare. Toate elementele ansamblului sunt comandate și controlate de un calculator. O comandă – program acționează dispozitivul de încărcare – descărcare. Schema unei astfel de instalații se prezintă în figura 3.7

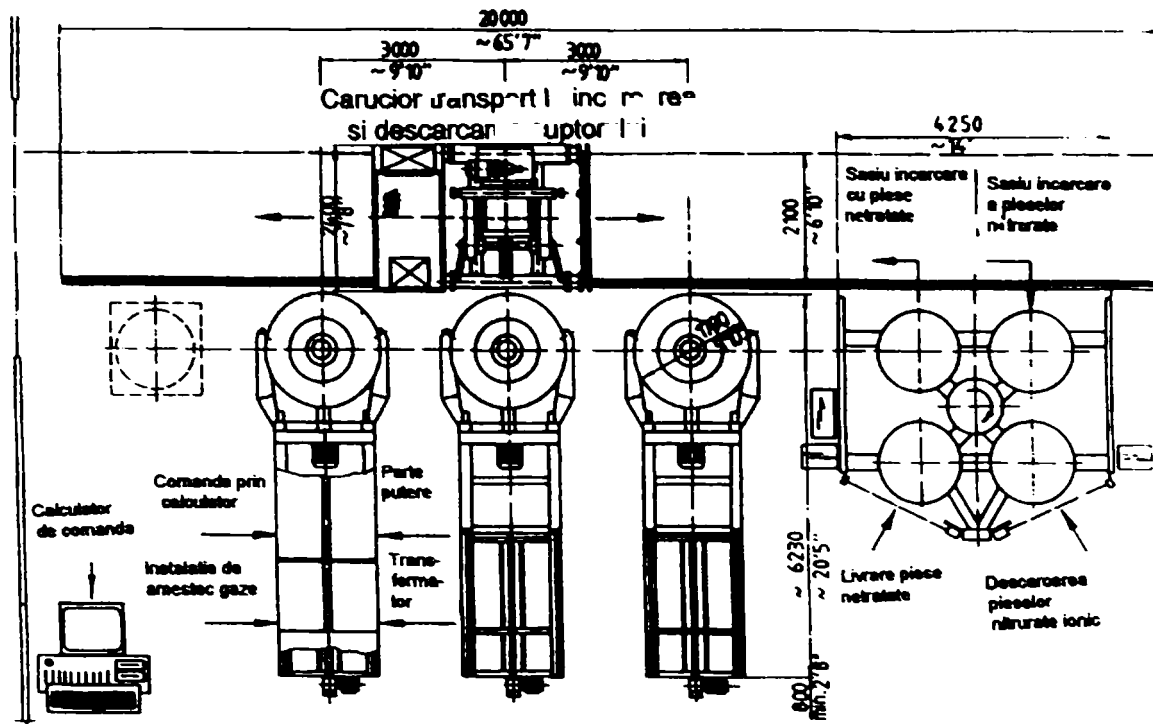


Figura 3.6 Instalație de nitrurare ionică cu stație automată rotativă de încărcare – descărcare și cărucior de încărcare CNC, integrat în fabricația de serie

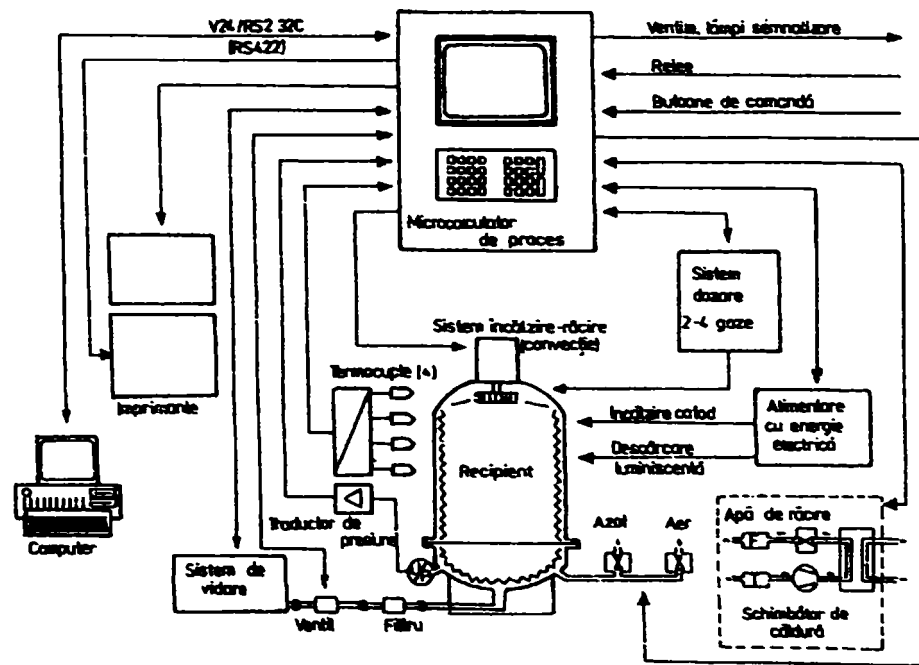


Figura 3.7 Schema de principiu a echipamentelor unei instalații moderne pentru nitrurare ionică (Kloekner Ionon) [47]

Instalațiile de nitrurare ionică, de tipul descris anterior, sunt produse actualmente în serie, având puteri de până la 450 kW. La cerere, pot fi construite și instalații de puteri mai mari, cu curenți de până la 1000 A.

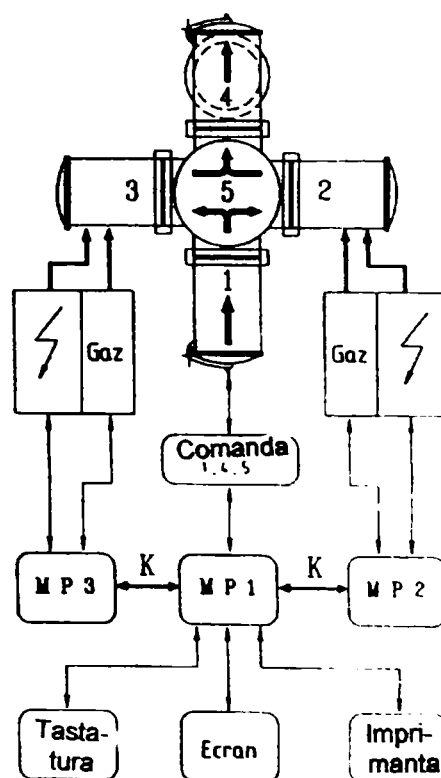
Toate instalațiile de nitrurare ionică disponibile actualmente pe piață, nitrurează piese pe loturi. Dorința unei alte automatizări, orientate către o producție continuă, a fost deja





realizată în instalațiile continue de cementare sau carbonitrurare în gaz. Realizarea analoagă, pentru instalațiile sub vid, este legată de o cheltuială mult mai mare, dată de tehnica acestor instalații.

Figura 3.8 prezintă, în secțiune, o astfel de instalație, realizată ca prototip.[46] Această concepție modulară poate fi desfășurată pe mai multe camere de tratament, crescând prin aceasta, în continuare, productivitatea.



**Figura 3.8** Instalație de nitrurare ionică cu mai multe camere, pentru realizarea unei exploatari cvasi – continue, comandată prin microprocesor

În cele ce urmează, sunt prezentate câteva instalații și consumul lor de energie, pentru tratarea pieselor din construcția de automobile.[48] Acestea au un diametru util de 2 m. În astfel de instalații sunt nitrurați arbori cotiți pentru camioane, cu o greutate totală a șarjei de cca. 5 tone. Materialul arborilor cotiți este 42CrMo4 – EN 10269/1999. La un ciclu al șarjei de 24 h se atinge o grosime de nitrurare de 0,5 mm. Consumul total de curent al șarjei este 2000 kWh, deci de cca. 0,4 kWh /kg. Un consum de energie favorabil, asemănător, se obține și la șarje constituite din piese mici de genul șarjei de roți dințate prezentată în figura 3.9.

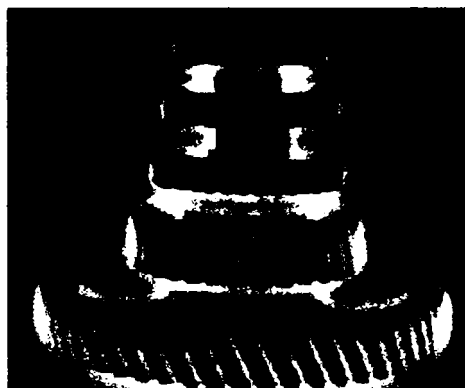


Figura 3.9 Șarjă de roți dințate în timpul nitrurării ionice

Pentru obținerea unei grosimi a stratului de 0,1 mm la supape realizate din oțelul X45CrS13 – 1.4035, Germania, sunt necesari, în total, 730 kW. Aceasta înseamnă numai cca. 0,076 kWh/ supapă. Recipienții descriși sunt alimentați de către dulapuri electrice cu o putere de 450 kW. Această putere este necesară numai în timpul fazei de încălzire.

Necesarul de energie dependent de greutate, în principiu, nu este mai mare la instalațiile mici.

La o instalație de nitrurare ionică, în care sunt introduse roți dințate, recipientii tip puț au un diametru de 4,5 m. Pe o astfel de șarjă sunt nitrurate ionic 720 roți dințate din fontă cu grafit nodular, timp de 6 ore, la 570°C. Aici consumul total de energie este de 640 kWh, aceasta însemnând cca. 0,9 kWh/kg.

Consumul de energie din instalațiile de nitrurare este redus, din următoarele motive:

- procesul are loc în recipienti reci, aceasta însemnând că energia pentru încălzirea recipientilor sau a băii este economisită;
- tratamentul are loc în vid, aceasta înseamnă că, dacă șarja a atins temperatura de tratare, trebuie compensate doar pierderile prin radiație, pierderile de căldură prin convecție fiind foarte mici.

Pentru procesul de nitrurare ionică sunt necesare intensități ale curentului de cca. 0,5 – 2 mA/cm<sup>2</sup>. În funcție de tensiunea aplicată tratamentului, rezultă un necesar de putere de 0,2 – 1,2 W/cm<sup>2</sup>.

Cel mai bun necesar de putere se obține la șarje dintr-un număr mare de piese, în timp ce, necesarul de putere cel mai defavorabil se obține la introducerea pieselor unicat (individuale).

Consumul de gaz la nitrurarea ionică este între 20 și 200 l/h, prezentând o mare importanță din considerații de cost.



Piese de schimb și cele de uzură, care reprezintă un factor de cost, care la alte procedee de nitrurare poate fi defavorabil, la instalațiile de nitrurare ionică trebuie avut în vedere numai cu o valoare de investiție de 1 – 2%.

Atunci când se au în vedere costurile la nitrurarea ionică, trebuie să se țină cont și de faptul că, cele privind depoluarea, decontaminarea, cât și cele cu măsurile de siguranță deosebite care se impun celorlalte procedee, aici se vor neglija.

Putem spune, așadar că, alături de celelalte avantaje pe care le oferă nitrurarea ionică la tratarea diferitelor materiale, le întâlnim și pe cele privitoare la costurile cu utilajele.

O tehnică nouă de nitrurare dezvoltată în ultimii ani este tehnologia PULS PLASMA, care poate fi comparată cu nitrurarea ionică clasică, conform tabelului 3.1 [49].

**Tabelul 3.1** Compararea tehnicii de nitrurare clasică în plasmă cu tehnica PULS

Nitrurarea Puls	Nitrurarea clasică
Numai energia necesară procesului va fi adăugată măsurat, în special, dacă se cer temperaturi scăzute de tratament	Surplusul de energie trebuie să fie eliminat (de exemplu, răcirea peretelui vasului)
Energia minimă pierdută prin răcirea cu apă, atunci când peretele vasului este izolat (energia economisită este de 3 la 5 comparativ cu peretele răcit)	Pierdere ridicată de energie prin răcirea unei arii mari a peretelui cuptorului
Omogenitatea bună a temperaturii în vas, datorită diferenței scăzute de temperaturi dintre încălzirea și perete	Gradientul înalt de temperatură dintre încălzirea și vasul răcit
Utilizarea completă a volumului încărcat la o bună omogenitate a temperaturii	Utilizarea zonei încărcate este limitată prin supraîncălzirea pieselor din centrul încălzirii
Rezultate excelente la o controlabilitate și reproductibilitate ușoară a tratamentului pentru diferite mărimi ale încălzirii, ca parametri ai plasmelor, important pentru rezultate, sunt independente de compactitatea încălzirii	Rezultatele tratamentului depind de compactitatea încălzirii atunci când parametrii plasmelor sunt în legătură cu stabilizarea temperaturii
Formarea arcului electric este imposibilă ca dezvoltare și este întreruptă periodic de modul curentului pulsant, dacă este necesară în timpul fiecărui puls o deconectare la mai puțin de 1 μs	Formarea arcului electric este întotdeauna posibilă și trebuie întreruptă imediat, în ciuda timpului scurt de reacție a schițării arcului pe suprafețele pieselor
Nitrurarea totală a suprafeței, chiar în alezaje foarte mici	Acoperirea conturului pe suprafață este limitată
Timp de încălzire scurt a încălzirii prin utilizarea încălzirii separate	Timpul lung de încălzire, deoarece încălzirea poate fi încălzită direct sau indirect doar prin plasmă

Procesul nitrurării cu plasmă pulsantă este capabil să genereze straturi durificate fără straturi de compuși, straturi de tipul Fe<sub>4</sub>N sau Fe<sub>2-3</sub>N sau straturi compuse.[50] Formarea stratului depinde de cerințele pieselor. Stratul de compuși variază normal, între 0 și 20 μm,



zona de difuzie între câțiva  $\mu\text{m}$  și 0,7 mm. În funcție de proprietățile stratului și distanța de la suprafață, stratul nitrurat asigură o mulțime de posibilități pentru optimizarea vieții pieselor.

Exemplul tipic de creștere a rezistenței la oboseală este stratul de compuși nitrurat liber al arcului de supapă, la temperaturi scăzute. Temperatura de nitrurare este mai scăzută decât temperatura de revenirea oțelului Si-Cr. Precipitatele fine de faze conduc la tensiuni interne ridicate. Numărul de încărcări la tensiuni medii de  $650 \text{ N/mm}^2$  este crescut de un factor de 10 după procesul nitrurării cu plasmă pulsantă. Altă aplicație pentru stratul de compuși nitrurat liber sunt supapele pentru motoare. Cele mai importante avantaje în acest caz sunt:

- nu necesită prelucrare după nitrurare;
- este posibilă nitrurarea parțială;
- rugozitate scăzută;
- crește rezistența la oboseală.

În cazul arborilor cotiți este importantă optimizarea materialului, temperatura și timpul procesului de nitrurare pentru îmbunătățirea duratei de viață. Stratul ductil de compuși  $\text{Fe}_4\text{N}$  este recomandat pentru evitarea uzării lagărelor. Precipitățile de grăunți fini în zona de difuzie împarte tensiunile interne și prin urmare îmbunătățește proprietățile de oboseală (de exemplu, un arbore cotit pentru motocicletele Triumph după 18 h de nitrurare la  $520 \text{ }^\circ\text{C}$ , arborii cotiți pentru Formula 1 și motoarele de carturi, precum și pentru mașinile obișnuite și compresoare). Acest procedeu de nitrurare ionică a fost optimizat pentru rezistență maximă la oboseală prin răsucire cu deformări minime și timp minim de tratament. Se economisește timpul semnificativ de prelucrare comparativ cu procesul de nitrurare în gaz, nu numai la timpul de tratament, dar și la operațiile post tratament, datorită stratului de compuși mult mai fin.

Stratul pur de compuși  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$  după nitrurarea cu plasmă pulsantă prezintă comportament mai bun la uzare decât nitrurarea în baie de sare a arborilor cu came, ca rezultat a unui tip de strat mult mai compact și mai dens.[51,52] Diferențele de grosime ale straturilor de compuși dintr-o șarjă sunt mai mici de  $2 \mu\text{m}$ . Se poate aplica la piesele obținute prin metalurgia pulberilor, la care procesul de durificare este necesar pentru evitarea uzării. Nitrocarbura la  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  timp de 6 h a unei pulberi nealiate are o grosime de strat de aproximativ  $3 - 8 \mu\text{m}$  de  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ . La aceste piese este importantă înlăturarea fluidelor din procesul de calibrare dinaintea nitrurării. Nitrurarea în plasmă sau nitrocarbura este un proces în vid și prin urmare, procesul este capabil să înlătore aceste fluide complet în timpul



treptei de încălzire. Acestea sunt bazele pentru ciclurile de timp cele mai scurte și tipuri de straturi dense de compuși.[53]

#### *Operații de acoperire aplicate după nitrurarea cu plasmă pulsantă*

Pentru multe componente exterioare cum sunt, de exemplu, pistoanele pentru preluarea șocurilor, este necesară o suprafață rezistentă la uzare și coroziune. Combinarea nitrocarburații și postoxidării realizează ambele cerințe. Rezistența la uzare este puternic dependentă de tipul stratului de material și grosimea acestuia. Postoxidarea în timpul răcirii, după nitrocarburație, generează un strat de  $Fe_3O_4$  de grosime 1 până la 2  $\mu m$ , care conferă rezistență bună la coroziune. Încercările în ceață salină, conform DIN 50021 timp de 300 h sau peste, nu evidențiază nici un atac coroziv. Alte aplicații pentru post oxidare includ arborii cu came ale mașinilor de curse. Aici, stratul post oxidare ajută la prevenirea gripării acestor piese tensionate puternic în timpul perioadei critice de lucru.

Arborii cu came din fontă călită pot fi nitrurați în plasmă pentru îmbunătățirea rezistenței la uzare, chiar și după reprofilare. Arborii cu came durificați integral nu pot rezista la tensiunile ridicate date de cerințele pentru cursa și accelerația supapei. Nitrocarburația timp de 12 ore la 470 °C dă rezistența la uzare necesară, cu o valoare minimă acceptată pentru creșterea durității în miezul piesei.

#### *Nitrurarea parțială a tacheților*

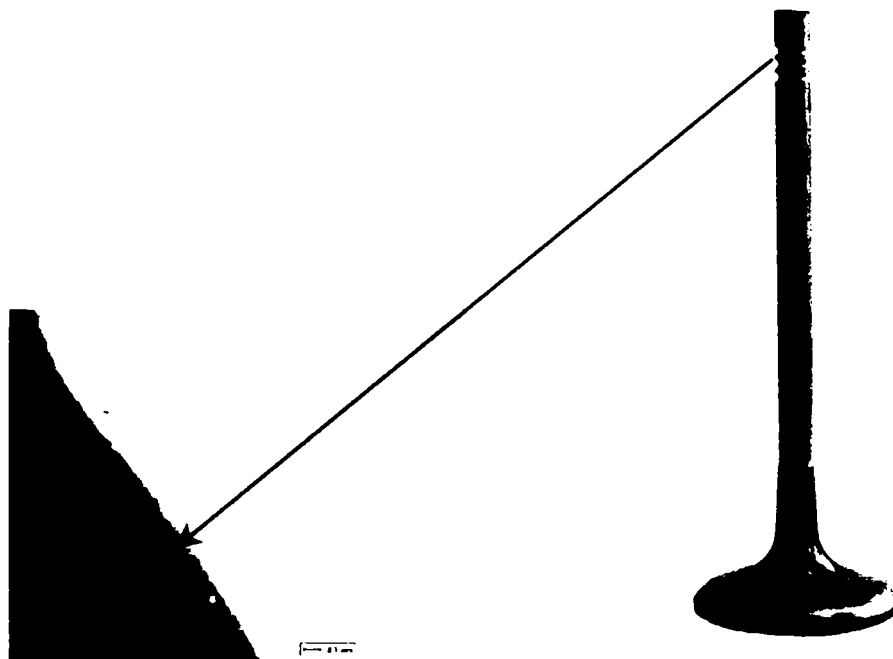
Tacheții sunt acoperiți mecanic în timpul tratamentului, astfel încât numai suprafața din capăt și fața de contact cu supapa este nitrurată. Acestea permit piesei să fie complet finisată înaintea nitrurării și asigură o reducere a greutateii. Acești tacheți s-au dovedit a lucra extrem de bine cu arborii cu came nitrurați sau carbonitruați.

Nitrurarea parțială se impune, din mai multe motive (de exemplu, sudarea ariei nitrurate nu este posibilă). În cazul nitrurării în gaz, ariile nenitrate trebuie protejate cu vopsea sau trebuie prelucrate după tratamentul suprafeței. Aceasta înseamnă manoperă importantă și costuri adiționale. Nitrurarea în plasmă oferă oportunitatea folosirii stativelor de șarjare și alte acoperiri pentru a evita efectul nitrurării. Comparativ cu nitrurarea în gaz, costul este mai redus.

Pentru multe aplicații de nitrurare în plasmă clasică este bine cunoscut că este dificilă nitrurarea în interiorul găurilor mici, a fantelor sau a altor geometrii complexe. Nitrurarea cu plasmă pulsantă aduce posibilități noi pentru aceste aplicații. Pot fi nitrurate uniform alezajele



cu diametru de 7,5 mm și 50 mm lungime, precum și găurile cu diametru de 3 mm și 70 mm lungime (figura 3.10).



**Figura 3.10** Strat nitrurat de grosime uniformă în canelura unei supape

Pentru asemenea aplicații se necesită un supliment special de putere cu pulsuri de aprindere și vârfuri de curent ridicate. Tehnologiile nitrurării în gaz nu sunt capabile să nitureze uniform asemenea geometrii, datorită schimbului insuficient de gaz.

Câteva echipe de Formula 1 folosesc procesul Eltropuls pentru aplicații critice, incluzând componente din oțel maraging sau titan. Nitrurarea componentelor maraging este un exemplu pentru un proces la temperaturi joase. Procesul durificării unui profil de arbore de transmisie Aermet 100 (superaliaj Ni-Co martensitic), nitrurat la 470 °C timp de 12 h, a optimizat la maximum rezistența la oboseală.

În timpul tratamentului, piesa de tratat este înconjurată de plasmă, generată de o descărcare luminiscentă la presiune slabă. Plasma este un gaz ionizat și are un număr de avantaje cheie prezentate anterior (nu poluează mediul înconjurător, consum redus de gaz și energie, timpul scurt al procesului, bazat pe accelerarea transferului de masă).

Pentru a realiza formarea stratului proiectat descris cu toleranțe reduse, este necesar sistemul plasmei pulsante cu pereți calzi. Energia de alimentare este redusă prin pulsarea plasmei. Aceasta se relevă în distribuția termică uniformă. Sistemul pulsant Eltropuls brevetat [54] micșorează căldura de alimentare mult mai mult, comparativ cu alte sisteme și este baza



pentru deconectarea proceselor termice și chimice. Sistemul pulsant de aprindere garantează o plasmă stabilă în toate circumstanțele.

### *Procesul nitrurării cu plasmă pulsantă*

Cuptoarele cu muflă (figura 3.11) sunt proiectate pentru modificarea suprafeței cu descărcare luminiscentă la presiuni electrice slabe, incluzând o incintă de vid cu o bază staționară scăzută și o muflă mobilă deasupra. [55]



**Figura 3.11** Cuptor cu muflă

Incinta de vid este încălzită extern cu elemente de rezistență. Cuptorul folosește zone multiple, controlate independent, pentru a garanta temperaturi uniforme de proces. Cuptorul cu muflă poate menține temperaturile operației de nitrurare independente de parametrii celorlalte procese. Alimentarea cu energie include o rețea de formare a pulsului tranzistorial pentru aprovizionarea potențialului electric dintre piesă și retorta de vid, pentru a sprijini descărcarea luminiscentă.

Sistemul pulsant brevetat [DP 33 22 341] (figura 3.12) garantează cea mai scăzută căldură de intrare a plasmăi [56] și generează în amestecul de gaz un potențial de nitrurare pentru a crea structura specifică de nitrurare.



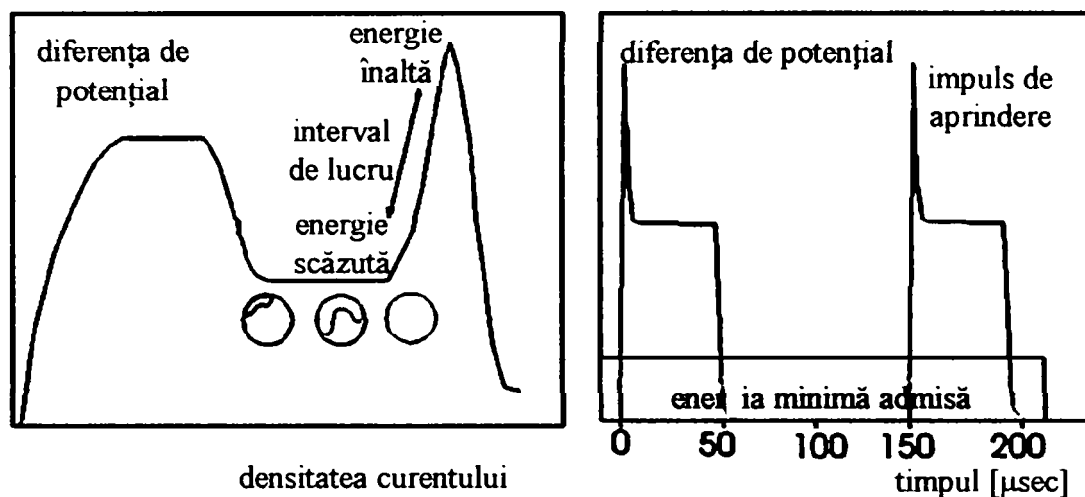


Figura 3.12 Sistemul pulsant

Procesul poate fi folosit și pentru piese din construcția de mașini obținute prin metalurgia pulberilor:

- 1) Piesele sinterizate sunt încălzite în retorta de vid pentru a îndepărta depunerile reziduale și lubrifianții. Treapta de putere este inclusă pentru îndepărtarea completă a tuturor depunerilor și lubrifianților. Timpul și temperatura sunt dependente de tipul și cantitatea reziduurilor.
- 2) Retorta este umplută cu amestec de gaz hidrogen/ azot. Aplicarea diferenței de potențial dintre retortă și piese inițiază o descărcare luminiscentă care produce un strat de plasmă, de azot ionizat și hidrogen, ce înconjoară piesa într-o manieră intimă. Timpul și temperatura procesului de nitrurare definesc grosimea stratului. Nitrurarea este o difuzie controlată. Temperaturile înalte duc la grosimea straturilor, dar cu duritate scăzută a suprafeței.

Tipul stratului de compuși este dat de amestecul de gaz și de parametri plasmei. [57]

Figura 3.13 prezintă un strat de compuși de grosime 10 μm de tipul Fe<sub>2-3</sub>N, după nitrurarea la 550 °C timp de 8 h.





**Figura 3.13** Structură derapafinată de piesă obținută prin metalurgia pulberii și nitrurată cu plasmă pulsantă într-o singură treaptă

Ca rezultat al unei deparafinări complete, stratul de compuși se formează în timp scurt, fără zone poroase.

Este recunoscut că piesele obținute prin metalurgia pulberii au unele caracteristici speciale, comparativ cu piesele fabricate din materiale turnate sau forjate. Compoziția chimică este adesea cu totul diferită de oțelurile convenționale. Aliajele din metalurgia pulberii conțin cupru și nichel, care pot influența marcant formarea stratului nitrurat de compuși. Va fi o concentrație limită mai mare pentru aceste elemente de aliere din aplicațiile din metalurgia pulberii ce necesită niturare. Nitruirile formează elemente (Co, Cr) care duc la duritate ridicată.

- 3) După niturare, piesele sunt răcite la o temperatură neîncărcată cu viteză controlată, care va împiedica deformările dimensionale. Răcirea în gaz inert cu un ventilator intern sau cu un schimbător gaz – apă – căldură, poate accelera procesul de răcire.

Se produc instalații de niturare pentru aceste metode, atât pentru piese mici și încărcături reduse ( $\phi$  400 x 800 mm<sup>2</sup>), cât și pentru piese sau încărcături mari ( $\phi$  1800 x 3500 mm<sup>2</sup>) (figura 3.14).



**Figura 3.14** Instalație de nitrurare ionică pentru piese obținute prin metalurgia pulberilor

Firma PLASMA TECHNIK GRÜN utilizează pentru nitrurare metoda PLASMAPLUS în producție de serie, următoarele procedee tehnologice:

#### 1 Procedeele Mono Plant

Configurarea instalației mono corespunde instalației de tratament termic clasic.[58]  
Conține o cameră de control și una de tratament (figura 3.15).



**Figura 3.15** Instalația de nitrurare Mono – Plant

Principala caracteristică a procesului este aceea că o șarjă nouă poate fi introdusă în cuptor, după ce șarja anterioară a fost tratată, răcită și descărcată, conform ciclogramei din figura 3.16.

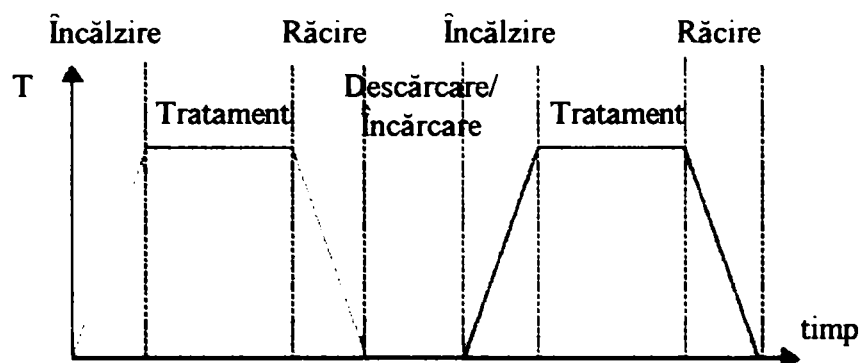


Figura 3.16 Ciclograma de tratament corespunzătoare instalației Mono – Plant

## 2 Procedul Shuttle – Plant

Instalația oscilantă este o posibilitate simplă de creștere ușoară a eficienței unei instalații pentru tratarea superficială cu plasmă.[59] Conține o cameră de control, de tratament și o cameră secundară pe podea (figura 3.17).

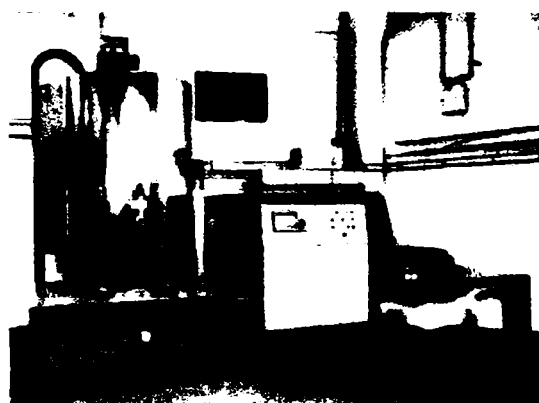


Figura 3.17 Instalația de nitrurare Shuttle – Plant

În timpul procesului de tratament funcționează camera inferioară 1 cu învelișul camerei poziționat, o nouă șarjă pregătindu-se pentru camera inferioară 2 (figura 3.18). Când șarja din camera inferioară 1 s-a răcit suficient astfel încât camera să poată fi deschisă, piesele ridicate se poziționează deasupra camerei inferioare 2 și un nou proces poate să înceapă.

Avantajele sunt timpii de încărcare și descărcare mici pentru fiecare șarjă.

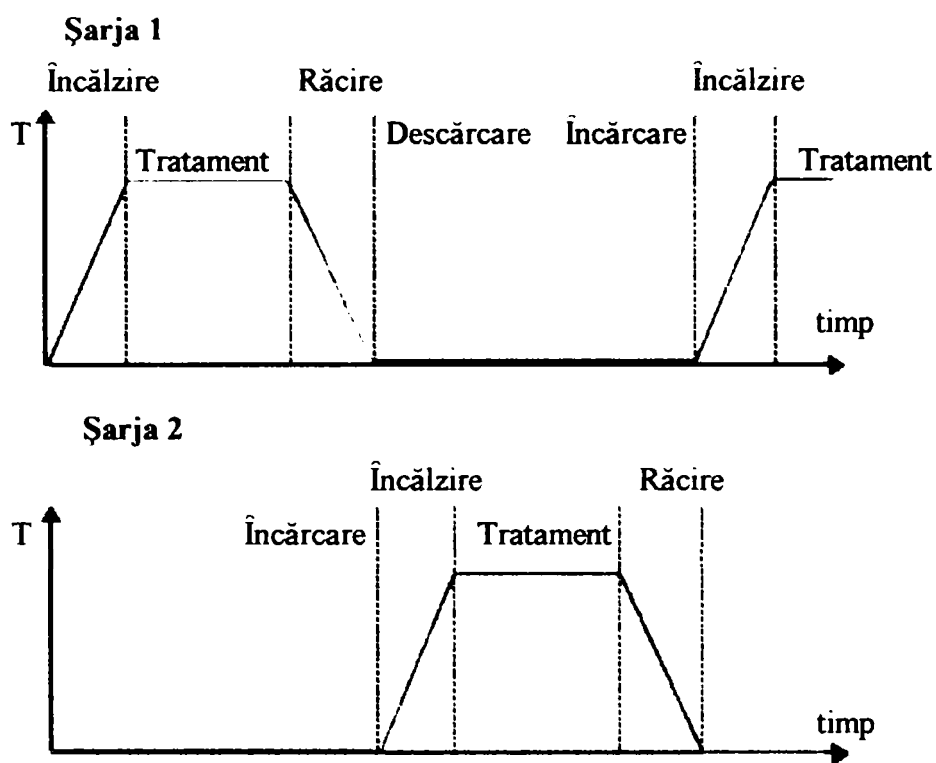


Figura 3.18 Ciclograma de tratament corespunzătoare instalației Shuttle – Plan

### 3 Procedul Tandem – Plant

Instalația tandem oferă un grad foarte mare de eficiență cu costuri de investiție foarte mici.[60] În ordinea realizării conceptului sunt necesare o configurație specială a cadrului de bază, facilități de ridicare și deplasare.

Instalația tandem conține o cameră de control și două camere complete de tratament (figura 3.19).



Figura 3.19 Instalația de nitrurare Tandem – Plant

În timpul tratamentului camera 1 este încălzită și se efectuează procesul de tratare, o nouă șarjă este pregătită pentru camera inferioară 2, iar învelișul camerei 2 se poziționează peste aceasta. În timp ce procesul de răcire începe în camera de tratament 1, controlerul se conectează la camera 2 și începe un nou proces. Sistemul este conceput astfel încât să se poate întrerupe automat, de exemplu noaptea sau în zilele libere. Ciclograma de tratament se prezintă în figura 3.20.

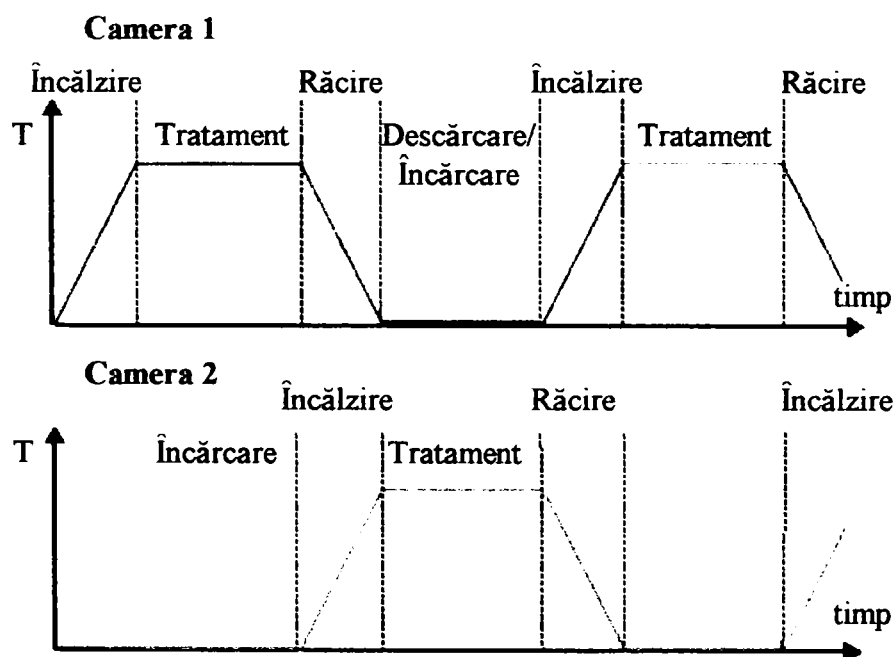


Figura 3.20 Ciclograma de tratament corespunzătoare instalației Tandem – Plant



Se realizează economisirea minimă a timpilor de răcire, încărcare și descărcare pentru fiecare șarjă.

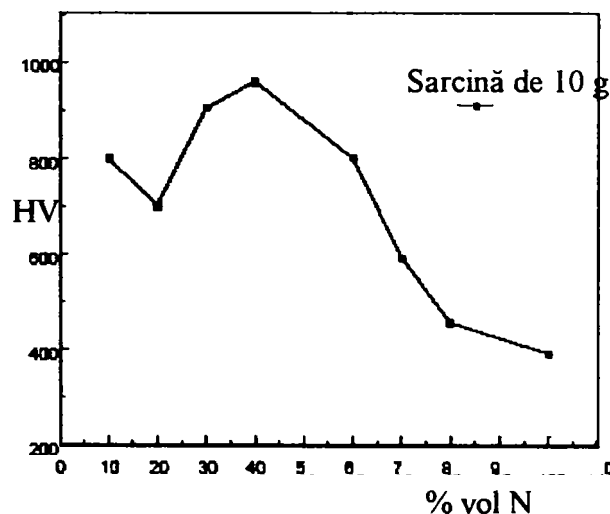
### *Nitrurarea în plasmă cu microunde*

Plasma cu microunde este foarte avantajoasă, deoarece procedeul generează o densitate ridicată a plasmei la regimuri de presiune scăzută. [61] Presiunile scăzute, împreună cu compoziția gazului permit generarea selectivă a particulelor active din plasmă. S-au folosit concentrații diferite de azot în amestecul de gaz [62], folosite pentru stabilirea amestecului optim pentru nitrurarea oțelului inoxidabil AISI-316 (X3CrNiMo17-13-3, EN 10028-7/2000).

Aparatul experimental folosit pentru efectuarea nitrurării [63] produce plasma prin intermediul microundelor ( $f = 2,45$  GHz) într-un câmp magnetic extern. Puterea necesară este de 350 W. Presiunea din interiorul camerei de lucru a fost fixată la  $4 \times 10^{-4}$  Torr pentru toate rapoartele diferite de  $H_2/N_2$  folosite ca gaze de lucru. Plasma, în aceste condiții, transferă suficientă căldură epruvetelor pentru a atinge temperatura de  $450 \pm 30$  °C.

Pentru a determina amestecul de gaz optim din plasmă pentru a realiza nitrurarea oțelului, au fost măsurate duritatea suprafeței și penetrările adâncimii azotului. Detaliile structurale ale straturilor de nitruri formate, au fost investigate prin difracție de raze X pentru a asigura prezența așa numitei structuri de austenită cu volum mărit. În acest fel, rezistența la coroziune a materialului nu se degradează și poate fi chiar îmbunătățită. [64]

Rezultatele măsurătorilor microdurităților, ca funcție a concentrației de azot din gazul de lucru sunt arătate în figura 3.21.



**Figura 3.21** Măsurătorile microdurităților efectuate cu sarcini diferite pentru probele tratate cu diferite conținuturi de azot din gaz



Duritatea cea mai mare se observă la proba tratată în plasmă cu  $H_2-N_2$  60 – 40. Valoarea maximă este de  $1000 \pm 150$  HV. Valoarea inițială a durității a fost de  $260 \pm 20$  HV, astfel încât s-a obținut o creștere cu 380% a durității. Descreșterea rapidă a durității cu creșterea sarcinii se datorează grosimii mici a stratului nitrurat.

Analizele cu reacții nucleare permit determinarea penetrării în adâncime a azotului pentru probele tratate cu diferite amestecuri de gaz în plasmă. Proba tratată cu  $H_2-N_2$  60 – 40 prezintă stratul cel mai gros constant de azot (cca.  $1,6 \mu m$ ). Deși proba cu  $H_2-N_2$  70 – 30 are cel mai mic strat constant de azot (cca.  $1,3 \mu m$ ), concentrația acestuia descrește, în final, gradual, obținându-se cea mai mare penetrare, de aproximativ  $3,5 \mu m$ .

Rezultatele obținute arată că, concentrația optimă de azot din gaz, folosită pentru a forma plasma din descărcarea microundelor, este aproape de  $H_2-N_2$  60 – 40.

Figura 3.22 prezintă difractograma pentru proba tratată în amestec de plasmă cu  $H_2/N_2$  60/40.

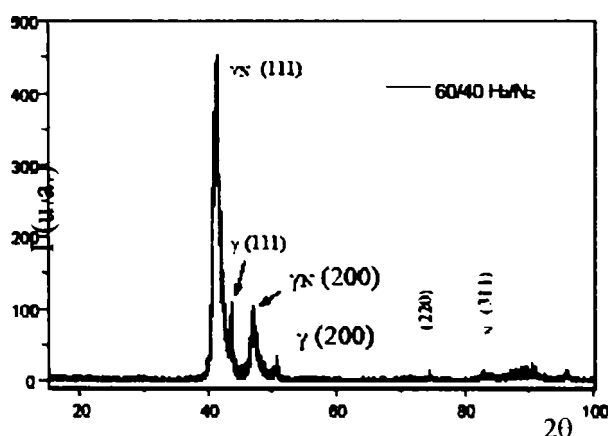


Figura 3.22 Difractograma probei tratate în plasmă cu  $H_2/N_2$  60/40

Acesta este un rezultat tipic, unde se văd vârfurile corespunzătoare fazei  $\gamma_N$  (sau austenită cu volum mărit), localizate la valorile lui  $2\theta$  de 41 și 46, în timp ce, cele mai puțin intense vârfuri localizate la 67 și 83 nu se pot detecta. Acestea confirmă că temperaturile de tratament au fost alese corect și nu sunt precipitări ale fazei CrN, care în mod normal sunt însoțite de descompunerea fazei  $\gamma_N$ . [65] Vârfurile fazei  $\gamma$  rezultă la oțeluri inoxidabile. Analizele cu raze X arată că stratul cu conținut de azot are o orientare preferențială (111) și vârfurile de difracție sunt lărgite, așa cum conținutul de azot din straturi crește. Matricea oțelului are grăunți de mărime de cca.  $100 \mu m$ . Stratul nitrurat crește cu o formă granulară cu grăunți cristalini mici, a căror mărime depinde de conținutul de azot dizolvat în matricea

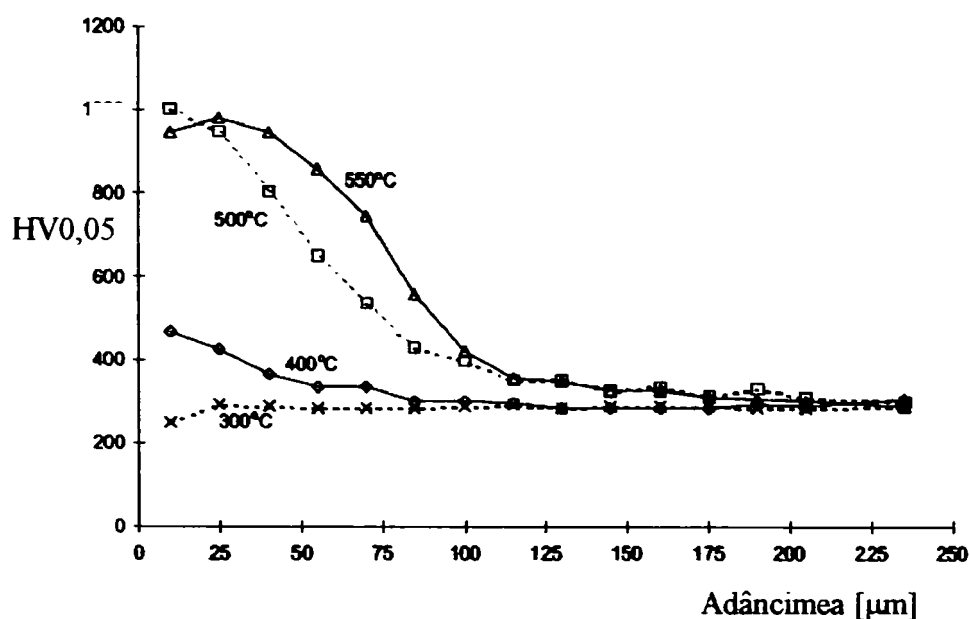


oțelului. Examinarea poziției vârfurilor și a lărgimilor indică faptul că parametri rețelei cristaline,  $\alpha$ , cresc de la 3,87 Å la 3,93 Å, iar mărimea cristalitelor se schimbă de la 24 nm la 10 nm cu creșterea conținutului de azot.

S-a efectuat o încercare la coroziune pe aceste probe în soluție de 3,5% NaCl. Rezultatele prezintă că nitrurarea oțelului AISI-316 (X3CrNiMo17-13-3, EN 10028-7/2000) la temperaturi scăzute cu descărcare de microunde, conduce la mărirea durității suprafeței fără a cauza deteriorarea proprietăților de coroziune a materialului și aceasta într-un timp de tratament relativ scurt.

### *Nitrurarea în plasmă cu microunde a unui oțel slab aliat*

În figura 3.23 se prezintă variația microdurității la oțelul nitrurat CSN 15330 (30CrMoV9 – EN 10250-3/1999) la diferite temperaturi de nitrurare la valori fixe ale timpului de nitrurare, în azot pur.



**Figura 3.23** Profilele adâncimii microdurității pentru diferite temperaturi de nitrurare; nitrurate timp de 2 h în atmosferă de  $\text{N}_2$  pur

Se observă că nitrurarea conduce la o creștere semnificativă a microdurității regiunii de sub suprafață la 500 – 550 °C, unde s-au observat efecte slabe sau nenitrurări la 400 °C, respectiv 300 °C.[66]

Pentru temperaturi de 500 la 550 °C valorile microdurității de la 1100 la 1280 HV<sub>0,05</sub> s-au obținut la suprafață, când duritatea oțelului netratat a fost de 260 HV<sub>0,05</sub>. Temperatura are influență asupra grosimii și, în special, asupra profilului microdurității stratului de difuzie.





Grosimea acestuia a fost de la 0,09 la 0,10 mm și de la 0,11 la 0,12 mm la temperatura de 500 °C, respectiv 550 °C. Timpul de tratat de 3 h duce la creșterea grosimii stratului de difuzie cu cca. 15%. Nu s-a observat nici o influență puternică a presiunii, polarizării sau a compoziției de gaz schimbate în grosimea stratului de difuzie și forma profilului microdurității la o temperatură fixă.

Din investigarea cu microscopul optic a secțiunii transversale a probei după atacul cu nital, a fost posibil de determinat grosimea stratului de compuși. S-a găsit a fi în jur de 0,2 μm la 400 °C, 1,5 până la 2,5 μm la 500 °C și 3,2 până la 4,5 μm la 550 °C timp de 2 h de tratament. Ambele duc la creșterea polarizării negative și a conținutului de hidrogen în atmosfera de nitrurare, descrescând grosimea stratului de compuși, în timp ce, prelungirea tratamentului duce la creșterea acestuia.

Difractograma din figura 3.24 furnizează informații asupra compoziției fazei straturilor de compuși.

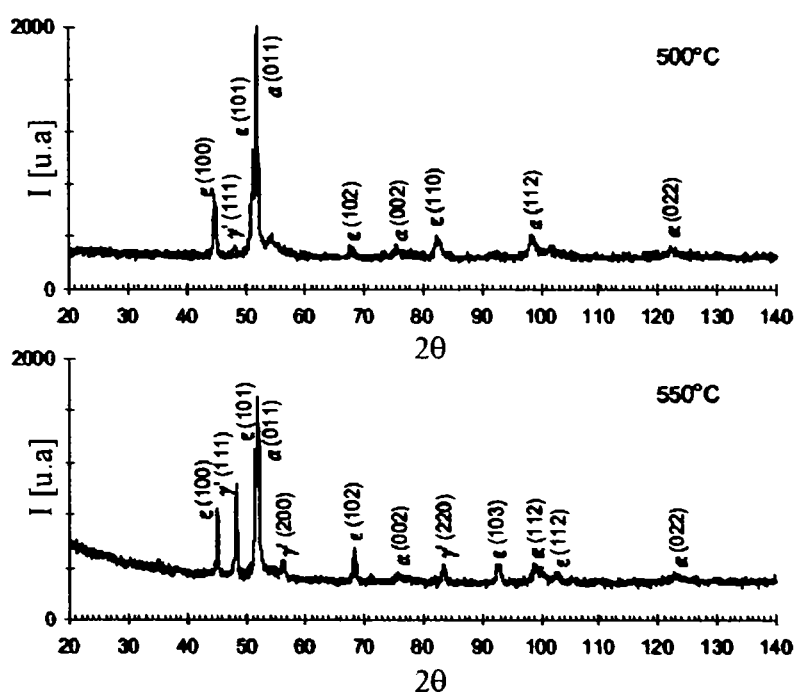


Figura 3.24 Difractogramele probelor nitrurate la 500 °C și 550 °C timp de 3 h în azot pur; se observă vârfurile  $\alpha$ -Fe,  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N și  $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>N

Pe lângă vârfurile substraturilor, se observă la suprafața probei nitrurate la 500 °C prezența fazei  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N cu o cantitate infimă de fază  $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>N. Temperatura cea mai înaltă de tratament de 550 °C conduce la creșterea conținutului de fază  $\gamma$ -Fe<sub>4</sub>N (figura 3.24). Vârfurile foarte mici ale fazei  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N au fost găsite la difracția cu raze X a probelor nitrurate la 400 °C timp de 2 h și nu au apărut reflexii la difracția probelor nitrurate la 300 °C.



### *Nitrurarea ionică prin procedeul în manta colivie (Through Cage TC)*

După o creștere rapidă în anii '80 și '90, azi se constată o stagnare a utilizării procedeului, astfel încât, în țările industrializate, între 65 și 85% din tratamentele de nitrurare sunt efectuate în băi de săruri sau în gaz.

Această stagnare se poate explica prin faptul că, nitrurarea ionică, în varianta clasică, prezintă o serie de inconveniente, care au impus perfecționarea tehnologiei.

Dificultatea de a asigura o temperatură constată în toată încărcătura (geometria pieselor, modul de dispunere a lor în cuptor, compoziția chimică și presiunea gazului) au o influență puternică asupra temperaturii și inclusiv asupra rezultatelor nitrurării ionice.

De exemplu, o modificare cu câteva zecimi de mbar a presiunii gazului, poate conduce la formarea unui „catod fals” într-un alezaj, provocând distrugerea piesei.

Obținerea și menținerea unei temperaturi optime în tot volumul încărcăturii, necesită încărcarea unor piese cilindrice în aceeași încărcătură și o dispunere adecvată, ceea ce reduce economicitatea procesului.

Asigurarea unei temperaturi constante este condiționată de o bună experiență a operatorului, ceea ce este în contradicție cu cerințele de repetabilitate a procesului într-un sistem de asigurare a calității.

Legarea piesei la catodul sursei de tensiune induce următoarele fenomene secundare dezavantajoase:[67]

- Apariția unui arc electric provocat de reziduurile organice. Pentru evitarea efectelor acestui arc pe suprafața pieselor, se folosește azi nitrurarea în plasmă pulsantă, care implică puteri mai reduse și creșterea evidentă a duratei procesului de decapare și de ridicare a temperaturii. Procedeul devine astfel neeconomic.
- Aplicarea directă a plasmei pe suprafața pieselor tratate generează, în zonele învecinate muchiilor, culori diferite care, uneori, nu sunt acceptabile pentru scopul în care piesele au fost produse.

Aceste dificultăți tehnologice sunt responsabile pentru complicațiile care apar în timpul procesului de nitrurare și generează costuri de producție mai mari în comparație cu alte procedee tehnologice mult mai simple.

Procedeul de nitrurare TC [6], care utilizează un echipament brevetat în SUA [68] elimină aceste dezavantaje. Contrar, datelor din literatura de specialitate a anilor '70 [69,70] s-a stabilit [71,72,73] că, îmbogățirea în azot a stratului superficial nu este datorată atât ionilor



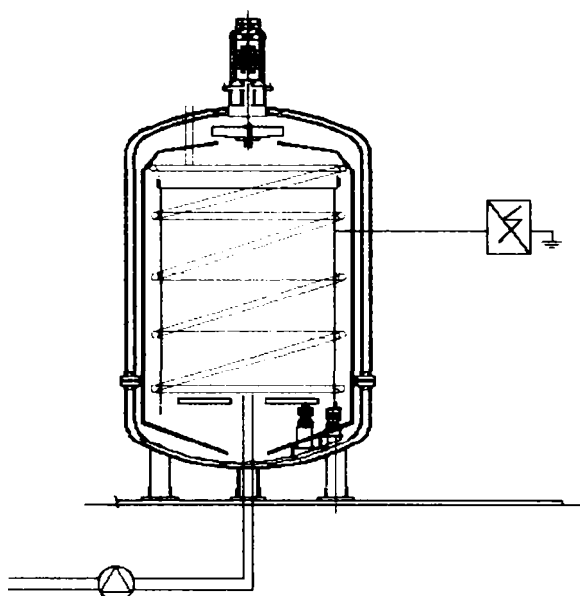
care bombardează suprafața, ci, mai ales, atomilor neutri, cu energia mărită, ca urmare a acțiunii plasmei.

Acest fapt a condus la o nouă soluție tehnică în care nu mai este necesară legarea piesei la catodul instalației.

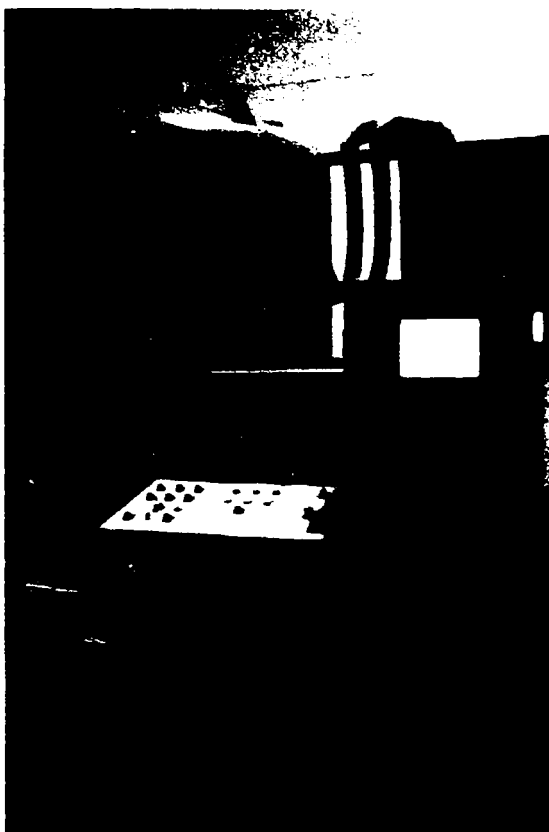
Procedeul de nitrurare ionică TC reprezintă o simplificare tehnologică și presupune că nitrurarea ionică impune doar două condiții:

- aducerea piesei la temperatura optimă;
- generarea unor particule active în vecinătatea suprafeței piesei.

Schema de principiu a unei instalații industriale bazate pe procedeul TC se prezintă în figurile 3.25 și 3.26.



**Figura 3.25** Schema instalației

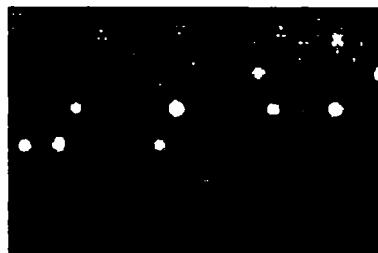


**Figura 3.26** Imaginea unei instalații TC industriale

Piesa de bază a acestei instalații este reprezentată de un „ecran activ”, respectiv o grilă cu dimensiunea ochiurilor definită, care înconjoară întreaga sarcină utilă (figura 3.27, figura 3.28).



**Figura 3.27** Ecranul activ la deschiderea incintei de nitrurare



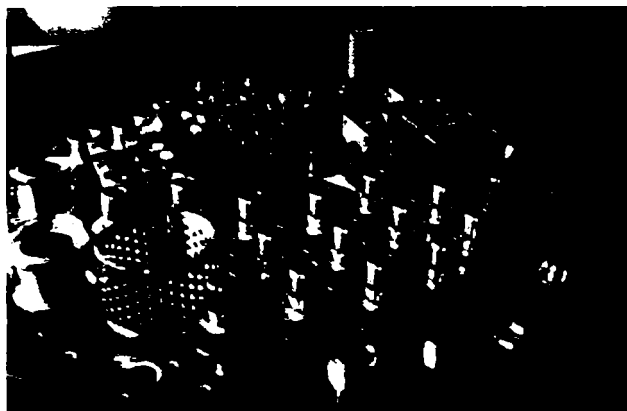
**Figura 3.28** Ecranul activ în timpul procesului de nitrurare



Plasma nu este aplicată direct pe suprafața piesei, grila fiind cea care permite îndeplinirea celor două condiții enumerate anterior:

- încălzirea șarjei se realizează prin radiație de la grila încălzită sub efectul plasmei;
- generarea de particule active prin pomparea amestecului de gaz care trece prin ochiurile grilei și apoi spală toată încărcătura.

Se pot folosi astfel șarje din piese de forme și dimensiuni diferite (figura 3.29).



**Figura 3.29** Șarjă din piese de forme și dimensiuni diferite

În funcție de compoziția amestecului de gaz se pot obține:

- o structură formată dintr-un strat  $\gamma$  și un strat de difuzie – dacă atmosfera conține 30%  $N_2$  și 70%  $N_2$ ;
- o structură cu strat de nitruri  $\epsilon$  - dacă atmosfera este formată din 80%  $N_2$ , 18%  $H_2$  și 2%  $CH_4$ .

Dacă se utilizează o atmosferă specială (amestec TC), reactivitatea particulelor de gaz crește, permițând nitrurarea orificiilor de diametre reduse și chiar a suprafețelor de pe piese diferite aflate în contact în timpul nitrurării.

În figura 3.30 se prezintă structura și variația durității pe adâncime pentru oțelul AISI 304 (X5CrNi18-10 – EN 10028-7/2000), respectiv AISI 17-4 (X5CrNiCuNb16-4, EN 10250/2000) (figura 3.31).

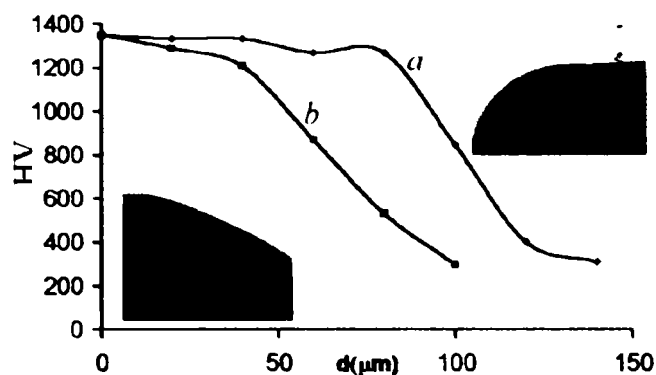


Figura 3.30 Variația durtății în funcție de adâncimea stratului nitrurat pentru oțelul AISI 304

Curbele notate cu *a* indică variația durtății pe adâncime pentru suprafața exterioară, iar curbele notate *b* corespund unor degajării 2x4 mm.

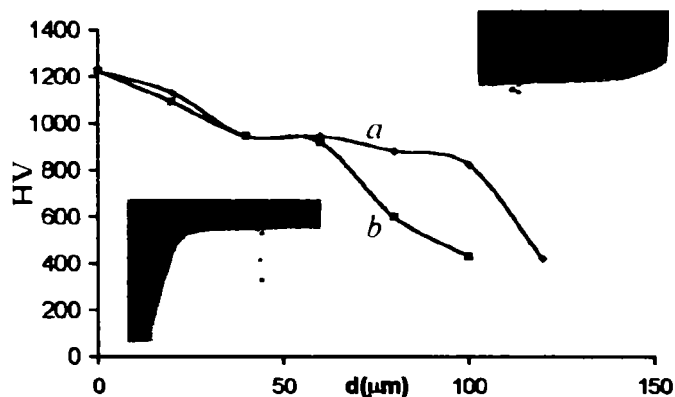


Figura 3.31 Variația durtății în funcție de adâncimea stratului nitrurat pentru oțelul AISI 17-4

În concluzie, se poate spune că procedeul de nitrurare ionică TC este un procedeu care prezintă toate avantajele cunoscute anterior pentru nitrurarea ionică, fără a avea însă și dezavantajele prezentate de acestea.

O altă perfecționare a nitrurării ionice o reprezintă utilizarea unor sisteme de descărcare stimulată [74], care funcționează după principiul din figura 3.32.

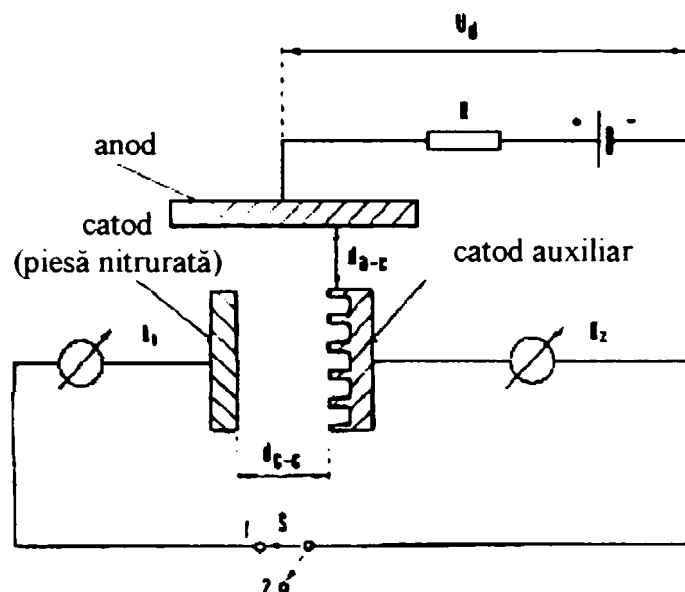


Figura 3.32 Schema de principiu a nitrurării cu catod auxiliar

O asemenea instalație este echipată cu 2 catodi:

- un catod convențional;
- un catod auxiliar.

Catodul auxiliar poate avea o formă plană sau, pentru mărirea eficienței, este prevăzut cu orificii având adâncimi și diametre determinate. [75]

Rolul catodului auxiliar este acela de a intensifica descărcarea în plasmă și emisia de particule active. Catodul auxiliar poate avea aceeași tensiune ca și catodul principal ( $U_d$ ) sau o altă tensiune ( $U_s$ ).

Prin utilizarea catodului secundar dintr-un material este posibilă formarea unor straturi îmbogățite într-un anumit element (materialul din care confecționat catodul secundar).

În figura 3.33 se arată compoziția chimică a stratului superficial al unui oțel slab aliat (1.5330) nitrurat prin această metodă cu un electrod secundar de molibden la 550 °C într-o atmosferă conținând  $N_2$ ,  $H_2$  și Ar în raportul 3:1,5:1,5.

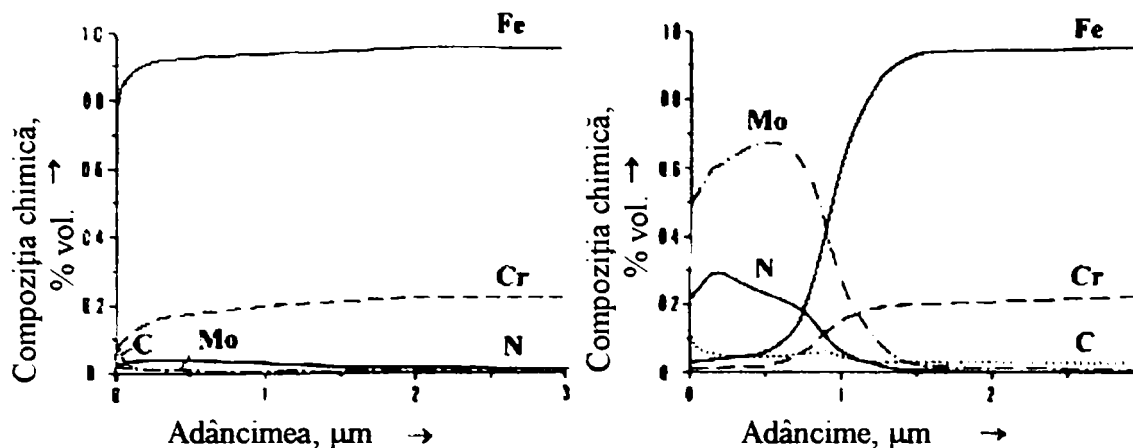


Figura 3.33 Compoziția chimică a stratului nitrurat al oțelului 1.5330 nitrurat prin metoda descărcării stimulate cu catod auxiliar de Mo: a) catod plan; b) catod cu orificii  $\phi 2,5 \times 3 \text{ mm}^2$

### 3.3 Utilizarea industrială, capacitatea de adaptare a procedeelor de nitrurare

Pentru ca prin tratamentele de nitrurare să obținem cele mai bune rezultate, este de foarte mare importanță ca tratamentul unui procedeu de nitrurare să se adapteze fiecărui material și stării sale structurale, precum și solicitărilor pieselor respective.

Melcii și cilindrii de la mașinile de extrudat mase plastice sunt, spre exemplu, două reperi componente solicitate complet diferit. Ca urmare a solicitărilor dinamice ale melcului (torsione, etc.), acestei piese i se recomandă un strat nitrurat. La nitrurarea ionică se ține cont de împrejurări și se tratează melcii și cilindrii separat. La melcii din oțel de nitrurare, grosimile straturilor obținute au fost de 0,3...0,4 mm, iar la cilindri, grosimile optime s-au situat între 0,4...0,5 mm. La nitrurarea în gaz se face frecvent greșeala că melcii și cilindrii să se trateze împreună și cu o durată de menținere prea mare. Prin aceasta, apare o grosime prea mare a stratului, cu fragilitate corespunzătoare. Aceasta este, desigur, un motiv pentru durata redusă de viață a melcilor nitrurați în gaz.

Un alt exemplu elocvent pentru adaptarea tratamentelor de nitrurare la solicitările piesei sunt sculele așchietoare, cum ar fi frezele, burghiile, etc. Solicitățile mari ale muchiilor subțiri pretind o tenacitate maximă a stratului nitrurat. La nitrurarea ionică, aceasta se realizează printr-un strat de difuzie subțire, de numai 20...30  $\mu\text{m}$  și o suprimare totală a stratului de combinație. O asemenea variantă de straturi se poate obține foarte simplu prin reglarea compoziției plasmei și a intensității pulverizării catodice. La nitrurarea în gaz, precum și la cea în baie de sare, nu există o asemenea posibilitate.





Și materialele diferite pretind folosirea unor procedee de nitrurare total diferite. În acest sens, importante sunt, în special, variația temperaturii și a potențialului de azot. La oțelurile nealiate, rezistența optimă se obține printr-o preluare și dizolvare maximă a azotului în ferită, la aproximativ 580 °C. Aici sunt avantajoase, față de nitrurarea în gaz, nitrurarea în baie de sare, cu temperatura sa de 570 °C și nitrurarea ionică, cu domeniul său variabil de temperatură (400 °C...600 °C).

La oțelurile mediu aliate, rezistențele optime se obțin numai la o distribuție uniformă și fină a nitrurilor speciale (spre exemplu: AlN, CrN, etc.) în structura de bază corespunzătoare, la temperaturi de tratament situate între 470 °C și 530 °C. Pentru acest tip de oțeluri nitrurarea ionică și cea în gaz sunt cele mai avantajoase procedee.

Oțelurile înalt aliate pretind, datorită condițiilor de difuzie, temperaturi înalte de nitrurare, între 560 °C...600 °C, așa cum se pot obține cel mai favorabil la nitrurarea în baie și la cea ionică.

Suplimentar, la oțelurile înalt aliate, rezistența la coroziune și acizi, o depasivizare a suprafeței este premisă pentru un tratament de nitrurare aplicat cu succes. Acesta are loc automat la nitrurarea ionică, prin bombardarea suprafețelor cu ioni și la nitrurarea în baie de săruri, prin activitatea chimică a băii.

Alături de compoziția materialului, starea structurii, respectiv rezistența miezului este o mărime, care trebuie adaptată tratamentului de nitrurare. Pentru a evita scăderea rezistenței miezului la nitrurare, temperatura de nitrurare trebuie să se situeze cu aproximativ 30 – 50 °C sub temperatura de revenire. La sculele care lucrează în condiții de solicitări mari la compresiune se necesită, adesea, durități de 60 HRC sau chiar mai mult. Aceasta impune ca temperatura de revenire a materialului, să fie situată în jurul a 500 °C. Pentru obținerea rezistenței mari a miezului, se recomandă doar nitrurarea ionică, cu posibilitatea ei de tratare la temperaturi sub 500 °C.

Pentru obținerea oțelurilor durificabile prin îmbătrânire se utilizează tratamente de nitrurare ionică între 430 °C și 460 °C. La acestea se obține simultan, în cadrul unui tratament, nitrurarea stratului periferic și detensionarea.

Cu toate că piesele de transmisie sunt părți componente importante ale unui vehicul acționat printr-un motor, există încă multe alte piese de motoare, respectiv vehicule, care sunt supuse unor solicitări mecanice mari și prin aceasta necesită aplicarea unor procedee, precum nitrurarea ionică.



Arborii cotiți sunt piese de motor complicate, sollicitate intens, al căror tratament termic, ca tehnologie, ridică mari probleme, datorită complexității solicitărilor (torsiune, încovoiere, șocuri, uzură, mers în condiții anormale), precum și datorită tendinței de modificare dimensională, cauzată de geometria arborelui și stării de tensiuni interne rezultate după prelucrarea arborilor.

Șarjarea atârnată sau așezarea verticală, încălzirea și răcirea directă în vid (la oțeluri aliate), soluționează problema modificării dimensionale la nitrurarea ionică.

Un strat rezultat în urma unei nitrurări ionice, compus dintr-un strat de combinație  $\gamma'$ , subțire (6 până la 8  $\mu\text{m}$ ) și un strat rezistent de difuzie de 0,3 – 0,5 mm grosime, poate rezolva problema solicitărilor multiple ale arborilor de camioane.

Arborii cotiți ai autovehiculelor sunt realizați, în principiu, din oțeluri nealiate, iar datorită solicitărilor reduse, se niturează, de regulă, doar foarte puțin (1 până la 3 h).

Creșterea rezistenței la oboseală, obținută în acest mod, este semnificativă și depășește arborii nitrurați în mod obișnuit, după cum demonstrează și curbele de rezistență la încovoiere, pentru exemplul arborelui cotit montat într-un motor cu 4 cilindri.

Ca urmare a călirii, necesară a fi efectuată la oțelurile nealiate, în vederea unei creșteri maxime a rezistenței la oboseală și care se efectuează într-un mediu corespunzător (ulei, apă), problema modificării dimensionale a unor asemenea arbori se poate soluționa numai prin prelucrări efectuate imediat, care au ca urmare o reducere corespunzătoare a rezistenței la oboseală.

De asemenea, nitrurarea ionică se recomandă tijelor din bușele de ghidare, sollicitate la uzură, supapelor de admisie și de evacuare. Prin aplicarea unor tratamente scurte de 2 – 3 h la 570 °C, la tijele de supape (spre exemplu, din X45CrSi9-3 – EN 10090/03/1998 (Germania), X55CrMnNiN20-8 – EN 10090/03/1998 (Germania)) se obțin durități ale suprafeței între 900 – 1200 HV, care împiedică tendința de uzură la rece și îmbunătățesc comportarea la frecare. Și aici problemele foarte critice legate de modificările dimensionale ale acestor piese se rezolvă printr-o creștere extrem de limitată și uniformă (aproximativ 10  $\mu\text{m}$ ) și printr-o deformare extrem de redusă.

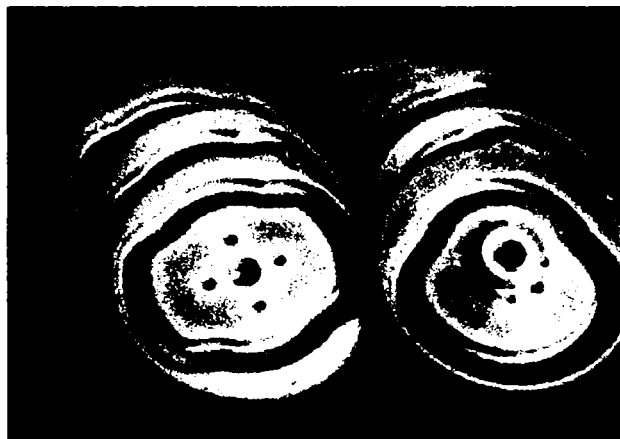
Problemele de deformații ale flanșelor carcsei motorului cu pistoane rotative oscilante au fost rezolvate printr-o acoperire cu tablă specială, tip sandwich, astfel că se niturează ionic numai suprafețele de rulare propriu-zise ale pistoanelor rotative. Datorită acestei măsuri, flanșele cu pereți subțiri și concave interior se deformează doar foarte puțin.



După nitrurare, planitatea acestora pe întreaga suprafață este mai bună, având în jur de câțiva microni.

Flanșele sunt executate din fontă și ating după nitrurarea ionică o duritate a suprafeței de aproximativ 500 HV. Toate carcasele oscilante executate din fontă cenușie la autoturismele din Europa sunt nitrurate ionic.

În figura 3.34 se prezintă came plane nitrurate ionic cu o abatere maximă de  $\pm 5 \mu\text{m}$



**Figura 3.34** Came plane nitrurate ionic

Duratele de menținere depind de materialele pieselor supuse nitrurării și de grosimea dorită a stratului. Ele sunt, în general, de la câteva minute până la mai multe ore. Numai la nitrurarea în curent de amoniac durata de nitrurare este foarte mare: 40 până la 96 h (în cazuri rare chiar 186 h). Durata a fost redusă cu 2 h până la 4 h prin introducerea noilor variante (nitrurarea în gaz, cu gaz suport).

În continuare se prezintă câteva exemple de linii automate de fabricație și tratament termic din cadrul unor firme renumite producătoare de autoturisme.

Firma producătoare de autoturisme Lada folosește, linii complet automate pentru fabricarea și tratarea pieselor auto. Schema unei linii automate de nitrurare se prezintă în figura 3.35. O astfel de linie cuprinde: 1 - instalații de spălare (figura 3.36), 2 - manipolatoare pentru încărcarea dispozitivelor de fixare șarjate; (figura 3.37), 3 - sistem de transport pentru dispozitivele de fixare șarjate (figura 3.38), 4 - agregate de nitrurare în plasmă pulsantă (figura 3.39).

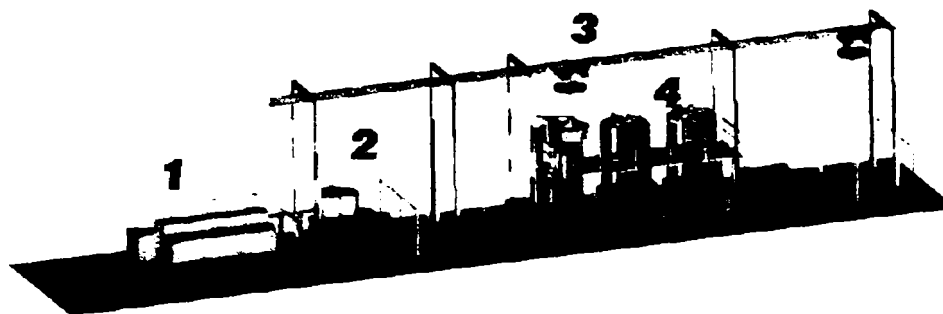


Figura 3.35 Schema liniei automate de nitrurare a firmei Lada

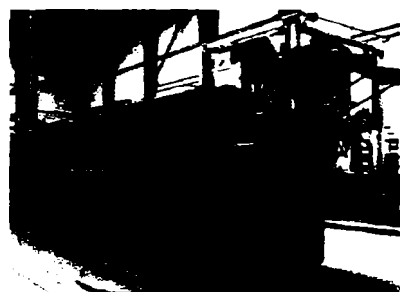


Figura 3. 36 Instalație de spălare

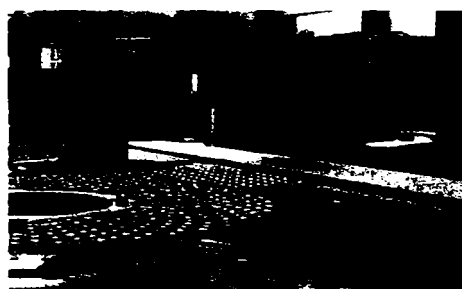


Figura 3.37 2 – Încărcarea dispozitivelor de fixare șarjate, staționare



Figura 3.38 3 – Sistem de transport pentru dispozitivele de fixare șarjate



**Figura 3.39** Agregate de nitrurare în plasmă pulsantă

În figurile 3.40, 3.41, 3.42 și 3.43 se prezintă o linie de fabricație, încărcarea parțială a unei șarje pentru tratament, un dispozitiv de transport, precum și un cuptor de nitrurare ale firmei Suspa



**Figura 3.40** Vedere de ansamblu a unei linii de fabricație



**Figura 3.41** Încărcare parțială

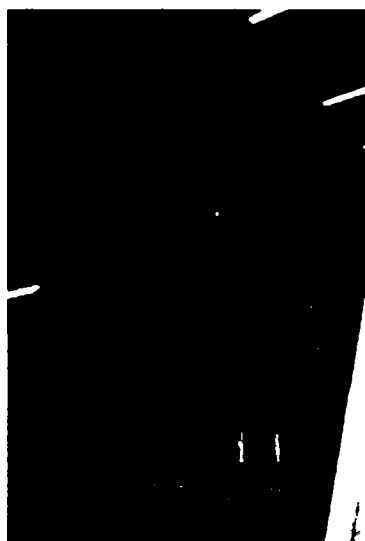


Figura 3.42 Dispozitiv de transport pe șină



Figura 3.43 Cuptor

Audi folosește pentru fabricarea de autoturisme sisteme complet automate pentru nitrurarea arborilor cotiți (figura 3.44), cu 6 cuptoare verticale 1200/ 2750 mm, robot pentru încărcarea și descărcarea pieselor (figura 3.45), robot pentru încărcarea și descărcarea standurilor de șarjare

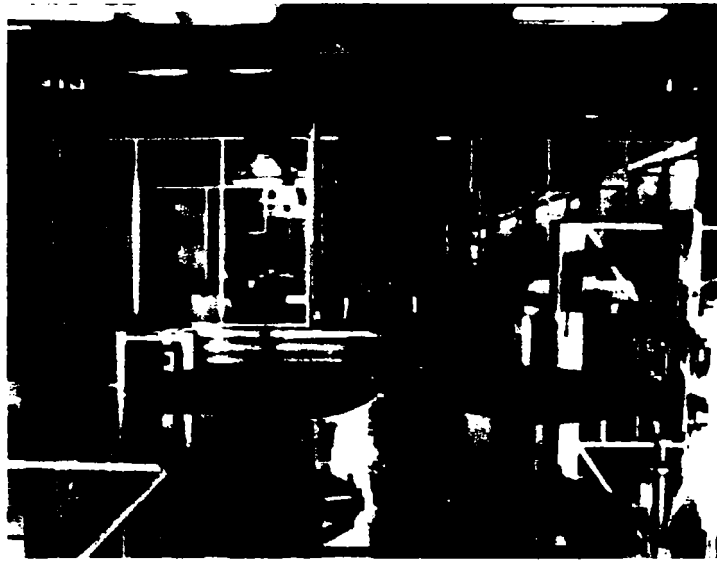


Figura 3.44 Sistem complet automat pentru nitrurarea arborilor cotiți



Figura 3.45 Robot pentru încărcarea și descărcarea pieselor

Pentru piesele cutiilor de viteze, firma producătoare de autoturisme Mercedes folosește, de asemenea, instalații complet automate, cu 2 cuptoare verticale 1600/ 3000 mm. în figura 3.46 prezentându-se schema unei astfel de instalații, iar în figura 3.47 se prezintă imaginea instalației. În figura 3.49 se prezintă imaginea unui robot pentru standurile de șarjare, iar în figura 3.48 un nivel de piese încărcate ce urmează a fi supuse tratamentului de nitrurare.

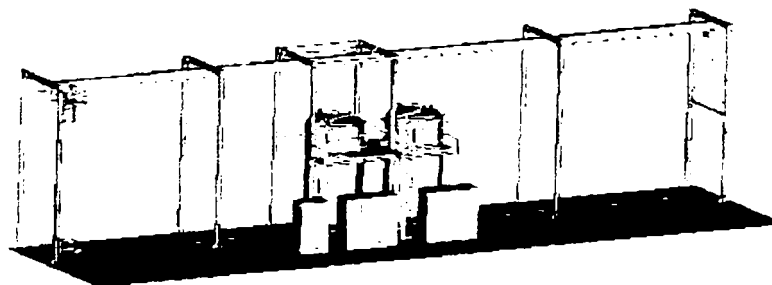
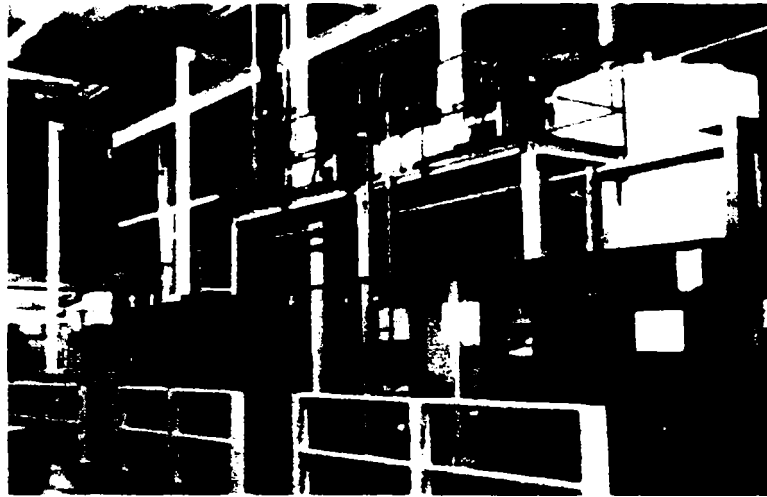


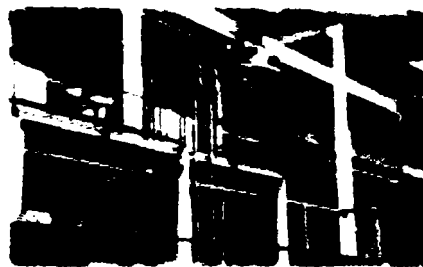
Figura 3.46 Schemă de instalație complet automată de tratament a firmei Mercedes



**Figura 3.47** Imaginea unei instalații complet automată de tratament a firmei Mercedes



**Figura 3.48** Un nivel de piese încărcate



**Figura 3.49** Robot transportor pentru dispozitivele de fixare șarjate

Volkswagen folosește instalații complet automate pentru nitrurarea arborilor cu came (figura 3.50), cu 2 cuptoare verticale, 1200/ 2750 mm, robot încărcător pentru încărcarea și descărcarea pieselor, robot pentru încărcarea și descărcarea standurilor de șarjare





**Figura 3.50** Instalație complet automată pentru nitrurarea arborilor cu came

### **3.4 Criterii suplimentare de alegere a procedeeleor de nitrurare**

Diferențele prezentate până în acest moment, între procedeele individuale de nitrurare, se refereau la conducerea proceselor, la calitățile straturilor, la domenii de aplicabilitate, în funcție de materialele și solicitările la care sunt supuse piesele, de mărimile pieselor și de capacitatea de modificare a tehnologiei

Din aceste expuneri a rezultat că procedeele de nitrurare prezintă anumite avantaje, oferind posibilități de adaptare și de variație. Nu se poate stabili însă o ierarhie general valabilă, deoarece fiecare din procedeele de nitrurare reprezintă un caz practic, particular, prin care se obțin rezultate optime din punctul de vedere al calității și economicității

La tratamentele de nitrurare din atelierele de lucru ce lucrează cu salariați, se constată, în ciuda unor diferențe regionale, că nivelul de preț este aproximativ egal la toate procedeele de nitrurare. Pentru piesele mici, la nitrurarea ionică efectuată în astfel de ateliere, calculul trebuie făcut cu puțin peste prețurile medii. Aceasta se explică prin asocierea șarjilor corespunzătoare anumitor grupe de materiale și cu șarjele individuale, necesar a fi combinate uneori.



Pe lângă costurile rezultate numai din nitrurare, clienții sunt interesați în aceste situații și de costurile cu prelucrările ulterioare ale pieselor nitrurate. Experiența a arătat că piesele nitrurate în gaz, ca urmare a fragilității stratului lor de combinație polifazic, au nevoie întotdeauna de prelucrări ulterioare, în timp ce, piesele nitrurate în baie de sare, ca urmare a marginilor poroase a straturilor de combinație, necesită doar uneori tratamentul ulterior.

Stratul de combinație, care prezintă pori, se uzează foarte repede la solicitările mari de uzură, deoarece particulele foarte dure, apărute alături de pori, conduc la distrugerea suprafeței nitrurate în baia de sare.

Datorită proprietăților excepționale ale stratului de combinație monofazic, suprafețele nitrurate ionic nu mai trebuie, în nici un caz, rectificate ulterior. Stabilitatea dimensională bună de la nitrurarea ionică, face ca această cerință să fie ușor de îndeplinit.

Posibilele modificări, care pot apărea la nitrurare, se pot împărți în trei categorii:

- deformații;
- creștere volumică;
- creșterea rugozității suprafeței.

Deformațiile apar datorită tensiunilor mecanice și termice, respectiv prin depunere de material. Prin recoaceri corespunzătoare, aplicate înaintea ultimei trepte de prelucrare, precum și prin încălziri și răcirii cu viteze mici, aplicate la nitrurare, deformațiile pot fi menținute la valori minime. Tratamentul realizat în vid permite ca deformațiile rezultate să aibă cele mai mici valori. La nitrurarea în baie de sare însă, ca urmare a modificării treptate a temperaturii la imersarea în baie, respectiv la scoaterea piesei din baie, deformațiile rezultate au valorile cele mai mari. Creșterea volumică se situează, la toate tratamentele de nitrurare, în domeniul a câtorva microni și poate fi, în principiu, neglijată.

Cunoscuta bombare a muchiilor, care are loc la procedeele obișnuite de nitrurare, ca urmare a alungirilor tangențiale ale suprafețelor și care poate conduce la întinderi nedorite și la ruperi ale muchiilor, este evitată la nitrurarea ionică, datorită procesului de pulverizare catodică.

Creșterea valorilor de rugozitate ale suprafeței este redusă și este aproximativ egală la toate procedeele de nitrurare. În acest sens, procedeul de nitrurare ionică oferă un avantaj, datorită capacității de rectificare a suprafețelor nitrurate ionic.

Tratamentele parțiale de nitrurare, adică cele care se aplică numai pe anumite suprafețe ale unei piese, se pot efectua la nitrurarea în gaz și la cea ionică. Costurile



suplimentare care apar prin acoperirea cu table, paste, etc., reprezintă, de multe ori, o economie făcută la alte costuri mai ridicate.

În alegerea în exploatare a unei anumite instalații de nitrurare, un rol deosebit îl joacă, în plus, răspunsurile la întrebări precum costurile cu utilajele, costurile comune, consumabilele, salariile, precum și criteriile de siguranță în funcționare și de includere a instalației de nitrurare în linia de fabricație.

Fără a aborda în mod izolat această temă complexă, trebuie reținut că instalațiile de nitrurare ionică, în ciuda unor costuri ceva mai mari, legate de utilajele din atelierele de producție, funcționează mai convenabil din punct de vedere al costurilor, decât instalațiile celorlalte procedee de nitrurare. Aceasta datorită duratelor de menținere mici, a unui consum extrem de mic de substanțe pentru nitrurare, a costurilor reduse de întreținere și a eliminării complete a costurilor cu curățirea și depoluarea.

Ca un avantaj suplimentar, important de semnalat este și posibilitatea de cuplare a instalațiilor de nitrurare ionică în liniile de producție, așa cum s-a arătat în subcapitolul anterior.

Această posibilitate este motivată de siguranța în exploatare și de netoxicitatea nitrurării ionice.

### **3.5 Comportamentul la uzare al suprafețelor nitrurate în plasmă în comparație cu suprafețele nitrurate convențional în cazul angrenajelor elicoidale din industria auto**

Tratamentele pentru protecția contra uzurii prin nitrurare sunt importante din mai multe motive. Costurile și pericolul de deformare sunt mai reduse și pe lângă asigurarea protecției contra uzurii prin nitrurare, crește limita de oboseală și rezistența la coroziune. Pentru examinarea tratamentelor diferite de nitrurare [76,77] există o diferențiere între stările de agregare ale mediului de tratament, de exemplu, solid (pulbere), lichid (baie), gaz sau plasmă și a celorlalte compoziții ale mediului de tratament. Temperatura de nitrurare este 400...590 °C, de exemplu, sub temperatura de transformare ferită – austenită în sistemul Fe-N.[78] Cele mai multe cazuri de nitrurare conțin un strat de nitrură de Fe pe partea exterioară, care poate fi poros și o zonă de difuzie.



Nitrurările produse de tipuri diferite de tratamente pot arăta comportamente diferite la uzare.[79] Există mai multe lucrări [80 – 88] de comparare a comportamentului la uzare în

cazurile nitrurării, dar, cel mai adesea, doar câteva tipuri de tratamente sunt selectate pentru a fi comparate.

În continuare, se vor compara cazuri diferite de nitrurare:

- cu aceeași structură de încercare;
- cu același material de bază;
- cu aceeași grosime a stratului de compus (dacă este posibil).

Investigările se vor concentra asupra măsurătorilor de uzare. Cu ajutorul investigațiilor adiționale se vor examina structura, compoziția și proprietățile stratului depus, pentru a găsi caracteristicile unui proces de nitrurare „bun” și a unui comportament bun la uzare.

Transpunerea tuturor experimentelor de uzare este critică. Se vor măsura comportamentele la uzare a unor componente de motor reale. Experimentele se vor face pe o roată dințată de transmisie a unui motor cu ardere internă. Acest mecanism de acționare conduce pompa de ulei la motor. Remarcabil pentru cazurile de nitrurare este presiunea înaltă pe toată suprafața și viteza înaltă de alunecare. Ambele mecanisme au fost nitrurate cu același tratament. La toate experimentele s-a folosit ulei multifuncțional de motor SAE 10W30.

Uzura roții dințate elicoidale a fost măsurată cu tehnologie radionucleară. Fiecare variantă de nitrurare a fost însoțită de radiație de neutroni pentru marcarea. Particulele de uzură a unei asemenea roți dințate radioactive pot fi detectate printr-o evaluare de acuratețe mare.

Figura 3.51 arată programul de încercare și curba tipică de uzură.

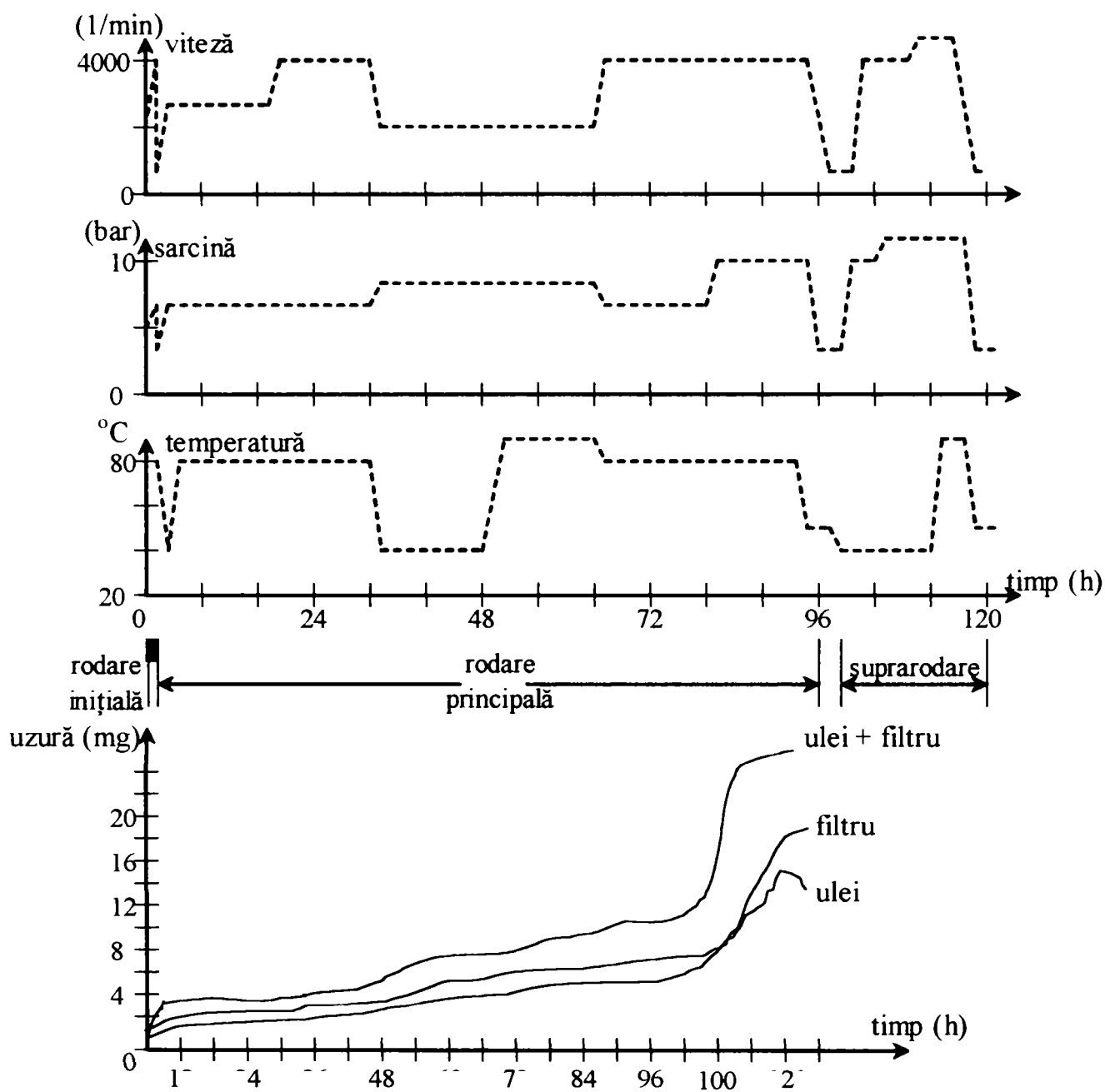


Figura 3.51 Curba tipică la uzare și corespondența programului de încercări la rodare inițială, rodare principală și suprarodare

Programul de încercare este compus din trei părți principale: rodarea inițială la 1,5 h, rodarea principală la 95 h și suprarodarea la 21 h. Sunt controlați trei parametri: viteza, sarcina și temperatura uleiului. Programul de încercare a fost selectat astfel încât roata dințată elicoidală standard să reziste.

Părțile principale ale programului de încercare sunt, în general, reflectate prin curba tipică la uzare. Urmând o creștere rapidă pe parcursul rodării, curba se va aplatiza. Pe parcursul rodării principale, uzura va crește treptat. Pe parcursul suprarodării, uzura va crește



uneori catastrofal. Particulele de uzură se vor depune treptat în filtrul de ulei. Nivelul lor din ulei poate fi micșorat prin filtrarea treptată a uleiului.

Sunt analizate seturi de variante de roți dințate nitrurate prin procese diferite (în baie de săruri, gaz și plasmă). Tabelul 3.2 [79] arată tratamentele de niturare care au fost analizate. Ca material de bază s-a folosi oțelul cu 0,15% C.

**Tabelul 3.2** Investigarea variantelor de niturare cu material de bază din oțel cu 0,15% C

Nr.	Tratament		Nr.	Tratament	
1	BS	Baie de sare cu conținut ridicat de cianură/ apă	9	P	Fază mixtă
2	BS	Baie de sare cu conținut slab de cianură	10	P	Monofază $\gamma'$
3	BS		2/3	P	Fază mixtă
4	BS		2/5	BS	Baie de sare cu conținut slab de cianură cu aditie de S
5	G	1 – NH <sub>3</sub> + exogaz 2 – NH <sub>3</sub> + endogaz	2/6	P	Fază mixtă
6	G	NH <sub>3</sub> + metilamină	2/7	P	Monofază $\gamma'$
7	G	NH <sub>3</sub> + exogaz	2/8	G	NH <sub>3</sub> + exogaz
8	G	NH <sub>3</sub> + endogaz	2/9	G	1 – NH <sub>3</sub> + exogaz 2 – NH <sub>3</sub> + endogaz
11	G	NH <sub>3</sub> + exogaz	2/10	BS	Baie de sare cu conținut slab de cianură/ apă
12	BS	Baie de sare cu conținut slab de cianură/ apă			

BS – baie de sare; G – gaz; P – plasmă

Examinările metalografice care s-au făcut pentru toate variantele, au urmărit:

- grosimea stratului de compuși și zona de difuzie;
- încercarea de duritate HV0,5;
- rugozitatea suprafeței.

Nu a fost stabilită nici o corelație dintre duritate – rugozitatea suprafeței și caracteristicile de uzare.

Un nivel specific de uzare poate fi corelat cu fiecare parte a încercării, de exemplu, rodarea, rodarea principală și suprarodarea. Nivelul uzării în ulei și în filtrul de ulei însumează uzura totală. Oricum, nivelul total al uzurii nu este singurul factor decisiv, ci și gradul de uzare. Este posibilă o comparare a tratamentelor prin compararea nivelului de uzură și a gradului de uzare la un moment dat de timp.

Caracteristicile la uzare ale variantelor analizate pot fi compilate într-o schemă și clasificate după scopul programului de încercări folosit (figura 3.52).

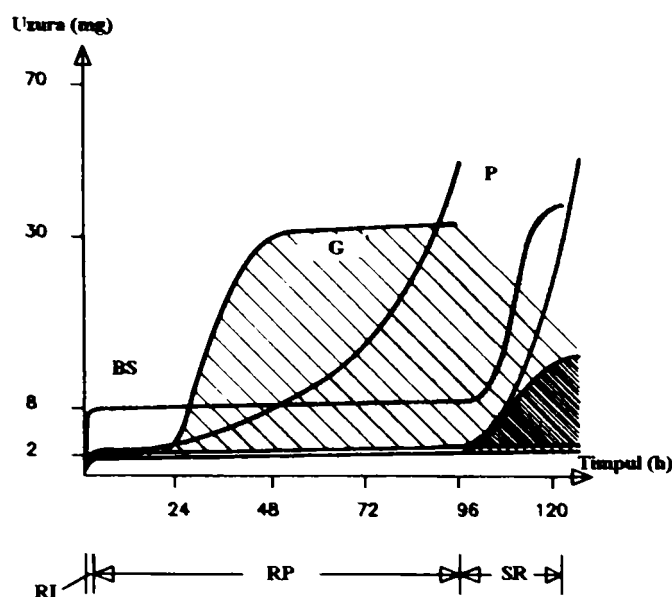


Figura 3.52 Reprezentarea schematică a comportamentului la uzare: BS – baie de săruri; G – gaz; P – plasmă; RI – rodare inițială; RP – rodare principală; SR - suprarodare

Din experiența obținută pe parcursul încercării la rodaj al vehiculului, doar două variante pot fi considerate bune, de exemplu, varianta 1 de tratament în baie de săruri și varianta 5 de tratament în gaz. Variantele de tratament corespunzătoare rodării principale cu uzare slabă sunt de calitate medie. Acestea se aplică la toate variantele de nitrurare în băi de săruri cu grosimea stratului depus de aproximativ  $18 \mu\text{m}$ , așa cum sunt și variantele de nitrurare în gaz 7, 8, 2/8, 2/9 și varianta de nitrurare în plasmă 2/6.

Variantele care prezintă o creștere rapidă a uzurii pe parcursul rodării principale sunt considerate „slabe”. Varianta 6 și 11 de nitrurare în gaz, cum sunt și variantele de nitrurare în plasmă, cu excepția variantei 2/6 și a variantei de nitrurare în baie de săruri 2/10, cu grosimea de strat de aproximativ  $10 \mu\text{m}$ , eșuează în această categorie.

De reținut este faptul că uzarea nu este un parametru de material. Ea este determinată de parametri sistemului de uzare. Pentru sistemul de uzare investigat, este evident că, cazul nitrurării are o grosime a stratului depus apt de a opune rezistență la suprarodare.

La compararea variantelor de nitrurare în plasmă cu celelalte variante de tratament, se va lua în considerare numai pentru rodarea principală. Dacă se analizează variantele de tratament termic cu grosimea de strat nitrurat de aproximativ  $10 \mu\text{m}$ , în funcție de valoarea principală a uzurii totale obținute la sfârșitul rodării principale, se obține următoarea ordine, de la cea mai bună la cea mai slabă: 2/6 – 2/10 – 2/7 – 2/3 – 9 – 10. Ultimele două variante cu comportamentul cel mai slab au grosimea de strat cea mai mică.





Mecanismul uzării este prezent independent de grosimea de strat nitrurat. Toate roțile dințate elicoidale nitrurate prezintă avarii similare la sfârșitul testului de rodare. Există un canal de grosimi diferite cu pittinguri sau desprinderi forțate mai mult sau mai puțin mari, cu uzare prin abraziune. Cea mai importantă desprindere forțată, frecvent întâlnită, are loc în materialul de bază. Ruperea poate să aibă loc după rodarea inițială. Examinări cu microscopul electronic, făcute pe roți dințate, au relevat faptul că, mecanismul principal de avarie este formarea coroziunii pătrunse (pitting) care crește apoi până la rupere.[89]

Detaliile avariei arată diferențe între variante. Nu se constată o distribuție omogenă a uzurii de-a curmezișul dinților unei roți, de exemplu, unii dinți pot să nu prezinte aproape deloc avarii, alții pot fi sever avariați.

Analiza fazelor cu difracție de raze X a evidențiat faptul că straturile nitrurate ale oțelurilor nealiate conțin, în primul rând, nitrură de Fe, un compus  $Fe_{2-3}N$  (fază  $\epsilon$ ) și  $Fe_4N$  (fază  $\gamma'$ ), precum și carbonitruuri izomorfe. Proporția relativă a acestor faze poate varia mult, chiar între două extreme, de exemplu, monofaza  $\epsilon$  și monofaza  $\gamma'$ . De cele mai multe ori, compușii nu sunt omogeni și variază cu distanța de la suprafață. La suprafața stratului nitrurat se mai pot găsi oxizi de Fe. [90,91]

Analiza fazelor s-a făcut pe dinții unei roți dințate elicoidale, cu radiație de Mo. Pe această cale s-a putut analiza o suprafață de cca. 10  $\mu m$  (aproximativ 10% intensitate reziduală). Pentru această suprafață nitrurată exterioară aproape toate variantele, cu excepția straturilor nitrurate de aproximativ 10  $\mu m$ , arată, mai degrabă, o imagine similară de difracție: suprafețele lor nitrurate conțin, în esență, fază  $\epsilon$ . Numai la o distanță mare de la suprafață se găsesc diferențe în ceea ce privește conținutul de fază  $\gamma'$ . Acestea au fost încercate pentru unele variante prin măsurători pe secțiunea transversală înclinată. În afară de tratamentele încercate, compoziția fazelor și parametrul rețelei cristaline al fazei  $\epsilon$  sunt mai constante în adâncime pentru varianta 1. Variantele cu straturile nitrurate de aproximativ 10  $\mu m$  arată conținutul mare de fază  $\gamma'$ , care variază de la 25% (varianta 2/3) la 100% (variantele 10, 2/7).

Clasificarea, după comportamentul la uzare, nu se supune întru totul compoziției de faze a stratului nitrurat: monofaza  $\gamma'$  a stratului nitrurat nu arată cel mai bun comportament la uzare, la fel ca și stratul nitrurat cu conținutul cel mai ridicat de fază  $\epsilon$ . Cel mai bun tratament de nitrurare în plasmă, varianta 2/6 are aproximativ 75% fază  $\gamma'$  în stratul nitrurat.

Comportamentul la uzare examinat al diferitelor tratamente de nitrurare permite o clasificare, dar o comparare a tratamentului de nitrurare în plasmă și a celor de nitrurare





convenționale (în gaz și în baie de săruri) este complicată, din cauza diferenței de grosime a straturilor nitrurate. Evident, straturile nitrurate de aproximativ 10  $\mu\text{m}$ , obținute în cazul variantelor de nitrurare în plasmă, nu au suficientă rezistență la uzare pentru roțile dințate elicoidale investigate. Se pot compara atributele celei mai bune variante de nitrurare în plasmă cu atributele celei mai bune variante global, pentru a găsi proprietăți comune:

- în ambele cazuri se pot găsi concentrații de carbon, care sunt mai ridicate decât la variantele cu comportament la uzură prost;
- un grad sigur de porozitate este necesar pentru a asigura un comportament bun la rodare inițială;
- faza  $\varepsilon$  a stratului nitrurat este mai favorabilă decât faza  $\gamma'$ , care este mai puțin maleabilă.

Acestea confirmă rezultatele anterioare [89] cum sunt intensificarea maleabilității carbonitrurilor.[92] Folosind tehnica crestăturii, s-a dedus că monofaza  $\gamma'$  a straturilor nitrurate este mai maleabilă decât faza compusă a straturilor nitrurate.

Aceste investigații au găsit, de asemenea, că sarcina minimă necesară pentru formarea fisurilor este mai mare pentru straturile nitrurate în băi de săruri cu monofaza  $\varepsilon$  decât la celelalte straturi nitrurate cu faze compuse sau monofază  $\gamma'$ , de exemplu, faza  $\varepsilon$  a straturilor nitrurate în băi de săruri poate suporta o sarcină mai mare la suprafață.

Comparând tratamentele de nitrurare în gaz și băi de săruri în trei puncte la încercarea la încovoiere [93], s-a găsit un comportament la fisurare mai puțin ductil pentru tratamentele de nitrurare în gaz și băi de săruri.

Privind asupra comportamentului la uzare a diferitelor tratamente de nitrurare, tratamentul de nitrurare în băi de săruri prezintă o difuzie mai mică, de exemplu, par să aibă siguranță tehnică mai mare.

Comportamentul la uzare a tratamentelor de nitrurare în gaz și plasmă par a fi dependente senzorial mai mult de parametrii procesului. Varianta 5 dovedește că nitrurarea în gaz poate produce structuri de nitrurare cu particularități mai precise față de nitrurările în băi de săruri. Un strat nitrurat fără faza  $\gamma'$  poate ridica comportamentul la uzare a tratamentelor de nitrurare în plasmă la nivelul cel mai bun față de tratamentul de nitrurare în băi de săruri.



### 3.6 Costuri

La alegerea unui procedeu de călire pentru un caz practic anume, alături de problemele tehnice, trebuie luate în considerare și cele economice. La o comparație a diferitelor procedee, având în vedere costurile, trebuie studiate cele suplimentare care pot apărea, sau cele care se elimină. Aici ar fi de menționat: prelucrarea ulterioară, procentul de rebuturi, creșterea calității, poluarea, eliminarea emisiilor poluante, pregătirile privind siguranța procesului sau modalitățile de transport.

Deoarece costurile care apar sunt diferite de la un procedeu la altul și de la o fabrică la alta, este greu să se facă o afirmație în acest sens. În cele ce urmează, din acest motiv, se vor lua în considerare numai costurile ce rezultă direct, numai la niturarea ionică. Cele mai importante criterii de alegere sunt ale costurilor rezultante din piese sau pe kg.

Datorită tehnicii relativ costisitoare, necesară la obținerea și comanda descărcării luminescente, precum și la automatizarea desfășurării procesului, investițiile pentru instalațiile de niturare ionică sunt ceva mai mari decât cele pentru instalațiile de niturare convențională. Totuși, instalațiile de niturare ionică nu sunt supuse practic nici unei uzuri, astfel că durata de amortizare poate fi evaluată pe o perioadă foarte lungă de timp.

Necesarul de energie al instalațiilor nu depinde de volumul recipientilor, ci numai de mărimea suprafeței șarjei pe care are loc descărcarea luminescentă. Ca urmare a încălzirii directe a șarjei prin bombardamentul ionilor, are loc doar încălzirea piesei însăși. Deoarece niturarea ionică are loc în vid, trebuie compensate doar pierderile de radiație. Ca exemplu, se va considera consumul de energie al unei șarje de 42 arbori cotiți din 42CrMo4 – EN 10269/1999 pentru motoare cu 10 cilindri, executați pentru autocamioane mari (greutate 4 tone). Pentru a obține o adâncime a durtății stratului niturat de 0,4 – 0,5 mm este necesar ca instalația să fie alimentată cu o energie electrică totală de aproximativ 2000 kWh. Raportat la șarjă, înseamnă un consum de 0,5 kWh/kg sau de 0,3 W/cm<sup>2</sup>. În general, consumul de energie pe unitatea de suprafață este cuprins între 0,2 și 0,7 W/cm<sup>2</sup>.

Consumul de gaz este neglijabil de mic. El este, în funcție de mărimea șarjei, între 25 și 150 l gaz/h.

Pentru piesele de schimb și cele de uzură, întreaga instalație poate solicita pe an un procent de 1 – 2% din valoarea investiției. Piesele de uzură sunt, în principal, numai piesele sistemului de vidare și cele ale formării curentului, a căror izolație împotriva pulverizării stratului metalic trebuie reînnoită din când în când.



Deoarece instalațiile sunt în cea mai mare parte automatizate, necesarul de personal de supraveghere este redus. O singură persoană poate supraveghea până la 10 instalații. Costurile pentru pregătirea șarjei sunt compatibile cu cele pentru celelalte procedee de nitrurare.

Dacă se calculează costurile, ținându-se cont de o durată de amortizare de 8 ani și de o dobândă a capitalului de 10%, se obține, spre exemplu, un cost la arborii cotiți menționați anterior, de aproximativ 0,2 euro/kg. Această valoare este un rezultat bun, ce poate fi obținut la instalațiile mari și pentru acest material al pieselor. Pentru instalațiile mai mici, valoarea obținută va fi ceva mai mare, deoarece aici costurile capitalului se regăsesc relativ puternic în costul pieselor.

Din punct de vedere economic, un interes deosebit îl prezintă consumul energetic și costul unitar al nitrurării ionice.

Literatura de specialitate oferă puține informații concrete, iar o bună parte dintre acestea sunt elemente asociate, cum ar fi tipul și mărimea instalației în care s-a efectuat nitrurarea, natura și mărimea încărcăturii, masa și suprafața dispozitivelor de suspendare / așezare, durata fazelor procesului, temperatura de nitrurare, compoziția mediului gazos, etc. În funcție de aceste elemente, consumul de energie electrică indicat de diferiți autori variază în limite foarte largi: între 0,1 și 2,5 kWh/kg și respectiv 2 și 12 kW/m<sup>2</sup>.

Deoarece unele informații pot prezenta interes, justificând aprecierile cuprinse în paragraful precedent, în continuare, se expun câteva elemente tehnico – economice în domeniu.

Un bilanț comparativ între nitrurarea ionică și nitrurarea în gaz este oferit mai jos. Deși nu sunt prezentate informații cu privire la natura și mărimea încărcăturii, la parametrii tehnologici ai proceselor de nitrurare, se consideră că, elementele oferite sunt interesante și se redau în tabelele 3.3 și 3.4.

**Tabelul 3.3 Parametrii tehnologici ai proceselor de nitrurare**

Faza	Durata (min.)	Consum de energie electrică (kWh)	Consum de gaz	
			N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Vidare	10	0,8	-	-
Depasivizare	30	10	-	80
Încălzire	220	158	110	320
Menținere	120	28,5	95	280
Răcire	150	9,2	175	525
Total	525	206,5	380	1205



**Tabelul 3.4** Consumul energetic și gazos în diferitele faze de nitrurare a unor piese cilindrice pentru motoare hidraulice

Nitrurare ionică		Nitrurare în gaz	
<b>A Fazele procesului</b>			
încălzire	3 h	încălzire	2 h
menținere la palier	21 h	menținere la palier	30 – 40 h
răcire	1 h	răcire efectuată într-o altă celulă	
<b>B Consum energetic</b>			
în cursul încălzirii	35 kWh	în cursul încălzirii	50 kWh
în cursul menținerii	237 kWh	în cursul menținerii	650 kWh
consum auxiliar	120 kWh	consum auxiliar	96 kWh
Total	392 kWh	Total	796 kWh
<b>C. Consum de gaze</b>			
azot R: $2 \text{ m}^3 \times 4 \text{ F}$	8,00 F	azot R: $4 \text{ m}^3 \times 4 \text{ F}$	16,00 F
azot U: $0,12 \text{ m}^3 \times 11,5 \text{ F}$	1,38 F	amoniac: $38,4 \text{ m}^3 \times 2,2 \text{ F}$	84,48 F
hidrogen: $0,96 \text{ m}^3 \times 5,7 \text{ F}$	5,47 F		
Total	14,85 F	Total	100,48 F

În tabelul 3.4 s-a prezentat bilanțul comparativ între nitrurarea ionică și cea clasică în gaz, pentru aceeași adâncime a stratului nitrurat.

Ambele tabele conțin date ce vin în sprijinul afirmațiilor privind avantajele nitrurării ionice, în privința consumului relativ redus de energie electrică și de gaze, a duratei procesului.

Un alt studiu, ce a luat în considerare consumul energetic la nitrurarea unor arbori cotiți pentru autocamioane (oțel 42CrMo4 – EN 10269/ 1999), menționează valori la nivelul a 0,5 kWh/kg sau 0,3 W/cm<sup>2</sup>, la o grosime de 0,4 – 0,5 mm.

O pondere deosebită prezintă în determinarea consumului unitar de energie electrică, următorii factori:

- acuratețea pieselor introduse pentru nitrurare (durata depasivizării);
- durata nitrurării propriu – zise (adâncimea stratului nitrurat);
- temperatura de nitrurare (figura 3.53);

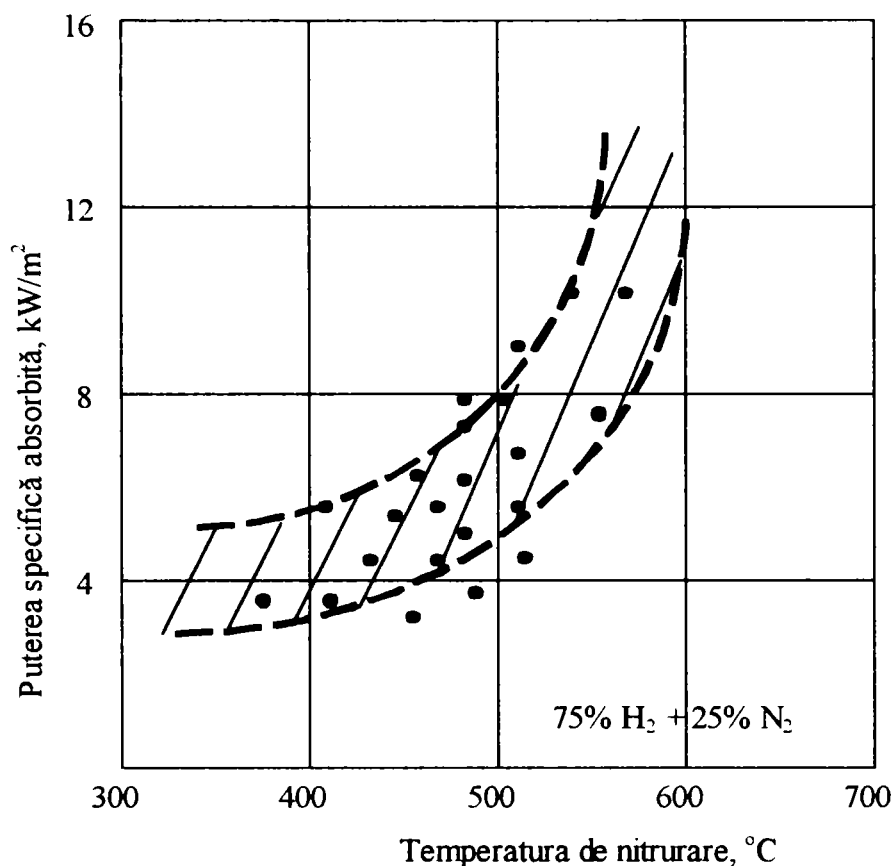


Figura 3.53 Variația puterii specifice adsorbite în funcție de temperatura procesului de nitrurare ionică (faza de menținere)

- gradul de încărcare a recipientului (ca raport între suprafața totală a pieselor și dispozitivelor și respectiv cea a recipientului în care are loc nitrurarea (figura 3.54));

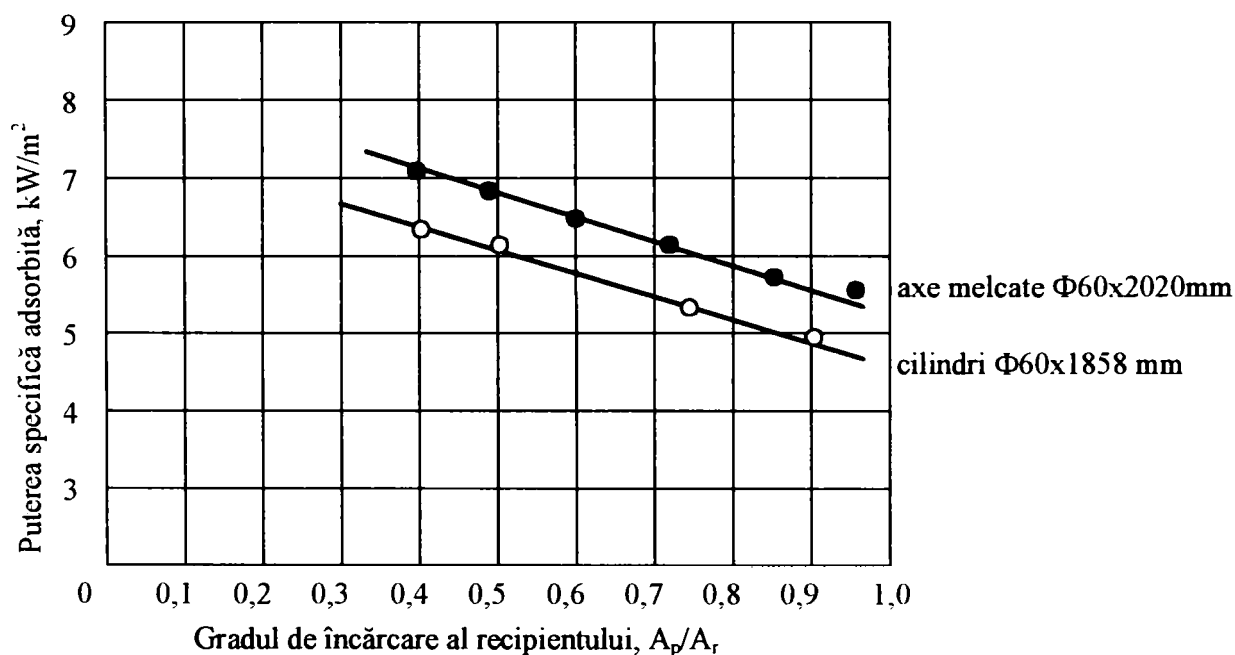


Figura 3.54 Influența geometriei pieselor și a gradientului de încărcare a recipientului asupra puterii specifice adsorbite în faza de menținere la nitrurarea unor cilindri și respectiv a unor axe cu came



- complexitatea geometrică a pieselor;
- eficiența sistemului de ecranare a radiației termice a pieselor;
- compoziția și presiunea mediului gazos.

Valorile experimentale prezentate în figurile de mai sus au fost obținute pe baza unor cercetări efectuate pe o instalație de nitrurare ionică în amoniac disociaț tip cu recipient vertical și având o putere instalată de 280 kVA.

În tabelul 3.5 se prezintă valorile energiei consumate la nitrurarea unor încărcături metalice formate din axe metalice și cilindri din oțel 39MoAlCr15 – STAS 791-88.

**Tabelul 3.5** Valori ale energiei consumate pe bucata de piesă la nitrurarea (530°C / 20 h) unor încărcături metalice formate din axe metalice  $\phi 60 \times 2020$  mm și respectiv cilindri  $\phi 120 \times 2000$  mm din oțel 39MoAlCr15

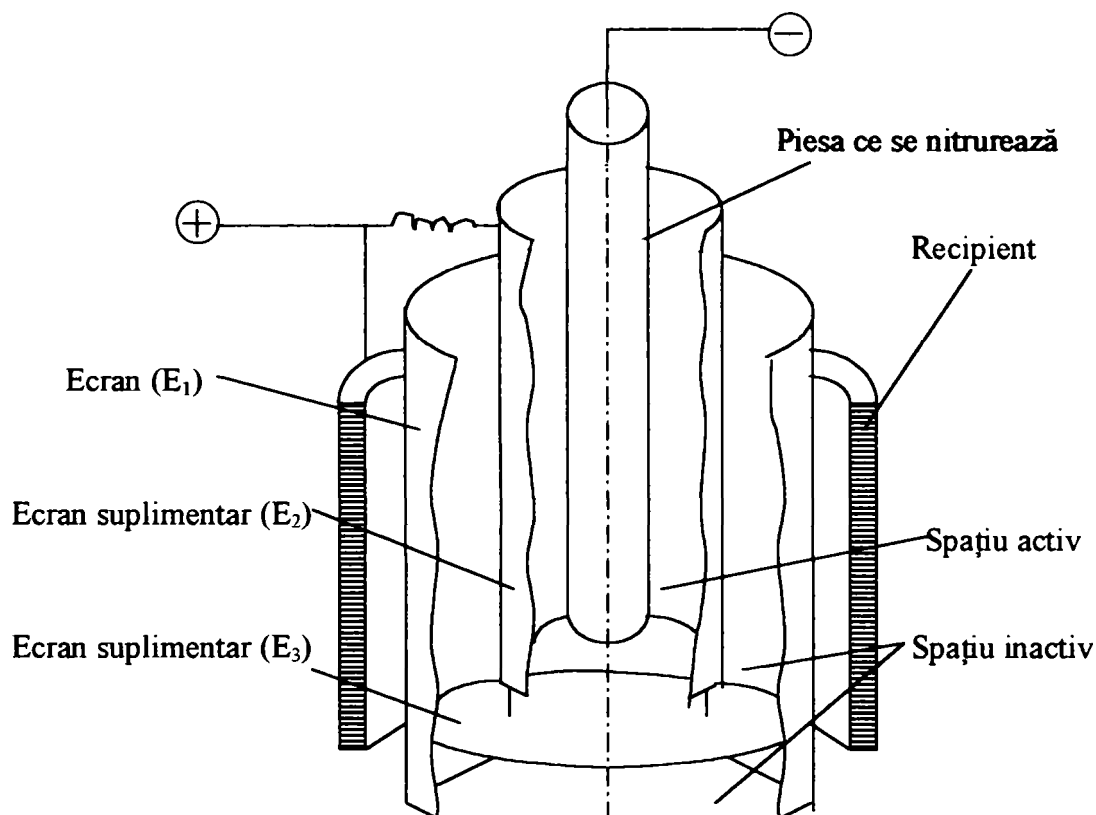
Denumirea piesei	K=A/V (dm <sup>-1</sup> )	Energia consumată	
		Totală	În faza de mentinere
Ax melcat $\phi 60 \times 2020$ mm	11,19	69,10 kWh (2,01 kWh/kg) (141,31 kWh/m <sup>2</sup> )	57,24 kWh (1,66 kWh/kg) (117,05 kWh/m <sup>2</sup> )
Cilindru $\phi 120 \times 2000$ mm	3,43	98,46 kWh (0,55 kWh/kg) (126,94 kWh/m <sup>2</sup> )	76,50 kWh (0,43 kWh/kg) (98,63 kWh/m <sup>2</sup> )

Din cercetările efectuate rezultă că optimizarea consumului energetic la nitrurarea ionică trebuie să ia în considerare o serie de măsuri cu caracter tehnologic, constructiv sau de exploatare, între care se menționează:

- stabilirea “economică” a condițiilor tehnice ce se impun stratului nitrurat prin documentația de execuție și respectiv corelarea judicioasă a temperaturii și duratei procesului de nitrurare propriu – zisă;
- manifestarea unei exigențe maxime în operațiile de curățare prealabilă și în manipularea pieselor până la introducerea în recipientul de nitrurare;
- reducerea la minimum necesar a dispozitivelor de șarjare;
- efectuarea tratamentelor de nitrurare ionică la un grad de încărcare a recipientului cât mai ridicat;
- curățarea periodică a sistemului de ecranare – la fiecare 5 – 20 cicluri de nitrurare, după caz, în vederea redării capacității emise inițiale;
- adoptarea, după caz, a unor soluții constructive bazate pe ecranări suplimentare contra radiației termice și respectiv ajustarea spațiului activ al recipientului la dimensiunile șarjei.



Cu privire la această ultimă măsură, trebuie să arătăm că, deși cercetările efectuate menționează eficiența dublării sistemelor de ecrane standard ale instalațiilor de nitrurare, aceasta impune adoptarea unor soluții constructive noi de către înșiși furnizorii instalațiilor respective. În lipsa acestora, se poate proceda la limitarea pierderilor prin radiație termică – în instalațiile existente prin ajustarea, după caz, a volumului descărcării la dimensiunile șarjei. O astfel de soluție, utilizând unul sau mai multe ecrane suplimentare (figura 3.55), este relativ simplă și se recomandă, în special, pentru instalațiile cu diametru sau / și adâncime relativ mare.



**Figura 3.55** Prezentarea schematică a unei soluții de ajustare a volumului descărcării la dimensiunile șarjei

Se apreciază că aplicarea consecventă a măsurilor menționate poate contribui la diminuarea cu 30...60% a consumului energetic înregistrat curent la nitrurarea ionică, ceea ce, la o instalație de mărime medie, de exemplu, poate reprezenta o reducere a consumului anual cu 100 – 200 MWh, în funcție de puterea instalată și de condițiile specifice de utilizare.

Încercările de a elabora o relație matematică cât mai exactă pentru determinarea consumului de energie electrică la nitrurarea ionică devin dificile prin natura și complexitatea





factorilor ce trebuie luați în considerare, astfel că relațiile respective pot avea, de regulă, doar un caracter particular.

Se prezintă, de exemplu, o astfel de relație aproximativă determinată pe baza unor cercetări efectuate pe o instalație asupra unor încărcături compuse din piese de schimb pentru siderurgie, având masa unitară cuprinsă între 0,200...200 kg și de configurații diferite, supuse nitrurării ionice pe durata de 30 de ore, ceilalți parametri variind de la caz la caz:

$$e = k \cdot M^{\alpha} \cdot m^{\beta} (h + a) \quad (3.1)$$

unde:

$e$  – consumul de energie unitar, kWh/kg;

$h$  – durata nitrurării propriu – zise, h;

$M$  – masa totală a șarjei, inclusiv dispozitivele, kg;

$m$  – masa medie a unei piese componente, kg;

$\alpha, \beta, a, k$  – constante specifice instalației.

În ceea ce privește costul de producție al nitrurării ionice, se apreciază, de asemenea, de către diferiți autori [114], valori în limite foarte largi, cuprinse, de exemplu, între 0,25 și 1,6 € în funcție de consumul de energie și retribuții, regii, amortismente, beneficiu, ș.a., practicate de diferite firme.

La nitrurarea acelorași arbori cotiți pentru autocamioane, în încărcături cu greutate totală de 4 tone, cheltuielile totale se ridică la cca. 0,5 €/ kg piesă, luând în considerare o durată de 8 ani pentru amortizarea instalației și o dobândă de 10% la valoarea investită.

Efectele economice ale utilizării nitrurării ionice se apreciază, în RUSIA, la nivelul de 400 ruble la tona de piese, ca urmare a reducerii manoperei de prelucrări mecanice și de tratament termic, precum și a economiilor de energie și de gaz.

O serie de date interesante din acest punct de vedere prezintă P. H. Nowill cu privire la nitrurarea ionică a unor matrițe din oțel utilizate în SUA pentru extrudarea aluminiului. Astfel, la un nivel de fabricație de 300 de matrițe pe an, prin creșterea cu peste 50% a duratei de utilizare a matrițelor, reducerea ciclului de nitrurare cu cca. 20% și creșterea vitezei de extrudare cu cca. 20% (față de matrițele nitrurate în gaz), introducerea nitrurării ionice s-a soldat, global, cu economii anuale relative de cca. 80000 dolari.

Cu toate că, în țara noastră, o serie de elemente ale prețului de cost au fost unitar determinate pentru o serie de alte tratamente termochimice, gama largă de valori care pot să revină parametrilor constructivi ai pieselor ce se niturează ionic sau celor tehnologici ai

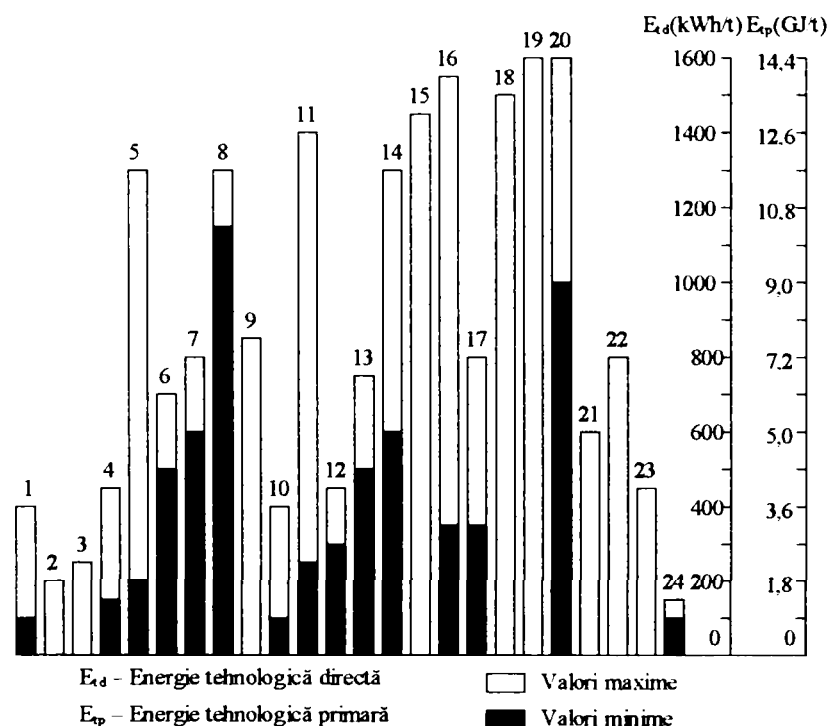




procesului de nitrurare, a făcut ca până în prezent, să nu se elaboreze tarife specifice pentru acest tratament.

Deoarece nici în literatura de specialitate din țara noastră nu au apărut, până acum, date tehnico – economice în acest sens, se prezintă, cu titlu informativ, elemente ale costului de uzină (deci fără cheltuieli de desfacere, service, beneficiu, impozit pe circulația mărfurilor) la tratamentul de nitrurare ionică pentru cazul nitrurării unei încărcături formate din 12 buc. axe melcate  $\phi 60 \times 2020$  mm din oțel 39MoAlCr15, în greutate totală de 408 kg. Nitrurarea s-a efectuat prin menținere 20 h la temperatura de 520°C în atmosferă de amoniac disociat, în recipientul  $\phi 750 \times 4500$  mm al unei instalații, după degresarea prealabilă a pieselor în tricloretilenă.

Așa cum s-a arătat, consumul energetic deține o pondere ridicată în costul total al nitrurării ionice. Pentru a înlătura însă eventuala imagine a unei tehnologii “energofage” pe care o poate oferi la o analiză limitată nitrurarea ionică, trebuie să menționăm că aceasta prezintă, totuși, cel mai scăzut indice al consumului energetic specific, nu numai comparativ cu celelalte procedee de nitrurare, dar și în raport cu alte tratamente termice (figura 3.56).



**Figura 3.56** Consumul de energie tehnologică la unele operații de tratamente termice: 1 – călire prin inducție; 2 – călire cu flux de electroni; 3 – călire cu laser; 4 – călire prin inducție + revenire; 5 – călire cu încălzire în cuptoare obișnuite; 6 – călire în cuptoare cu vid; 7 – călire în cuptoare cu atmosferă controlată; 8 – călire în băi de săruri; 9 – călire în strat fluidizat; 10 – revenire; 11 – recoacere; 12 – recoacerea oțelului în aer; 13 – recoacerea de sferoidizare a fontei; 14 – normalizare; 15 – patentare în baie de plumb; 16 – carburare; 17 – carburare în vid; 18 – carburare în mediu solid; 19 – carburare în săruri; 20 – cianurare; 21 – nitrocarburare în mediu gazos; 22 – nitrocarburare în mediu lichid; 23 – nitrurare în gaz; 24 – nitrurare ionică



## Cap. 4 STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA DIFERIȚILOR FACTORI ASUPRA STRUCTURII ȘI PROPRIETĂȚILOR STRATURILOR NITRURATE ÎN PLASMĂ

### 4.1 Structura și compoziția chimică a straturilor exterioare nitrurate

Straturile pieselor din materiale feroase obținute prin majoritatea procedeelor de nitrurare au un caracter aderent, în sensul că, se compun dintr-un strat de combinație direct la suprafață și imediat după acesta, stratul de difuzie. Stratul de combinație are, adesea, o grosime de numai câțiva  $\mu\text{m}$ , compunându-se din diverse combinații de nitruri ale fierului (tabelul 4.1).

**Tabelul 4.1** Structuri ale straturilor obținute în urma nitrurării în medii și cu parametrii de tratament diferiți

Procedeu	Nitrurare în pulberi	Nitrurare în baie de săruri	Nitrurare în gaz	Nitrurare ionică
Temperatura	470 – 570 °C	570° C	510 °C (570 °C )	400 – 600 °C
Durata de menținere	3 – 7 h	10 min – 4 h	36 h – 96 h (2 h – 4 h )	10 min – 30 h
Stratul de combinație	$\varepsilon - \text{Fe}_{2,3}\text{N}$	$\varepsilon - \text{Fe}_{2,3}\text{N}$	fază mixtă $\gamma' - \text{Fe}_4\text{N} + \varepsilon - \text{Fe}_{2,3}\text{N}$ ( $\varepsilon - \text{Fe}_{2,3}\text{N}$ )	monofazic $\varepsilon - \text{Fe}_{2,3}\text{N}$ monofazic $\gamma' - \text{Fe}_4\text{N}$
Zona de difuzie	carbonitruri	carbonitruri	nitruri (carbonitruri)	fără precipitări de nitruri sau carbonitruri

Tabelul 4.2 prezintă o altă clasificare a zonelor de combinații obținute prin diferite procedee de nitrurare.



Tabelul 4.2 Clasificarea zonelor de combinații obținute în urma nitrurării

Structura		Grosimea de strat [μm]	Duritatea [HV]	Fragilitatea	Recomandat la solicitări de tip:	Procedeele de nitrurare
Tipul de fază	Rețeaua cristalină					
$\gamma'$ - Fe <sub>4</sub> N monofazică	cubică cu fețe centrate	0...8	1300 – 1600	slabă	uzură, oboseală, șocuri, răsucire, coroziune	nitrurare ionică
$\epsilon$ - Fe <sub>2-3</sub> N monofazică	hexagonală	3...30	1200 – 1500	medie	uzură, oboseală, coroziune	nitrurare ionică, nitrurare în baie de săruri
$\gamma' + \epsilon$ polifazică	cubică cu fețe centrate, hexagonală	2...30	1000 – 1500	ridicată	coroziune, uzură, oboseală	nitrurare în gaz (nitrurare ionică), nitrurare în băi de săruri

Compoziția straturilor de combinație se poate determina pe cale roentgenografică, cu ajutorul analizelor microstructurale (figura 4.1).

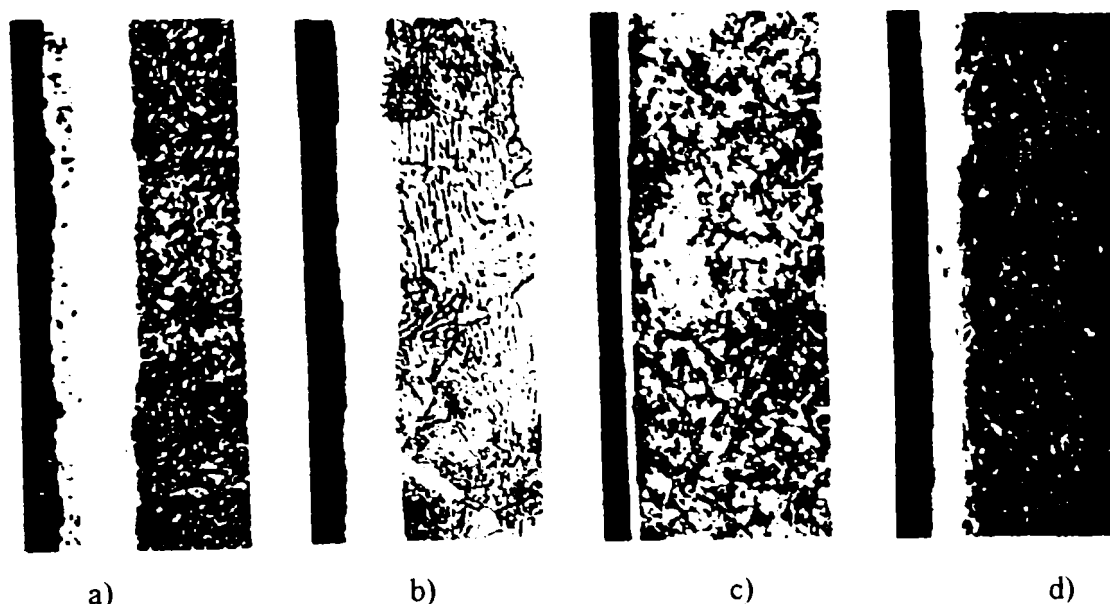


Figura 4.1 Tipuri ale straturilor de combinație obținute în urma nitrurării: a) nitrurat în baie, 3 h/570 °C, faza  $\epsilon$ , b) nitrurat ionic, 10 h/550 °C, faza  $\epsilon$ , c) nitrurat ionic, 16 h/530 °C, faza  $\gamma'$ , d) nitrurat în gaz, 48 h/ 505 °C, faza ( $\gamma' + \epsilon$ )

Figura 4.1 arată structura a 4 straturi nitrurate, după atac cu soluție alcoolică 3% (sare Salpetru). Stratul de combinație nu este influențat prin acest atac, apărând așa – numitul “strat alb”. Figura 4.1 prezintă un strat de combinație cu o grosime de aproximativ 15 μm, obținut după nitrurarea în baie la 570 °C, timp de 3 ore. Atrage atenția zona poroasă de la suprafață, care are o grosime de aproximativ 1/3 din întreaga grosime a stratului de combinație. Asemenea zone poroase sunt tipice pentru nitrurarea în baie. Intensitatea formării acestora



este în strânsă legătură cu poluarea băii și cu conducerea procesului. Până în prezent, la nitrurarea în baie, nu s-a putut obține eliminarea reproductibilă a zonei cu porozități.

Compoziția straturilor de legătură se poate determina pe cale roentgenografică, cu ajutorul analizelor microstructurale.

Astfel, s-a putut determina că straturile de combinație obținute la nitrurarea în baie de săruri sunt, în principal, monofazice și se compun dintr-o structură de carbură hexagonală  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ , respectiv  $\text{Fe}_{2-3}\text{C}_x\text{N}_y$ ). În funcție de conținutul aliajului de oțel, în acest strat de combinație de fază  $\epsilon$ , se pot introduce în cantități mici și nitruri ale unor elemente ce au tendință de formare a acestora, cum ar fi Cr, Al, Ti, V, Mo, precum și carbonitruri. Stratul de combinație monofazic de tip  $\epsilon$  se poate obține și prin nitrurare ionică (cu adaos de metan în plasma de nitrurare).

Grosimea stratului, după un tratament de nitrurare ionică efectuat pe o durată de menținere de 10 h, este de aproximativ 12  $\mu\text{m}$ , neapărând stratul poros amintit în situația anterioară. Porozitatea nu se observă nici prin metodele optice și nici prin cele roentgenografice.

Cu toate că există prime cercetări și teorii privitoare la cauzele și formarea porilor în straturi de combinație cu carburi  $\epsilon$ , problema este încă foarte departe de a rezolva îndepărtarea porilor. În acest sens, mai sunt necesare cercetări amănunțite în domeniul influenței temperaturii asupra formării porilor.

Spre exemplu, s-a stabilit că, la nitrurarea ionică sub 550 °C nu apar pori în mod reproductibil, în timp ce, la tratamentele efectuate peste 550 °C, pot apărea pori izolați.

Un interes deosebit îl prezintă stratul de combinație, cu structură monofazică de tip  $\text{Fe}_4\text{N}$ , de grosime variabilă (figura 4.1 c). Acesta, simbolizat și ca fază  $\gamma'$  are, după aplicarea tratamentului timp de 16 h la 530°C, o grosime de aproximativ 4  $\mu\text{m}$ . Se remarcă, în acest caz, uniformitatea deosebită și totala lipsă de pori. Grosimea lui, datorită ratei sale de creștere, nu va depăși cu mult 8  $\mu\text{m}$ , chiar și după tratamente foarte lungi. Aceasta este foarte important pentru tenacitatea acestui strat. În figura 4.1 d) se prezintă un strat de combinație dur, cu o grosime de aproximativ 10  $\mu\text{m}$ , obținut ca urmare a unei nitrurări în gaz, pe o durată de menținere de 48 de ore, la 505 °C. Straturile de combinație obținute prin nitrurarea în amestec de amoniac au, întotdeauna, o structură mixtă ( $\gamma' + \epsilon$ ), ceea ce le conferă fragilitate, conducând astfel la proprietăți nefavorabile în exploatare.



Dedesubtul stratului de combinație se găsește stratul de difuzie, în care azotul, în funcție de conținutul aliajului fiecărui material feros, precum și al condițiilor de răcire în soluția solidă, se prezintă sub forma nitrurilor de fier  $Fe_4N$ , a nitrurilor sau al carbonitrurilor elementelor de aliere.

Grosimea stratului de difuzie depinde foarte mult de tipul oțelului, de durata și de temperatura de nitrurare, așa cum s-a arătat deja. Și componența stratului de difuzie poate varia prin aplicarea diferitelor procedee de nitrurare. În timp ce în urma nitrurărilor în gaz și în baie de săruri se obține o nitrurare puternică a limitelor grăunților în zona periferică a stratului de difuzie (precipitarea nitrurilor și a carbonitrurilor la limitele grăunților, cu efect de rigidizare), la nitrurarea ionică în amestec de amoniac sau azot – hidrogen aceste nitruri de la limita grăunților, aflate în zona periferică a stratului de difuzie, ar putea fi suprimate.

#### **4.2 Rezistența și grosimea stratului**

Rezistența și prin aceasta duritatea stratului de combinație variază în funcție de compoziția aliajului materialului feros, între 700 și 900 HV<sub>0,01</sub> la oțeluri nealiante și 1000...1500 HV<sub>0,01</sub> la oțeluri aliate. Grosimea stratului obținut la nitrurările în baie și în gaz este situată între 10 și 25 μm (tabelul 4.3) [94].



**Tabelul 4.3** Duritățile și grosimile de strat la nitrurare pentru diferite tipuri de oțeluri și fonte

Material	Duritatea miezului, HV	Duritatea superficială, HV	Grosime, $\mu\text{m}$	
			Strat de compuși	Strat total
<b>Oțeluri carbon</b>				
1010 – A 510/2000 (C10E – EN 10084/1998)	180	250 – 400	10 – 15	375 – 750
1038 – A 568 – 2000	190	250 – 400	10 – 15	375 – 750
1060 – A 510/2000 (C60 – EN 10250/1999)	200	250 – 400	10 – 15	375 – 750
<b>Oțeluri slab aliate</b>				
3310 – A 519/1996 (15NiCr13 – EN 10084/1998)	210	500 – 700	7,5 – 10	300 – 375
4140 – A 320/1999 (42CrMo4 – EN 10269/1999)	300	550 – 650	5 – 7,5	375 – 625
5132 – A 29/1999 (34Cr4 – EN 10250/3/1999)	300	500 – 600	5 – 7,5	375 – 625
<b>Oțeluri pentru deformare la cald</b>				
H13 – A 681/1994 (X40CrMoV5-1 – EN ISO 4957/1999)	407	900 – 1150	2,5 – 5	250 – 375
H21 – A 681/1994 (X30WCrV9-3 – EN ISO 1957/1999)	450	900 – 1150	5 – 7,5	250 – 500
<b>Oțeluri pentru deformare la rece</b>				
D2 – A 681/1994 (X153CrMoV12 – EN ISO 4957/1999)	646	950 – 1200		125 – 250
D3 – A 681/94 (X210Cr12 – EN ISO 4957/1999)	513	850 – 1100		75 – 175
<b>Oțeluri rapide</b>				
M2 – A 600/92 (HS6-5-2C – EN ISO 4957/1999)	820	900 – 1200		25 – 100
<b>Oțeluri inoxidabile</b>				
304 – A 479/2000 (X5CrNi18-10 – EN 10250-4/2000)	180	950 – 1200		75 – 125
420 – A 473/1999 (X20Cr13 – EN 10151/1999)	290	900 – 1100		125 – 250
<b>Fonte cenușii</b>				
cu grafit lamelar	260	350 – 400	10 – 15	125
cu grafit nodular	260	400 – 600	10 – 15	125 – 250

Stratul de combinație  $\varepsilon$  poate avea, la nitrurarea ionică, o grosime între 3 și 30  $\mu\text{m}$ . Grosimea stratului de compus  $\gamma'$ , variază în funcție de tratamentul de nitrurare ionică, între 1 și 8  $\mu\text{m}$ . De asemenea, la nitrurarea ionică se poate obține, dacă se dorește, o suprimare completă a stratului de compuși, prin reglarea concentrației de azot de la suprafața piesei și prin rata pulverizării. Aceasta, însă, prezintă importanță, în special, pentru sculele așchietoare.

Duritatea și grosimea stratului de difuzie depind, de asemenea, de conținutul elementelor de aliere ale materialului. În general, se poate spune că, pentru aceleași condiții



de nitrurare (aceleași temperaturi și aceeași durată) duritatea stratului de difuzie cu conținutul ridicat în elemente de aliere crește, în timp ce, grosimea stratului de difuzie scade. Astfel, la oțelurile nealiate, duritatea maximă este, în special, între 350 și 450 HV<sub>0,2</sub>, în timp ce, la oțeluri cu un conținut de Cr de aproximativ 5% (sau la un conținut de Al de aproximativ 1,5%) este mai mare de 1000 HV<sub>0,2</sub>. La oțelurile nealiate grosimea stratului de difuzie poate fi chiar mai mare de 1 mm. La oțelurile înalt aliate, în special, cele rezistente la coroziune și săruri, grosimile sunt peste 0,3 mm, obținându-se însă cu greutate.

Figura 4.2 arată scăderea durității cu grosimea stratului de difuzie la oțelul 16MnCr5 – EN 10084/1998, în cazul a trei tratamente de nitrurare. Duritatea superficială maximă este aproape egală la toate tratamentele de nitrurare. Se constată diferențe apreciable, în special, la mărimea adâncimii de nitrurare.

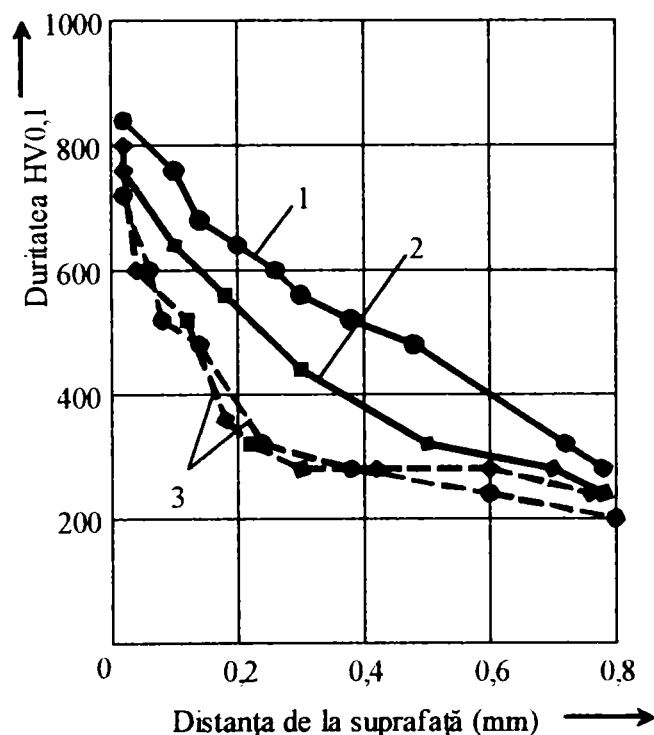


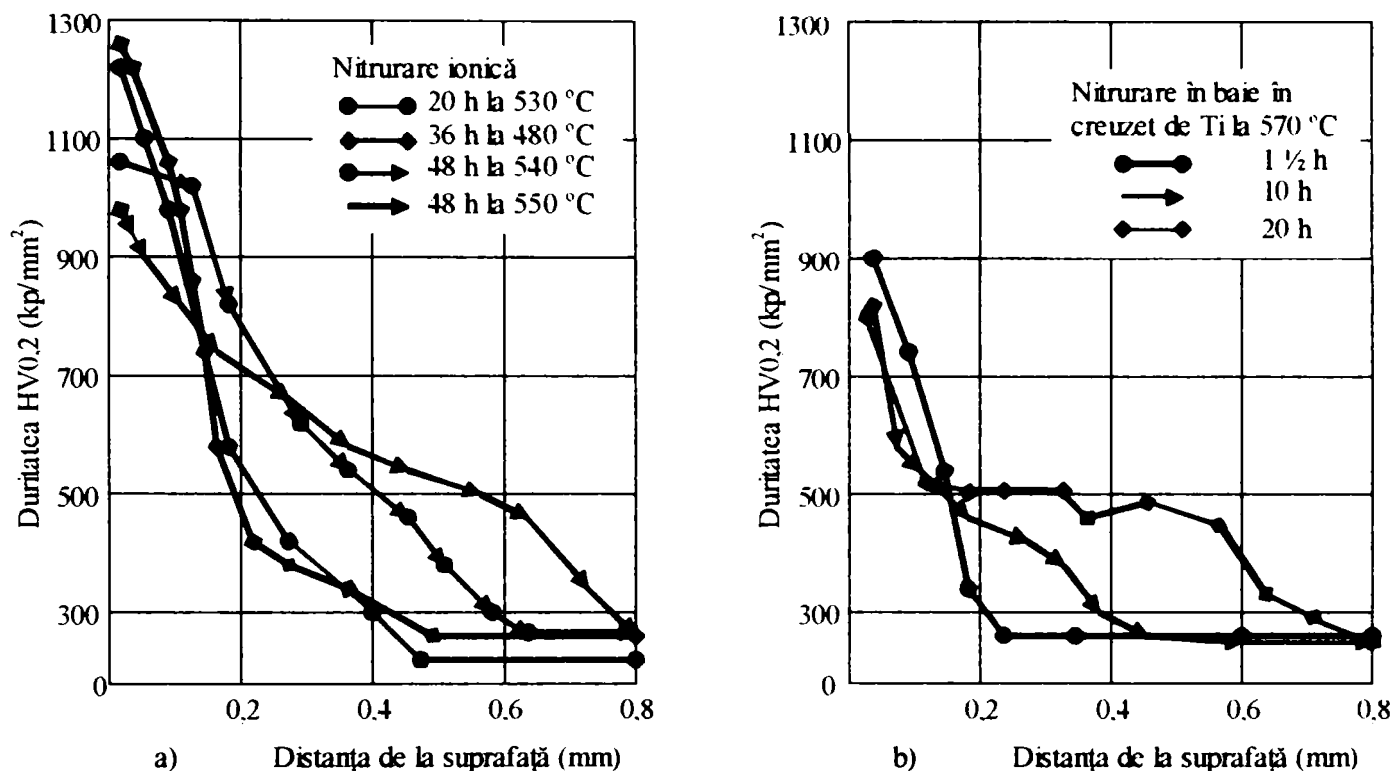
Figura 4.2 Curbe de duritate obținute prin diferite procedee de nitrurare în stratul de difuzie la oțelul 16MnCr5: 1 – nitrurare ionică, 20 h la 550 °C; 2 – nitrurare gazoasă, 60 h la 500 °C; 3 – nitrurare în băi de săruri, 1,5 h la 570 °C

Deoarece la nitrurarea ionică a pieselor din 16MnCr5 – EN 10084/1998 s-au obținut grosimi de până la 0,8 mm după 20 h, rezultă că difuzia azotului este mult mai rapidă la nitrurarea ionică, comparativ cu nitrurarea în gaz. În realitate, se obțin aceleași adâncimi ale durității stratului nitrurat la toate cele trei procedee de nitrurare, prin variația duratei de





menținere. Aspectul curbelor adâncimii durtății, structura straturilor de difuzie, cât și proprietățile în exploatare nu sunt însă, în nici un caz identice, așa cum arată și figura 4.3.



**Figura 4.3** Variația durtății la nitrurarea ionică a) și în baie de sare b), la oțelul 34CrAlNi7

În figura 4.3 a) se arată că, prin nitrurarea ionică a oțelului de nitrurare 34CrAlNi7 – EN 10085/1998, se pot obține și adâncimi de nitrurare mai mari de 0,8 mm la aceeași valoare a durtății în scădere, neputându-se obține structuri “suprasaturate”.

Încercările de nitrurare în baie de sare, pe durate mari de menținere, au arătat că se pot obține adâncimi mari de nitrurare dorite, însă curbele de variație a durtății cu adâncimea prezintă o scădere de duritate de tipul celei prezentate în figura 4.3. Aceasta a condus la obținerea straturilor periferice extrem de subțiri (sub 0,1 mm), cu durtăți de peste 700 sau 800 HV<sub>0.2</sub>. În aceste condiții, structura prezintă concentrații puternice de nitruri la limita grăunților. Cauzele acestor apariții ar permite, în cazul oțelurilor aliate, să se meargă până la temperaturi mari de 570 °C și cu un potențial mare de azot.

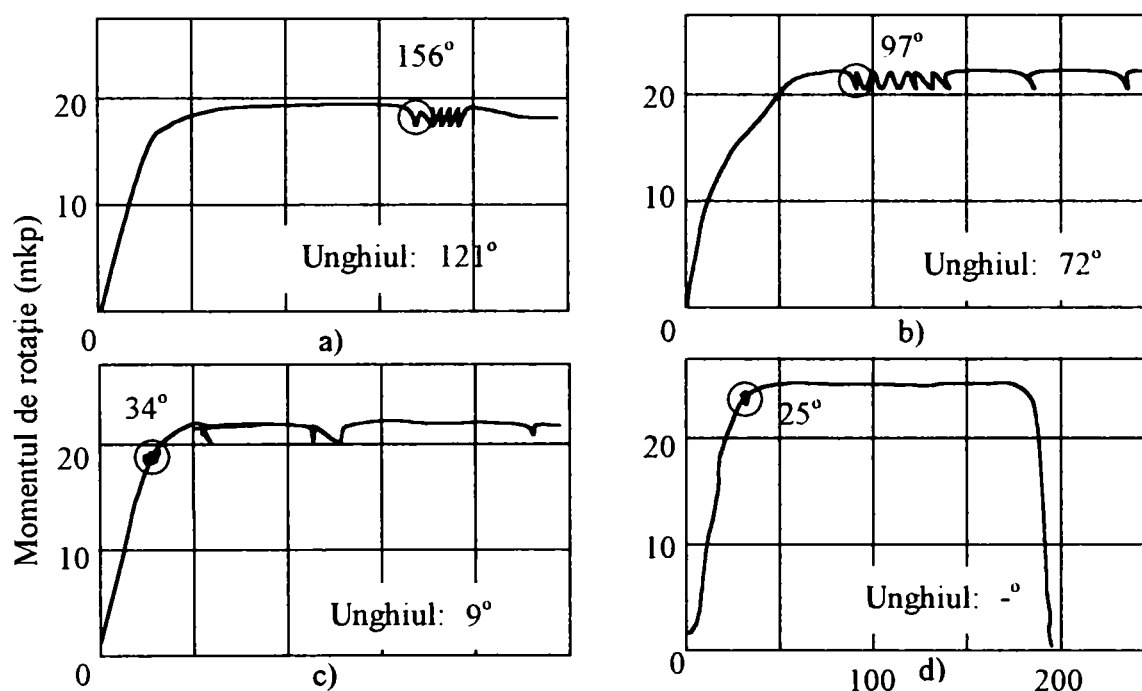
În ultimul timp, s-a arătat, de asemenea, că piesele nitrurate în baie de săruri pe o durată de 10 h, au o comportare proastă la uzare, la prelucrarea materialelor plastice, arătând ca și cum ar fi fost tratate numai 2 h.





### 4.3 Tenacitatea

În cele ce urmează, se prezintă exemplul oțelului 32CrMoV12-9 – EN 10085/1998, arătându-se influența covârșitoare a structurii unui strat nitrurat asupra fragilității. În acest scop, au fost solicitate la torsiune probe cu straturi nitrurate ( $\phi = 10$  mm,  $l = 200$  mm) cu grosimi foarte asemănătoare (0,9 – 0,22 mm) și durități (760 – 820 HV1), până ce stratul nitrurat s-a fisurat. Unghiul de torsiune la care apare prima ruptură se poate stabili cu ajutorul unui microfon de sunet în corpuri solide, putându-se determina apoi, din diagramele momentelor de rotație – unghi de torsiune (figura 4.4).



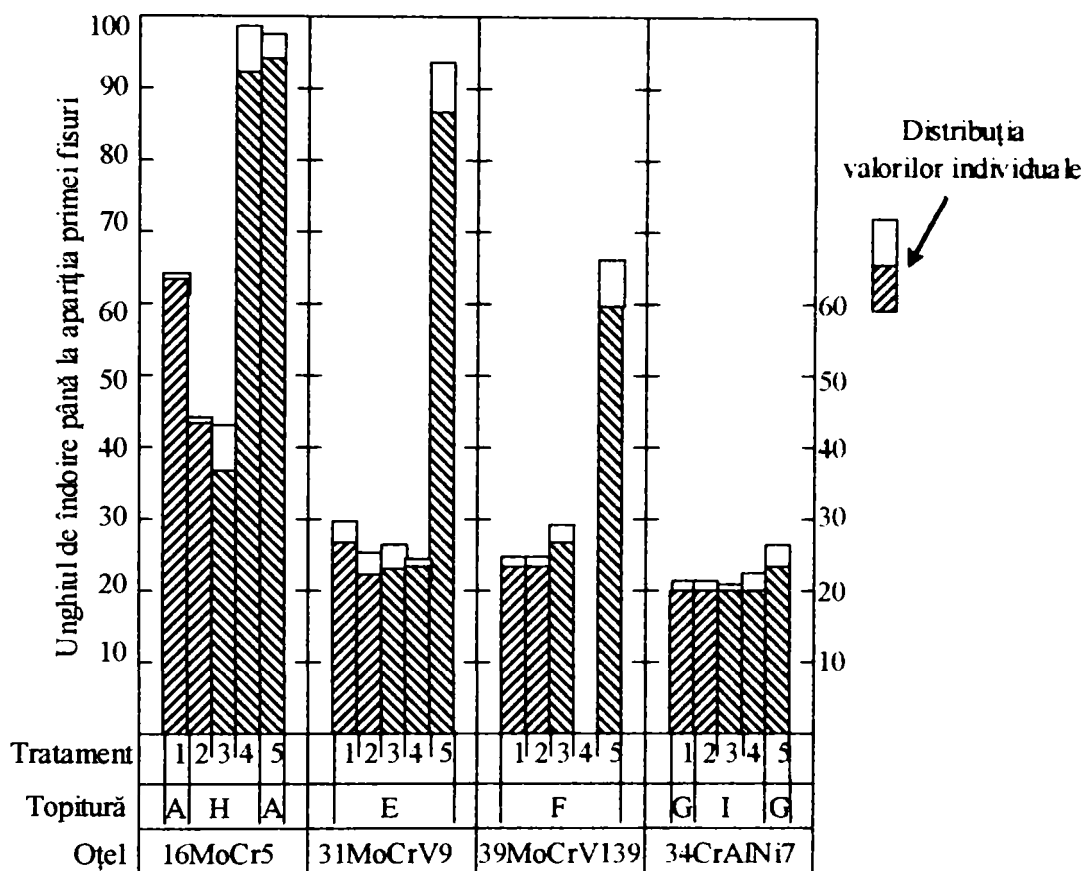
**Figura 4.4** Rezultate ale măsurătorilor la torsiune aplicate straturilor nitrurate ale oțelului 32CrMoV12-9; duritatea suprafeței: HV 1kp; 760 – 82 kp/mm<sup>2</sup>; adâncimea stratului nitrurat: 0,19 – 0,22 mm; a) nitrurat ionic 24 h, 510 °C; grosimea zonei de combinație: --; strat de difuzie fără nitruri: 90 μm; b) nitrurat ionic 24 h, 510 °C; grosimea zonei de combinație  $\gamma'$ : 5 – 7 μm; strat de difuzie fără nitruri: 55 μm; c) nitrurat ionic 24 h, 510 °C; grosimea zonei de combinație  $\epsilon$ : 12– 16 μm; strat de difuzie fără nitruri: --; d) nitrurat în gaz 36 h, 500 °C; grosimea zonei de combinație  $\epsilon$ : 8 – 11 μm; strat de difuzie fără nitruri: --

Diagramele din figura 4.4 arată faptul că, la oțelul 32CrMoV12-9, straturile de combinație polifazice ( $\gamma' + \epsilon$ ) sunt foarte casante la un unghi de torsiune de 25°, cele monofazice ( $\epsilon$ ) sunt ceva mai tenace (unghiul primei rupturi este la 34°), iar straturile monofazice  $\gamma'$ , obținute numai la nitrurarea ionică, sunt extrem de tenace, cedând la un unghi de torsiune de 97°.



Tenacitatea stratului nitrurat se poate mări și mai mult printr-o suprimare totală a stratului de combinație.

Diferențe asemănător de mari ale tenacității straturilor nitrurate se prezintă și ca rezultat al altor cercetări întreprinse [95] și prezentate în figura 4.5. Se arată o posibilă dependență între gradul de decarburare și cel de carburare, care poate fi asociat nitrurării și tenacitatea stratului nitrurat.



**Figura 4.5** Deformabilitatea plastică a diferitelor straturi nitrurate determinată prin unghiul la care apare prima fisură la încercarea de torsiune: 1, 2 – nitrurat în gaz 36 h, 500 °C în NH<sub>3</sub>; 3 – nitrurat ionic 24 h, 510 °C în amestec de N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>; 4 – nitrurat ionic 24 h, 510 °C în amestec de N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>; 5 – nitrurat ionic 24 h, 510 °C în amestec de NH<sub>3</sub>

Interesant este faptul că, tenacitatea depinde și de gradul de aliere al materialului de bază, după cum se prezintă în figura 4.5. Cel mai bine se pot deforma straturile nitrurate ale oțelului 16MnCr5 – EN 10084/1998, deformările cele mai reduse obținându-se la 34CrAlNi7 – EN 10085/1998. În afară de acestea, se arată că straturile nitrurate obținute prin nitrurare ionică, care au o zona de combinație  $\gamma'$ , tratamentul nr. 5, au prezentat cele mai mari valori ale tenacității în împrejurările date la toate încercările oțelurilor.



#### **4.4 Rezistența la uzare**

După cum arată și experiența acumulată în practică, solicitările de uzare sunt foarte complexe, astfel încât rezultatele măsurătorilor efectuate pe mașinile de uzură (cum ar fi Faville – Levally, Siebel – Kehl, Skoda – Sawin, etc.) pot fi acceptate doar cu anumite rezerve. În cazul măsurătorilor de uzură efectuate pe mașinile de testare, trebuie verificat dacă solicitările cauzatoare de uzură și mecanismele de uzare ale piesei ce se verifică, corespund sau cel puțin se aseamănă piesei existente în practică. O solicitare de uzură rostogolire – alunecare, așa cum se întâlnește la cele mai multe mașini și piese de motoare (spre exemplu, la arborii cu came, pârghii basculante, cămași de cilindru, roți dințate, etc.) se poate determina foarte bine pe o mașină de încercări la uzură Amsler. Aici, două role ( $\phi = 30 - 40$  mm; lățimea suprafeței de rulare  $l = 10$  mm) rulează în același fel, prin alunecare, una peste cealaltă. Viteza lor de rulare, respectiv viteza relativă și forța de presare  $F$  se pot regla.

Rezultatele măsurătorilor, prezentate în figura 4.6, se referă la role nitrurate prin același procedeu și executate din același material. Ca lubrifianț, s-a folosit ulei marca Shell – Vitrea 41. Viteza relativă a fost de 1,43 m/s. Puterea a fost mărită după fiecare 50000 rotații cu câte 20 CP, de la 40 CP până la 100 CP.

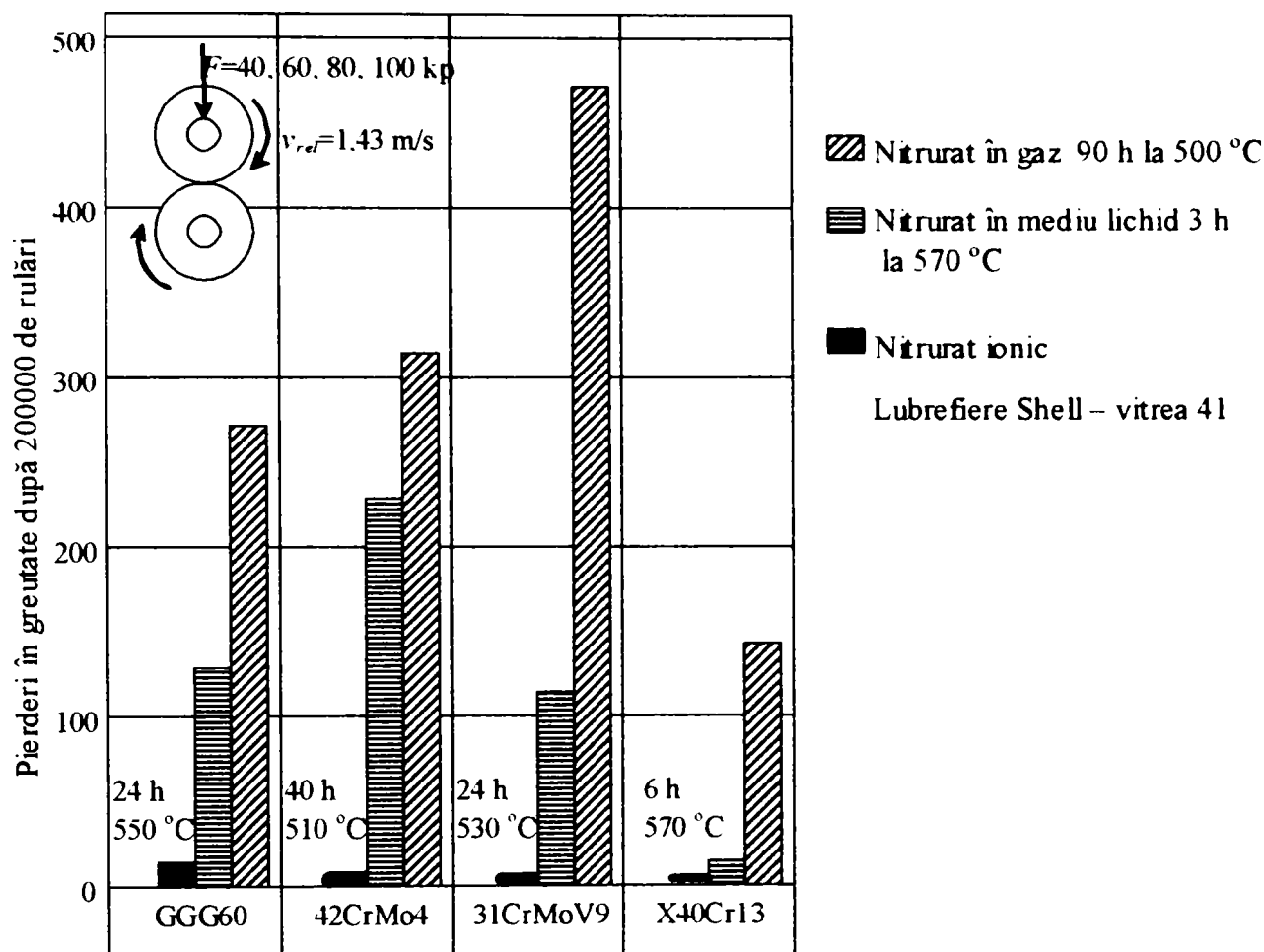


Figura 4.6 Situație comparativă privind rezistența la uzare (proba Amsler) a probelor nitrurate în gaz, ionic și mediu lichid

Ca măsură a uzurii, s-a considerat pierderea în greutate a ambelor probe după 200000 rotații, pentru oțelurile 43CrMo4 – EN ISO 683-17/04/2000), 31CrMoV9 – EN 10085/1998, X40Cr13 – EN 10088-3/08/1995 și fontă cu grafit nodular tip GGG60.

Valorile mari ale uzurilor descoperite la probele nitrurate în gaz timp de 90 h la 500 °C (pierderi în greutate de, în medie, 300 mg), denotă clar că straturile de combinație polifazice și zonele de difuzie cu nitruri precipitate la limita grăunților nu sunt potrivite pentru astfel de solicitări de uzură, rezultând că piesele nitrurate în gaz trebuie rectificate înainte de întrebuințare.

Probele solicitate la uzură, nitrurate în baie de sare 3 h la 570 °C prezintă o comportare mai bună, ca urmare a stratului lor monofazic de compus  $\epsilon$ . Rezultatele optime se obțin însă abia atunci când se suprimă și nitrurile de la limita grăunților stratului de difuzie, așa cum arată probele nitrurate ionic supuse la solicitarea de uzură.



Astfel de rezultate ale testelor de uzură au corespuns și cu măsurătorile din practică, efectuate pe piesele de mașini (vezi exemplul arborilor cotiți a căror durabilitate s-a prelungit o dată și jumătate mai mult după aplicarea tratamentului de nitrurare ionică la 580 °C – 1 h sau 2 h la 570 °C la nitrurarea în baie de săruri – figura 4.7).

**Figura 4.7** Arbori cotiți nitrurați ionic

#### **4.5 Rezistența la oboseală**

Prin tratamentul de nitrurare crește semnificativ atât limita, cât și rezistența la oboseală a pieselor de mașină solicitate alternativ.

Îmbunătățirile pot fi până la 100% la oțelurile nealiat (comparativ cu cele în stare normalizată), la cele aliate ajungând până la 85% (în comparație cu cele îmbunătățite). Aceasta poate fi verificată pe probele solicitate la încovoiere cu rotire sau la piese din practică, cum ar fi, spre exemplu, arborii cotiți.

Diferențele dintre fiecare procedeu de nitrurare nu sunt foarte mari în privința creșterii rezistenței la oboseală. Nitrurarea în baie de sare furnizează valori bune ale rezistenței la oboseală la piesele din oțeluri nealiat. Aceste valori scad însă la piesele din oțeluri aliate, ca urmare a temperaturii nefavorabile de tratare de 570 °C, comparativ cu nitrurarea în gaz și cu cea ionică.

Valorile rezistenței la oboseală la piciorul dintelui, măsurate la roțile dințate din GGG70 și 31CrMoV9 – EN 10085/1998, confirmă aceasta (figura 4.8).

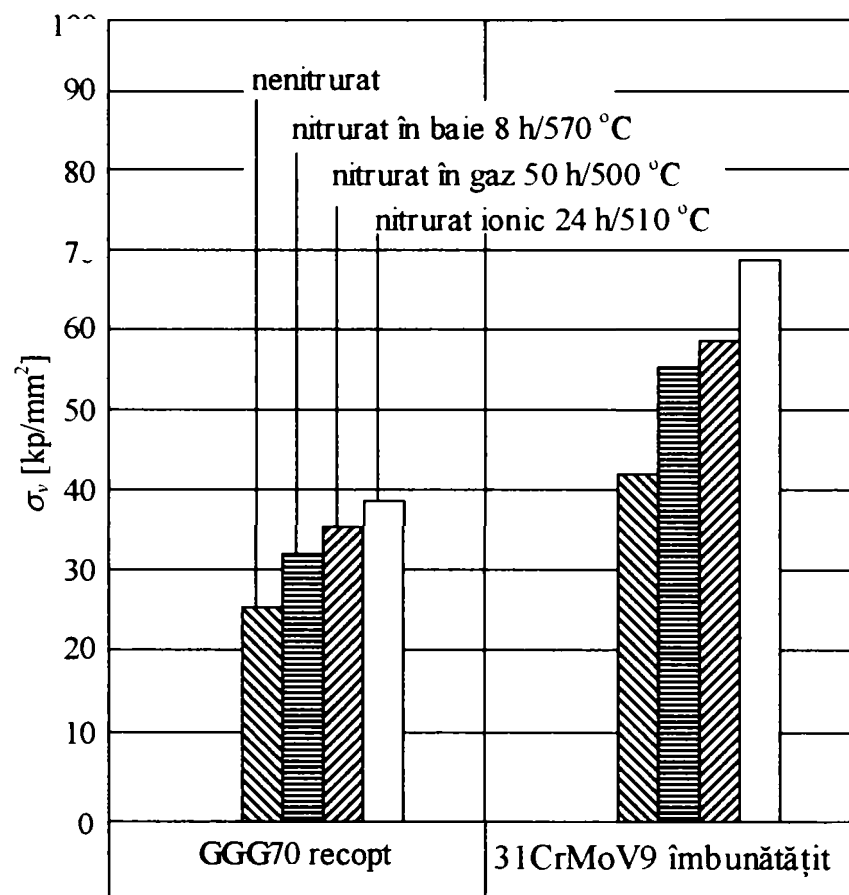


Figura 4.8 Rezistența la oboseală a piciorului dintelui la roți dințate din GGG70 și 31CrMoV9 în stare nitrurată și nenitrurată

#### 4.6 Rezistența la coroziune

Printr-un tratament de nitrurare nu se poate obține o rezistență la coroziune sau chiar la atacul cu acizi. Prin tratamente de nitrurare aplicate oțelurilor nealiate, slab aliate, până la mediu aliate, s-au obținut însă anumite creșteri singulare ale rezistenței la coroziune față de acțiunea atmosferei și a acizilor organici.

Nu se poate realiza o ordine a importanței procedeeleor de nitrurare, deoarece la acestea, singurul lucru care are importanță este obținerea unui strat de combinație suficient de gros, uniform și fără fisuri.

Aceasta este posibil la toate cele trei procedee, cu mențiunea că rezistența la coroziune a oțelurilor anticorozive și antiacide scade considerabil prin fiecare procedeu de nitrurare.



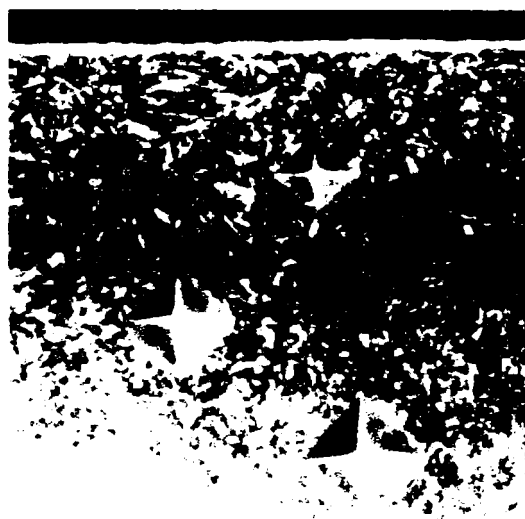
#### 4.7 Tehnologii de obținere a straturilor nitrurate multiple

O creștere spectaculoasă a rezistenței la uzare a pieselor auto nitrurate ionic se poate obține prin combinarea nitrurării ionice cu alte tratamente termochimice sau prin aplicarea ulterioară a unor straturi peste stratul nitrurat. [96]

Grupul THERMAL – LYON utilizează pentru mărirea rezistenței la gripare, la uzare și la oboseală un tratament de sulfonitrocarburare în plasmă (TRIONIC 100).

Tratamentul permite difuzia N, S, și C (disociate în plasmă) la temperaturi de 450 – 570 °C.

Se obține astfel un strat de compuși (strat alb) de 5 – 30 μm format din nitruri  $\epsilon$  și sulfură de fier cu duritate ridicată și comportare bună la frecare. Stratul de difuzie asigură o bună rezistență la oboseală și la uzare (figura 4.9).



**Figura 4.9** Duritatea în stratul de difuzie la un oțel aliat

Procedeul este recomandat pentru piese de tipul arborilor cu came, roților dințate, ghidaje, tije, axe și pentru matrițe de forje sau de injectat mase plastice și înlocuiește procedeul de sulfonitrocarburare în băi de săruri THERMI – SULFO, prin care se obține un strat poros, care împiedică microsudurile din suprafață, mărind rezistența la gripare (figura 4.10).[97]



Figura 4.10 Strat poros

Proprietățile la coroziune și uzare a pieselor nitrurate pot fi îmbunătățite mai departe prin însumarea treptelor de tratare la programul de nitrurare.[98] Treapta de oxidare este adăugată pentru a produce un strat negru de  $Fe_3O_4$  îmbunătățind rezistența la coroziune. Rezistența la coroziune este îmbunătățită fără rugozitatea semnificativă a suprafeței, acest proces neneccitând prelucrare adițională sau trepte de lustruire după tratament. Treapta CVD este necesară pentru acoperirea dură cu TiN pentru oțelurile aliate călite și revenite și creșterea rezistenței la uzare. Nitrurarea asigură o bună legătură pentru aceste straturi de acoperire. Depunerea acestor straturi poate fi completată în timpul unui singur ciclu în retorta de nitrurare prin simpla extindere a programului procesului. Tehnologia cu plasmă Eltropuls cu impuls de aprindere brevetat oferă stabilitatea controlată a plasmei în toate condițiile, ce permite toate procesele de nitrurare: nitrurare, nitrocarburare, nitrurare liberă cu strat de compuși și straturi combinate, post oxidare și acoperire dură.

#### *Oxidarea Pulsplasma*

Straturile de oxizi ale componentelor din oțel cresc în importanță în inginerie, deoarece:

- oferă protecție remarcabilă la coroziune;
- intensifică rezistența la uzare;
- reduce mult coeficientul de frecare al suprafeței;
- îmbunătățește aspectul suprafeței de la un gri închis la negru.





Straturile de oxizi produse prin oxidarea în plasmă [99] sunt comparabile cu cele de la alte procese de nitrurare și au următoarele proprietăți:

- culoare neagră;
- grosime de aproximativ 1  $\mu\text{m}$ ;
- au în compoziția chimică  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetită).

Pentru producerea straturilor de oxizi, componentele sunt mai întâi nitrurate în plasmă. Pentru aceasta, piesele sunt plasate într-o incintă vidată, izolată electric de o carcasă suport. La o presiune de 100 – 500 Pa, o tensiune DC pulsantă de câteva sute de volți este aplicată între piesele de tratat și pereții vasului, cu piesa de tratat conectată ca și catod. O descărcare luminiscentă de curent înalt se dezvoltă apoi prin ionizarea gazului în incintă.

Temperaturile tratamentului în timpul nitrurării sunt de la 500 la 550°C. Pentru oxidarea următoare este necesară producerea unui strat de compuși de grosime 5 – 10  $\mu\text{m}$ ; aceasta se poate realiza printr-o alegere corespunzătoare a parametrilor procesului și a compoziției gazului.

Oxidarea cu plasmă are loc imediat după nitrurare, fără a necesita întreruperea procesului care se derulează. Din punct de vedere fizic, același proces are loc în timpul oxidării în plasmă ca în timpul nitrurării, exceptând faptul că gazele procesului sunt schimbate, iar parametrii procesului sunt adaptați. Treapta de oxidare se desfășoară în aproximativ 30 minute și urmează imediat după tratamentul de nitrurare; poate fi controlată cu precizie grosimea stratului format.

În multe domenii ale ingineriei prelucrătoare, straturile de oxizi sunt comparate cu alte acoperiri, cum ar fi acoperirea galvanică cu crom dur a cilindrilor hidraulici din industria hidraulică. În astfel de cazuri, rezistența la coroziune a stratului de oxid este, în mod normal, mai ridicată decât cea prin acoperire galvanică cu crom dur având numai jumătate de coeficient de frecare la frecare uscată.

#### *Echipamente pentru straturi combinate*

Retorta de vid este încălzită de un cuptor cu muflă cu elemente de rezistență. Cuptorul folosește zone multiple, controlate independent, pentru a garanta temperaturi uniforme procesului.[100] Cuptorul cu muflă poate menține temperaturile de operare pentru nitrurare, oxidare și acoperire independente de toți ceilalți parametri ai procesului. Rețeaua electrică include formarea rețelei de impulsuri brevetată pentru alimentarea cu potențial electric dintre piesă și retorta de vacuum pentru a susține descărcarea luminiscentă. Folosirea rețelei

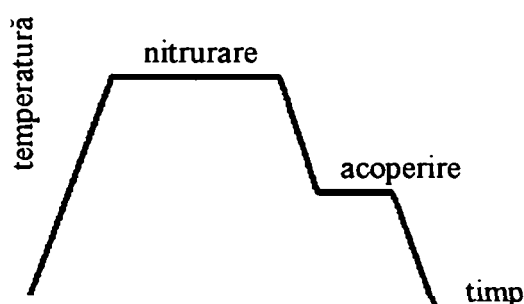


electrice cu plasmă pulsantă, controlarea raportului ciclic al energiei de intrare permite reglarea temperaturilor procesului independent de celelalte puncte de referință. Încălzitoarele independente ale cuptorului cu muflă pot apoi să stabilească temperaturile de nitrurare, post oxidare și acoperire dură, care sunt sigur sub temperatura de revenire a pieselor din aliaj de oțel. Multe aplicații industriale prezintă importanța impulsului de aprindere pentru rezultate metalurgice de calitate înaltă.[101]

#### *Nitrurarea în plasmă plus post oxidarea*

Nitrurarea și oxidarea în procesul cu două trepte este bine cunoscută, putând fi realizată cu mai multe tipuri de multe instalații.

O procedură mai nouă permite nitrurarea și post oxidarea într-o singură treaptă, fără alte prelucrări mecanice sau șlefuiți între sau după procesele combinate. Procesul post oxidare asistat în plasmă pentru realizarea unui strat negru de  $Fe_3O_4$  pe piesele nitrurate, a fost dezvoltat de ELTRO GmbH.[102] Acest proces se prezintă în figura 4.11.



**Figura 4.11** Ciclograma procesului de nitrurare într-o singură treaptă și post oxidarea

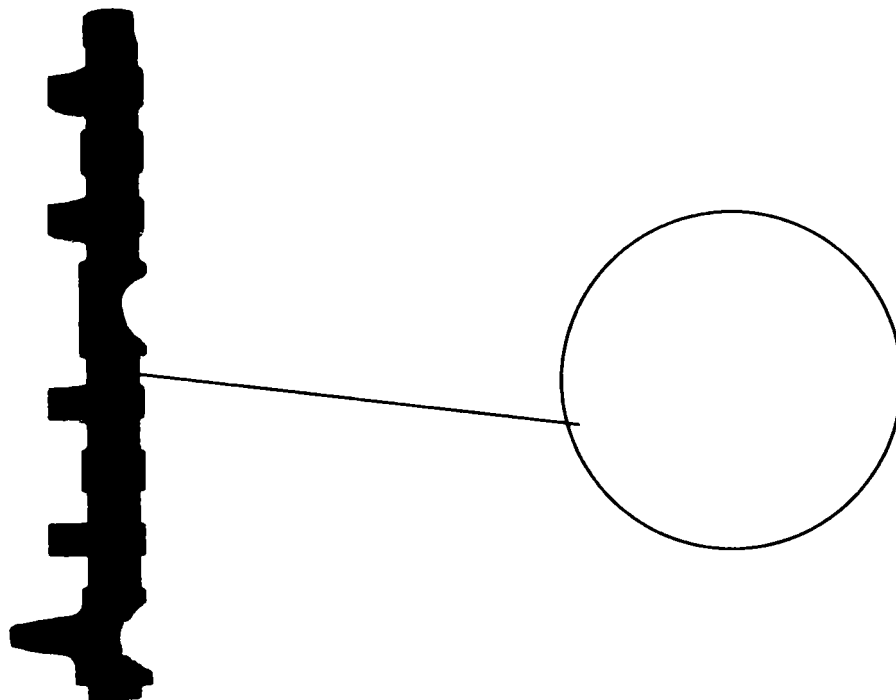
Temperatura de nitrurare cea mai înaltă, compatibilă cu proprietățile miezului, poate fi folosită pentru a scurta ciclul. Temperatura de nitrurare într-un caz a fost de aproximativ 570 °C. Creșterea stratului de  $Fe_3O_4$  este controlată de difuzie și temperaturile ridicate, accelerând treapta de oxidare. Figura 4.12 prezintă stratul de  $Fe_3O_4$  pe un oțel austenitic nitrurat.



**Figura 4.12** Stratul de  $Fe_3O_4$  pe un oțel austenitic nitrurat



În figura 4.13 se prezintă aspectul general și al suprafeței pentru un arbore cu came tratat prin această tehnologie.



**Figura 4.13** Arbore cu came după nitrurare și oxidare

#### *Nitrurarea în plasmă plus acoperirea dură [TiN]*

Sculele nitrurate în plasma sunt utilizate cu succes în multe aplicații tribologice (care necesită rezistență la uzare). A fost studiată și combinarea straturilor superficiale, care conțin o acoperire dură pe straturi de oțel nitrurate în plasmă pentru intensificarea mai departe a vieții sculei și productivității.[103,104] Avantajele straturile combinate de TiN la nitrurarea în plasmă sunt binevenite.

Stratul de acoperire TiN este suportat mai bine de un substrat superficial mai dur nitrurat în plasmă. Adeziunea este mai bună dacă depunerea de TiN poate fi completată imediat după curățarea prin stropire și nitrurarea în plasmă, în timpul aceleași încălziri, prin extinderea programului de tratament.

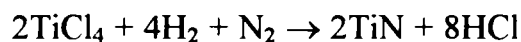
Tensiunile reziduale de compresiune introduse prin nitrurarea în plasmă îmbunătățesc comportamentul de lucru și comportamentul în aplicație devine mai puțin dependent de compoziția aliajului piesei.

Aceste procese noi PACVD au fost proiectate pentru a îmbunătăți adeziunea stratului de TiN și de a fi mai puțin sensibile la linia de vizare în timpul depunerii. Această alternativă PACVD este un proces de acoperire necondus, important pentru piese cu geometrii complexe



ca matrițele de extrudare, broșele și frezele modul, ferăstraiile metalice de crestă, burghiile elicoidale și cuțitele de filetat, freze și frezele deget, alezoarele și frezele conice.

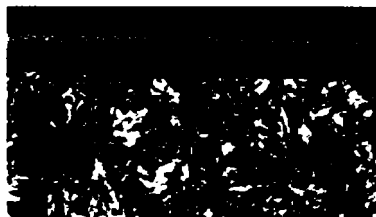
Comparativ, sistemele termice CVD utilizează precursori pentru acoperire lichizi sau gazoși pentru legarea reacțiilor chimice pe suprafețe relativ fierbinți, cu următoarea reacție:



Temperaturile de tratament trebuie să fie relativ ridicate, pentru a accelera cinetica acestor reacții CVD. Oricum, temperaturile de depunere, suficient de înalte pentru a realiza o viteză rezonabilă pentru aceste reacții sunt, în general, suficient de mari pentru a cauza o schimbare nedorită în proprietățile miezului pieselor acoperite. Prezența plasmăi poate fi folosită pentru a depăși problema reacțiilor cinetice ale CVD termic, permițând folosirea temperaturilor scăzute pentru acoperire, între 400 – 550 °C, care nu vor modifica proprietățile miezului.

Filmele de TiN sau TiC sunt depuse pe straturile de oțel nitrurat prin PACVD, cu diferite amestecuri de gaz. Straturile superficiale combinate sunt produse prin combinarea descărcării luminiscente la nitrurare și PACVD, în timpul aceluiași ciclu de proces în aceeași cameră de reacție, prin simpla extindere a programului de tratament. [105]

Figura 4.14 prezintă o secțiune transversală a unui strat superficial pentru un oțel aliat supus nitrurării în plasmă și urmată de depunerea unui strat de TiN.



**Figura 4.14** Stratul de gradient pe 42CrMo4

Figura 4.15 prezintă o secțiune transversală a porțiunii active a unei freze realizată din 205Cr115 (X210Cr12, EN ISO 49579/1999) după nitrurarea în plasmă și depunerea unui strat de TiN.



**Figura 4.15** Freză nitrurată și acoperită cu TiN

Avantajul acestor tehnici PACVD este capacitatea de integrare a tehnologiei de nitrurare în plasmă în procesul de acoperire. Cu combinarea ambelor procese, sunt câteva limite în selectarea materialului pentru piese. Pot fi acoperite cu succes oțelurile slab aliate după nitrurarea în plasmă.



## Cap. 5 FONTE ȘI OȚELURI NITRURATE UTILIZATE ÎN CONSTRUCȚIA REPERELOR DE AUTOMOBILE

### 5.1 Fonte cenușii

Caracteristicile specifice fontelor cenușii (turnabilitate, prelucrabilitate prin așchiere, coeficientul redus de frecare, capacitatea de a atenua vibrațiile) au impus această clasă de materiale pentru realizarea unor piese de autoturisme.

Nitrurarea ionică poate asigura o sporire importantă a proprietăților de exploatare ale reperelor realizate din fontă care lucrează în condiții de solicitare la uzare (tabelul 5.1).

**Tabelul 5.1** Proprietăți de exploatare ale reperelor din fonte cenușii

Material	Duritatea miezului, HV	Duritatea superficială, HV	Grosimea, $\mu\text{m}$	
			Strat de compuși	Strat total
Fonte cenușii				
cu grafit lamelar	260	350 – 400	10 – 15	125
cu grafit nodular	260	400 – 600	10 – 15	125 – 250

#### 5.1.1 Fonte cu grafit nodular pentru repere de autoturisme

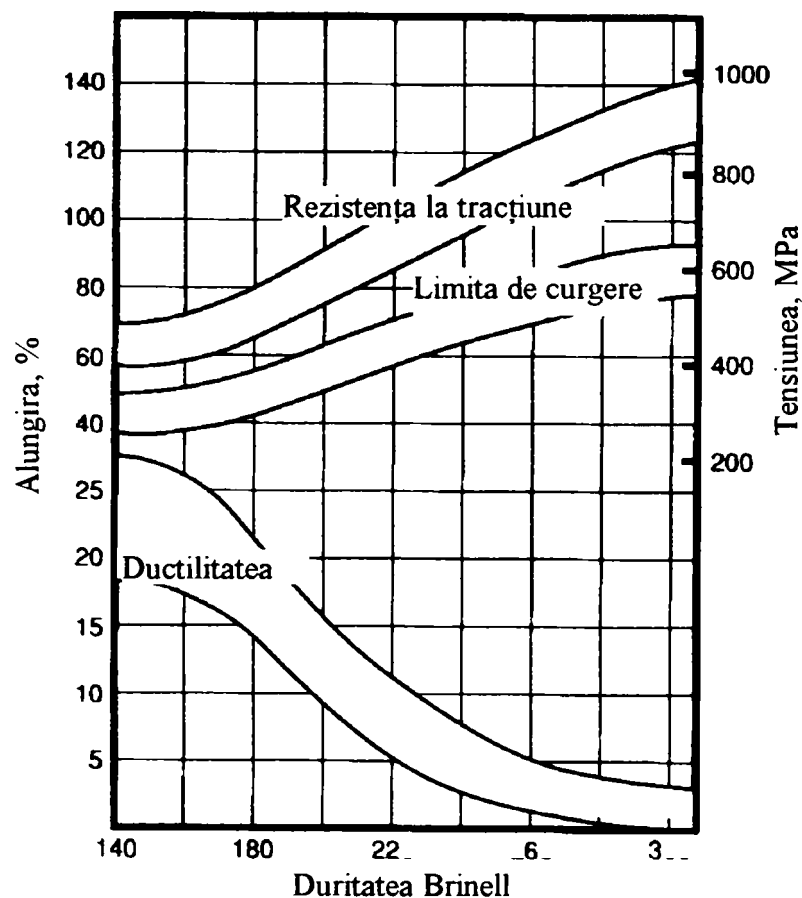
Fontele cu grafit nodular sunt o familie de fonte de turnare, care prezintă un spectru larg de proprietăți, obținute prin controlul microstructurii. Cele mai importante și distincte particularități ale fontelor nodulare sunt date de prezența grafitului sferoidal, care acționează ca un „opritor de fisuri” și dă fontelor ductilitate și tenacitate superioare față de celelalte fonte de turnare, comparabile cu cele ale multor oțeluri turnate și forjate. Matricile în care este dispersat grafitul nodular joacă un rol semnificativ în determinarea proprietăților.

Matricea controlată, se obține la aceste fonte în formă inițială, la turnare prin dirijarea compoziției și controlul procesului sau prin tratament termic. În acest mod se oferă producătorului opțiunea selectării clasei de fonte nodulare care asigură cele mai convenabile proprietăți.

Figura 5.1 ilustrează scara largă a durității, ductilității și rezistenței oferite de fontele cu grafit nodular. Ductilitatea înaltă a fontelor feritice (în stânga figurii) asigură alungirea de 18...30% cu rezistențele la tracțiune echivalentă cu cea a oțelurilor cu conținut scăzut de



carbon. Fontele nodulare perlitice (în partea dreaptă a figurii) au rezistența la tracțiune peste 825 MPa, dar și ductilitate mai redusă. Fontele nodulare austenitice oferă chiar proprietăți mecanice mai bune și o bună rezistență la uzare asigurate de rezistența la tracțiune, ce depășește 1600 MPa. Fontele nodulare speciale aliate pot fi selectate încât să asigure rezistență la fluaj și oxidare la temperaturi înalte, rezistențe la cicluri termice, rezistențe la compresiune, proprietăți magnetice speciale sau tenacitate la temperaturi scăzute.



**Figura 5.1** Reprezentarea proprietăților la tracțiune funcție de duritatea Brinell

La utilizarea fontelor cenușii pentru realizarea de piese auto, inginerul producător trebuie să aibă acces la datele care precizează proprietăți mecanice (comportamentul elastic, rezistența, ductilitatea, duritatea, tenacitatea și rezistența la oboseală), proprietățile fizice (dilatarea termică, conductivitatea termică, căldura specifică, densitatea și proprietățile magnetice și electrice).



### 5.1.2 Proprietăți mecanice

#### Comportarea la tracțiune

Proprietățile la tracțiune ale fontelor nodulare convenționale, în special, limita de curgere, rezistența la tracțiune și alungirea sunt cele mai reprezentative și mai utilizate caracteristici mecanice. Multe dintre semnificațiile cuvintelor cheie pentru fontele cenușii descriu proprietăți ale diferitelor clase de fonte cenușii primare prin limita de curgere, rezistența la tracțiune și alungirea. Valorile durității, de obicei, oferite ca informații suplimentare și proprietățile la solicitări la șoc, specificate numai pentru clasele feritice, completează multe normative. Cele nespecificate, modulul de elasticitate și limita de proporționalitate sunt, de asemenea, criterii foarte importante pentru elaborare.

În figura 5.2 se prezintă curba de tensiune – deformație a fontelor cu grafit nodular la tensiune – deformație, care se află între oțel și fontă cenușie.

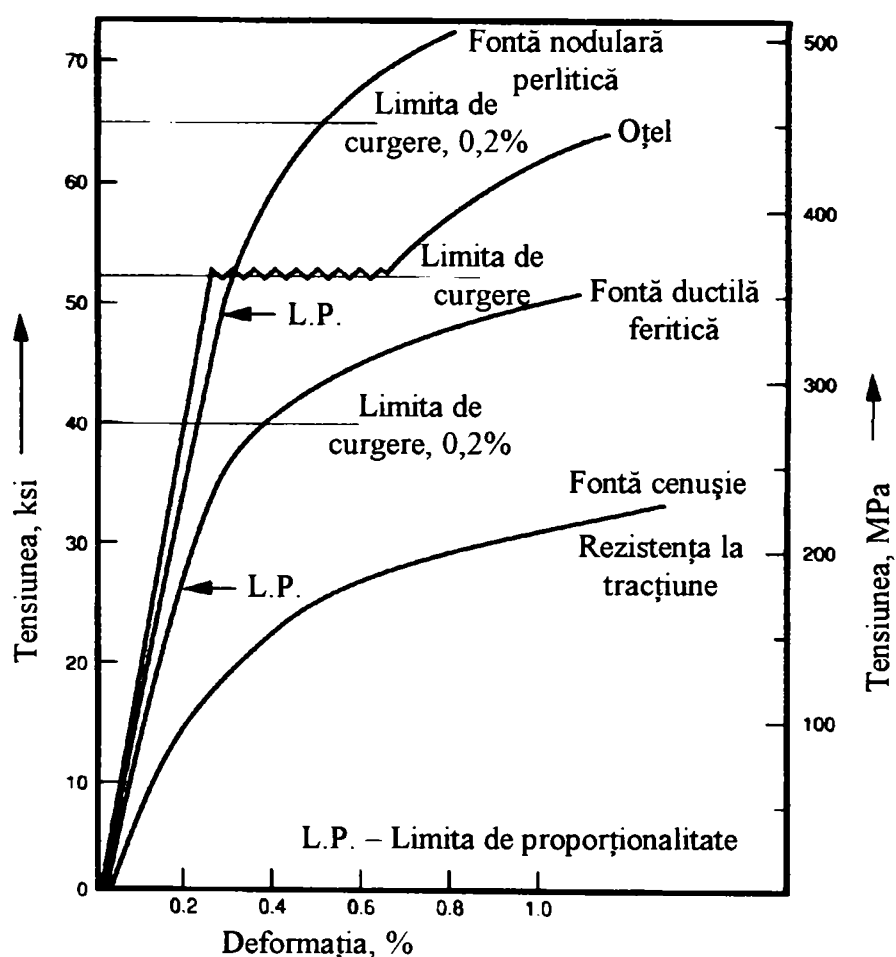


Figura 5.2 Curbe de încercare statică la tracțiune pentru oțeluri, fonte cenușii și fonte cu grafit nodular





Oțelurile recoapte sau normalizate prezintă comportament elastic până la punctul de curgere, unde deformația elastică poate avea loc pe neașteptate și fără orice creștere inițială a tensiunii de deformație plastică. La fontele cenușii, fulgii de grafit inițiază deformarea microplastică la tensiuni foarte slabe aplicate. Această deformație plastică cauzează înclinarea curbei tensiune – deformație, care descrește continuu și ca rezultat, fontele cenușii nu prezintă comportament elastic real.

Fontele cu grafit nodular prezintă o relație proporțională sau elastică tensiune – deformație, similară cu cea a oțelurilor, dar care este limitată de deformația plastică progresivă.

*Modulul de elasticitate* al fontelor cu grafit nodular variază de la 162 la 170 GPa. Modulul de elasticitate dinamic, măsurat la încercarea cu frecvență de rezonanță, este de 162...186 GPa.

*Coefficientul lui Poisson* (raportul dintre deformația elastică transversală și deformația elastică longitudinală, produse în timpul încercării la tracțiune), are o valoare obișnuit acceptată de 0,275.

*Limita de proporționalitate* (tensiunea maximă la care materialul prezintă comportament elastic), în cazul fontele cu grafit nodular, care prezintă o tranziție treptată de la comportamentul elastic la plastic este definită ca tensiunea necesară producerii unei deviații de la comportamentul elastic de 0,005%. Raportul dintre limita de proporționalitate și limita de curgere 0,2% este, de obicei, de 0,71 la clasele de fonte feritice, scăzând la 0,56 pentru clasele perlitice și martensitice de revenire.

*Limita de curgere* (tensiunea de încărcare la care un material începe să prezinte deformații plastice semnificative) pentru fontele cu grafit nodular variază, de regulă, de la 275 MPa la clasele feritice până la 620 MPa la clasele martensitice.

*Rezistența la tracțiune* (încărcarea maximă suportată de către material până la rupere) variază, în general, de la 414 MPa pentru clasele de fonte feritice la 1380 MPa pentru clasele martensitice.

*Alungirea* (creșterea permanentă în lungime) este folosită pe scară largă ca indicație primară a ductilității la tracțiune și este inclusă în multe normative care definesc fontele cu grafit nodular. De asemenea, include deformația localizată, care are loc înaintea ruperii. Fontele cu grafit nodular austenitice prezintă cea mai bună combinație de rezistență și alungire.



*Relațiile dintre proprietățile la tracțiune*

Influența puternică a morfologiei grafitului și structurii matricii asupra diferitelor proprietăți la tracțiune ale fontelor cu grafit nodular produce corelații semnificative între aceste proprietăți. În 1970 Siefer și Orths, într-un studiu statistic al proprietăților mecanice a unui număr mare de epruvete din fonte cu grafit nodular, au identificat o relație dintre rezistența la tracțiune și alungire, de forma:

$$(\text{rezistența la tracțiune, ksi})^2 \times (\text{alungirea, \%})^2 + 1000 = Q \quad (5.1)$$

unde  $Q$  este o constantă (1 ksi = 6,894 Pa).

Intervalul larg de valori ale lui  $Q$  indică o combinație a rezistenței înalte și alungirii și de asemenea, performanțele înalte ale materialului. Crews (1974) definește  $Q$  ca indicele de calitate pentru fontele cu grafit nodular.

Indicele de calitate și relația fundamentală dintre rezistență și alungire oferă înțelegerea comportării diferitelor fonte cu grafit nodular de turnătorie și fezabilitatea obținerii de combinații variate ale proprietăților. Indicele de calitate înalt a fost arătat ca rezultat al globulizării (nodularizării) înalte (procentul ridicat de particule de grafit sferice și aproape sferice), absența grafitului intracelular degenerat, înregistrarea de noduli numeroși, fracția volumică scăzută a carburilor, conținutul scăzut de fosfor (< 0,03%) și absența porozității interne. O turnare de înaltă calitate, care să asigure aceste caracteristici, poate fi produsă de o turnătorie de fonte cu grafit nodular competentă, modernă.

Figura 5.3 ilustrează dependența dintre rezistența la tracțiune și alungire pentru diferite nivele ale indicelui de calitate ( $Q$ ) ale fontelor cu grafit nodular.

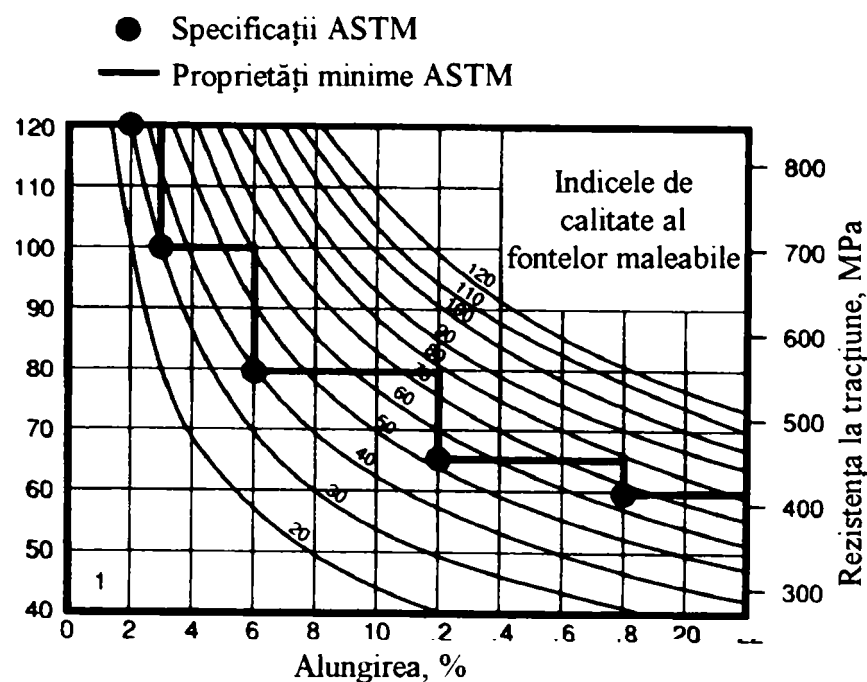


Figura 5.3 Semnificația indicelui de calitate în conformitate cu standardul ASTM A 536

Fiecare curbă este o linie de „izo – calitate” de-a lungul căreia valorile rezistenței – alungirii pot fi modificate prin tratamentele termice de recoacere sau normalizare, ce modifică matricea (proporția feritiei). Tratamentele termice de călire și revenire produc curbe similare, dar dispersate ușor către calitate înaltă. Acest concept de izo – calitate poate participa la aprecierea fontelor care au calitate suficientă. Spre exemplu, trei fonte diferite, toate având indicele de calitate 70, pot avea cuplul de valori rezistență – alungire de 64 ksi/ 17,1%, 70 ksi/ 14,3% și 78 ksi/ 11,5%.

La epruvetele din fonte cu grafit nodular se urmărește și relația inversă dintre rezistența la tracțiune și alungire. Clasele diferite de fonte și proprietățile lor sunt prezentate în figura 5.4 în ordinea calității relative.

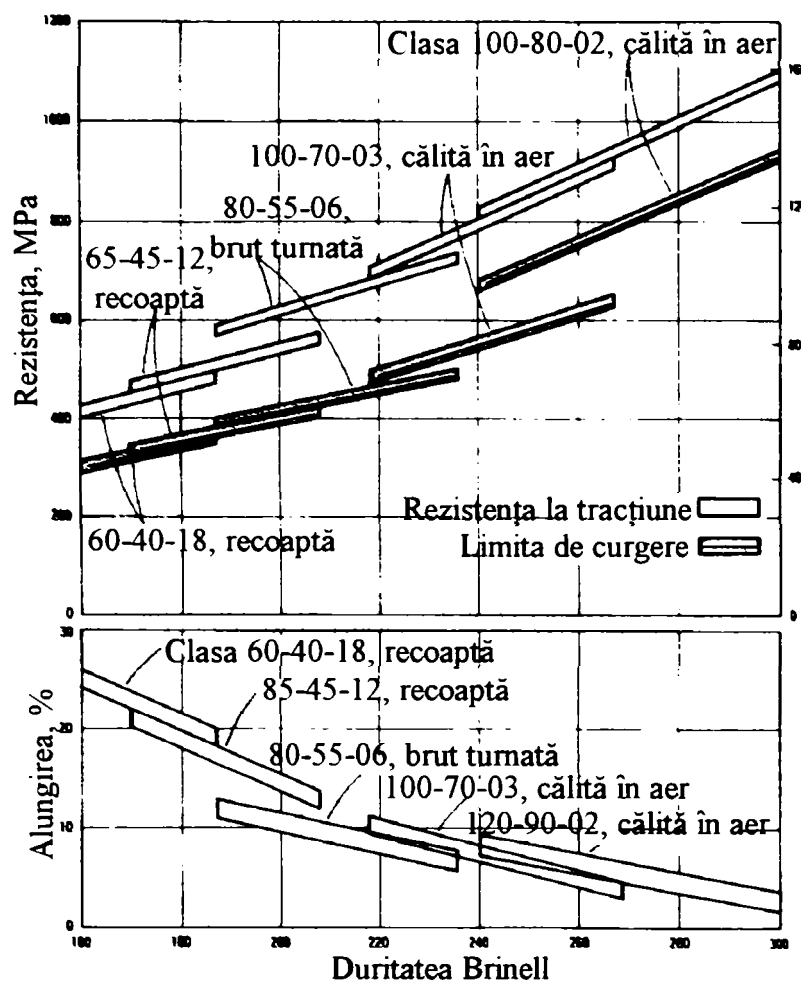


Figura 5.4 Proprietățile la tracțiune și duritatea fontelor cu grafit nodular, conform diferitelor clase din standardul ASTM A 536

Examinarea figurii 5.3 relevă câteva relații dintre clasele ASTM și indicele de calitate al fontelor cu grafit nodular:

- Clasa 60-40-18 are cel mai mare indice de calitate, 64,8, indicele de calitate descrescând la valoarea de 29 pentru clasa 120-90-02.
- Proprietățile corespondente la o clasă notată, spre exemplu, 65-45-12, definesc indicele de calitate minim, 50,7, cerut de această clasă. Proprietățile limitate pentru această clasă definesc nivelul indicelui de calitate care crește până ce limita următoarei clase se extinde, 76,8 pentru limita cu 80-55-06 și 76 pentru limita cu 60-40-18.
- Semnificația indicelui de calitate  $Q_{50, 90}$ , este mai ridicat decât indicele de calitate cerut în toate normativele de ASTM A 536-80.

Duritatea fontelor cu grafit nodular este, în mod obișnuit, măsurată prin încercarea Brinell, cu bilă având diametrul de 10 mm.

Duritatea Brinell este inclusă în multe normative de fonte cu grafit nodular și se folosește pentru controlul producției și ca o proprietate de încercare auxiliară, la controlul



reproductibilității. Pentru încercările de microduritate se folosesc sau amprentele Knoop sau cele Vickers și pot fi folosite pentru măsurarea durității componentelor individuale cu matrice de fontă maleabilă.

Efectul nodularității la fontele perlitice poate fi determinat din figurile 5.5 și 5.6 prin compararea proprietăților la tracțiune, la nivele constante ale proporțiilor de carburi cu nodularitatea de 90, 70 și 40%.

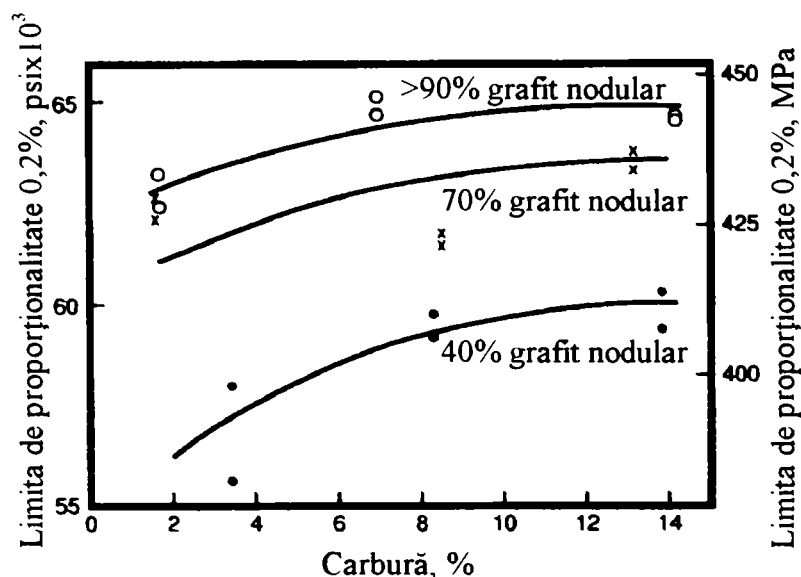


Figura 5.5 Efectul nodularității și al conținutului de carburi asupra limitei de curgere a fontelor cu grafit nodular perlitice

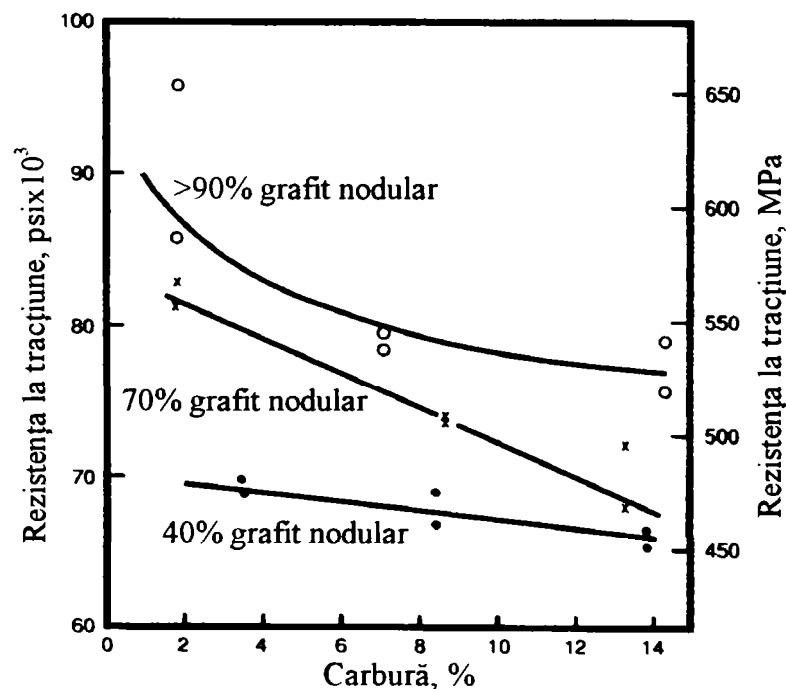


Figura 5.6 Efectul nodularității și al conținutului de carbon asupra rezistenței la tracțiune a fontelor cu grafit nodular perlitice



Aceste două figuri prezintă două importante particularități: prima compară conținutul controlat de Mg, care la fontele feritice duce la pierderea nodularității, iar fontele perlitice sunt mult mai sensibile la reducerea nodularității. A doua particularitate este că, la nivele de carburi slabe, tipice unei calități bune a fontelor cu grafit nodular, există o pierdere relativ mică a rezistenței.

#### *Efectul conținutului de carburi*

Conținutul de carburi are două efecte directe și indirecte asupra proprietăților de turnabilitate ale fontelor cu grafit nodular. Figurile 5.5 și 5.6 arată creșterea cu 100% a durității, carburile fragile cresc limita de curgere, dar reduc rezistența la tracțiune a fontelor de turnătorie. Această convergență a limitei de curgere și rezistenței la tracțiune produce o descreștere a alungirii cu creșterea conținutului de carburi.

Formarea carbunii eutectice, pe parcursul solidificării, afectează fracția volumică a grafitului produs, din cauza carbunii și grafitului ce concură pentru conținutul de carbon în fonta lichidă. 15% carburi necesită 1% C, reducând carbonul disponibil pentru grafit cu aproximativ 1/3. Formarea carbunii are ca efect creșterea porozității interne la turnare prin reducerea efectului de dilatare produs de formarea grafitului pe parcursul solidificării.

Pentru diminuarea efectului dăunător asupra proprietăților, de regulă, se specifică nivelul de carburi mai mic de 5%.

#### *Efectul matricei*

La fontele cu nodularitate ridicată, porozitate slabă și conținut minim de carburi, proprietățile mecanice sunt determinate, în primul rând, de constituenții matricii și duritatea lor. Pentru clasele de fonte cu grafit nodular obișnuite, matricea este constituită din ferită și/ sau perlită. Prin comparație cu ferita, perlita asigură o combinație de rezistență și duritate înalte și ductilitate slabă. Proprietățile mecanice ale fontelor cu grafit nodular feritice/ perlitice sunt, de asemenea, determinate de raportul ferito – perlitic din matrice. Acest raport este controlat la piesele brut turnate prin controlarea compoziției fontei, luând în considerare viteza de răcire la turnare. Mai poate fi controlat la tratamentul termic de recoacere, producând matrice feritică în întregime sau la normalizare, maximizând conținutul de perlită.

Figura 5.7 prezintă corelarea dintre proprietățile de tracțiune, duritate și conținutul de perlită la lingourile brut turnate de 25 mm grosime.

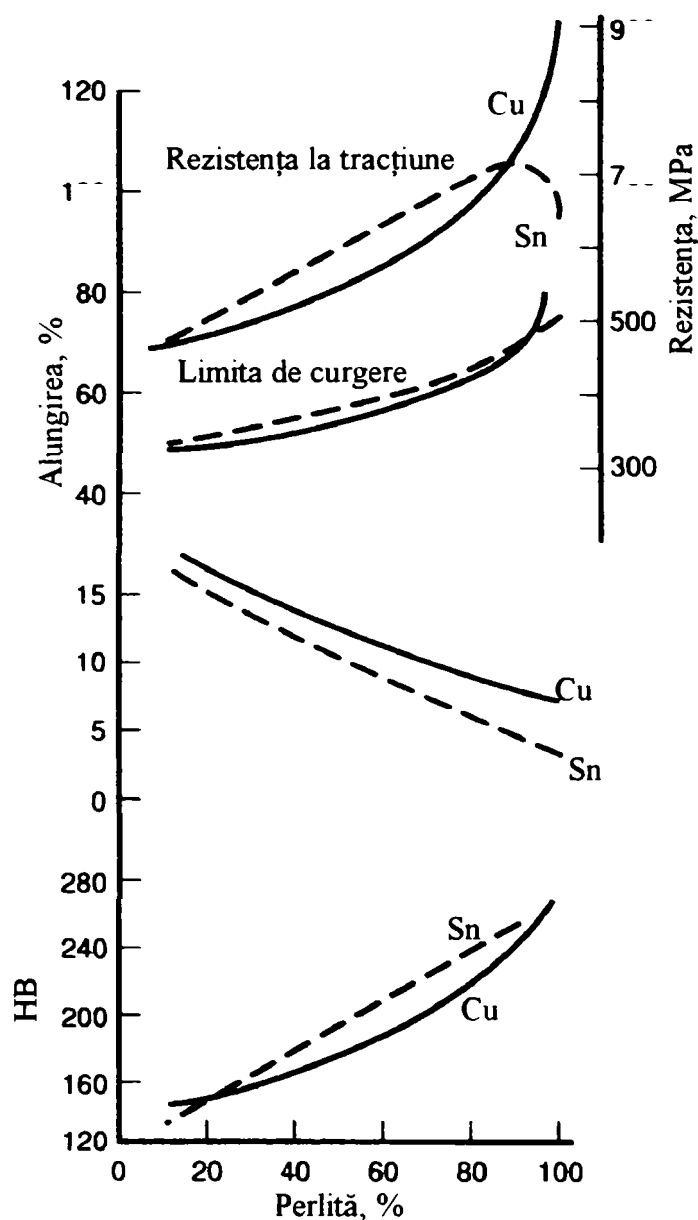


Figura 5.7 Dependența proprietăților la tracțiune de conținutul de perlită la fontele cu grafit nodular brut turnate

Conținutul de perlită variază de la 15% la 100% prin folosirea de combinații diferite de Cu-Mg și Sn-Mg. Conținutul elementelor de aliere peste cel prescris produce matrice perlitică în întregime. Variația aparentă a proprietăților la un nivel al perlitei de 100% indică efectul conținutului înalt de elemente de aliere. Figura 5.7 arată consistența remarcabilă în relația dintre proprietățile mecanice și nivelul conținutului de perlită de 100%, produsă de alierea cu Sn sau Cu.

#### Rezistența la uzare

Uzura mecanică poate fi definită ca deteriorarea suprafeței și/ sau pierderea de material cauzată de tensiunea produsă la contactul dintre suprafețele a două corpuri. Uzura



este, în primul rând, de natură mecanică, dar pot interveni și reacții chimice. Uzarea este un fenomen complex și poate implica unul sau mai multe dintre următoarele mecanisme:

- uzarea abrazivă cauzată de îndepărtarea de material de pe un corp prin contactul cu un corp dur;
- uzarea adezivă sau prin frecare, cauzată de contactul prin alunecarea relativă a două corpuri;
- uzarea prin fretare sau oboseală este rezultatul tensiunilor ciclice cauzate de mișcarea relativă dintre două corpuri în contact;
- uzarea prin cavitație, cauzată de mișcarea unui fluid cu viteză mare de-a lungul suprafeței unui corp.

Complexitatea fenomenelor de uzare și dependența lor de proprietățile materialului și mediu exclud posibilitatea unei încercări universale la uzare pentru a evalua și compara comportamentul la uzare a unor materiale diferite în condiții de uzare diferite. Ca rezultat, s-au dezvoltat multe încercări pentru evaluarea rezistenței la uzare, cu fiecare încercare aplicându-se un set specific de condiții. De altfel, discuțiile despre rezistența la uzare sunt, în general, limitate la note comparative și la presupuneri asupra modului în care microstructura fontelor cu grafit nodular poate afecta rezistența la uzare.

Fontele de turnătorie au fost recunoscute de mulți ani ca materiale ideale pe scară largă pentru aplicații ce solicită uzarea, în special, uzarea prin frecare în condiții uscate sau cu lubrifianți. În condiții uscate, căldura suficientă poate genera frecarea dintre suprafața exploatată și suprafața individuală călită sau, în cazuri mai severe, topirea (fuziunea) lor. În aceste condiții, particulele de grafit din fontele de turnătorie lubrifiază suprafața, reducând frecarea și minimizând deteriorarea suprafeței prin supraîncălzire. Fontele de turnătorie grafitice asigură bine lubrifierea la uzarea prin alunecare. Particulele de grafit de pe suprafața uzată acționează ca rezervoare pentru ulei și sub acțiunea unei sarcini destul de mari pentru a înlătura filmul de ulei, efectul lubrifierii grafitului însuși asigură rezistență la uzare prin frecare.

Rezistența la uzare a fontelor cu grafit nodular este determinată, în primul rând, de microstructura lor. Prezența a 8...11% grafit în volum asigură lubrifierea grafitului și retenția uleiului, esențială la unele aplicații de uzare. Perlita, conținând lamele foarte dure de cementită într-o matrice moale, ductilă, de ferită, prezintă bună rezistență la uzare în condițiile de uzare prin frecare și abraziune medie. Îmbunătățirile ce au urmat în ceea ce privește





rezistența la uzare prin abraziune pot fi obținute prin alierea și/ sau tratamentul termic pentru a produce o matrice de martensită dură, austenită sau bainită (figura 5.8).

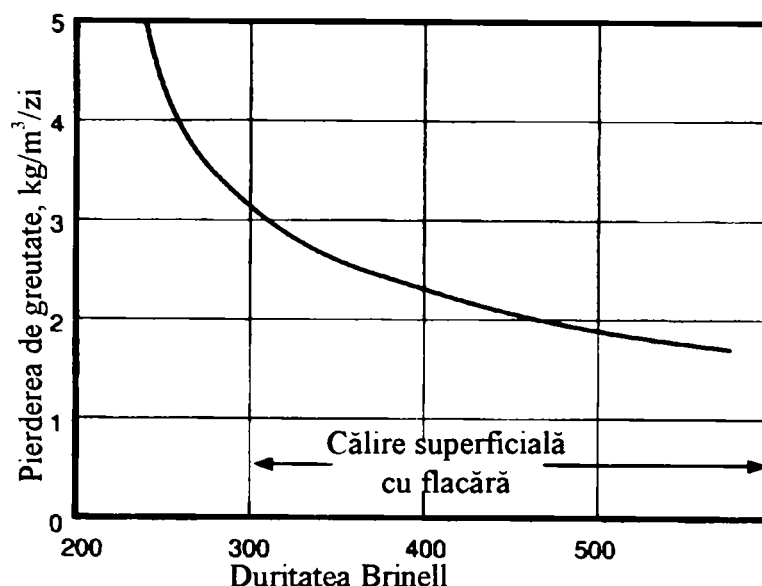


Figura 5.8 Reprezentarea pierderii de greutate la uzarea abrazivă funcție de duritatea obținută la călirea superficială cu flacără a fontelor cu grafit nodular

## 5.2 Fonte cu grafit nodular aliate

Există trei familii de fonte cu grafit nodular aliate:

- austenitice – cu conținut ridicat de Ni;
- bainitice;
- feritice – cu conținut ridicat de Si și Mo.

Acestea asigură proprietăți speciale sau rezistă în condiții de exploatare severe față de fontele cu grafit nodular convenționale.

În timp ce fontele cu grafit nodular obișnuite au un conținut limitat de elemente de aliere, ce asigură microstructura dorită, fontele cu grafit nodular aliate conțin un nivel substanțial ridicat de elemente de aliere, în ordinea asigurării creșterii și îmbunătățirii proprietăților.

Nivelul ridicat de Si asociat cu Mo dau fontelor feritice proprietăți mecanice superioare la temperaturi ridicate și îmbunătățesc rezistența la oxidare la temperaturi înalte.

Conținutul ridicat de Ni al fontelor austenitice, corelat cu Cr în procente bine determinate, asigură îmbunătățirea rezistenței la coroziune, proprietăți mecanice superioare la



temperaturi ridicate și joase și controlează dilatarea, precum și proprietățile mecanice și electrice.

Fontele bainitice sunt folosite acolo unde rezistența ridicată și rezistența bună la uzare sunt obținute fie la turnare, fie prin tratament termic, folosind de la 1% la 3% elemente de aliere (Ni și Mo). Fontele bainitice nu au un domeniu de folosire larg ca fontele cu grafit nodular austenitice sau aliate cu Si-Mo.

Fontele cu grafit nodular înalt aliate cu Si-Mo oferă producătorilor și utilizatorilor o combinație la preț scăzut, rezistență bună la temperaturi înalte, rezistență superioară la oxidare și creșterea stabilității structurale și performanțe bune în condiții de solicitări la cicluri termice.

Ca rezultat, aceste materiale au fost foarte eficiente la aplicații cu temperaturi de exploatare la 650...820 °C și pot avea cicluri termice de severitate moderată.

Fontele cu grafit nodular cu 4% Si și 0,6...0,8% Mo sunt prezent specificate pentru numeroase turnări de țevi de eșapament și alimentatoare turbo la automobile. Fontele înalt aliate cu Si, conținând 1% Mo sunt folosite, în special, la temperaturi înalte, cerute de țevile de eșapament și la cremaliere tratate termic.

Fontele cu grafit nodular înalt aliate cu Si și Mo pot fi produse cu succes de orice atelier competent de turnătorie care, cu un bun control asupra procesului, se asigură că sunt luate următoarele precauții:

- Nivelul C trebuie păstrat între 2,5% și 3,4%. Conținutul de C trebuie redus cu nivelul Si și creșterea mărimii secțiunii.
- Si poate varia de la 3,7% la 6%, în acord cu aplicația. Creșterea conținutului de Si îmbunătățește rezistența la oxidare și crește rezistența la temperaturi intermediare scăzute, dar reduce tenacitatea și prelucrabilitatea.
- Conținutul de Mo poate fi peste 2%. Creșterea nivelului de Mo intensifică rezistența la temperaturi înalte și îmbunătățește prelucrabilitatea.
- Elementele stabilizante urmăresc păstrarea perlitei și carburilor la un nivel cât mai scăzut posibil, pentru a asigura o matrice feritică cu carburi libere.

Temperaturile de turnare trebuie să fie mai înalte decât la fontele cu grafit nodular normale. Creșterea nivelului de zgură necesită o bună selecție, iar creșterea contracțiilor necesită pâlnii de alimentare și orificii de aerisire largi.

Turnările necesită dezbaterea pieselor turnate din forme și mânuite cu grijă, pentru evitarea ruperii și toate piesele turnate trebuie tratate termic pentru creșterea tenacității.



Recoacerea de detensionare are loc timp de 4 h la 790 °C și răcirea se face în cuptor până la 200 °C, dar înmuierea completă este necesară atunci când matricea conține cantități semnificative de carburi și perlită. Prelucrabilitatea lor este similară cu a fontelor cu grafit nodular perlitice/ feritice cu valori ale durtății de 200...300 HB.

### 5.3 Fonte tratate termomecanic (fonte ADI)

Acestea sunt cele mai noi fonte adăugate la familia fontelor ductile și reprezintă un nou grup de fonte ductile ce oferă inginerilor proiectanți o remarcabilă combinație a rezistenței, tenacității și rezistenței la uzare.

Fontele ADI [106] sunt aproape de două ori mai rezistente decât clasele obișnuite de fonte cu grafit nodular din ASTM în timp ce își mențin caracteristicile de alungire ridicată și tenacitate (figura 5.9). În plus, fontele ADI oferă o rezistență la uzare și oboseală excepționale, astfel încât proiectanții pot reduce greutatea componentelor și costul pentru a echivala sau a îmbunătăți performanța.

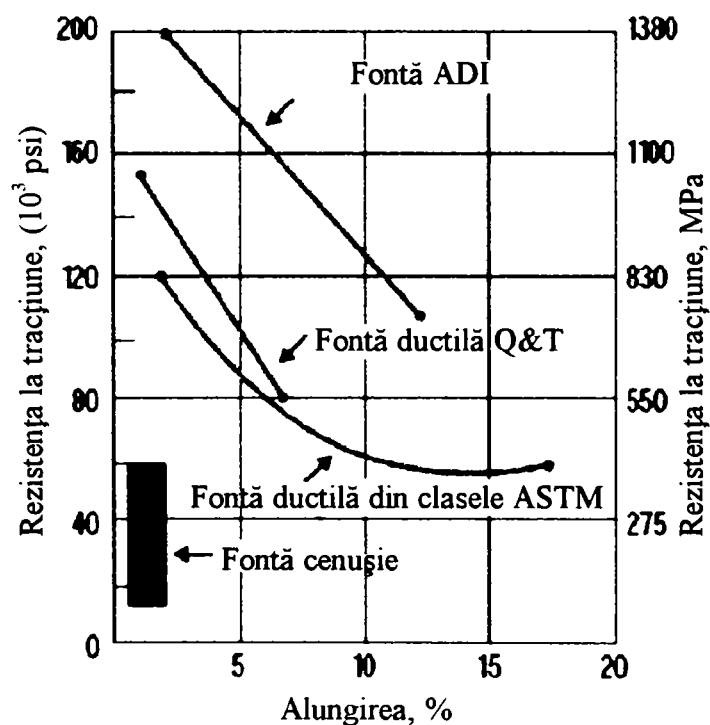


Figura 5.9 Linia portocalie dă mai multe informații despre normative și proprietăți



Proprietățile remarcabile ale fontelor ADI sunt dezvoltate prin operația de tratament termomecanic, care dezvoltă o matrice unică cu structură ferito – bainitică (60%) și austenită cu mult carbon.

Austenita cu mult carbon este stabilă termic la temperaturi extrem de scăzute, dar prin ecruisare se va transforma local în martensită, în condiții convenabile de tensionare. Avantajele acestor caracteristici ale fontelor ADI sunt dobândite prin condițiile de lucru la ecruisarea cu ajutorul sarcinilor portante. Alternativ, tensiunile superficiale pot fi impuse intenționat, anterior utilizării, de exemplu, prelucrarea cu alice metalice a roților dințate sau laminarea canelurilor arborilor cotiți pentru a obține îmbunătățiri semnificative a rezistenței la uzare și a duratei la oboseală.

În prezent, nu există standarde acceptate pentru fontele ADI, dar au fost făcute propuneri pentru cinci clase de fonte ADI, care formează bazele pentru selecția materialelor și discuții între proiectanți și turnători (tabelul 5.2).

**Tabelul 5.2 ASTM A 897, specificații ADA**

<b>Rezistența la tracțiune [MPa]</b>	<b>Limita de curgere [MPa]</b>	<b>Alungirea [%]</b>	<b>Energia de rupere [J]</b>	<b>Duritatea Brinell*</b>
850	550	10	100	269 – 321
1050	700	7	80	302 – 363
1200	850	4	60	341 – 444
1400	1100	1	35	388 – 477
1600	1300	-	-	444 – 555

\* - nu sunt incluse în specificații

Tratamentul termic necesar pentru a produce fontele ADI trebuie să se desfășoare în două trepte (figura 5.10).

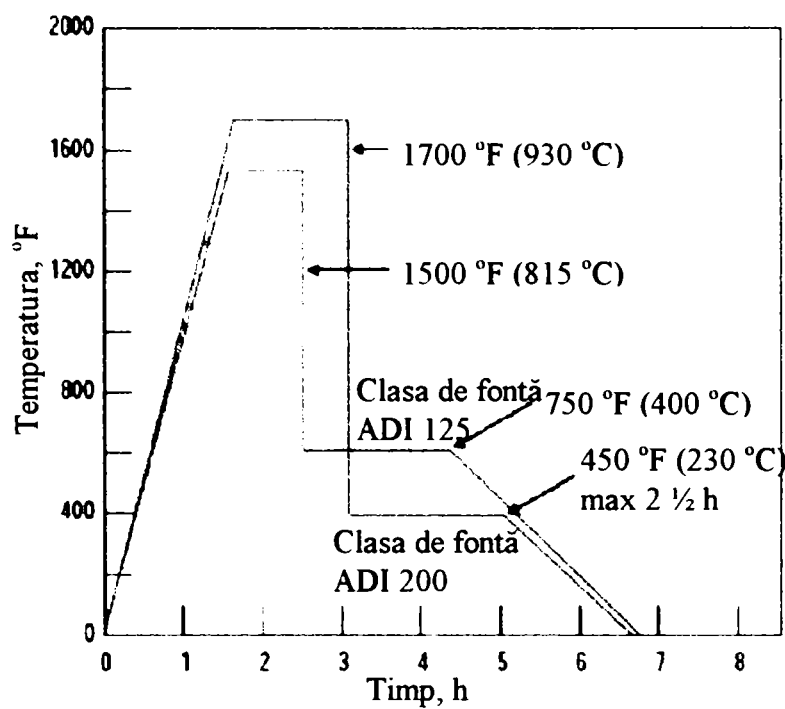


Figura 5.10 Cicluri caracteristice de austenitizare și tratament termomecanic

#### Treapta 1

Are loc austenitizarea la 815 – 920 °C. Temperatura specifică de austenitizare selectată depinde de temperatura tratamentului termomecanic și de clasa de fontă ADI cerută. Odată selectată, temperatura de austenitizare trebuie controlată cu precizie.

#### Treapta 2

Se face transferul rapid al pieselor turnate la cuptorul de tratament termomecanic (de obicei, baie de săruri), unde piesele turnate sunt menținute izotermic la temperatura de tratament termomecanic selectată. Temperatura de tratament termomecanic este 230 – 400 °C, în acord cu proprietățile cerute la turnare (clasa de fonte ADI). Este necesar controlul precis pentru temperatura și durata tratamentului termomecanic (figura 5.11).

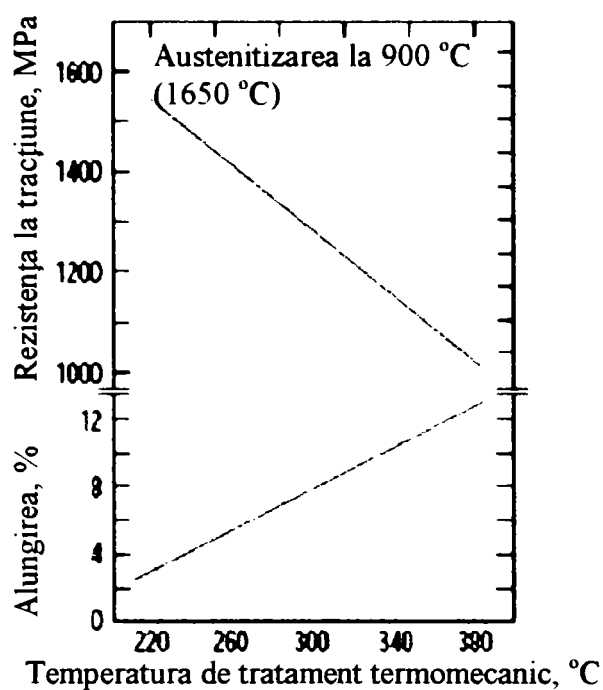


Figura 5.11 Variația caracteristicilor mecanice în funcție de temperatura de tratament termomecanic

Fontele ADI se folosesc ca materiale pentru roți dințate (figura 5.12), ce înlocuiesc oțelul forjat, reducând costurile, simplificând tehnologia și reducând greutatea.

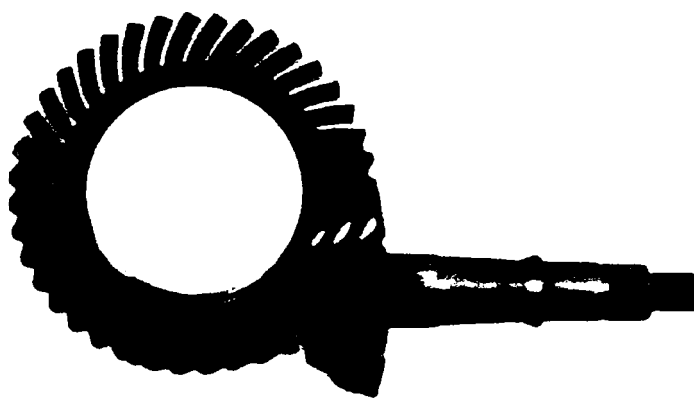
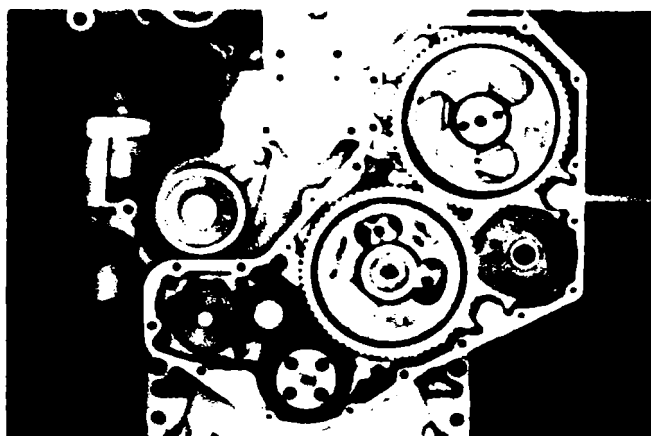
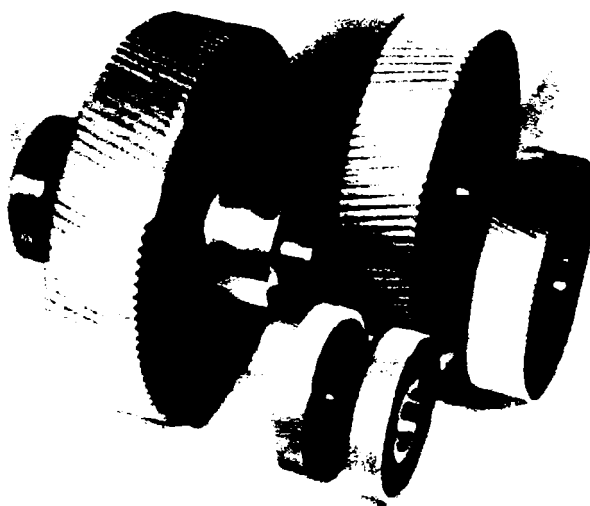


Figura 5.12 Roți dințate din fonte ADI

Roțile dințate (figura 5.14) hiperboloidale se confecționează din fonte ductile tratate termomecanic. Conversia de la oțel forjat la fonte ductile turnate duce la economisirea majoră a costurilor de producție, prelucrabilitate mai bună, operații mai simple, greutate redusă (la distribuția pentru motoare diesel; înlocuirea oțelului 1022 – A 510/2000 (20Mn5 – EN 10269/1999) forjat și cementat cu fontă ADI a dus la economisirea costurilor cu 30%) (figura 5.13).



**Figura 5.13** Distribuția pentru motoare diesel realizată din fontă ADI



**Figura 5.14** Roți dințate din fontă ductilă tratată termomecanic

Alte exemple ale utilizării pieselor turnate din fonte ADI includ suporturile de arcuri de la remorci, arcurile intermediare de la cuzineții de cale ferată, arborii cotiți, barele de conexiune, fiarele de pluguri din agricultură, etc.

În timp ce modulul de elasticitate al fontelor ductile este oarecum mai scăzut decât la oțeluri, tensiunile datorate nealiniamentului inevitabil sunt scăzute. Arborii cotiți sunt un exemplu bun pentru utilizarea acestor proprietăți (figura 5.15).



**Figura 5.15** Arbore cotit din fontă ADI pentru motoare Ford



Succesul pentru obținerea proprietăților optime și a performanțelor pentru fontele ADI necesită calitate ridicată, selecția cu atenție și controlul parametrilor tratamentului termic. Acestea necesită materiale cu număr mare de noduli, fără carburi, incluziuni și retasuri și cu o compoziție ce minimizează pericolul segregării aliajului.

Fontele ductile au fost inventate în 1948. Asocierea dintre rezistența la tracțiune, tensiunea de încercare și alungire au dus la depășirea altor aliaje feroase turnate, inclusiv oțeluri sau fonte maleabile.

De când s-au descoperit, creșterea aplicațiilor fontelor ductile au depășit toate așteptările. Producția mondială este de aproximativ 12 milioane tone și a depășit 20 milioane tone la sfârșitul secolului trecut (figura 5.16). Fontele ductile sunt o realizare notabilă în zilele noastre.

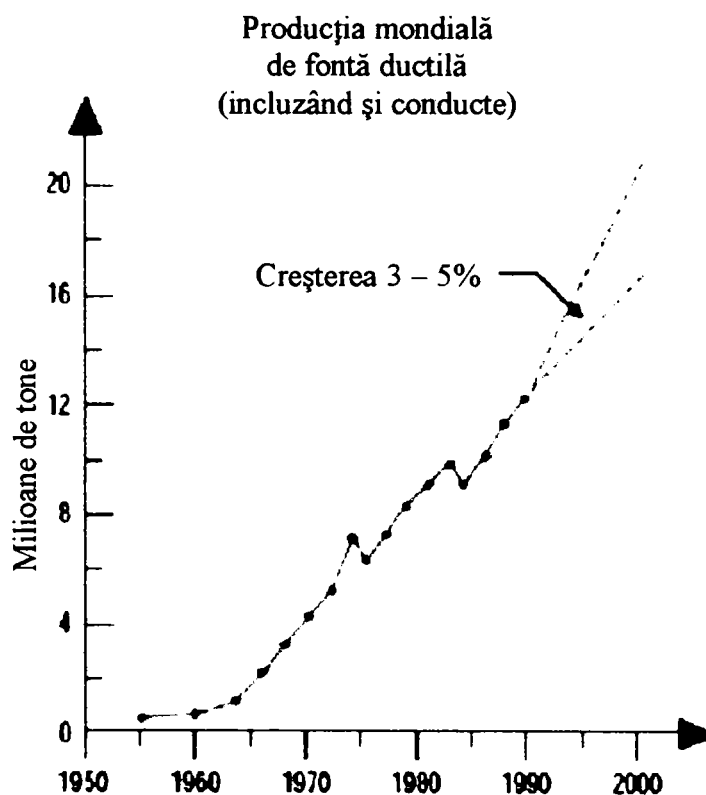
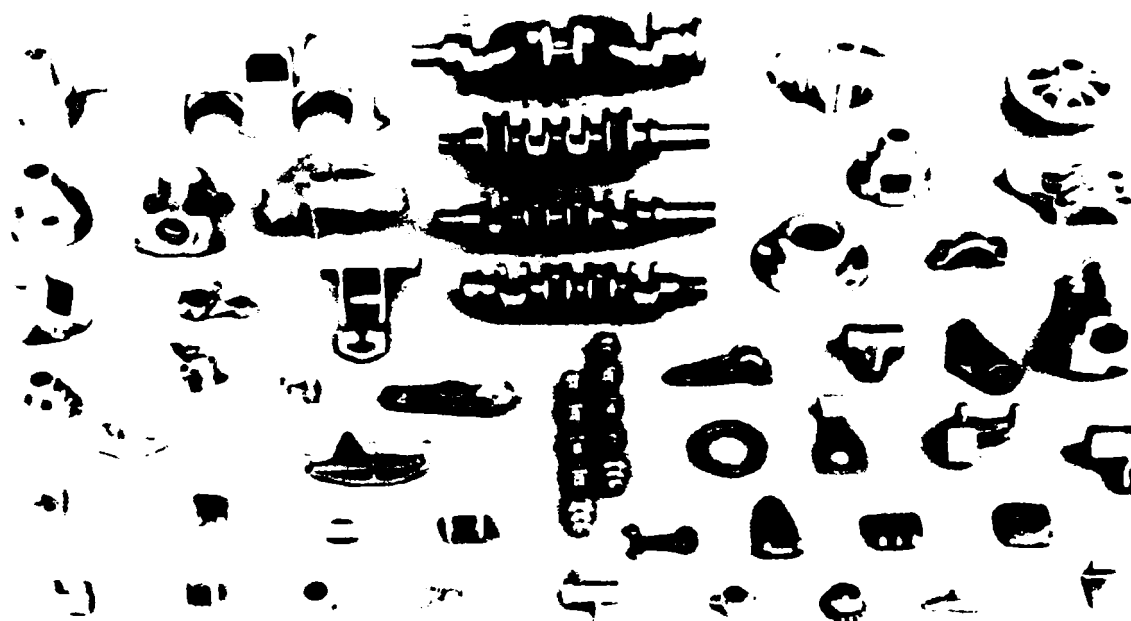


Figura 5.16 Evoluția producției de fonte ADI

Fie că e un component pentru automobil, o conductă de apă sau aparat de măsurat staționarea ilegală, fontele ductile au invadat piața pieselor turnate din fiecare țară dezvoltată industrial (figura 5.17).





**Figura 5.17** Piese turnate din fonte ductile folosite la automobilele japoneze

În industria de automobile se folosesc multe piese turnate din fonte ductile. Motivul principal în selecția materialului este turnabilitatea, ușurința prelucrabilității, siguranța în funcționare, amortizarea vibrațiilor, călibilitatea suprafeței, etc.

#### **5.4 Oțeluri nitrurate**

Nitrurare ionică în cazul pieselor de autoturisme presupune utilizarea unor oțeluri aliate, ce intră în componența pieselor intens solicitate, care trebuie să prezinte în urma tratamentului o duritate cât mai mare a stratului nitrurat, o rezistență și o tenacitate cât mai înalte pentru miez.

În același timp, elementele de aliere exercită o influență puternică, în sensul frânării difuziei azotului înspre interiorul piesei.

Duritatea mare a stratului este determinată de natura și succesiunea structurilor în limitele sale, respectiv de combinațiile la care participă azotul. Împreună cu fierul, azotul formează soluția solidă de azot în fier  $\alpha$  (ferită nitrurată) sau nitruri de tipul  $\epsilon$ , a căror duritate este relativ modestă în raport cu nitrurile rezultate în urma combinării azotului cu alte elemente de aliere (Al, Ti, Cr, etc.).

Pentru majoritatea pieselor auto, miezul trebuie să confere o rezistență între 80 – 140 daN/mm<sup>2</sup>. Aceste valori trebuie să se regăsească pe întreaga secțiune, de aceea oțelul trebuie să prezinte și o călibilitate corespunzătoare. Satisfacerea ambelor deziderate (duritate în strat



și tenacitate în miez) este asigurată de oțelurile aliate de îmbunătățire sau de cele de scule și într-o mai mică măsură de fonte. Cele mai bune oțeluri pentru nitrurare sunt cele aliate cu Al, Cr, Mo și V. Reprezentantul tipic este 39MoAlCr15, STAS 791 – 88. O comportare bună la nitrurare o au și oțelurile cu Cr-Mo, Cr-V, Cr-Ni, Cr-Mn și Cr-Mn-Ti, la care duritățile superficiale ating valori de 600 – 800 HV. Printre cele mai utilizate mărci se numără: 33MoCr11 – STAS 8185/88, 41MoCr11 – STAS 8185/88 (42MoCr4 – EN 10269/1999), 34MoCrNi15 – STAS 8185/88 (34CrNiMo6 – EN 10269/1999), 30MoCrNi20 – STAS 791/88 (30CrNiMo8 – EN 10269/1999), 28TiMnCr12 – STAS 791/88, 21TiMnCr12q – STAS 8949/82, 18MoCrNi13q – STAS 8949/82, 18MnCr10q – STAS 8949/82, ș.a.

Oțelul aliat cu Ti realizează o viteză de nitrurare mai mare și o duritate mai ridicată chiar și decât oțelurile cu Al. Având în vedere afinitatea mare dintre titan și carbon și pentru a pune mai pregnant în evidență influența favorabilă a titanului în cazul nitrurării, se recomandă raportul  $\%Ti / \%C > 10$ .

Normativele europene cuprind o gamă largă de oțeluri recomandate a fi utilizate în stare nitrurată la realizarea pieselor de autoturisme.

În tabelul 5.3 sunt indicate compozițiile chimice, iar în tabelul 5.4, regimurile de tratament termic și caracteristicile mecanice ale unor mărci de oțeluri pentru nitrurat.



Tabelul 5.3 Compoziții chimice pentru oțeluri de nitrurare

Nr. crt.	Marca	Simbol	Standard	C		Si		Mn		Al		Cr		Mo		V		Ni		
				min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
1	34CrAl6	1.8504		0,30	0,37	0,15	0,35	0,60	0,90	0,80	1,10	1,20	1,50							
2	34CrAl5	1.8506		0,30	0,37	0,15	0,40	0,60	0,90	0,80	1,20	1,00	1,30							
3	34CrAlMo5	1.8507	17211 (04/87) E EN 10085 (11/98)	0,30	0,37		0,40	0,50	0,80	0,80	1,20	1,00	1,30	0,15	0,25					
4	41CrAlMo7	1.8509	E EN 10085 (11/98)	0,38	0,45		0,40	0,50	0,80	0,80	1,20	1,50	1,80	0,25	0,40					
5		1.8514	LW	0,26	0,34		0,40	0,40	0,70			2,30	2,70	0,15	0,25	0,10	0,20			
6	31CrMo12	1.8515	17211 (04/87) E EN 10085 (11/98)	0,28	0,35		0,40	0,40	0,70			2,80	3,30	0,30	0,50					0,30
7	31CrMoV9	1.8519	17211 (04/87) E EN 10085 (11/98)	0,26	0,34		0,40	0,40	0,70			2,30	2,70	0,15	0,25	0,10	0,20			
8	15CrMoV5-9	1.8521	17211 (04/87)	0,13	0,18		0,40	0,80	1,10			1,20	1,50	0,80	1,10	0,20	0,30			
9	39CrMoV13-9	1.8523	E EN 10085 (11/98) EN 10250-3 (12/99)	0,35	0,42	0,15	0,40	0,40	0,70			3,00	3,50	0,80	1,10	0,15	0,25			
10	8CrMoV16-5	1.8524		0,04	0,12	0,10	0,40	0,85	1,20			3,70	4,30	0,40	0,60	0,05	0,15			
11		1.8544	LW	0,30	0,37	0,20	0,50	0,50	0,80	0,80	1,20	1,00	1,30	0,15	0,25					
12	34CrAlNi7	1.8550	17211 (04/87) E EN 10085 (11/98)	0,30	0,37		0,40	0,40	0,70	0,80	1,20	1,50	1,80	0,15	0,25				0,85	0,15
13		1.8564	LW	0,28	0,35	0,10	0,40	0,40	0,70			2,80	3,30	0,30	0,50					0,30
14	8CrMo16	1.8599		0,07	0,10	0,10	0,40	0,85	1,15			3,70	4,10	0,40	0,60					



Tabelul 5.4 Temperaturi de tratament termic și valorile durităților pentru oțeluri de nitrurare

Nr. crt.	Marca	Temperatura călire, °C		Temperatura revenire, °C	Temperatura nitrurare, °C	Duritatea inițială, HB	Duritatea finală, HV
1	1.8504	apă	900 – 950	580 – 650	500 – 520	217	900
		ulei	900 – 950				
2	1.8506	apă	900 – 950	580 – 660	500 – 520	217	900
		ulei	900 – 950				
3	1.8507	apă	900 – 940	570 – 650	500 – 520	248	950
		ulei	900 – 940				
4	1.8509	ulei	880 – 920	570 – 650	500 – 520	262	950
5	1.8514						
6	1.8515	ulei	870 – 910	570 – 700	500 – 520	248	800
		apă	840 – 880				
7	1.8519	ulei	840 – 880	570 – 680	500 – 520	248	800
		apă	940 – 980				
8	1.8521	ulei	940 – 980	600 – 700	500 – 520	248	800
		apă	920 – 960				
9	1.8523	ulei	920 – 960	570 – 650	490 – 510	262	800
		apă	920 – 960				
10	1.8524						
11	1.8544						
12	1.8550	ulei	850 – 890	570 – 660	500 – 520	248	950
13	1.8564						
14	1.8599						



Este de remarcă faptul că, pe măsură ce oțelul este mai complex aliat cu elemente ce formează nitruri, cresc duritatea și grosimea stratului nitrurat.

Firmele producătoare de instalații de nitrurare ionică oferă date relative la regimurile de tratament pentru diferite mărci de oțel (tabelul 5.5).[107]

**Tabelul 5.5 Regimurile de tratament pentru diferite mărci de oțel**

Marca	Nr. DIN	Duritatea inițială HB/HRC	Temperatura de nitrurare, °C	Durata, h
St 50	1.0052	160 – 180 HB	550 – 580	4 – 12
GG 25	-	240 – 250 HB	510 – 560	4 – 20
GGG 60	-	290 – 300 HB	510 – 560	4 – 20
CK 15	1.1141	130 – 150 HB	540 – 580	4 – 120
16MnCr5	1.7131	190 – 200 HB	500 – 550	10 – 24
34CrNiMo6	1.6582	250 – 350 HB	500 – 550	2 – 24
42CrMo4	1.7225	250 – 350 HB	450 – 570	2 – 24
31CrMo12	1.8515	300 – 350 HB	500 – 550	10 – 70
31CrMoV9	1.8519	300 – 350 HB	-	10 – 70
34CrAlNi7	1.8550	260 – 330 HB	-	10 – 70
X155CrVMo12 1	1.2379	53 – 60 HRC	400 – 520	8 – 24
X165CrMoV12	1.2601	56 – 58 HRC	400 – 480	8 – 40
X38CrMoV5 1	1.2343	35 – 55 HRC	500 – 560	4 – 24
X32CrMoV3 3	1.2365	35 – 51 HRC	500 – 560	4 – 24
S6-5-2	1.3343	63 – 66 HRC	500 – 530	0,3 – 2
X2NiCoMoTi18 12	1.6356	52 – 55 HRC	480	15 – 20
X2NiCoMo18 8	1.6359	52 – 55 HRC	480	15 – 20
X35CrMo17	1.4122	190 – 200 HB	520 – 570	10 – 20
X35CrNi18 8	1.4301	240 – 250 HB	520 – 580	10 – 20

Procedeul de nitrocarburare ionică, o variantă a procedurii de nitrurare, este recomandat în industria de automobile atunci când se utilizează oțeluri slab aliate, cu rezistență scăzută.

Dintre piesele folosite în industria de automobile se supun deja nitrocarburării ionice, pe scară industrială, roțile de lanț ale mecanismelor de distribuție, la care se formează un strat de combinație de grosime medie, constantă,  $\geq 4 \mu\text{m}$ , cu o duritate superficială ridicată  $> 300 \text{HV}_{0,5}$ , ceea ce ameliorează caracteristicile de frecare și uzare.

Din categoria pieselor de transmisie, se nitrurează ionic atât roțile dințate mici, cât și roțile dințate solicitate puternic, arborii pinion, cremalierele sau pinioanele. Pentru roțile supuse încercărilor foarte mari, se pune problema folosirii, în principal, a oțelurilor de îmbunătățire, cu valori ale rezistenței între 1000 și 1200  $\text{N/mm}^2$ , cum ar fi, spre exemplu: 42MoCr4 – EN 10269/1999, 31CrMo12 – EN 10085/1998 sau 147CrMoV6-9 (1.7735, Germania), care se nitrurează ionic timp de 36 h pentru obținerea unei grosimi de aproximativ



0,5 mm. Ca urmare a durității mari a stratului nitrurat, cu faza  $\gamma'$ , nu apare tendința de coșcovire întâlnită la straturile nitrurate prin metodele obișnuite, iar limita de apariție a pitting-ului se deplasează către valori mai mari ale sarcinilor. Din cele de mai sus, se înțelege că nu este necesară o rectificare a flancurilor nitrurate ionice.

Roțile dințate mici, care rulează cu viteze mari, se execută dacă se ia în considerare nitrurarea ionică, cel mai bine conform exemplelor următoare din materiale precum: Ck45 – EN 10132-3/05/2000 (C45E – EN 10269/1999), Ck60 – EN 10132-3/05/2000 (C60E – EN 10250-2/1999), GGG-60 (0.7060, Germania), 37MnSi5 (1.5122, Germania; 35MnSi13 – STAS 791/88) și 42CrMo4 – EN 10269/1999. Asemenea roți se folosesc într-un număr foarte mare în cutiile de viteze ale autoturismelor, camioanelor, tractoarelor, motocicletelor și ale altor automobile, fiind deja parțial nitrurate. Pentru aceasta, se aplică, în special, un tratament de nitrurare ionică de scurtă durată, cu o durată de menținere între 1 și 3 h, efectuat de cele mai multe ori la 570 °C și în multe cazuri de întrebuințare (oțeluri nealiate, fontă turnată, etc.) este astfel condus, încât apare o grosime de aproximativ 15  $\mu\text{m}$  a stratului de combinație  $\epsilon$ .



## Cap. 6 CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA REPERELOR DE AUTOTURISME NITRURATE IONIC

Realizarea unor motoare moderne pentru automobile, ușoare și puțin poluante, economice din punct de vedere al fabricației și exploatării, fiabile și competitive, reprezintă problema de bază care preocupă specialiștii din domeniu.

Obținerea unui produs calitativ superior impune stabilirea celor mai adecvate materiale și forme constructive, precum și cele mai ieftine și productive procese tehnologice de prelucrare și montaj.

Nitrurarea ionică și-a dovedit eficiența prin creșterea performanțelor componentelor intens solicitate la uzare (figura 6.1).

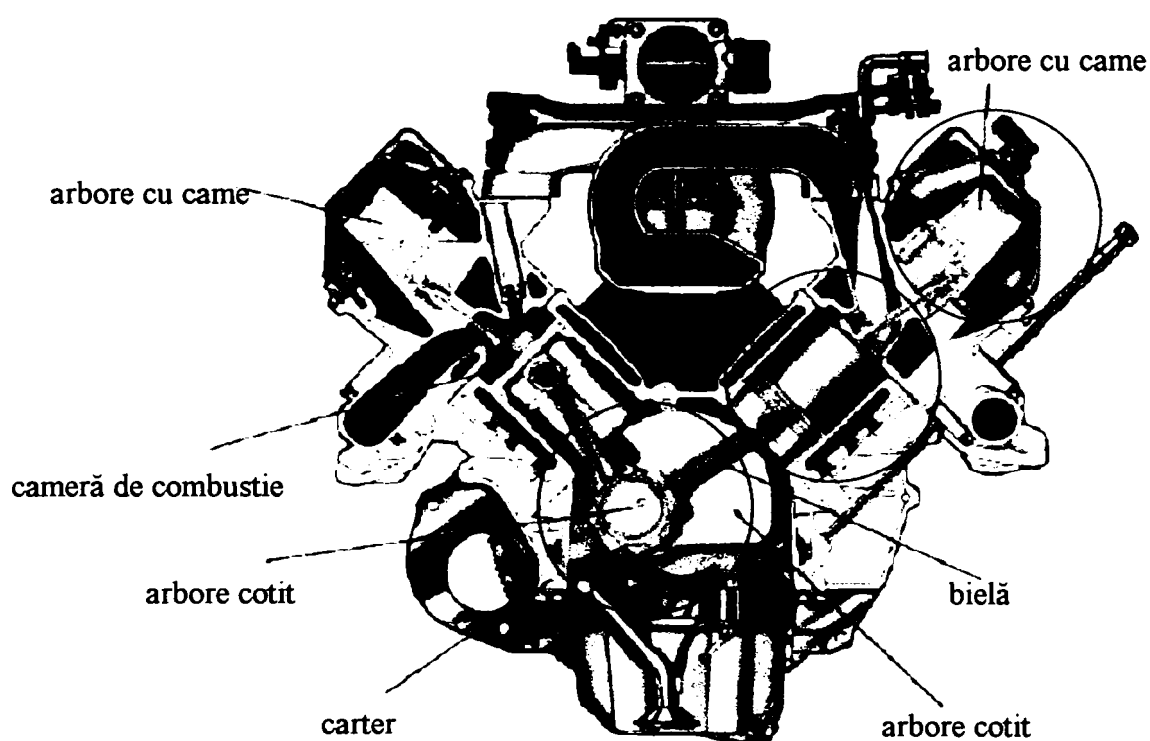


Figura 6.1 Componentele unui motor de autoturism la care nitrurarea ionică mărește rezistența la uzare

### 6.1 Comportarea cămășilor de cilindru și a segmentilor după nitrurare ionică

*Cămașa cilindrului* – face parte din părțile fixe ale mecanismului motor. Aceasta este organul motorului în interiorul căreia se realizează ciclul motor, fiind supusă, în timpul



lucrului, la procese complete de uzare și coroziune, datorate presiunii gazelor, tensiunilor termice și acțiunii erozive ale agentului de răcire.

Aceste condiții de funcționare impun cămășii cilindrului următoarele cerințe:

- rezistență ridicată la acțiunea gazelor;
- mare rezistență la uzare;
- mare rezistență la coroziune a suprafețelor de lucru și a acelor în contact cu mediul de răcire;
- siguranța etanșeității la gazele din interior și a mediului de răcire. [108]

**Segmentul** – este un inel elastic de contact între cilindru și piston, în mișcare de du-te-vino a acestuia. Pe un piston se montează un set de segmenti care, în ansamblu, trebuie să asigure: etanșeitarea camerei de ardere, reglarea cantității de ulei de pe oglinda cilindrului și îmbunătățirea transmiterii căldurii de la piston la cilindru. Aceste funcții pot fi îndeplinite dacă suprafața exterioară a segmentilor se află în contact perfect cu oglinda cilindrului, iar flancurile se așează perfect pe suprafețele corespunzătoare din piston.

Dacă se au în vedere condițiile de lucru și funcțiile ce trebuie îndeplinite, segmentilor li se impun următoarele cerințe:

- elasticitate corespunzătoare care să se mențină și la temperaturi înalte un timp îndelungat;
- să asigure repartizarea determinată a presiunii pe oglinda cilindrului;
- să aibă o formă geometrică adecvată care să asigure o așezare etanșă pe suprafața de lucru;
- materialul să aibă bune proprietăți antifricțiune;
- rezistență mare la uzare în condiții de temperatură ridicată și ungere insuficientă;
- să asigure posibilitatea rapidă de rodaj;
- adaptabilitate pe oglinda cilindrului. [108]

### **6.1.1 Considerații asupra fenomenelor de uzare semnalate la cămăși de cilindru și segmenti**

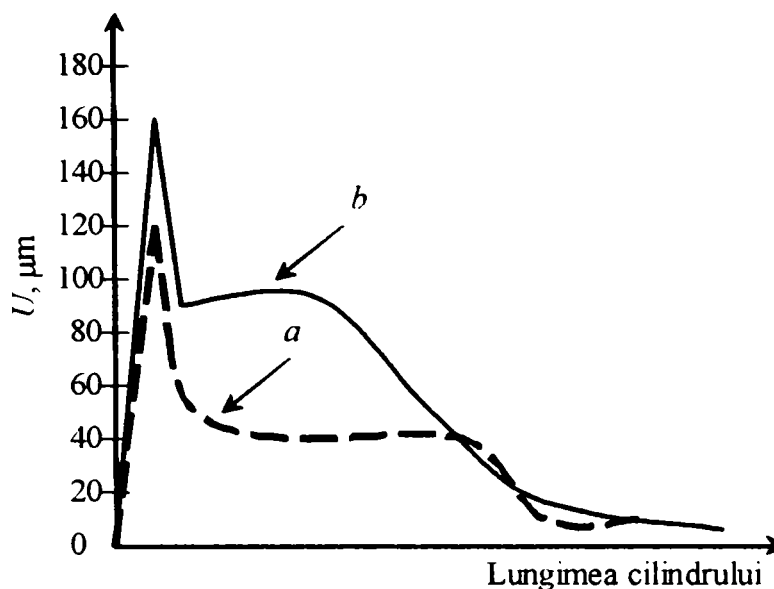
#### *Cămăși de cilindru*

Uzarea suprafeței interioare a cămășilor de cilindru constituie una din principalele cauze care limitează durata de funcționare a motorului. Experiența arată că uzura maximă a cilindrului în exploatare se produce în dreptul primului segment, când pistonul se află la





punctul mort inferior (P.M.I.) – uzura fiind mai mică în planul arborelui cotit (curba *a*) și mai mare în planul normal pe axa lui (curba *b*) (figura 6.2).



**Figura 6.2** Variația uzurii după înălțimea cilindrului:  
*a* – uzura în planul arborelui cotit; *b* – uzura în planul normal la planul arborelui cotit

Fenomenele care intervin în procesele de uzare a oglinzii cilindrului dau naștere la următoarele forme de uzare reprezentative:

- uzarea corozivă;
- uzarea abrazivă;
- uzarea adezivă.

*Uzarea corozivă* apare ca rezultat al contactului dintre metal și unii produși agresivi care se formează în procesul de ardere (acid azotic, formaldehide, vapori de apă), care condensează pe oglinda cilindrului. Prezența sulfului în combustibili intensifică uzura corozivă (figura 6.2), datorită oxizilor de sulf  $SO_2$  și  $SO_3$ , care împreună cu vaporii de apă dau acizii sulfuric și sulfuros.

*Uzarea abrazivă* a oglinzii cilindrului este produsă de particulele dure existente în atmosferă, în ulei și în combustibil. Distribuția uzării abrazive a cilindrului arată că uzura este concentrată la partea inferioară când este provocată de particulele dure din ulei (figura 6.3 a) în zona superioară a cilindrului, când este provocată de particulele dure din aer sau combustibil.

*Uzarea adezivă* este consecința contactului direct dintre piston, segmenti și cilindru, contact care este posibil la punctele moarte, deoarece viteza pistonului este nulă și ungerea



hidrodinamică este compromisă; uzarea adezivă se dezvoltă și în anumite condiții particulare ale motorului, când este compromisă ungerea cilindrului (de exemplu, pornirea motorului la rece). Faptul că uzarea adezivă este maximă la P.M.I., se explică prin acțiunea a două cauze:

- Presiunea ridicată a gazelor, care acționează în spatele primului segment;
- Temperatura ridicată a segmentului de foc și a zonei superioare a cilindrului, care ușurează formarea unor oxizi superficiali cu rezistență mecanică redusă.

Factorii care determină uzura cilindrului sunt:

- regimul de funcționare al motorului (sarcină, turație, stare termică);
- presiunea exercitată de segmenti;
- regimul de uzare al cilindrului;
- gradul de impurificare al aerului, uleiului și combustibilului;
- natura, vâscozitatea și stabilitatea uleiului;
- natura materialului de cilindru;
- tehnologia de finisare a oglinzii cilindrului (rugozitate, tratament termic și termochimic);
- particularitățile constructive ale cămășilor;
- deformațiile cilindrului produse de montaj sau de starea termică;
- răcirea cilindrului.

Datorită progreselor realizate în creșterea rezistenței la uzare a suprafețelor interioare a cilindrului, în ultimul timp, se ridică, tot mai des, problema rezistenței la uzare și coroziune a suprafeței exterioare a cilindrului, deoarece se constată că rezistența acestuia la oboseală și coroziune rămâne, tot mai frecvent, în urma rezistenței la uzare a oglinzii cilindrului. [109]

### *Segmenti*

Principala funcțiune a segmentilor este de a etanșa cilindrul. Segmentii care împiedică scăparea gazelor din cilindru spre carter se numesc *segmenti de compresiune*, iar segmentii care dozează cantitatea de ulei pe oglinda cilindrului se numesc *segmenti de ungere*.

Dintre toți segmentii, primul are cele mai mari cerințe în ceea ce privește nivelul tehnic, deoarece vine în contact cu gazele fierbinți și cu porțiunea cea mai caldă din piston. Temperatura pistonului variază radial, având valoarea minimă pe suprafața laterală de contact (figura 6.3). Pe direcția axială, temperatura segmentului este practic aceeași.

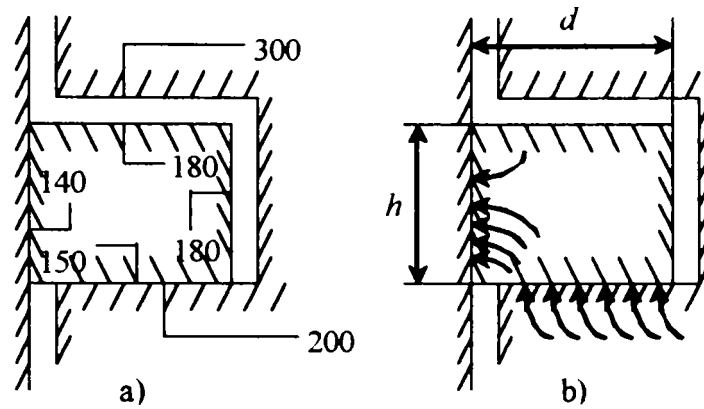


Figura 6.3 Câmpul de temperatură în segment (a); direcția fluxului de căldură (b)

Temperatura medie a segmentului de foc ajunge la 150...250 °C și este mai mică decât temperatura flancurilor cu 50...100 °C. O influență directă asupra temperaturii segmentului o exercită temperatura cilindrului. Coborârea acesteia sub o limită nu este indicată din considerente de uzare corozivă și frecare, influența cea mai mare asupra regimului termic al segmentului o are scăparea gazelor fierbinți, care produc supraîncălzirea și scoaterea segmentului din funcțiune.

Eficiența etanșării grupului de segmenti este dependentă de intensitatea procesului de uzare determinată de frecarea la care este supus segmentul. Dacă se ține seama de acțiunea agresivă a unor substanțe care ajung pe suprafața segmentului, ca și de acțiunea impurităților mecanice din aer sau ulei, se înțelege că, în cazul segmentilor, procesul de uzare este determinat de trei tipuri fundamentale:

- uzare adezivă sau de contact;
- uzare abrazivă;
- uzare corozivă.

Regimul termic ridicat reduce vâscozitatea uleiului și ușurează apariția frecării semifluide; pe de altă parte, la temperaturi ridicate, straturile superficiale ale materialului se oxidează, au o rezistență mecanică mai mică și sunt smulse cu ușurință de pe suprafața laterală.

Cantitatea mai mică de ulei care ajunge la primul segment, reduce porțiunea din cursa pistonului pe care se efectuează ungerea hidrodinamică.

*Uzarea corozivă* a segmentului este provocată de unele substanțe prezente în combustibil ca sulfurul, tetraetilul de plumb, etc. La acestea trebuie adăugat și efectul de condensare a vaporilor de combustibil, pentru a furniza o explicație mai completă a faptului



că uzura segmentului de foc în perioada de pornire depășește de 5...10 ori uzura la funcționarea în sarcină.

Particulele solide prezente în aer, ulei sau combustibil, produc o *uzare abrazivă* a primului segment, cu atât mai mare cu cât concentrația de praf este mai mare, cu cât sarcina este mai mare și cu cât diametrul mediu al particulelor de praf este mai aproape de diametrul critic.

Există mai multe împrejurări care compromit siguranța în funcționare a segmentului. O asemenea împrejurare este aceea în care segmentul se blochează în canal, ceea ce anulează, funcție de etanșare, deoarece segmentul nu mai poate urmări deformațiile cilindrului. Siguranța în funcționare mai poate fi compromisă prin pierderea elasticității segmentului din cauza uzării de contact și a temperaturii ridicate de funcționare sau cauza vibrațiilor.

Aplicarea pe segment a unor straturi superficiale dure, mărește rezistența la uzare de contact, deoarece metalul aderat are duritate și rezistență mecanică înaltă. Aria suprafețelor de contact și forța de frecare scad.[110]

Cromarea se aplică, mai ales, primului segment care lucrează la temperaturi ridicate și se uzează cel mai mult.

### **6.1.2 Program de experimentări, metodologie, utilaje, aparatură și epruvete folosite**

Având în vedere solicitările care apar în timpul funcționării, s-a întocmit un program de experimentări care să vizeze creșterea duratei de înlocuire atât a cămășilor de cilindru, cât și a segmentilor.

În alcătuirea acestui program s-a plecat de la ideea îmbunătățirii rezistenței la uzare adezivă, corozivă și abrazivă a cămășilor de cilindru și a segmentilor printr-un tratament de suprafață, fără a înrăutăți caracteristicile materialului de bază și totodată, găsirii, pe cât posibil, a cuplului de frecare segment – cămașă.

Având în vedere experiența în acest sens, ce privește realizarea de straturi superficiale printr-un tratament termochimic de suprafață, s-a stabilit următorul program:

- pentru cămăși de cilindru s-au efectuat experimentări în vederea realizării de straturi superficiale rezistente la uzare și coroziune prin aplicarea unui tratament de nitrurare în plasmă, comparativ cu alte tratamente superficiale; s-a urmărit comportarea materialului de bază la tratamentul de nitrurare (nivel de microduritate,



microstructură) și de asemenea, s-au studiat caracteristicile mecanice (rezistență la uzare) odată cu stabilirea abaterilor dimensionale și stării suprafeței (rugozitatea), față de prevederile documentației;

- pentru segmenti s-a realizat o durificare superficială prin nitroferoxare în strat fluidizat și nitrurare în baie de săruri, comparativ cu cromarea, care se aplică în mod uzual, urmărind obținerea unei variante optime din punct de vedere al cuplului de frecare segment – cămașă (simulat pe epruvete) și totodată, din punct de vedere a stării dimensionale și de elasticitate (joc, fantă, forță tangențială).

Pentru a evalua proprietățile obținute, s-au determinat:

- starea dimensională atât pentru cămași, cât și pentru segmenti, înainte și după tratamentele superficiale aplicate;
- structura inițială a cămașilor și segmentilor;
- duritatea și structura obținută după aplicarea tratamentului de suprafață;
- rezistența la uzare adezivă efectuată pe cupluri de uzură realizate din epruvete (fixă și mobilă) executate din materialul cămașilor și segmentilor, în diferite variante de tratament și comparativ cu epruveta mobilă realizată din oțel; coeficientul de frecare în diferite situații ale cuplului segment – cămașă;
- rugozitatea înainte și după tratament.

Rezultatele s-au comparat cu cuplele de frecare epruvetă mobilă cromată – epruvetă fixă în stare crudă, simulând situația din momentul de față al ansamblului cămașă – segment, adică segmenti de foc cromati în contact cu suprafața cămașii netratată.

Stabilirea comportării tribologice a ansamblului cămașă – segment s-a efectuat pe standul de uzură Timken.

În paralel cu determinările menționate mai sus, s-au făcut și experimentări la scară semiindustrială, verificând comportarea unor seturi motor pe standurile de încercare, în condițiile funcționării a 500 ore, ceea ce echivalează cu cca. 80000 km parcurși.

Pentru aceste experimentări s-au realizat seturi motor cu cămași și segmenti, care au fost tratate superficial, conform tehnologiei propuse, comparativ cu seturi motor din fabricația de serie. În urma încercărilor pe stand s-a evaluat uzura, atât a segmentilor, cât și a cămașilor în diferite situații privind starea suprafeței.

Programul de experimentări de mai sus s-a realizat utilizând următoarele echipamente și aparatură:

- instalația de nitrurare în plasmă NITRION – INTEC;



- instalația de nitroferoxare în strat fluidizat;
- standul de uzură TIMKEN;
- instalația de cromare;
- aparatură de măsură și control dimensional;
- rugozimetru;
- microscop optic Neophot 2;
- microscop electronic cu baleiaj TESLA;
- difractometru de raze X DRON 3;
- standuri de fiabilitate.

Pentru experimentări s-au utilizat un lot de 84 cămăși și 210 segmenti (câte 70 din fiecare tip: foc, ungere, compresie). Piesele prelucrate mecanic final și măsurate dimensional au fost livrate de întreprinderea producătoare (DACIA S.A. și SEGMENT S.A.).

Piesele au fost durificate superficial și s-au apreciat rezultatele tratamentului, după care au fost returnate la fabrica de motoare din cadrul întreprinderii Dacia, unde s-a efectuat montajul.

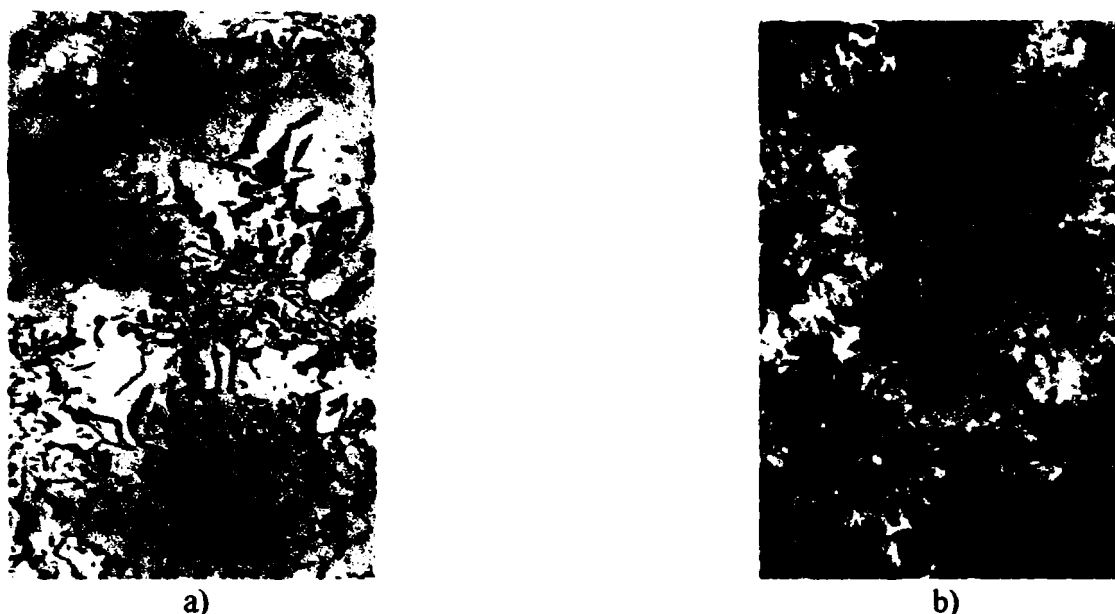
### **6.1.3 Experimentări privind durificarea superficială a cămășilor de cilindru**

Fonta realizată pentru fabricarea cămășilor de cilindru, care au servit la efectuarea experimentărilor, a avut compoziția chimică corespunzătoare celei din tabelul 6.1.

**Tabelul 6.1** Compoziția chimică a fontei din care s-au realizat cămăși de cilindru

<b>%C</b>	<b>%Si</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Cu</b>	<b>%Cr</b>	<b>%S</b>	<b>%P</b>
3,44	2,22	0,72	0,22	0,33	0,044	0,35

Microstructura fontei cu compoziția chimică din tabelul 6.1 este prezentată în figura 6.4 a) și b).



**Figura 6.4** Microstructură fontă cămașă cilindru:  
a) repartiția grafitului, 100:1, neatacat; b) din masa de bază, 100:1, atac nital 2%

Din figura 6.4 se observă că:

- masa de bază este perlită cu ferită sub 5%;
- forma separărilor de grafit: lamelară, arcuită cu tendință de repartiție în rozetă;
- eutecticul fosforos este sub formă de rețea întreruptă subțire ( $E_{r3}$ );
- duritatea masei de bază: 210 HB.

Așa cum s-a arătat, pentru experimentări s-au utilizat un lot de 84 cămăși.

Procesul tehnologic pentru fabricarea cămășilor de cilindru cuprinde următoarele operații tehnologice:

1. strunjire eboș;
2. debitare;
3. strunjire;
4. strunjire interior;
5. spălare;
6. scurtare;
7. strunjire exterior;
8. alezare;
9. strunjire;
10. detensionare;
11. frezare;
12. honuire;

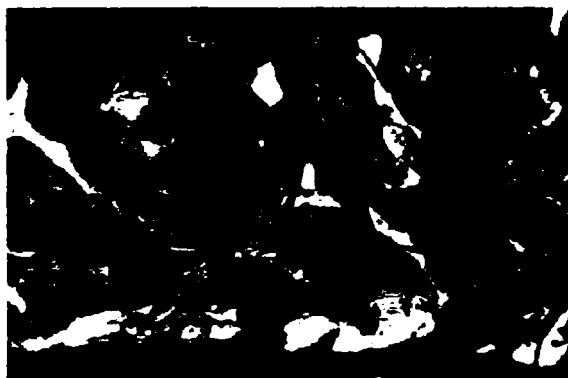


13. spălare;
14. probă de etanșeitate;
15. control marcare;
16. conservare;
17. degresare;
18. durificare superficială (nitrurare în plasmă);
19. control;
20. conservare.

După operațiile de prelucrare mecanică finală, conform procesului tehnologic prezentat, cămășile au fost inscripționate și controlate dimensional la compartimentul CTC al fabricii de motoare din cadrul întreprinderii Dacia și au fost pregătite pentru a fi durificate superficial.

În ceea ce privește tratamentul termochimic al acestor piese, s-a ales ca variantă nitrurarea în plasmă la 480 °C timp de 7 ore în amoniac.[111]

Microstructura obținută în urma acestui tratament este prezentată în figura 6.5. Valorile de microduritate în stratul superficial sunt de 857 – 1150 HV0,02.



**Figura 6.5** Microstructură cămașă cilindru nitrurată în plasmă, 500:1, atac nital 2%

Pe cele 84 de cămăși au fost efectuate măsurători înainte și după tratamentul de nitrurare ionică, pentru a se putea urmări influența procesului de nitrurare asupra dimensiunii conicității și ovalității. În tabelul 6.2 se prezintă datele inițiale, în tabelul 6.3 datele după tratament, iar în tabelul 6.4 se prezintă modificarea caracteristicilor în urma tratamentului termic.





**Tabelul 6.2** Valorile diametrului, conicității și ovalității înainte de tratament

Nr. cămașă	$\phi 73^{+0,04}$	Conicitate [ $\mu\text{m}$ ]		Ovalitate [ $\mu\text{m}$ ]			
		1	2	1	2	3	4
1	73.025	-0.009	0.000	-0.020	-0.013	0.002	0.008
2	73.003	0.000	0.002	0.000	-0.004	-0.004	-0.005
3	73.027	0.005	0.009	0.001	0.005	0.005	0.006
4	73.019	0.006	0.000	-0.009	0.002	0.002	0.002
5	73.025	0.016	0.009	-0.006	-0.001	0.005	0.009
6	73.031	0.007	0.010	0.009	0.003	0.004	0.002
7	73.033	0.014	0.008	0.012	-0.010	0.007	0.005
8	73.037	0.004	0.004	0.000	0.008	-0.008	-0.007
9	73.000	0.012	0.005	-0.001	-0.007	0.000	0.000
10	73.019	0.017	0.006	0.000	0.002	-0.001	0.006
11	73.000	0.001	0.001	0.000	0.000	-0.002	-0.002
12	73.025	0.003	0.004	0.000	0.012	-0.001	-0.002
13	73.007	0.011	0.006	0.000	0.001	-0.001	0.002
14	73.004	0.012	0.007	0.000	0.005	-0.001	0.001
15	73.018	-0.020	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.002
16	73.013	0.004	0.000	0.000	-0.004	-0.001	0.000
17	73.010	0.004	0.005	0.006	0.001	-0.001	0.002
18	73.025	0.010	0.006	0.008	0.007	0.007	0.005
19	73.015	0.003	0.008	0.013	0.006	0.001	0.004
20	73.019	0.003	0.004	0.011	0.002	0.001	0.001
21	73.023	0.001	0.005	0.004	0.008	-0.001	0.004
22	73.005	0.003	0.000	-0.003	-0.003	-0.001	0.002
23	73.020	0.007	0.007	0.004	-0.007	0.002	0.002
24	73.032	0.003	0.005	0.002	0.005	0.002	0.005
25	73.029	0.008	0.011	-0.009	0.007	0.005	0.007
26	73.007	0.000	0.005	-0.015	-0.001	-0.005	0.001
27	73.010	0.003	0.007	0.014	-0.003	-0.006	-0.001
28	73.034	0.008	0.006	0.005	0.005	0.004	0.005
29	73.005	0.004	0.007	0.001	-0.002	0.000	0.000
30	73.005	0.007	0.010	-0.003	-0.007	-0.001	-0.002
31	73.008	-0.012	0.000	-0.007	0.002	-0.007	-0.006
32	73.026	-0.002	0.004	-0.001	0.002	-0.001	0.003
33	73.034	-0.020	0.002	0.001	0.014	0.003	-0.014
34	73.030	0.010	0.010	0.007	0.006	0.005	0.005
35	73.033	0.005	0.004	0.004	0.002	0.006	0.007
36	73.036	-0.017	0.003	-0.008	0.004	0.005	-0.010
37	73.007	-0.001	0.009	-0.002	0.001	-0.004	-0.008
38	73.020	0.010	0.007	-0.006	-0.011	0.001	0.006
39	73.025	0.020	0.010	0.003	-0.010	0.006	0.007
40	73.028	0.008	0.010	0.005	0.005	0.003	0.002
41	73.011	0.003	0.006	0.004	-0.003	0.002	0.002
42	73.021	-0.007	0.010	0.003	0.001	0.004	-0.012
43	73.012	0.004	0.004	-0.006	-0.005	-0.001	-0.001
44	73.025	-0.007	0.000	-0.004	-0.005	0.003	-0.001
45	73.022	0.014	0.011	0.003	-0.004	0.004	0.006
46	73.009	0.003	0.002	-0.004	-0.005	-0.004	-0.003
47	73.023	0.003	0.010	0.010	0.007	0.000	0.002



48	73.008	0.007	0.008	0.007	-0.007	0.000	-0.001
49	73.013	-0.012	0.002	-0.005	-0.008	0.004	0.005
50	73.031	0.010	0.010	-0.008	0.005	0.005	0.005
51	73.023	-0.001	0.012	0.000	0.005	0.003	0.002
52	73.025	0.015	0.008	0.001	-0.001	0.005	0.008
53	73.011	-0.018	0.000	0.003	0.000	-0.003	0.000
54	73.038	-0.012	0.002	0.001	-0.002	0.005	0.009
55	73.018	-0.014	0.000	-0.012	-0.022	0.000	0.007
56	73.024	0.010	0.006	-0.006	0.001	0.005	0.004
57	73.007	-0.002	0.001	0.003	0.006	-0.005	-0.002
58	73.018	-0.003	0.000	-0.002	-0.003	0.000	0.004
59	73.009	0.007	0.004	0.006	-0.001	0.001	-0.001
60	73.010	-0.005	0.002	-0.005	-0.005	0.001	-0.002
61	73.006	-0.016	0.000	-0.012	-0.006	-0.004	-0.007
62	73.038	0.005	0.005	0.000	0.000	-0.008	-0.007
63	73.017	-0.001	-0.001	0.002	-0.007	0.003	-0.003
64	73.002	-0.007	0.000	-0.016	-0.005	-0.003	0.007
65	73.029	-0.008	0.000	0.013	-0.001	0.006	-0.003
66	73.005	-0.016	0.000	-0.012	-0.012	-0.006	0.000
67	73.010	-0.020	0.002	-0.020	-0.001	-0.008	0.007
68	73.005	-0.011	0.000	-0.004	0.003	-0.001	0.001
69	73.014	-0.020	0.000	-0.020	-0.020	-0.005	-0.003
70	73.013	0.002	0.001	0.007	-0.005	0.004	0.000
71	73.028	0.010	0.005	-0.016	0.005	0.005	0.007
72	73.009	0.004	0.007	0.001	-0.005	0.001	-0.004
73	73.009	-0.017	0.000	-0.022	-0.003	-0.007	-0.001
74	73.024	0.007	0.008	0.006	-0.001	0.004	0.002
75	73.008	-0.020	0.002	-0.017	-0.022	-0.013	-0.021
76	73.018	-0.020	0.000	-0.003	0.002	0.001	-0.004
77	73.032	-0.020	0.000	-0.001	-0.004	0.000	0.007
78	73.027	0.004	0.008	0.006	0.004	0.006	0.003
79	73.004	-0.019	0.005	-0.014	-0.015	-0.009	-0.011
80	73.028	0.005	0.009	0.000	-0.001	0.003	0.003
81	73.026	-0.003	0.011	0.005	0.002	0.004	0.001
82	73.028	-0.005	0.005	0.003	0.003	0.006	0.002
83	73.019	-0.004	0.010	0.004	0.003	0.003	0.001
84	73.027	0.010	0.010	-0.002	0.002	0.005	0.003



Tabelul 6.3 Valorile diametrului, conicității și ovalității după tratament

Nr. cămașă	$\phi 73^{+0,04}$	Conicitate [ $\mu\text{m}$ ]		Ovalitate [ $\mu\text{m}$ ]			
		1	2	1	2	3	4
1	73.032	-0.013	0.000	-0.015	-0.017	-0.017	0.007
2	73.000	-0.016	0.002	-0.011	-0.006	-0.013	-0.005
3	73.023	0.001	0.004	0.003	0.006	-0.013	0.005
4	73.023	-0.010	0.000	0.008	0.004	-0.005	0.009
5	73.020	0.012	0.007	-0.011	-0.008	-0.008	0.011
6	73.028	0.007	0.007	-0.004	-0.005	-0.013	0.000
7	73.031	0.004	0.007	0.018	-0.015	0.000	-0.003
8	73.036	0.003	0.000	0.009	-0.022	-0.010	-0.008
9	73.000	-0.006	0.007	-0.013	-0.011	-0.005	0.003
10	73.084	0.010	0.010	0.010	-0.004	0.003	-0.004
11	72.995	-0.005	0.000	-0.025	0.002	-0.024	-0.014
12							
13							
14	73.000	-0.002	0.000	-0.005	-0.014	-0.010	-0.007
15	73.021	-0.020	-0.002	-0.007	-0.011	-0.005	-0.003
16	73.006	-0.005	0.000	-0.008	-0.013	-0.018	-0.002
17	73.005	-0.009	0.005	0.016	-0.005	-0.015	0.007
18	73.022	0.000	0.010	0.017	0.002	-0.006	0.002
19	73.012	-0.017	0.008	0.027	0.000	-0.017	-0.004
20	73.018	-0.017	0.010	0.010	-0.005	-0.015	-0.005
21	73.018	-0.004	0.000	-0.003	0.006	-0.010	0.008
22	73.014	-0.002	0.001	0.004	0.006	0.008	0.005
23	73.020	0.007	0.004	-0.005	0.002	0.002	0.008
24							
25	73.035	0.000	0.015	-0.005	0.012	0.004	0.007
26							
27	73.015	-0.003	0.015	-0.017	-0.009	-0.009	-0.001
28	73.028	-0.003	0.008	-0.007	0.002	-0.008	0.002
29	73.003	-0.015	0.003	-0.001	0.004	-0.010	-0.003
30	73.000	-0.015	0.015	0.007	-0.004	-0.012	-0.002
31	73.010	-0.013	0.006	-0.010	0.002	-0.006	-0.003
32	73.022	-0.009	0.005	-0.010	-0.001	-0.003	0.000
33	73.015	-0.007	0.005	-0.001	0.008	-0.010	-0.005
34	73.023	0.003	0.005	0.010	0.004	-0.005	0.004
35	73.033	-0.009	0.005	0.015	0.003	-0.005	0.007
36							
37	73.003	-0.005	0.006	-0.002	-0.005	-0.010	-0.002
38	73.010	0.004	0.006	-0.008	-0.022	-0.013	0.001
39	73.019	0.012	0.010	0.010	-0.017	0.003	-0.001
40	73.023	-0.004	0.016	0.000	0.007	-0.004	-0.001
41	73.008	-0.007	0.010	0.009	-0.008	-0.013	0.000
42	73.014	0.003	0.011	0.010	-0.003	0.010	0.000
43	73.008	0.001	0.004	0.000	-0.002	-0.005	-0.006
44	73.024	-0.010	0.000	0.010	-0.005	0.003	-0.002
45	73.018	0.002	0.011	0.002	-0.007	-0.008	0.002
46	73.005	0.005	0.000	-0.004	-0.011	-0.005	-0.001
47	73.019	-0.006	0.010	0.006	0.003	-0.009	-0.002



48	73.000	0.004	0.006	0.012	-0.017	-0.011	-0.008
49	73.010	-0.023	-0.006	-0.009	-0.010	-0.006	0.007
50	73.025	-0.013	0.007	-0.002	0.007	-0.007	-0.005
51	73.022	-0.013	0.011	0.007	0.009	0.002	-0.004
52	73.021	0.000	0.016	-0.005	-0.005	-0.013	0.002
53	73.011	-0.025	0.007	-0.010	-0.011	0.000	0.016
54	73.037	-0.017	0.000	0.015	-0.002	-0.004	0.002
55	73.029	-0.017	0.000	-0.007	-0.004	0.010	0.012
56							
57	73.003	-0.007	0.002	-0.001	0.002	-0.017	-0.005
58	73.018	-0.003	0.000	0.002	-0.010	-0.008	0.006
59	73.005	-0.002	0.001	0.004	-0.007	-0.009	-0.005
60	73.009	-0.020	0.000	-0.020	-0.002	-0.007	-0.002
61	73.016	-0.017	0.000	-0.008	0.003	0.019	0.002
62	73.036	-0.001	0.007	-0.010	-0.004	-0.012	0.000
63							
64	73.000	-0.014	0.000	-0.013	-0.008	-0.018	0.004
65	73.039	-0.020	0.002	0.027	0.012	-0.005	-0.002
66	73.007	-0.029	-0.007	-0.001	-0.005	-0.009	-0.003
67	73.015	-0.015	0.004	-0.014	-0.007	0.003	0.013
68	73.008	-0.014	0.000	0.001	0.006	-0.004	0.007
69							
70	73.010	-0.002	0.000	0.005	-0.018	-0.014	-0.006
71	73.028	0.009	0.010	-0.022	0.002	0.001	0.003
72	73.005	-0.002	0.013	-0.002	-0.006	-0.005	0.001
73	73.008	-0.012	0.000	-0.020	-0.015	-0.021	-0.003
74	73.030	-0.001	0.010	0.005	-0.001	0.004	0.008
75	73.025	-0.018	0.000	0.002	-0.007	0.003	0.015
76	73.019	-0.020	-0.002	0.005	-0.005	-0.006	-0.003
77	73.027	-0.016	0.000	-0.001	-0.008	-0.008	0.008
78	73.033	-0.001	0.016	0.005	0.010	0.006	0.005
79	73.022	-0.030	0.002	-0.002	-0.005	-0.005	-0.002
80	73.036	-0.007	0.010	-0.002	0.000	-0.005	0.010
81	73.022	-0.013	0.010	0.004	-0.004	-0.006	-0.002
82	73.023	-0.014	0.010	-0.002	-0.004	-0.015	-0.002
83	73.027	-0.020	0.017	0.008	0.005	-0.007	-0.001
84	73.030	-0.011	0.011	-0.006	0.004	-0.008	-0.002

**Observație:** Cămășile cu nr. 12, 13, 24, 26, 36, 56, 63 și 69 au fost rebutate pentru încercările distructive.



Tabelul 6.4 Modificarea diametrului, conicității și ovalității în urma tratamentului

Nr. cămașă	$\phi 73^{+0,04}$	Conicitate [ $\mu\text{m}$ ]		Ovalitate [ $\mu\text{m}$ ]			
		1	2	1	2	3	4
1	0.007	-0.004	0.000	0.005	-0.004	-0.019	-0.001
2	-0.003	-0.016	0.000	-0.011	-0.002	-0.009	0.000
3	-0.004	-0.004	-0.005	0.002	0.001	-0.018	-0.001
4	0.004	-0.016	0.000	0.017	0.002	-0.007	0.007
5	-0.005	-0.004	-0.002	-0.005	-0.007	-0.013	0.002
6	-0.003	0.000	-0.003	-0.013	-0.008	-0.017	-0.002
7	-0.002	-0.010	-0.001	0.006	-0.005	-0.007	-0.008
8	-0.001	-0.001	-0.004	0.009	-0.030	-0.002	-0.001
9	0.000	-0.018	0.002	-0.012	-0.004	-0.005	0.003
10	0.065	-0.007	0.004	0.010	-0.006	0.004	-0.010
11	-0.005	-0.006	-0.001	-0.025	0.002	-0.022	-0.012
12							
13							
14	-0.004	-0.014	-0.007	-0.005	-0.019	-0.009	-0.008
15	0.003	0.000	-0.002	-0.007	-0.010	-0.004	-0.001
16	-0.007	-0.009	0.000	-0.008	-0.009	-0.017	-0.002
17	-0.005	-0.013	0.000	0.010	-0.006	-0.014	0.005
18	-0.003	-0.010	0.004	0.009	-0.005	-0.013	-0.003
19	-0.003	-0.020	0.000	0.014	-0.006	-0.018	-0.008
20	-0.001	-0.020	0.006	-0.001	-0.007	-0.016	-0.006
21	-0.005	-0.005	-0.005	-0.007	-0.002	-0.009	0.004
22	0.009	-0.005	0.001	0.007	0.009	0.009	0.003
23	0.000	0.000	-0.003	-0.009	0.009	0.000	0.006
24							
25	0.006	-0.008	0.004	0.004	0.005	-0.001	0.000
26							
27	0.005	-0.006	0.008	-0.031	-0.006	-0.003	0.000
28	-0.006	-0.011	0.002	-0.012	-0.003	-0.012	-0.003
29	-0.002	-0.019	-0.004	-0.002	0.006	-0.010	-0.003
30	-0.005	-0.022	0.005	0.010	0.003	-0.011	0.000
31	0.002	-0.001	0.006	-0.003	0.000	0.001	0.003
32	-0.004	-0.007	0.001	-0.009	-0.003	-0.002	-0.003
33	-0.019	0.013	0.003	-0.002	-0.006	-0.013	0.009
34	-0.007	-0.007	-0.005	0.003	-0.002	-0.010	-0.001
35	0.000	-0.014	0.001	0.011	0.001	-0.011	0.000
36							
37	-0.004	-0.004	-0.003	0.000	-0.006	-0.006	0.006
38	-0.010	-0.006	-0.001	-0.002	-0.011	-0.014	-0.005
39	-0.006	-0.008	0.000	0.007	-0.007	-0.003	-0.008
40	-0.005	-0.012	0.006	-0.005	0.002	-0.007	-0.003
41	-0.003	-0.010	0.004	0.005	-0.005	-0.015	-0.002
42	-0.007	0.010	0.001	0.007	-0.004	0.006	0.012
43	-0.004	-0.003	0.000	0.006	0.003	-0.004	-0.005
44	-0.001	-0.003	0.000	0.014	0.000	0.000	-0.001
45	-0.004	-0.012	0.000	-0.001	-0.003	-0.012	-0.004
46	-0.004	0.002	-0.002	0.000	-0.006	-0.001	0.002
47	-0.004	-0.009	0.000	-0.004	-0.004	-0.009	-0.004



48	-0.008	-0.003	-0.002	0.005	-0.010	-0.011	-0.007
49	-0.003	-0.011	-0.008	-0.004	-0.002	-0.010	0.002
50	-0.006	-0.023	-0.003	0.006	0.002	-0.012	-0.010
51	-0.001	-0.012	-0.001	0.007	0.004	-0.001	-0.006
52	-0.004	-0.015	0.008	-0.006	-0.004	-0.018	-0.006
53	0.000	-0.007	0.007	-0.013	-0.011	0.003	0.016
54	-0.001	-0.005	-0.002	0.014	0.000	-0.009	-0.007
55	0.011	-0.003	0.000	0.005	0.018	0.010	0.005
56							
57	-0.004	-0.005	0.001	-0.004	-0.004	-0.012	-0.003
58	0.000	0.000	0.000	0.004	-0.007	-0.008	0.002
59	-0.004	-0.009	-0.003	-0.002	-0.006	-0.010	-0.004
60	-0.001	-0.015	-0.002	-0.015	0.003	-0.008	0.000
61	0.010	-0.001	0.000	0.004	0.009	0.023	0.009
62	-0.002	-0.006	0.002	-0.010	-0.004	-0.004	0.007
63							
64	-0.002	-0.007	0.000	0.003	-0.003	-0.015	-0.003
65	0.010	-0.012	0.002	0.014	0.013	-0.011	0.001
66	0.002	-0.013	-0.007	0.011	0.007	-0.003	-0.003
67	0.005	0.005	0.002	0.006	-0.006	0.011	0.006
68	0.003	-0.003	0.000	0.005	0.003	-0.003	0.006
69							
70	-0.003	-0.004	-0.001	-0.002	-0.013	-0.018	-0.006
71	0.000	-0.001	0.005	-0.006	-0.003	-0.004	-0.004
72	-0.004	-0.006	0.006	-0.003	-0.001	-0.006	0.005
73	-0.001	0.005	0.000	0.002	-0.012	-0.014	-0.002
74	0.006	-0.008	0.002	-0.001	0.000	0.000	0.006
75	0.017	0.002	-0.002	0.019	0.015	0.016	0.036
76	0.001	0.000	-0.002	0.008	-0.007	-0.007	0.001
77	-0.005	0.004	0.000	0.000	-0.004	-0.008	0.001
78	0.006	-0.005	0.008	-0.001	0.006	0.000	0.002
79	0.018	-0.011	-0.003	0.012	0.010	0.004	0.009
80	0.008	-0.012	0.001	-0.002	0.001	-0.008	0.007
81	-0.004	-0.010	-0.001	-0.001	-0.006	-0.010	-0.003
82	-0.005	-0.009	0.005	-0.005	-0.007	-0.021	-0.004
83	0.008	-0.016	0.007	0.004	0.002	-0.010	-0.002
84	0.003	-0.021	0.001	-0.004	0.002	-0.013	-0.005

Distribuțiile modificării valorii diametrului, conicității și ovalității cămășilor de cilindru după nitrurarea ionică sunt prezentate în figurile 6.6...6.8.



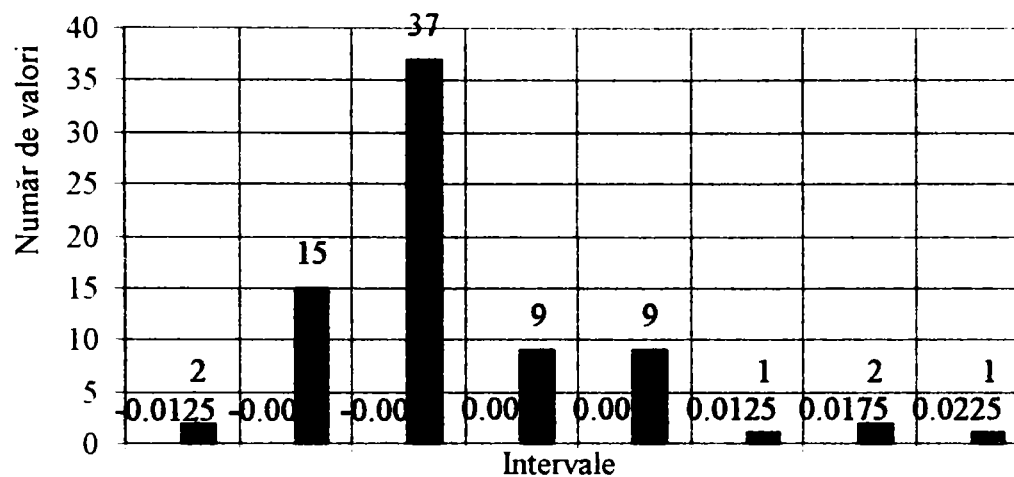


Figura 6.6 Distribuția modificărilor de diametru după nitrurarea ionică a cămășilor

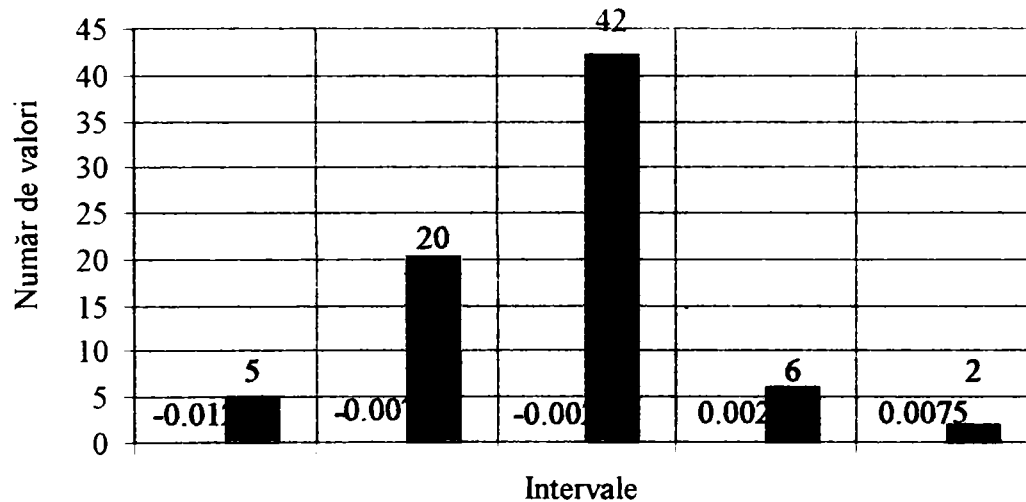


Figura 6.7 Distribuția conicității după nitrurarea ionică a cămășilor

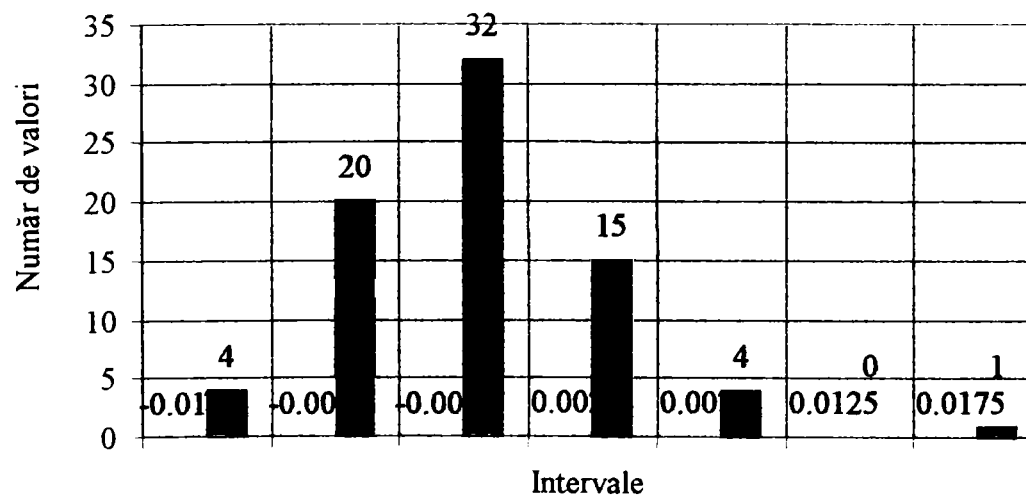


Figura 6.8 Distribuția ovalității după nitrurarea ionică a cămășilor



Se constată că, pentru toate cele trei abateri, distribuția valorilor este una normală, cu majoritatea valorilor situate către media intervalului.

Nitrurarea nu afectează în mod semnificativ nici valoarea diametrului și nici forma geometrică a cămășilor.

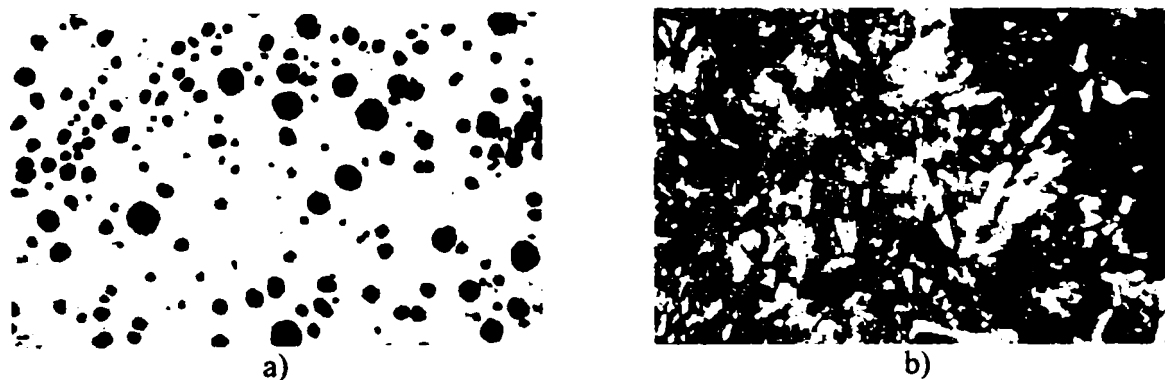
#### 6.1.4 Experimentări privind durificarea superficială a segmentelor

Fonta utilizată pentru realizarea segmentelor are compoziția indicată în tabelul 6.5. Aceasta s-a determinat pe segmente din fabricația de serie, în mod arbitrar.

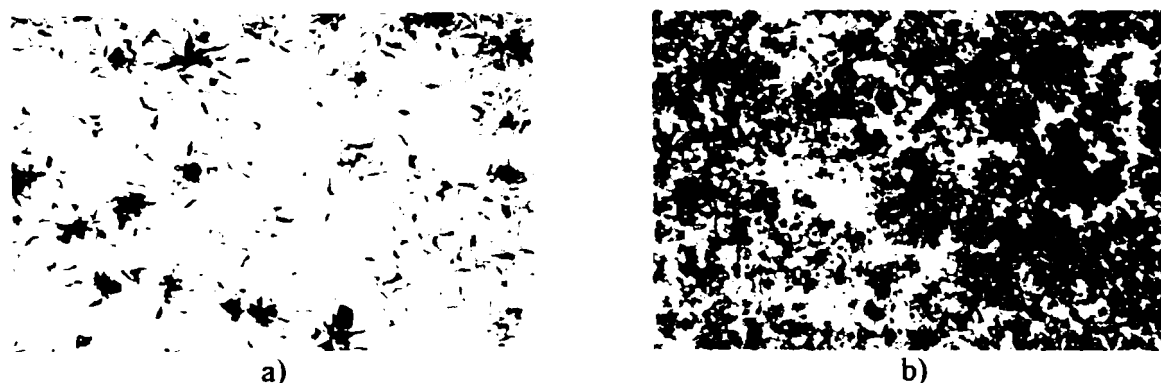
**Tabelul 6.5** Compoziția chimică a fontei utilizată la confecționarea segmentelor

Tip segment	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%Ni
I fontă KV <sub>1</sub>	3,62	2,45	0,22	0,24	0,04	0,04	-	0,7
II fontă K <sub>1</sub>	3,70	2,70	0,72	0,45	0,12	0,2	0,25	-
III fontă K <sub>1</sub>	3,62	2,70	0,63	0,45	0,12	0,3	0,3	-

Microstructurile corespunzătoare segmentelor de foc, de compresie și de ungere sunt prezentate în figurile 6.9, 6.10 și 6.11.

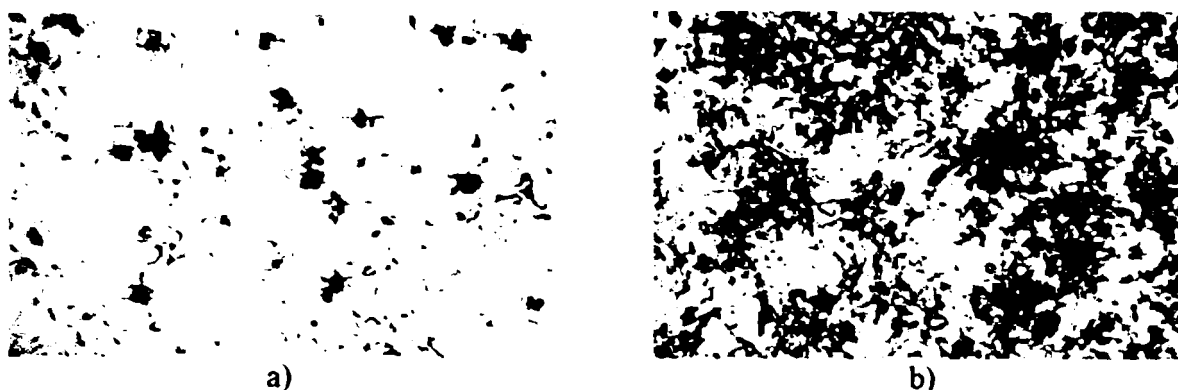


**Figura 6.9** Microstructură segment de foc: a) masa de bază, 100:1, neatacat; b) 500:1, atac nital



**Figura 6.10** (a) Microstructură segment mijlociu, 100:1, neatacat; (b) microstructură segment de compresie, 100:1, atac nital





**Figura 6.11** Microstructură segment ungere a) 100:1, neatacat; b) 100:1, atac nital

Din figura 6.9 se observă că:

- diametrul separărilor de grafit: 25...50  $\mu\text{m}$ ;
- suprafața ocupată de nodurile de grafit: peste 8 până la 12%;
- masa de bază: structură de călire și revenire înaltă, la care se mai remarcă fosta orientare aciculară cu mici separări de  $\text{Fe}_2\text{C}$ ;
- duritatea masei de bază: 270 HB.

Observând microstructurile din figurile 6.10 și 6.11, se pot face următoarele observații:

- masa de bază este formată din perlită și ferită în proporție de 5%;
- caracterul separărilor de grafit: lamelar, arcuit, asociat cu formă de cuiburi;
- caracterul repartizărilor eutecticului fosforos: rețea slab întreruptă;
- duritatea masei de bază: 210 HB.

Pentru experimentări s-au utilizat un lot de 210 segmenti (70 din fiecare tip). Segmentii au fost prelucrați la cote finite și fără cromare pe suprafața de lucru, conform următorului itinerar tehnologic:

Operații tehnologice la realizarea segmenti de foc

1. prelucrare eboș două treceri;
2. curățire;
3. retezare (debitare din bucșă);
4. rectificare eboș;
5. curățire;
6. tratament termic de feritizare (950 °C, răcire în cuptor până la 400 °C și apoi răcire în aer, HB = 160 și călire la 920 °C / ulei, urmată de revenire la 550 °C – 75 minute);



7. rectificare eboș;
8. rectificare semifină;
9. rectificare fină;
10. curățire;
11. control poli-sortare;
12. strunjire de formă și tăiere fontă;
13. controlul parametrilor;
14. eliminare rebut;
15. control înălțime;
16. calibrare eboș (la fontă);
17. strunjire exterioară și teșire muchii;
18. calibrare fină;
19. teșirea muchiilor de fontă;
20. rectificare fină la suprafață;
21. curățire;
22. marcare;
23. control;
24. degresare;
25. durificare superficială;
26. control final;
27. conservare.

Analizând ciclul tehnologic al segmentilor, se observă că este înlocuită aparatura, operațiunea de cromare aplicată suprafeței portante a segmentilor de foc, fapt ce duce și la simplificarea procesului tehnologic.

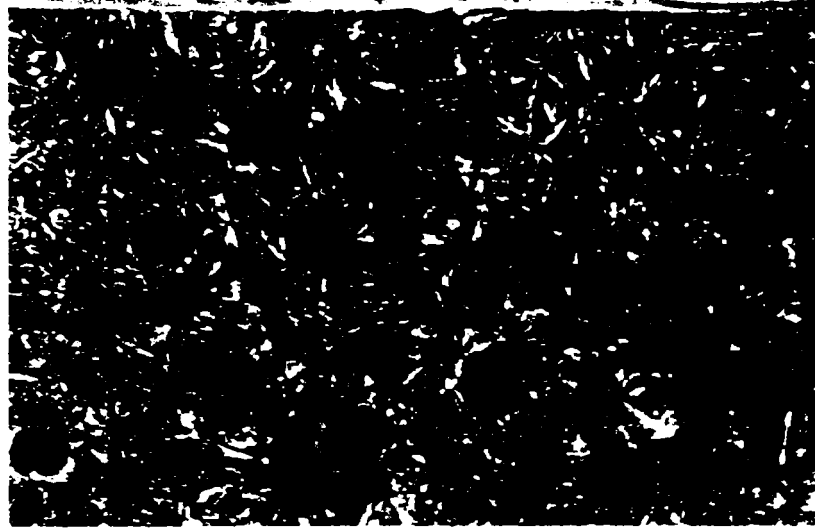
Înainte de montaj s-au efectuat măsurătorile dimensionale pentru a observa dacă piesele tratate se încadrează în limitele prevăzute de documentație și pentru a putea stabili gradul de uzare după efectuarea testului de încercare pe stand și pe autoturisme.

Piesele au fost controlate dimensional la compartimentul CTC al fabricii de segmenti SEGMENT S.A.

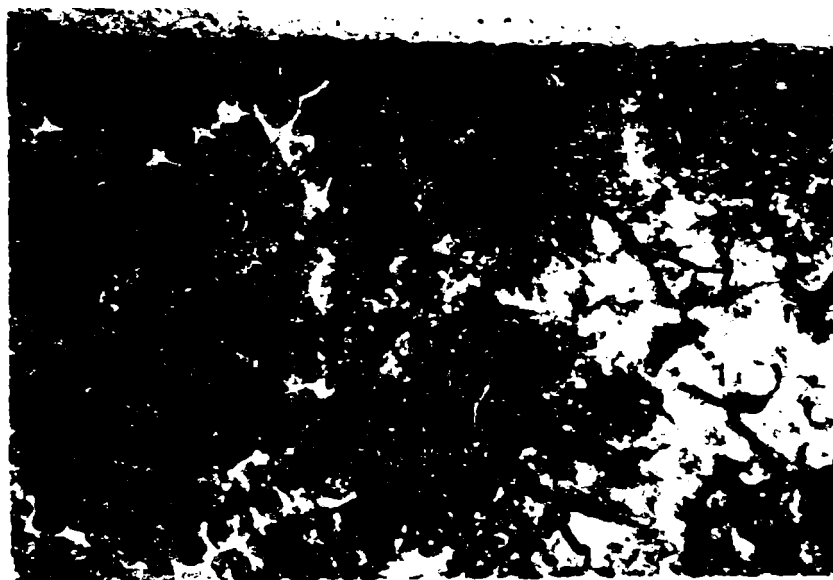
Segmentii astfel pregătiți au fost durificați la INTEC S.A. Pe baza datelor anterioare s-a ales ca variantă de tratament nitroferoxarea în strat fluidizat, realizată la 560 °C timp de 2,5 ore într-o atmosferă conținând amoniac și vapori de apă.



Microstructura obținută în urma acestui tratament este prezentată pentru cele trei tipuri de segmente în figurile 6.12, 6.13 și 6.14.



**Figura 6.12** Microstructură segment de foc durificat superficial, 500:1, atac nital



**Figura 6.13** Microstructură segment de compresie durificat superficial, 500:1, atac nital



**Figura 6.14** Microstructură segment de ungere durificat superficial, 500:1, atac nital

Straturile superficiale au prezentat microdurități de 720 – 941 HV<sub>0,02</sub> pe o adâncime de cca. 0,007 mm; se remarcă, de asemenea, valori de microduritate de 400 – 500 HV<sub>0,02</sub> pe constituenți perlitici pe o adâncime de până la 0,025 mm, comparativ cu 338 – 381 HV<sub>0,02</sub> la perlita din miez.

După tratamentul superficial de nitroferoxare, segmentii au fost controlați prin sondaj și s-a constatat că s-au încadrat în valorile prevăzute de documentație și anume:

- a) segmentii de foc:
- jocul de fantă: 0,25 – 0,30 mm;
  - cota radială: 3,0 – 3,20 mm;
  - înălțime: 1,75 – 0,003 – 1,75 – 0,012 mm;
  - forță tangențială: 1650 – 1760 g.

Duritatea după tratament a fost cuprinsă între 540 și 600 HV<sub>0,1</sub> (duritatea miezului fiind 210 HV<sub>0,1</sub>).

- b) segmentii de compresie:
- jocul de fantă: 0,20 – 0,40 mm;
  - cota radială: 3,20 – 3,25 mm;
  - înălțime: 2 – 0,002 – 2 – 0,006 mm;
  - forță tangențială: 1300 – 1500 g.
- c) segmentii de ungere:
- jocul de fantă: 0,35 – 0,48 mm;
  - cota radială: 2,50 – 3,75 mm;
  - înălțime: 4 – 0,005 – 4 – 0,015 mm;





Procesul de uzare este accelerat de condițiile dificile de lucru ca: temperatura, presiunea gazelor de ardere, viteza variabilă a pistonului, ungerea defectuoasă, concentrarea de particule abrazive din mediul exterior, ș.a. Pentru determinarea rezistenței la uzare și a coeficienților de frecare s-au utilizat epruvete de forme și dimensiuni din figura 6.15, realizate din materialul cămășilor de cilindru, pe de o parte și din cel al segmentilor pe de altă parte, cu aceeași stare de prelucrare a suprafeței ca cea a pieselor. Aceleași epruvete s-au utilizat și pentru aprecierea structurii și microdunității.

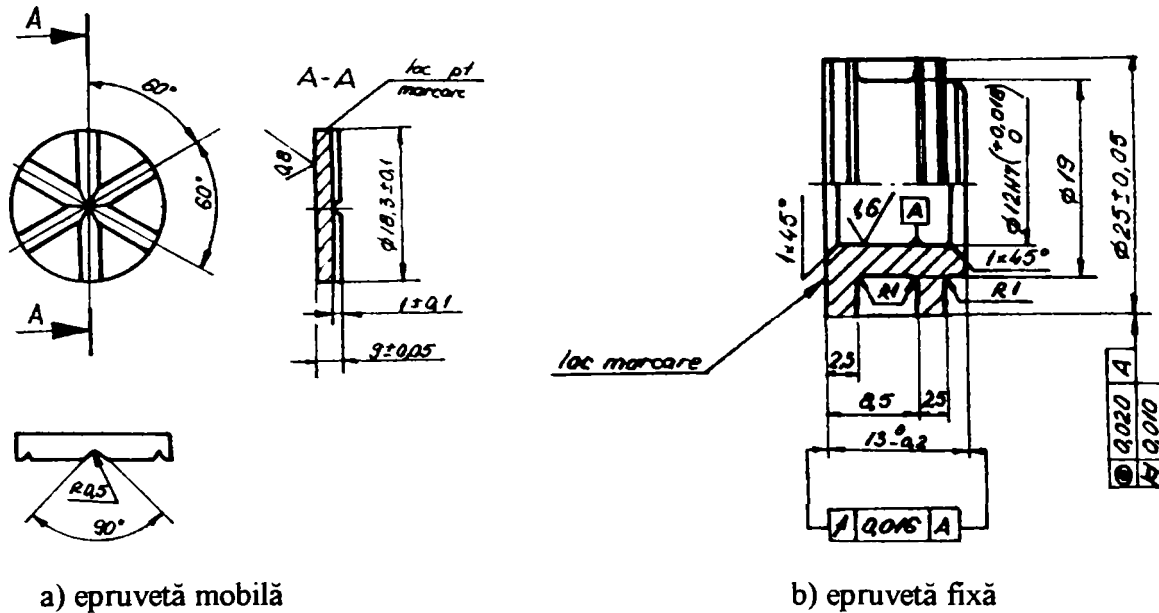
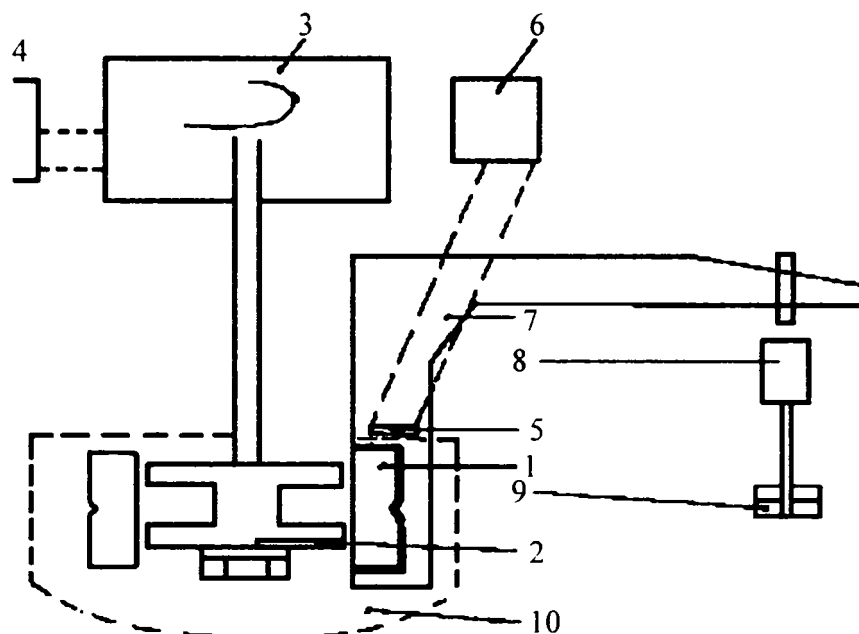


Figura 6.15 Tipuri de epruvete utilizate pentru determinarea rezistenței la uzare

În figura 6.16 este prezentată schema standului de uzură TIMKEN.



**Figura 6.16** Schema standului de uzură TIMKEN: 1 – epruvetă fixă; 2 – epruvetă mobilă; 3 – sistem ce asigură mișcarea de rotație; 4 – panou electric; 5 – traductor tensometric; 6 – punte tensometrică; 7 – braț pârghie încărcare; 8 – taler pentru greutate; 9 – greutate etalon; 10 – vas cu ulei

Determinările statistice privind uzura alezajului cămășii – cilindru au evidențiat o neuniformitate a dimensiunilor corelată cu solicitările la care sunt supuse în timpul funcționării.

Determinările pentru calculul vitezei de uzare au fost efectuate la aceeași viteză de rotație de 1395 rot/min, căreia conform metodologiei standard îi corespunde un timp de încercare de 60 de minute pentru fiecare treaptă de încărcare.

S-au efectuat determinări la 75, 125, 175 și 250 N. După fiecare încărcare care a durat 60 minute s-a citit la microscop lățimea petei de uzură pe epruveta plană. În calcul s-a luat media lățimii celor două pete de uzură lăsate de benzile de contact ale epruvetei mobile.

Viteza de uzare se determină cu relația:

$$v_{up} = 3 \cdot 10^4 \frac{D_j}{t} \cdot \frac{1}{sc} \arcsin x - \sqrt{1 - x^2}, \mu\text{m/h} \quad (6.2)$$

în care:

$t$  – timpul corespunzător treptei de încărcare în minute, respectiv 60 minute;

$D_j$  – diametrul mediu la finele treptei de încărcare;

$x = \frac{\bar{l}}{D}$ ,  $\bar{l}$  fiind valoarea medie a lățimii petei de uzură măsurată pe epruveta plană,

corespunzător treptei de încărcare;



$\arcsin x$  – se va introduce în calcul în radiani.

Pe parcursul determinărilor, uzura epruvetei mobile (cilindrice) a fost practic neglijabilă. În tabelul 6.7 sunt prezentate valorile vitezei de uzare, exprimate în  $\mu\text{m/h}$ , calculate pentru diverse cupluri de materiale.

**Tabelul 6.7** Valorile vitezei de uzare

	Epruveta mobilă /epruveta fixă	Durata încărcării (min)			
		60	120	180	240
<b>Uzură cămașă</b>	netratată / netratată	11,1065	14,0154	22,5516	28,5671
	cromată / netratată	10,2120	12,0385	16,1427	19,2132
	nitroferoxată / netratată	8,0843	18,8745	24,4191	28,1745
	nitroferoxată / nitrurată ionic	7,5020	10,8746	14,7669	18,4946
	netratată / nitrurată ionic	5,2093	7,5020	8,5359	14,7077
<b>Uzură segmenti</b>	netratată / cromată	7,5020	7,5020	12,0385	13,3397
	netratată / nitroferoxată	8,5359	16,7356	25,0479	32,0703
	nitrurată ionic / netratată	10,2531	25,3327	30,1533	32,1994
	nitrurată ionic/ nitroferoxată	9,6754	12,0869	15,3351	16,2076
	netratată / netratată	11,1065	14,0154	22,5516	28,5671

Pe lângă cuplurile existente la ora actuală în motorul de Dacia 1300, respectiv segment cromat – cămașă netratată și segment netratat – cămașă netratată, s-au efectuat determinări pentru cuplurile segment nitroferoxat – cămașă netratată, segment nitroferoxat – cămașă durificată și segment netratat – cămașă nitrurată (durificată).

În acest set de determinări, epruveta mobilă s-a considerat pe post de segment, iar epruveta fixă a jucat rol de cămașă cilindru, pe ea determinându-se viteza de uzare. Rezultatele acestui test de uzare sunt ilustrate prin curbele din figura 6.17.



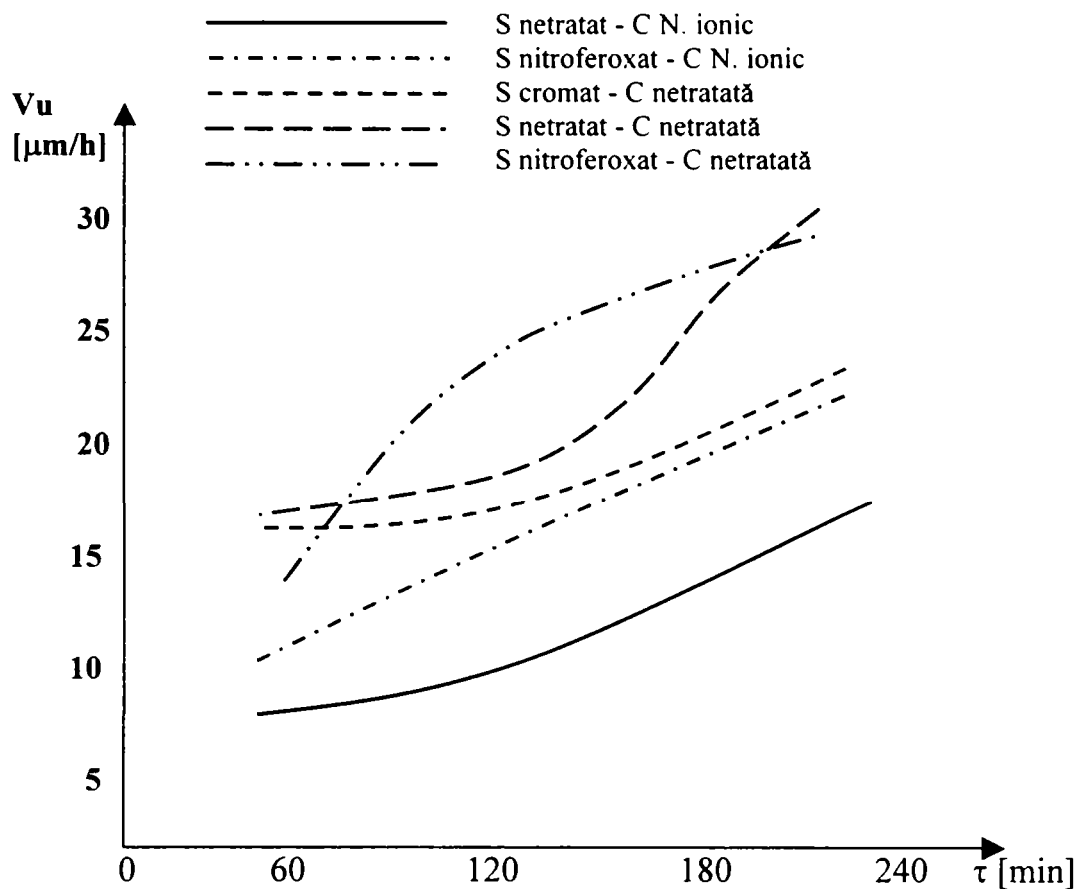


Figura 6.17 Rezultatele testului de uzură cămăși

Pentru a putea determina și uzura segmentilor, s-a inversat rolul epruvetelor, astfel încât epruveta fixă a devenit segment, iar cea mobilă cămașă. Rezultatele acestui test sunt ilustrate în graficele din figura 6.18.

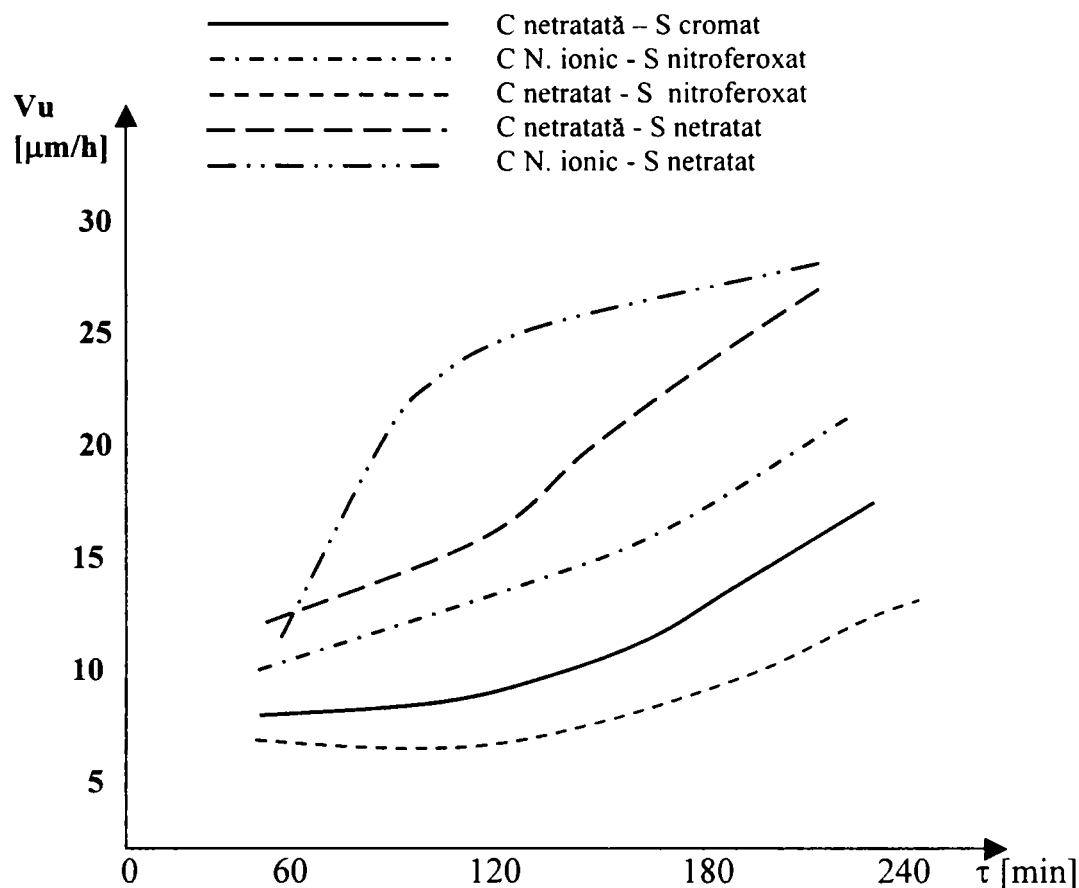


Figura 6.18 Rezultatele testului de uzură segmenti

Examinând datele din tabelul 6.7 și curbele din figurile 6.17 și 6.18 se pot face următoarele observații:

În ceea ce privește uzura segmentilor:

- cea mai mică uzură au prezentat-o segmentii cromati în cuplul cu cămăși crude (figura 6.17);
- o evoluție asemănătoare a vitezei de uzare au prezentat segmentii nitroferoxați în cuplul cu cămăși nitrurate în plasmă (ionic);
- cea mai mare uzură cu pantă mare în primele momente de încercare au prezentat-o segmentii cruzi în cuplul cu cămășă durificată;

În ceea ce privește uzura cămășilor:

- cea mai mică uzură se semnalează la cămășile nitrurate în cuplul cu segmenti cruzi;
- uzura cea mai mare se remarcă la cămășile crude în cuplul cu segmenti nitroferoxați.

Așadar, din punct de vedere al uzurii segmentilor, ar fi preferabilă utilizarea segmentilor cromati cu cămăși nedurificate, dar în acest caz uzura cămășilor ar fi destul de mare.



Din punct de vedere al vitezei de uzare a cămășilor, ar fi preferabilă varianta cămașă nitrurată – segment netratat, dar aceasta conduce la o uzură foarte mare a segmentilor.

Din cele prezentate mai sus rezultă că cea mai bună comportare la uzare, pentru ambele elemente ale cuplului cămașă – segment a avut-o cuplul cămașă nitrurată ionic - segment nitroferoxat.

Aceste rezultate se corelează și cu valorile reduse ale coeficientului de frecare determinat pentru cuplul nitroferoxat – nitrurat ionic.

O posibilă explicație ar fi rolul benefic pe care îl are stratul intermediar de oxinitruri și suprafața metalică. Pe de altă parte, stratul superficial de oxinitruri de pe segmenti și cămașa cu o rugozitate a suprafeței interioare nitrurate ușor mai mare decât cea a cămășii crude, constituie „magazii de ulei” care îmbunătățesc condițiile de frecare de alunecare. La acestea se mai adaugă și faptul că straturile superficiale nitrurate rezistă bine la temperaturi de cca. 400° C, fără a suferi modificări, ceea ce explică buna comportare a cuplului cămașă nitrurată – segment nitroferoxat.

#### **6.1.6 Experimentări pe motoare de autoturisme Dacia**

Din lotul avut la dispoziție, pentru încercările efectuate pe stand de către ICSITA, s-au format 5 seturi motor, după cum urmează:

- 1) – un set de cămăși durificate și segmenti durificați pe motorul: 381-117978 (cămăși nr. 85, 15, 95, 3);
- 2) un set de cămăși durificate și segmenti durificați pe motorul: 379-1179781 (cămăși nr. 46, 41, 37, 43);
- 3) un set de cămăși durificate și segmenti durificați pe motorul: 380-1179780 (cămăși nr. 27, 31, 49, 45);
- 4) un set de cămăși netratate și segmenti durificați pe motorul: 382-117979;
- 5) un set de cămăși și segmenti din fabricația de serie pe motorul: 383-1179782.

Pe aceste seturi care au funcționat 300 de ore (echivalente cu cca. 45000 km parcurși) s-au apreciat: uzura cămășilor și a cilindrilor, precum și caracteristicile funcționale ale motorului (putere activă, moment, consum specific, raport de compresie, etc.).



Rezultatele obținute atât în ceea ce privește calitatea tratamentului de durificare, cât și starea dimensională (înainte și după tratament) și comportarea din punct de vedere al uzării prezentate în continuare.

Prelucrând valorile măsurătorilor dimensionale inițiale și după 45000 km parcurși, rezultă mărirea uzurii pentru cămăși și segmenti și de asemenea, datele privind abaterea de la dimensiuni (conicitate) la cămăși după efectuarea încercării.

În ceea ce privește uzura cămășilor, efectuând media măsurătorilor, situația se prezintă în tabelul 6.8:

**Tabelul 6.8** Uzura cămășilor pe diferite plane

Planul	Uzura cămășii pe direcția A-A și B-B							
	Cilindru 1		Cilindru 2		Cilindru 3		Cilindru 4	
	A-A	B-B	A-A	B-B	A-A	B-B	A-A	B-B
I-I	0,065	0,015	0,008	0,135	0,130	0,140	0,035	0,030
II-II	0,035	0,022	0,067	0,105	0,112	0,090	0,018	0,013
III-III	0,023	0,025	0,055	0,083	0,074	0,067	0,020	0,006
IV-IV	0,020	0,037	0,033	0,063	0,065	0,037	0,020	0,008
V-V	0,020	0,004	0,020	0,035	0,055	0,015	0,030	0,010
VI-VI	0,012	0	0,025	0,027	0,037	0,10	0,050	0,008
VII-VII	0,005	0,022	0,025	0,033	0,030	0,013	0,042	0,005
VIII-VIII	0,008	0,025	0,030	0,030	0,030	0,018	0,022	0,008
Media	0,029	0,017	0,045	0,063	0,066	0,487	0,029	0,012

Din punct de vedere al conicității, situația pentru cele patru cămăși componente ale setului motor se prezintă astfel (tabelul 6.9):

**Tabelul 6.9** Valorile conicității cilindrilor cămășilor

Conicitate	Planul	Cilindru 1		Cilindru 2		Cilindru 3		Cilindru 4	
		Inițial	Final	Inițial	Final	Inițial	Final	Inițial	Final
A-A	A-A	0,0703	0,0906	0,01312	0,0562	0,0046	0,07125	0,0725	0,101
	B-B	0,0748	0,1006	0,0130	0,0678	0,01950	0,0682	0,0522	0,09

Se constată că uzură mai mare au prezentat cilindrii 2 și 3, aproximativ de 2 ori mai mare față de cilindrii 1 și 4.

Totuși, din punct de vedere al conicității, după efectuarea încercării, se constată că valorile sunt mai reduse la cilindrii 2 și 3, ceea ce înseamnă că suprafața piesei s-a uzat uniform.

După efectuarea a 350 de ore de încercare pe stand, suprafața interioară a cămășilor a prezentat aspectul din figura 6.19. Figura 6.19 a) reprezintă starea suprafeței cămășii



nedurificate, din setul 5, montată pe motorul de referință 383-1179782. Figura 6.19 b) reprezintă starea suprafeței cămășii 46 din setul 2, montată pe motorul 379-1179781 (cu cămăși și segmenti durificați).



**Figura 6.19** Aspect suprafață interioară cămașă cilindru după funcționare 500 h pe stand:  
a) nedurificat, 100:1; b) durificat, atac nital

Examinând aceste structuri, se constată că, la cămașa netratată apar smulgeri favorizate probabil de filamentele de grafit pe adâncimi până la 0,08 mm, comparativ cu suprafața interioară a cămășii inițial durificate, care este mult mai netedă, prezentând izolat denivelări pe adâncimea de 0,020 mm.

În ceea ce privește uzura segmentilor, valorile prezentate în fișa de măsurători indică o repartiție după cum se prezintă în tabelul 6.10:

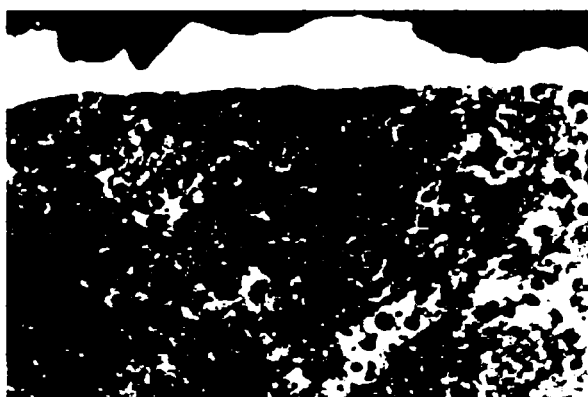
**Tabelul 6.10** Valorile uzurilor segmentilor

Tip segment	Uzura segmentilor, dimensiune fantă [ $\mu\text{m}$ ]			
	Cilindru 1	Cilindru 2	Cilindru 3	Cilindru 4
Superior (foc)	1,72	1,65	1,60	0,40
Mijlociu	1,73	0,88	0,59	1,60
Inferior (ungere)	1,98	2,90	2,21	0,90

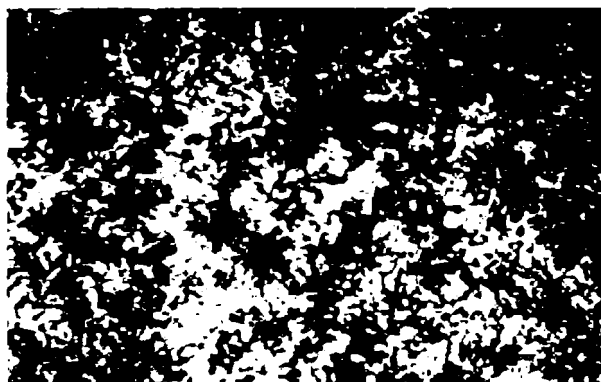


Din tabelul 6.10 rezultă că segmentii mijlocii nitroferoxați au prezentat o uzură mult mai mică decât cei de serie (0,765 față de 1,665 în medie), uzura segmentilor superiori este sensibil apropiată pentru cilindrii 1, 2 și 3, excepție prezentând segmentii cilindrului 4, la care uzura este foarte mică. Uzură mai mare apare la segmentii de ungere pentru seturile durificate față de seturile martor.

După efectuarea celor 500 ore de încercare pe stand, suprafețele portante ale segmentilor au prezentat aspectul din figurile 6.20...6.25.



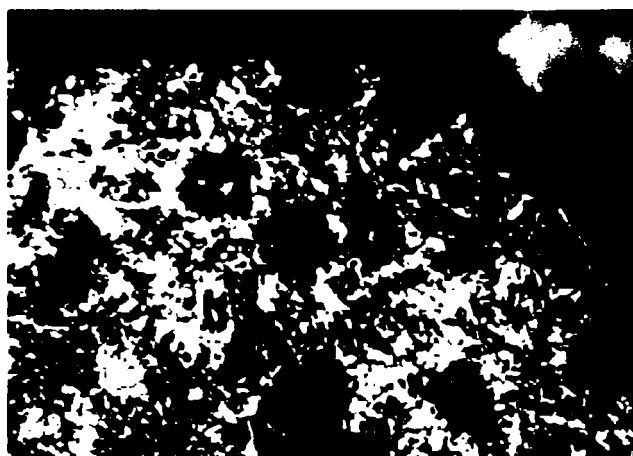
**Figura 6.20** Aspect suprafață segment de foc cromat după 500 ore funcționare (fabricație de serie), 100:1, atac nital



**Figura 6.21** Aspect suprafață segment compresie după 500 ore de funcționare (fabricație de serie), 100:1, atac nital



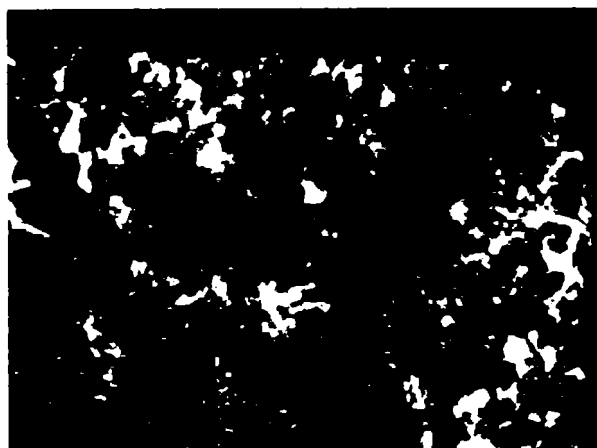
**Figura 6.22** Aspect suprafață segment de ungere cromat după 500 ore funcționare (fabricație de serie), 100:1, atac nital



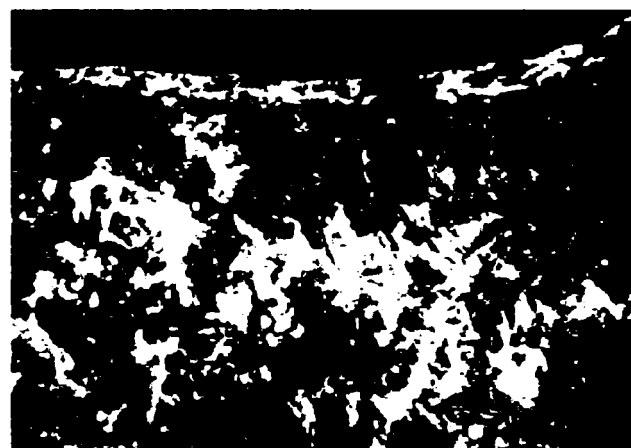
**Figura 6.23** Aspect suprafață segment de foc durificat după 500 ore de funcționare, 500:1, atac nital



**Figura 6.24** Aspect suprafață segment de compresie durificat după 500 ore de funcționare, 500:1, atac nital



a)



b)

**Figura 6.25** Aspect suprafață segment ungere durificat după 500 ore funcționare, 500:1, atac nital;  
a) zona de lucru; b) profil interior

În primele trei microstructuri este prezentată starea segmentelor din fabricația de serie, care au echipat motorul de referință 383-1179782, iar următoarele trei starea segmentelor care au funcționat 500 ore pe motorul 379-1179781.



Examinând microstructurile 6.20...6.22 se constată că stratul superficial cromat s-a păstrat pe cca. 0,050 mm la segmentul de foc (pe suprafața de lucru) și prezintă smulgeri; segmentul mijlociu prezintă, în general, o suprafață netedă, iar la cel de ungere se remarcă o absență totală a depunerii inițiale de Cr pe suprafața de lucru; stratul s-a păstrat la o grosime de 0,026 – 0,035 mm pe flancuri, față de 0,060 – 0,070 mm în interiorul profilului.

La segmentii durificați (nitroferoxați) se constată că, pe suprafața portantă au mai fost zone izolate în strat, îndeosebi la cei de compresie și de ungere (figura 6.24 și 6.25), comparativ cu figura 6.23; pe suprafețele laterale se observă, încă, existența stratului de oxinitrură pe o adâncime de cca. 0,005 mm, iar la profilul anterior al segmentului de ungere, stratul a rămas aproape nedeteriorat (figura 6.25 b).

Recapitulând rezultatele testelor efectuate atât pe stand, cât și pe autoturism, putem spune că:

- După tratamentul de durificare aplicat la cămăși nu s-au semnalat deformații, piesele corespunzând dimensional;
- La segmentii s-au semnalat valori ale fantei mai mari decât cele prezentate în documentație, îndeosebi la segmentii de ungere, proprietățile de elasticitate nu s-au modificat prin aplicarea tratamentului de durificare;
- Uzura măsurată la cămăși pentru lotul de motoare de Dacia 1300 este ceva mai mare la seturile durificate față de martor (serie) și anume 0,013 față de 0,009 (valori medii). Totuși, metoda calculării uzurii medii pe cilindru și pe set este aproximativă;
- Deși valorile arătate mai sus indică o uzură mai mare la seturile durificate față de setul martor, totuși, caracteristicile de funcționare ale motorului (consum de ulei, carburant, scăderea puterii efective) arată o comportare superioară a motoarelor echipate cu seturi durificate. O explicație ar consta în faptul că în acest caz are loc o uzură uniformă în sensul că segmentii exercită o presiune constantă pe suprafața cămășii în tot timpul exploatării;
- La setul încercat pe stand în condiții de uzură accelerată (120 h) și de duranță (500 h) cămășile nitrurate în cuplu cu segmentii durificați au prezentat o uzură cu cca. 30 % mai mică față de cămășile din fabricația de serie;
- Segmentii mijlocii se serie se uzează, de asemenea, mai mult decât cei durificați, fapt semnalat în toate situațiile, indiferent de tipul încercării;





## 6.2 Cercetări experimentale privind creșterea rezistenței la uzare a ansamblului arbore cu came – tachet

Uzura în ansamblul *arbore cu came -- tachet* (figura 6.26) are efecte nedorite, în primul rând, datorită modificărilor pe care le produce în procesul de admisie și evacuare, putând conduce la diminuarea puterii motorului, la consumuri exagerate de combustibil, dar și la creșterea nivelului de zgomot.

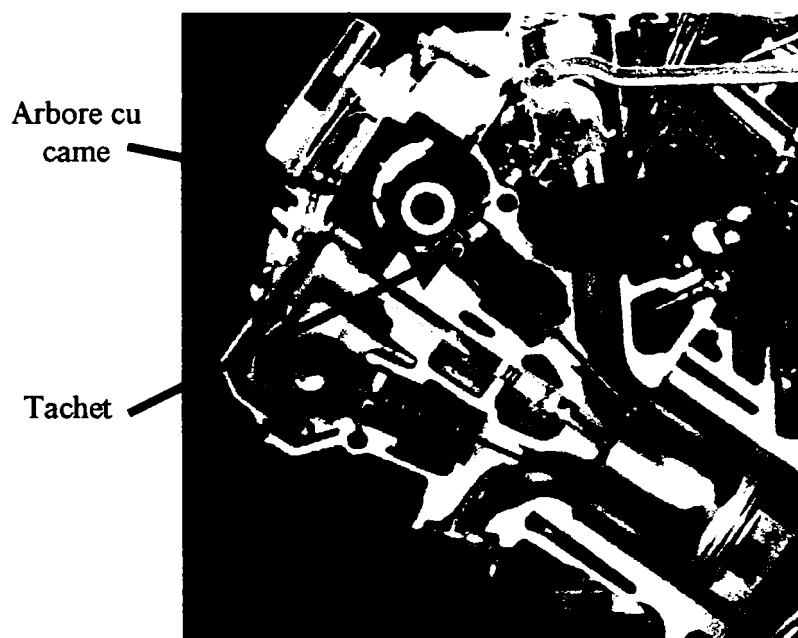


Figura 6.26 Ansamblul arbore cu came – tachet

O eventuală avarie a acestui ansamblu poate avea urmări catastrofale, afectând și alte componente ale motorului.

Funcționarea corectă a acestui ansamblu presupune proiectarea și realizarea corectă a profilului camei, calculul cinematic și dinamic, dar și alegerea convenabilă a materialului celor două componente și a unui tratament corespunzător. În general, arborii cu came se realizează din fontă cenușie la care, în timpul funcționării, pot apărea fisuri care se dezvoltă fie pornind de la un defect produs pe suprafață prin frecare (figura 6.27 a), fie de la o aglomerare de carburi din interiorul materialului (figura 6.27 b).[112]



**Figura 6.27** Apariția și propagarea fisurilor în arborii cu came din fontă cenușie: a) fisură pornită de la o aglomerare de carburi; b) fisură pornită de la un defect de pe suprafață

Programul de încercări a urmărit comportarea la solicitările din exploatare a arborilor cu came și a tacheților având diferite prelucrări ale suprafeței active.

În acest scop au fost analizate următoarele variante tehnologice de realizare a componentelor cuplului arbore cu came – tacheți:

- arbore cu came în stare turnată;
- arbore cu came nitrurat;
- tacheți căliți superficial;
- tacheți carbonitrurați.

Pentru evidențierea caracteristicilor acestor repere au fost efectuate:

- analize metalografice macroscopice și microscopice ale structurii;
- analize metalografice macroscopice și microscopice ale suprafețelor de contact înainte și după încercare;
- încercări sclerometrice în materialul de bază și în stratul superficial;
- difracție de raze X pentru analiza structurală și a stării de tensiuni.

Solicitările din exploatare au fost simulate prin montarea arborilor cu came și a tacheților pe motoare care au funcționat fie pe standul de încercare, fie pe autoturisme.

### **6.2.1 Tehnologia de fabricare și tratamentele superficiale ale arborilor cu came**

Schița unui arbore cu came pentru autoturisme Dacia este prezentată în figura 6.28.

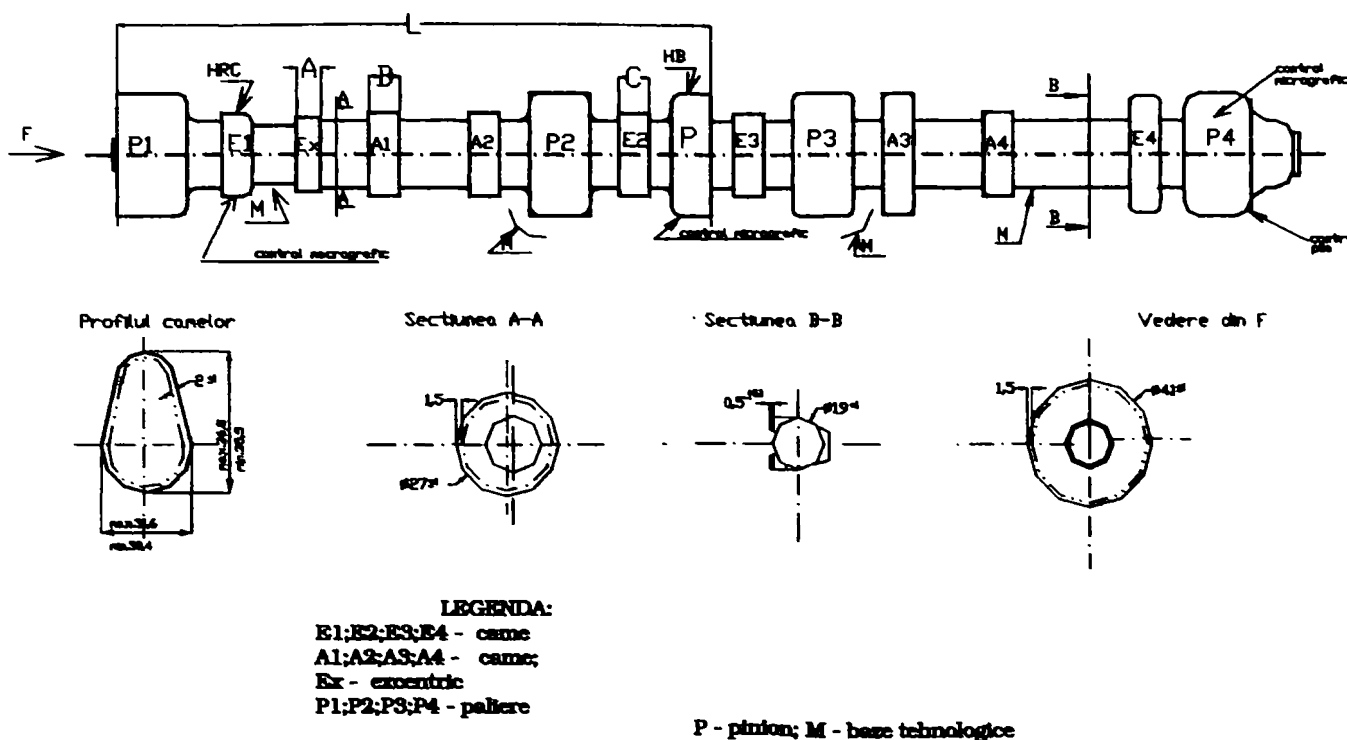


Figura 6.28 Arbore cu came pentru autoturisme Dacia

Arborii cu came se obțin prin turnare din fontă marca 250 – SR ISO 185, având următoarea compoziție chimică:

- carbon: 3,4 – 3,6 %;
- siliciu: 1,8 – 2,1 %;
- mangan: 1 – 1,1 %;
- sulf: max. 0,15 %;
- fosfor: max. 0,1 %.

Tehnologia standard prevede ca elaborarea să se facă în cuptor de topire cu inducție, de frecvență medie.

Temperatura de supraîncălzire a fontei este de 1460 – 1470 °C, iar durata de menținere la această temperatură este de 10 minute.

Arborii cu came se toarnă de la temperatura de 1370 – 1390 °C.

Structura fontei trebuie să conțină o matrice ferito – perlitică cu maxim 10% ferită. Pentru grafitizare se adaugă modificator grafitizant cu granulație de 5 – 10 mm, în cantitate de 0,4 la 1 kg pentru 300 kg fontă. Modificatorul se adaugă în momentul în care 1/3 din oala de turnare este umplută cu fontă lichidă.

Pentru a se evita obținerea unei structuri necorespunzătoare se realizează încercarea de duritate și analiza metalografică după schema din figura 6.29.

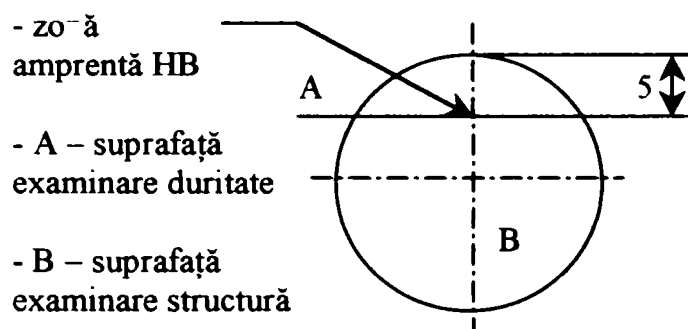


Figura 6.29 Schema încercărilor de duritate și analiză metalografică

Se admite ferită în proporție de maximum 20%, numai în cazul în care duritatea HB luată la 5 mm adâncime față de suprafața piesei se încadrează în limitele impuse (207 – 255 HB), iar duritatea minimă obținută după turnare, în zona de înălțime maximă a camei, este de 48 HRC.

Structura camei obținută după turnare se prezintă în figurile 6.30, 6.31, 6.32, 6.33 și 6.34.

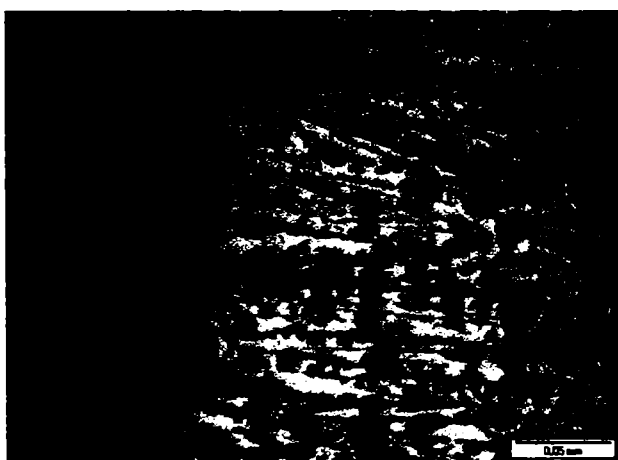


Figura 6.30 Suprafața camei în zona vârfului

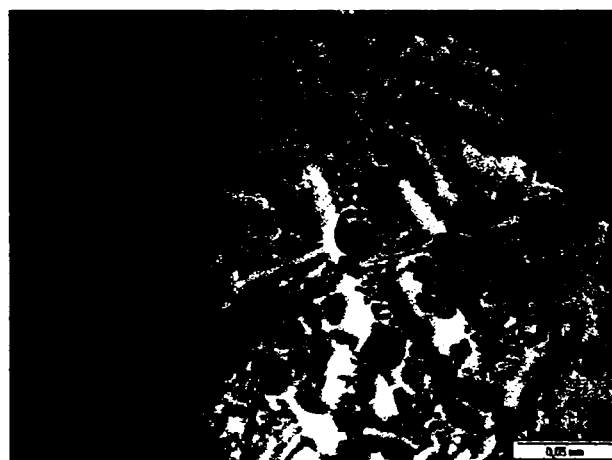


Figura 6.31 Suprafața camei pe cercul de bază

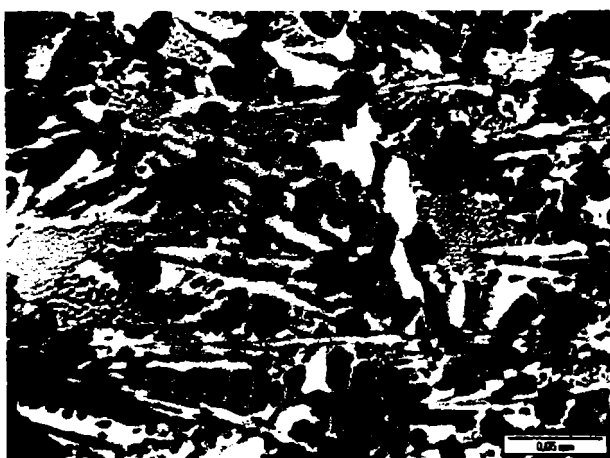


Figura 6.32 Zona din vecinătatea suprafeței  
(adâncime de 3 mm)

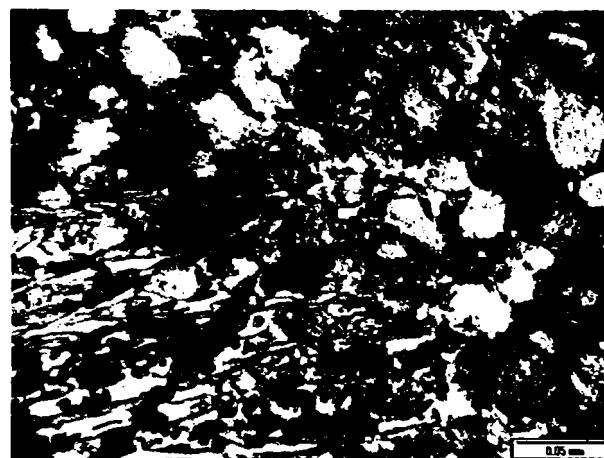


Figura 6.33 Zona intermediară (adâncime de 5  
mm)

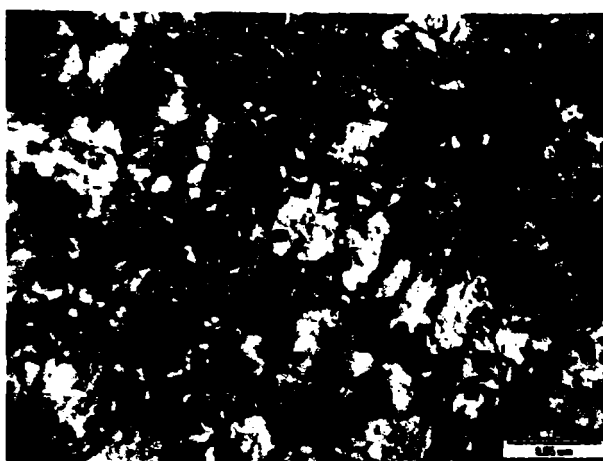


Figura 6.34 Zona centrală

Pentru a analiza efectul durificării structurale a arborilor cu came prin nitrurare ionică, a fost folosit un lot de 10 arbori nitrurați în plasmă într-o instalație NITRION la 520 °C timp de 12 ore.

Structurile obținute în stratul superficial sunt prezentate în figurile 6.35 și 6.36.

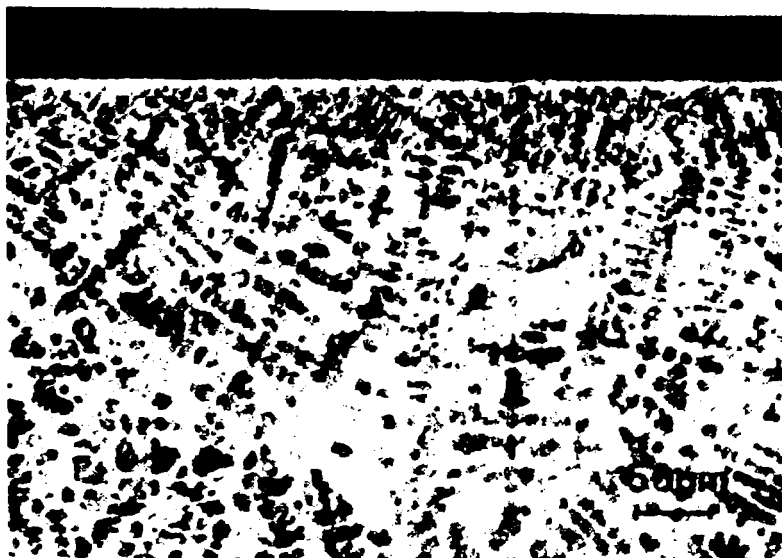


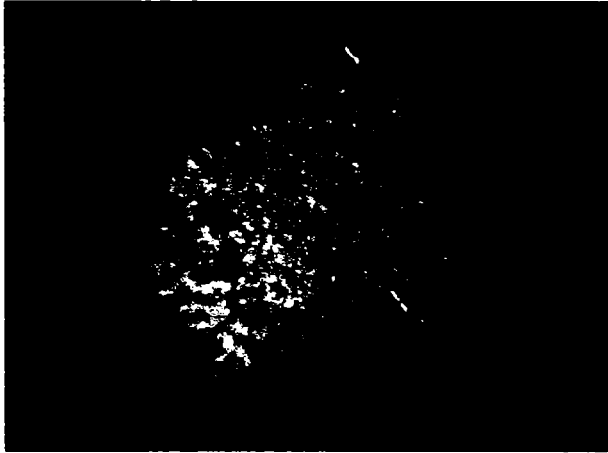
Figura 6.35 Structura came nitrurate



Figura 6.36 Strat nitrurat

### 6.2.2 Tehnologia de fabricare și tratamentele superficiale ale tacheților

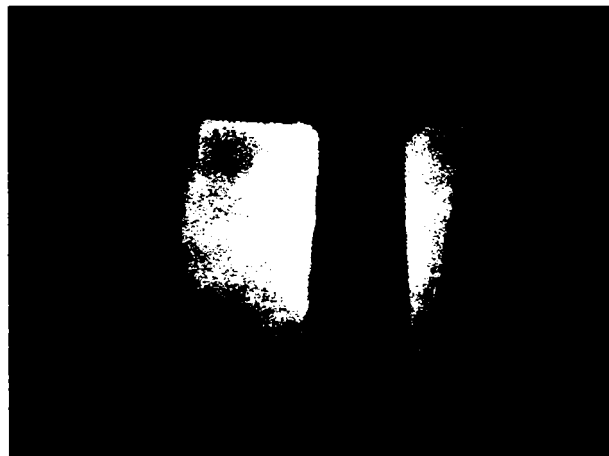
Suprafața tacheților noi prezintă neregularități, iar adâncimea stratului afectat de tratament diferă mult de la un tchet la altul (figura 6.37, figura 6.38, figura 6.39).



**Figura 6.37** Suprafața de contact tachtet neîncercat, microscop stereo, 1,6x

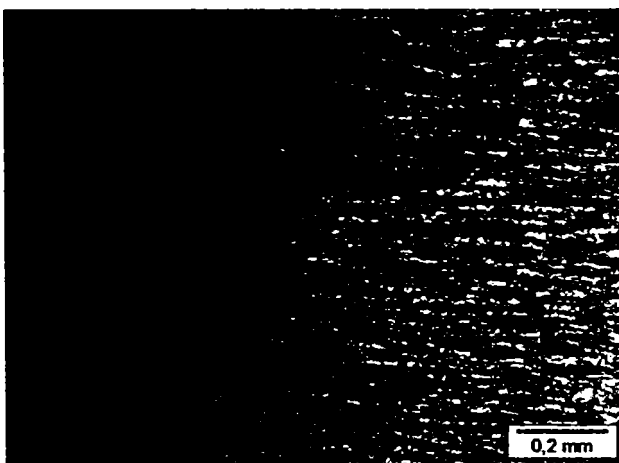


**Figura 6.38** Zona muchiei, tachtet neîncercat, microscop stereo, 1,6x

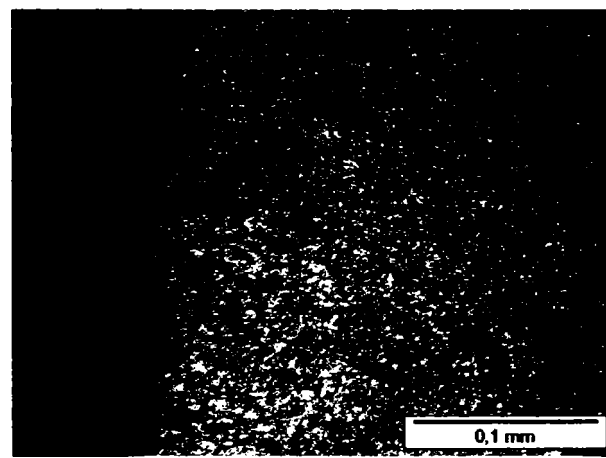


**Figura 6.39** Secțiune transversală prin doi tacheți, microscop stereo, 1x, atac nital

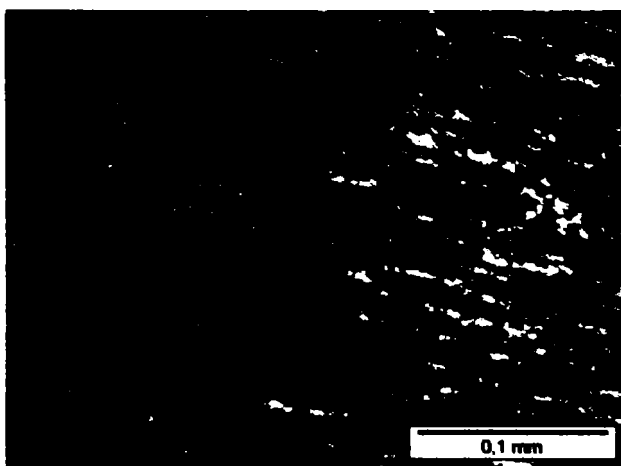
În figurile 6.40 – 6.49 se prezintă microstructurile a doi tacheți tratați prin carbonitrurare.



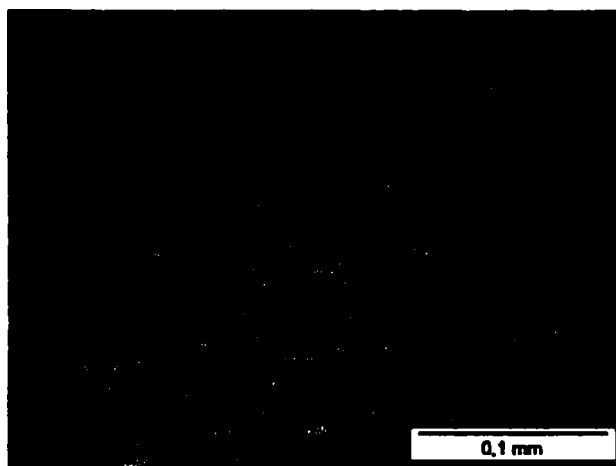
**Figura 6.40** Strat durificat (tachtet 1)



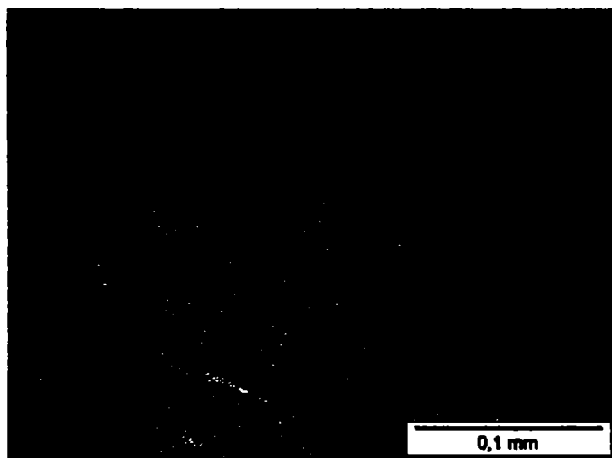
**Figura 6.41** Strat superficial (tachtet 1)



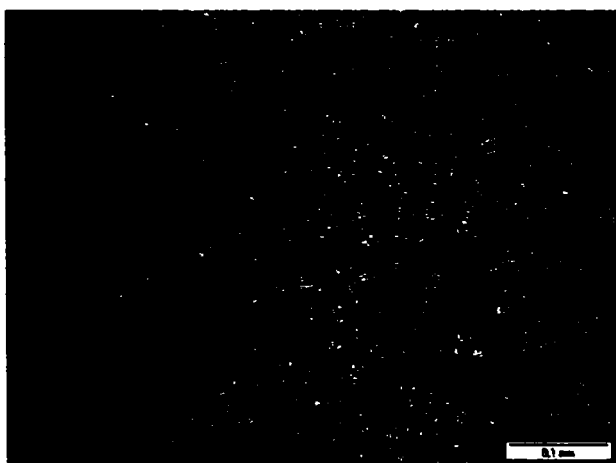
**Figura 6.42** Zona de trecere (tachet 1)



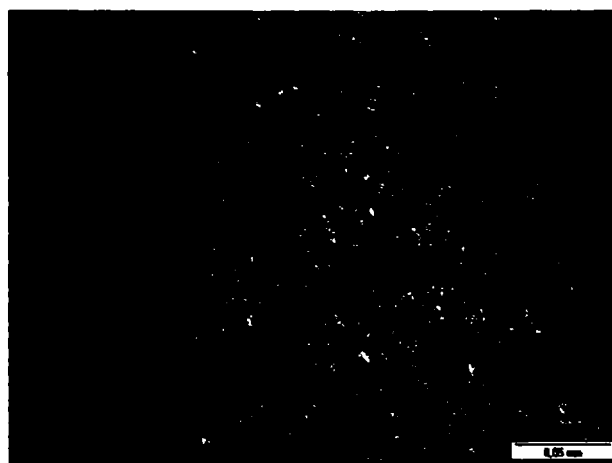
**Figura 6.43** Structura miezului (tachet 1)



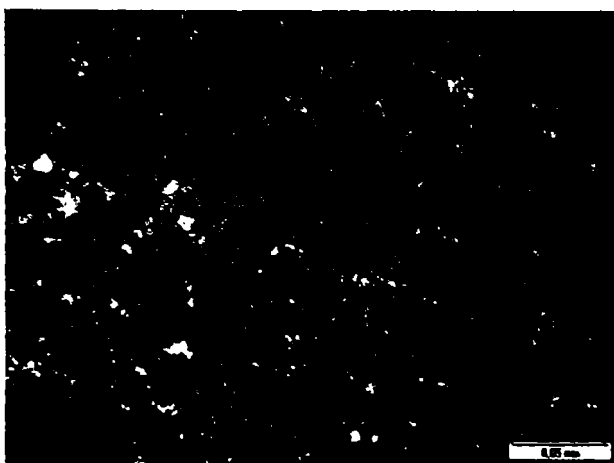
**Figura 6.44** Fibraj în zona deformată plastic (tachet 1)



**Figura 6. 45** Strat durificat (tachet 2)



**Figura 46** Strat exterior (tachet 2)



**Figura 6.47** Zona de trecere (tachet 2)



**Figura 6.48** Structura miezului (tachet 2)



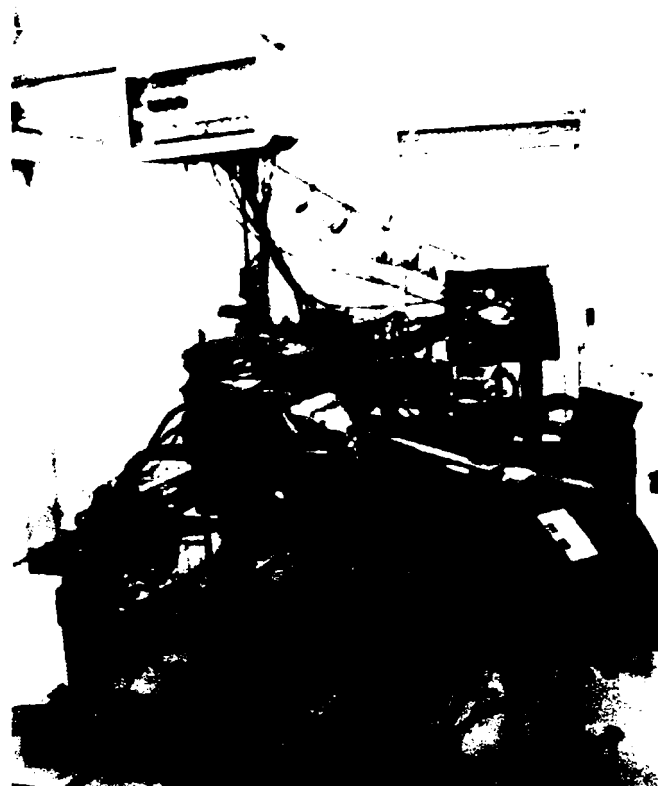
**Figura 6.49** Fibraj în zona deformată plastic (tachet 2)

### **6.2.3 Încercarea la uzură pe stand și pe autoturism a axelor cu came și a tacheștilor**

Pentru încercarea pe stand a motoarelor s-a utilizat celula de încercare M.A.I. (figura 6.50), care are în componență:

- frână electrică cu curenți turbionari (SCHENCK W130);
- batiu fixare motor; (acestea două fiind fixate pe o platformă suspendată elastic).
- pupitru de comandă și afișare a mărimilor măsurate.





**Figura 6.50** Interior celulă încercare

Pupitrul de comandă și afișare a mărimilor măsurate (figura 6.51) permite afișarea următoarelor mărimi:

1. Debit scăpări gaze carter;
2. Presiune atmosferică;
3. Debit pompă apă motor;
4. Tensiune baterie acumulatori;
5. Curent sarcină;
6. Presiune ulei motor;
7. Presiune apă motor;
8. Presiune benzină;
9. Presiune admisie;
10. Presiune evacuare 1 (amonte catalizator);
11. Presiune evacuare 2 (aval catalizator);
12. Presiune carter inferior;
13. Presiune filtru aer;
14. Temperatura uleiului;



15. Temperatură apă 1 (intrare motor);
16. Temperatură apă 2 (ieșire motor);
17. Temperatură evacuare 1 (amonte catalizator);
18. Temperatură evacuare 2 (aval catalizator);
19. Temperatură capotaj;
20. Temperatură aer admisie;
21. Temperatură benzină 1 (aparat consum);
22. Temperatură benzină 2 (rampă);
23. Forță la frână;
24. Număr rotații + timp (corespunzătoare consumului de combustibil);
25. Număr ore funcționare stand;
26. Număr ore funcționare motor;
27. Număr ore test;
28. Lambda, CO, CO<sub>2</sub>;
29. Debit aer admis;
30. Avans, KSC.



**Figura 6.51** Pupitru de comandă și afișare



Pe acest stand, prezentat în detaliu în figura 6.52 se pot realiza următoarele încercări:

1. Rodaj motor;
2. Etalonare;
3. Controlul Conformității Producției;
4. Ciclul Mixt (relanti/ $P_{max}$ );
5. Ciclul  $P_{max}$ ;
6. Ciclul  $C_{max}/P_{max}$ ;
7. Ciclul Cald/Rece;
8. Ciclul Baleiaj;
9. Consum ulei (4000 rpm – plină sarcină);
10. Încercare portantă piston.

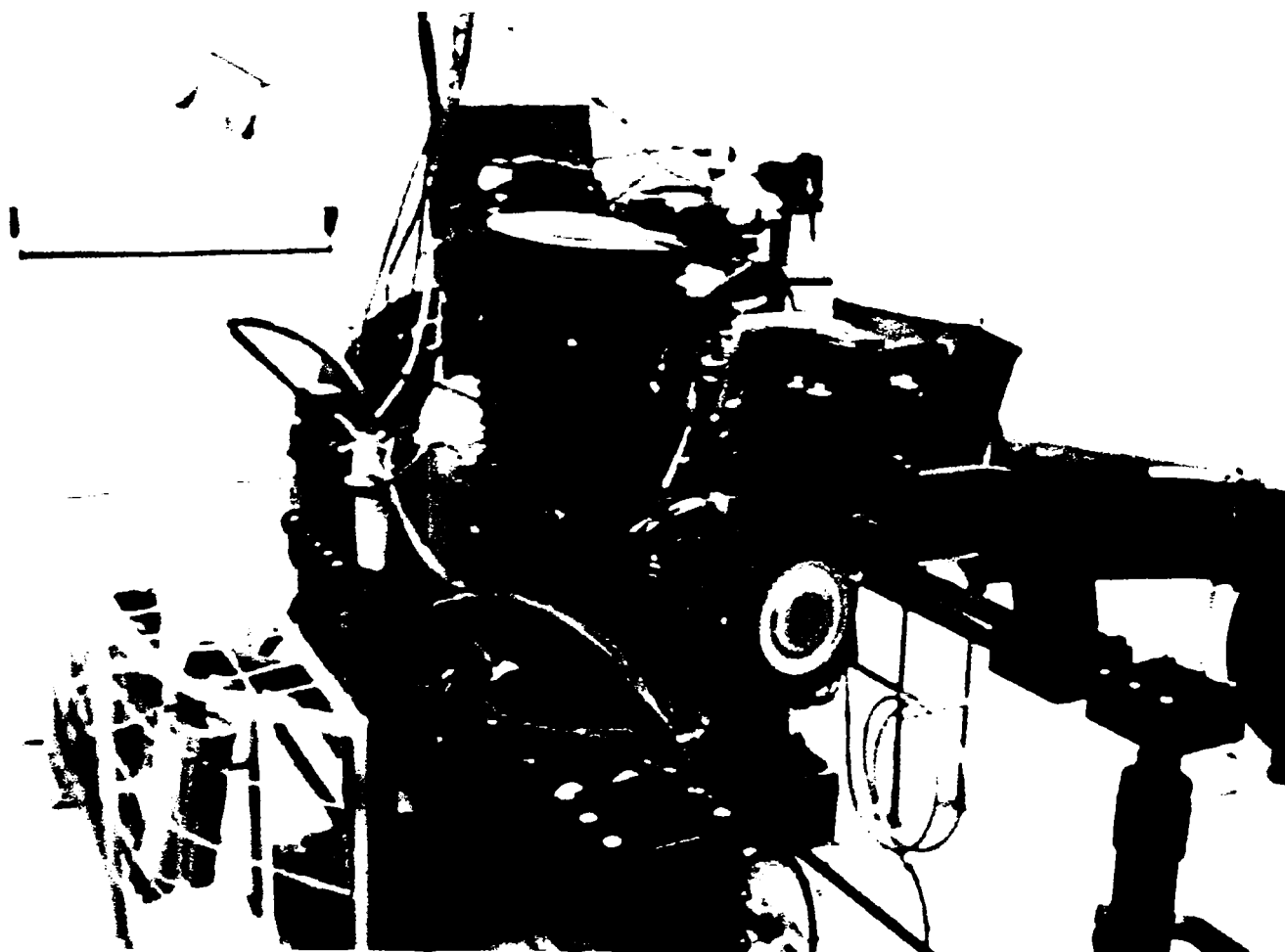


Figura 6.52 Celulă încercare (detaliu)



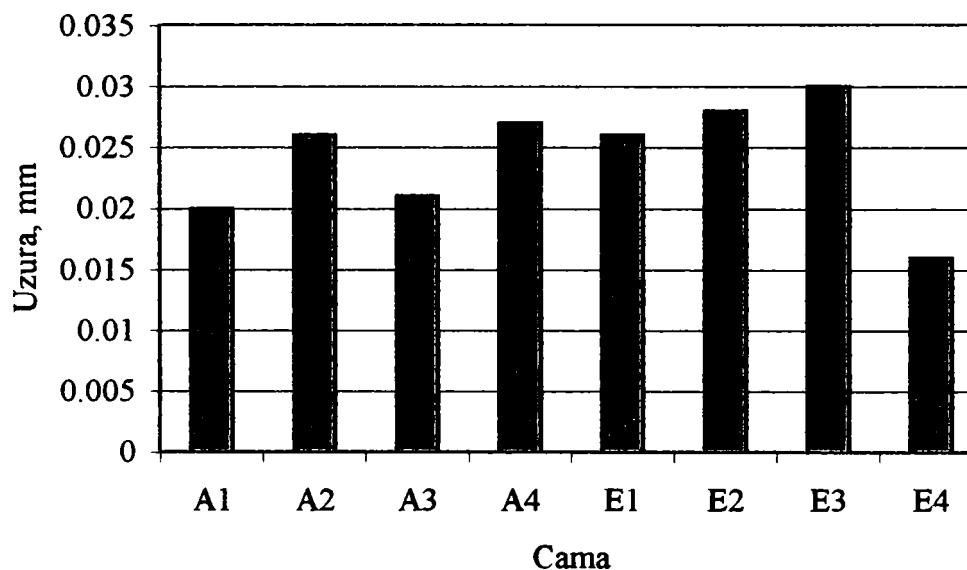
Pentru a se compara rezistența la uzare în regim de lucru pentru axe cu came tratate termic și respectiv nitrurate ionic au fost efectuate 4 tipuri de încercări pentru mai multe loturi de arbori obținuți prin diferite tehnologii.

a) *Încercarea de duranță pe standul motor al axului cu came în stare turnată*

Măsurând inițial și după cele 500 ore de duranță efectuate pe cele 4 axe, înălțimea camelor de admisie și evacuare s-au obținut pentru înălțimile camelor de admisie ( $A_1...A_4$ ) respectiv ale camelor de evacuare ( $E_1...E_4$ ); valorile sunt prezentate în tabelul 6.11, respectiv în figura 6.53 valorile uzurii camelor.

**Tabelul 6.11** Valorile înălțimii camelor și uzurii pentru arborele cu came în stare turnată

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$
<b>Înainte de probă</b>							
5,142	5,158	5,130	5,151	5,156	5,138	5,128	5,116
<b>După probă</b>							
5,122	5,132	5,109	5,124	5,130	5,110	5,098	5,100
<b>Uzura</b>							
0.02	0.026	0.021	0.027	0.026	0.028	0.03	0.016



**Figura 6.53** Valorile uzurii pe camele unui arbore cu came turnat

Analizând rezultatele obținute în urma măsurătorilor, reiese că uzura maximă este de 0,03 mm pentru camele de admisie și 0,27 mm pentru cele de evacuare, uzură ce este comparabilă cu uzurile medii înregistrate la axul cu came turnat în coji ( $A = 0,02$  mm și  $E = 0,03$  mm).



Camele au avut o uzură relativ uniformă, pe profilul lor neșemnalându-se ciupituri sau exfolieri de material pe suprafața de lucru a tacheților. Suprafețele de lucru ale tacheților cu came sunt suprafețe lucii, ceea ce denotă că pe durata programului de anduranță, rotirea tacheților în jurul axelor acestora este asigurată de către came.

b) Încercarea de anduranță pe standul motor a axului cu came în stare nitrurată

Măsurând inițial și după cele 500 ore de anduranță, înălțimea camelor de admisie și evacuare la cele 4 axe, s-au obținut valorile prezentate în tabelul 6.12, respectiv în figura 6.54 valorile uzurii pentru camele arborelui nitrurat.

Tabelul 6.12 Valorile înălțimii camelor și uzurii pentru arborele cu came în stare nitrurată

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$
<b>Înainte de probă</b>							
5.132	5.151	5.132	5.148	5.153	5.136	5.124	5.114
<b>După probă</b>							
5.122	5.132	5.109	5.124	5.13	5.11	5.098	5.1
<b>Uzura</b>							
0.01	0.019	0.023	0.024	0.023	0.026	0.026	0.014

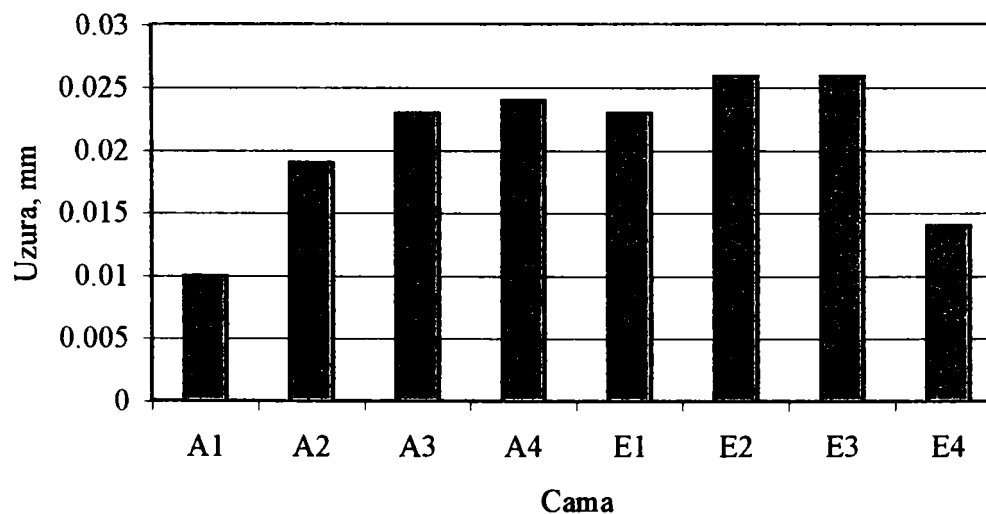


Figura 6.54 Valorile uzurii pe camele unui arbore cu came nitrurat

Analizând rezultatele măsurătorilor efectuate și prezentate în tabelul 6.12, reiese că uzura maximă a camelor, înregistrată pe parcursul programului de anduranță, este de maxim 0,026 mm, uzură ce este comparabilă cu uzuri înregistrate anterior la alte încercări.



c) Încercarea pe autoturisme a axelor cu came

Pentru măsurarea cantitativă a uzurii cuplului ax cu came – tacheți, s-a folosit criteriul de notare a aspectului feței de lucru, luându-se ca etalon tacheți care au funcționat 10 ore pe banc.

Criteriul se bazează pe constatarea verificată pe motoare încercate pe banc, conform căreia uzurile camelor sunt proporționale cu uzurile tacheților configurați. Acest criteriu este rezumat în tabelul 6.13 [113].

Tabelul 6.13 Valorile criteriului de notare a aspectului feței de lucru pentru tacheți etalon care au funcționat 10 ore pe banc

Tacheți rotitori (R)			Tacheți nerotitori (N)		
Pierdere de greutate (g)	Coefficient de aspect	Notă	Pierdere de greutate (g)	Coefficient de aspect	Notă
$\leq 0,02$	1	1	$\leq 0,01$	1	2
	2	2		2	2
0,04 – 0,11	2	4	0,01 – 0,02	2	4
$> 0,20$	2	10	$> 0,02$	21	10

Pentru aprecierea uzurii camelor s-au făcut măsurători ale acestora pe două direcții perpendiculare, în planele A-A și B-B, care se găsesc la o distanță de 5 mm față de capete, conform figurii 6.55, rezultatele fiind consemnate în fișele de măsurători. Precizia de măsurare este 0,01 mm.

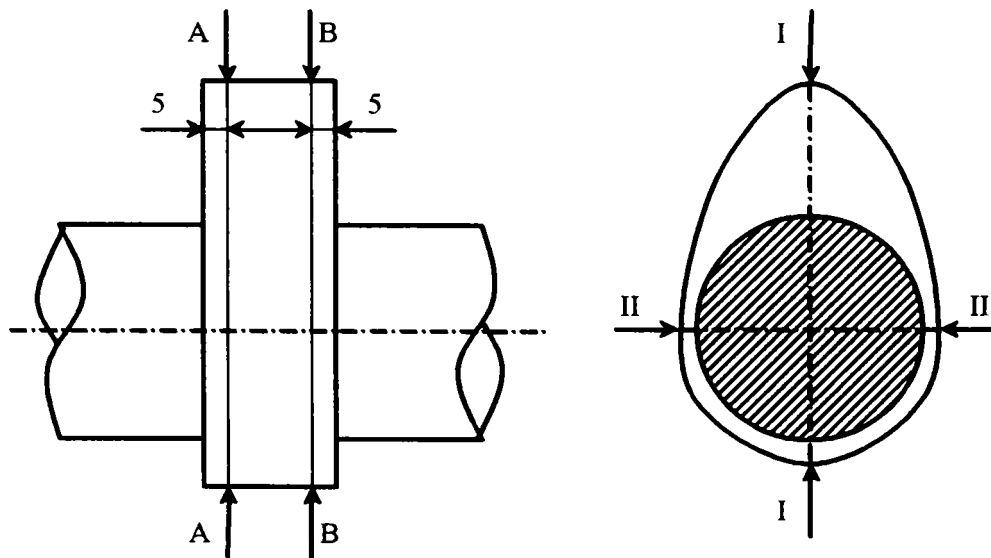


Figura 6.55 Prezentarea uzurii camelor pe două direcții perpendiculare



Pentru trei motoare echipate cu axele cu came nitrurate ionic s-au făcut măsurători după un rulaj de 5000 km. Măsurătorile s-au repetat la 10000 km și la încheierea probei comparative.

Aprecierile uzurii tacheților s-au făcut prin notare, după metoda prezentată anterior, tacheții obținând punctajele din tabelul 6.14:

**Tabelul 6. 14 Punctajele pentru tacheți în urma încercării la uzare**

Tachet	Motor		
	481089	480088	481091
E1	1R	2R	2R
A1	2R	2RN	2R
A2	2RN	2RN	2R
E2	4N	4N	2N
E3	2N	2RN	1N
A3	2RN	4N	2R
A4	2RN	4RN	1R
E4	2RN	2R	2R

Tacheții acumulează următoarele punctaje:

- Motor seria 481089 – 17 puncte;
- Motor seria 481088 – 22 puncte;
- Motor seria 481091 – 14 puncte.

După încercarea cu rulajele precizate, patru tacheți au primit nota 4 și sunt considerați ca inutilizabili în continuare. Repartizarea lor este următoarea:

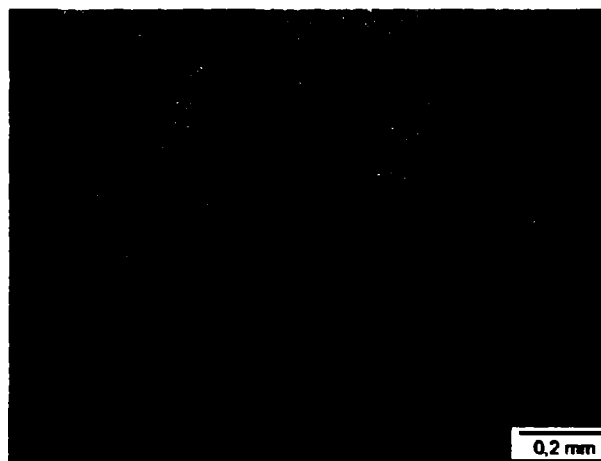
- E2 la motorul 481089 (R);
- E2, A3, A4 la motorul 48088 (N, N, RN).

Ceilalți tacheți au avut o uzură care a evoluat lent față de situația de referință de la sfârșitul probei comparative.

În figurile 6.56, 6.57, 6.58, 6.59, 6.60, 6.61, 6.62, 6.63, 6.64, 6.65 și 6.66 se prezintă aspectul macroscopic și microscopic al suprafeței de contact pentru tacheții cu cele mai intense uzuri.



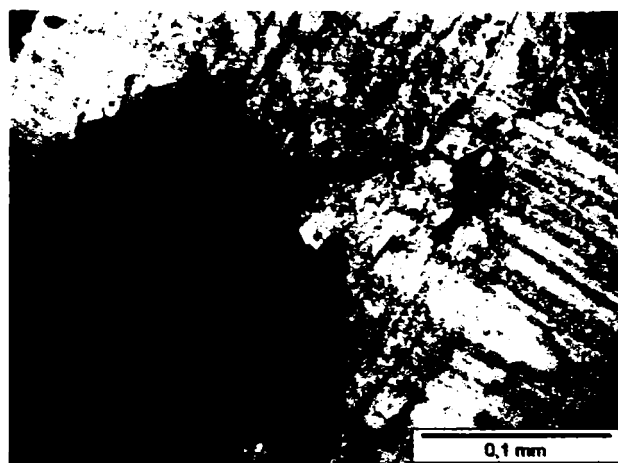
**Figura 6.56** Aspectul suprafeței uzate, tacet 1, microscop stereo 10x



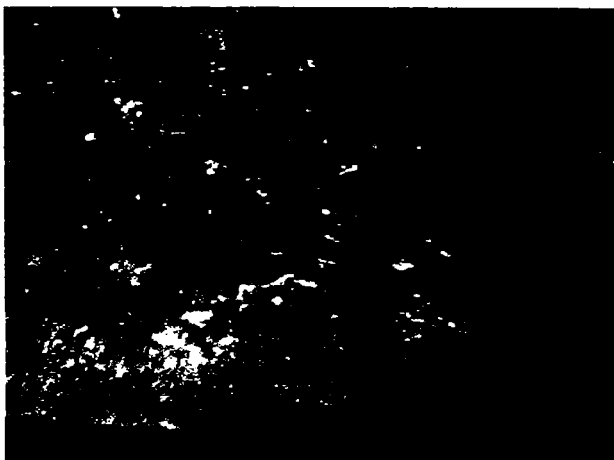
**Figura 6.57** Tacet 1, microscopie optică, suprafața de contact neatacată, 100x



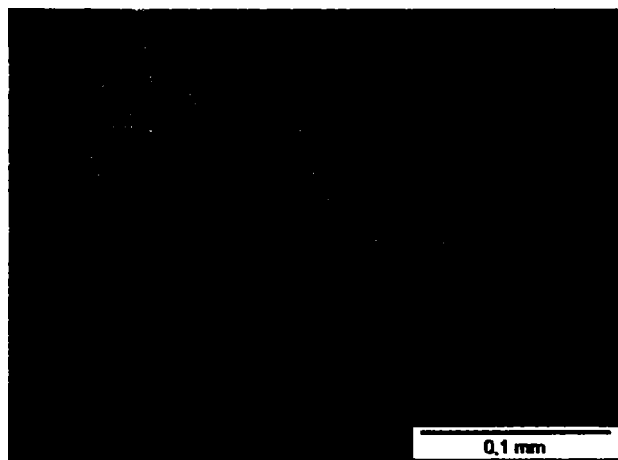
**Figura 6.58** Aspectul suprafeței uzate, tacet 2, microscop stereo 16x



**Figura 6.59** 2 Tacet 2 microscopie optică, suprafața de contact neatacată 100x

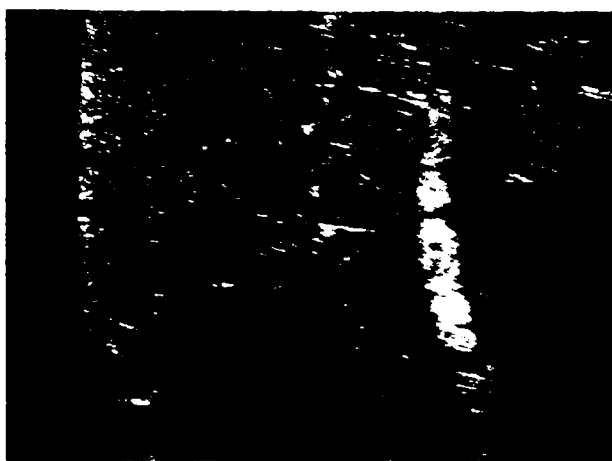


**Figura 6.60** Aspectul suprafeței uzate, tacet 3, microscop stereo 25X

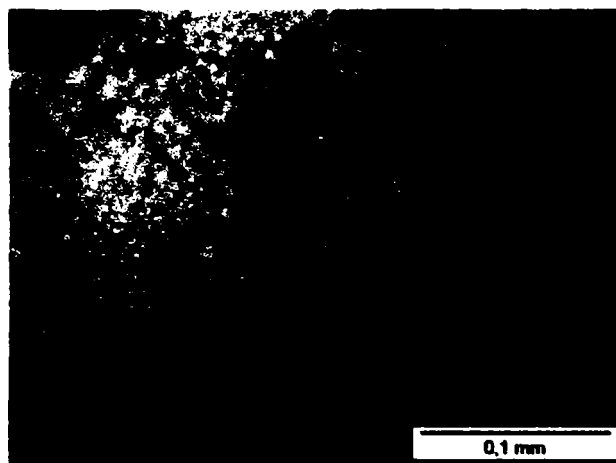


**Figura 6.61** Tacet 3, microscopie optică, suprafața de contact neatacată, 100x





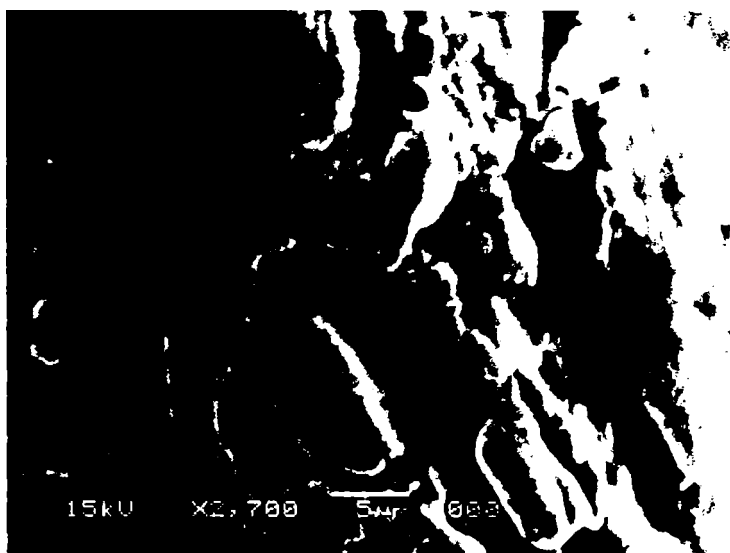
**Figura 6.62** Aspectul suprafeței uzate, tachet 4, microscop stereo 25X



**Figura 6.63** Tachet 4 microscopie optică, suprafața de contact neatacată, 100x



**Figura 6.64** Strat superficial deformat (MEB)



**Figura 6.65** Microfisuri în stratul superficial (MEB)

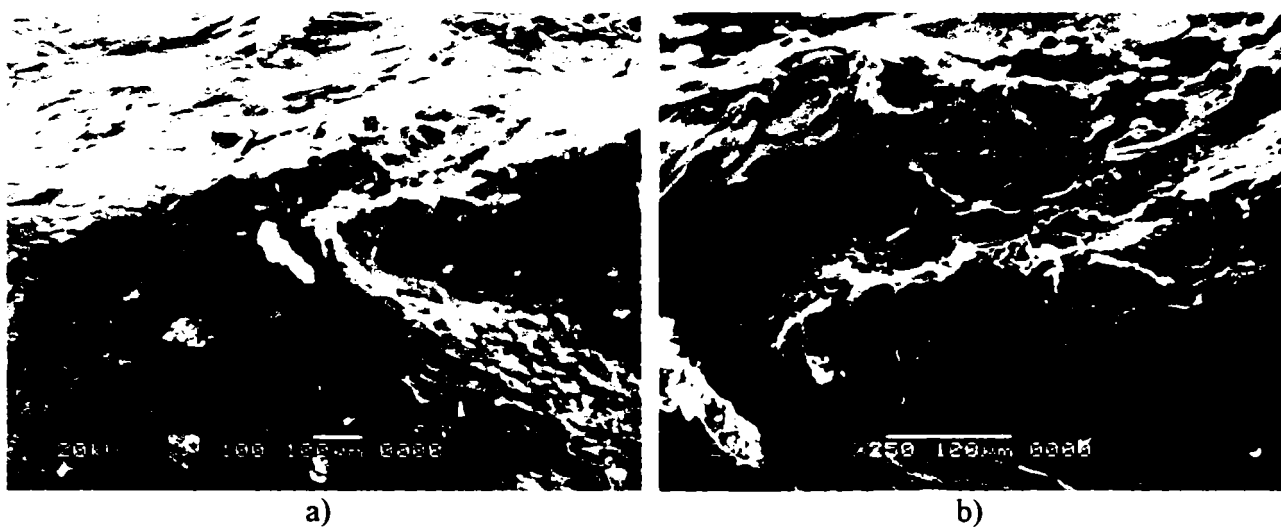


Figura 6.66 Aspectul suprafeței (MEB)

Pentru a determina starea de tensiune din materialul tacheților, au fost efectuate încercări de difracție de raze X în suprafața de contact și în metalul de bază.

Difractogramele obținute pe difractometrul Dron 3 cu radiația  $\lambda_{\text{Mo}} = 0,71 \text{ \AA}$ , sunt prezentate în figurile 6.67, 6.68, 6.69 și 6.70.

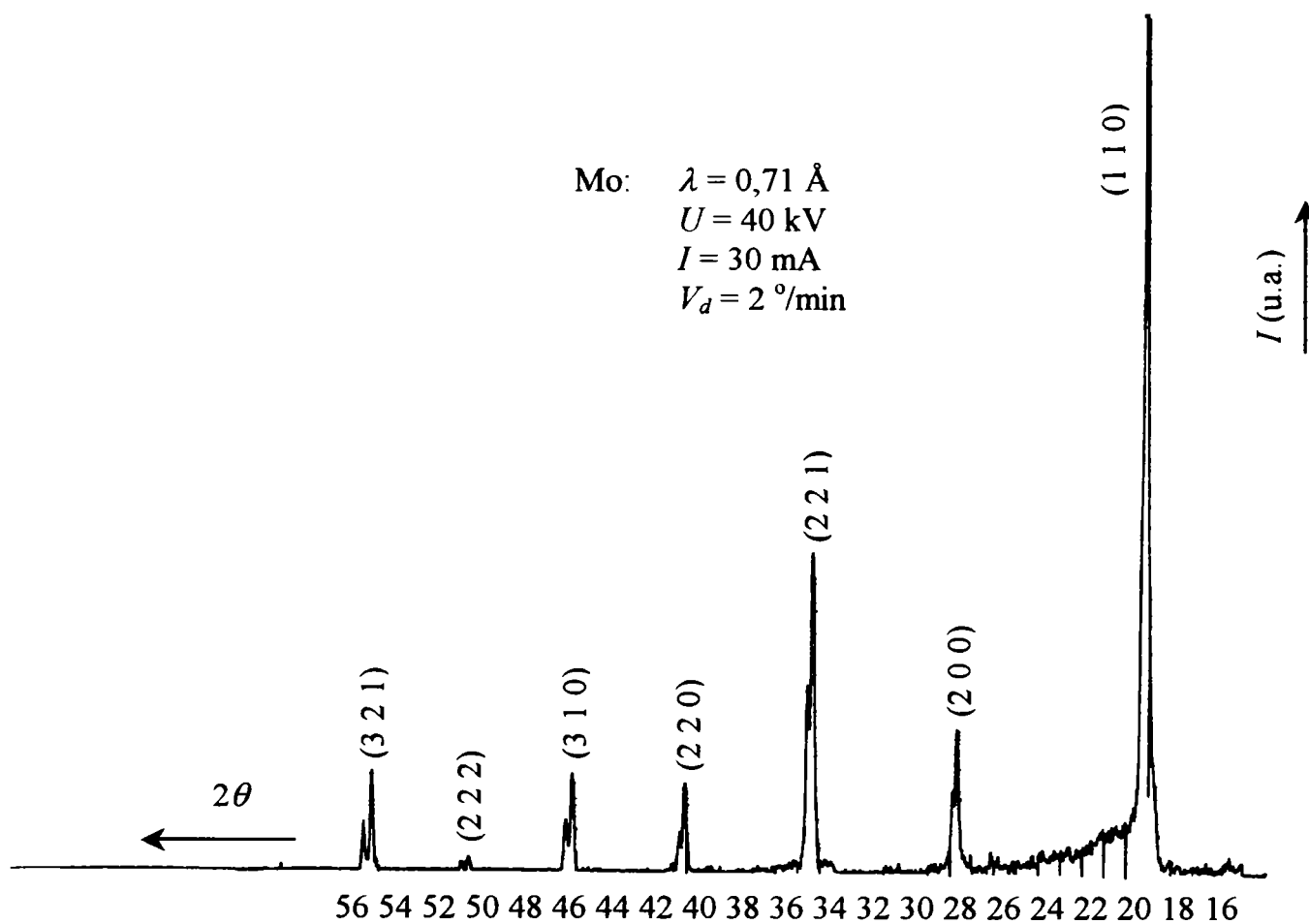
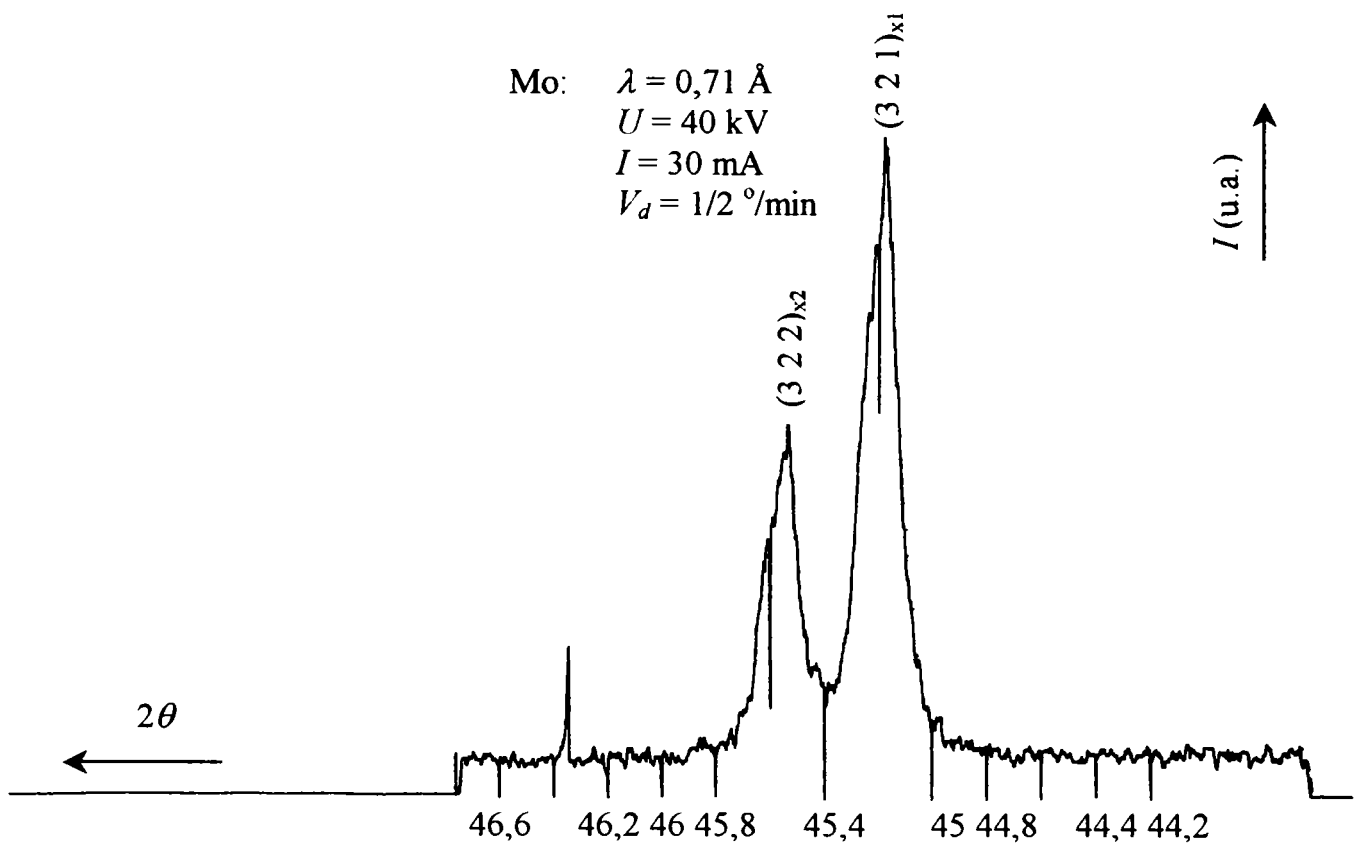
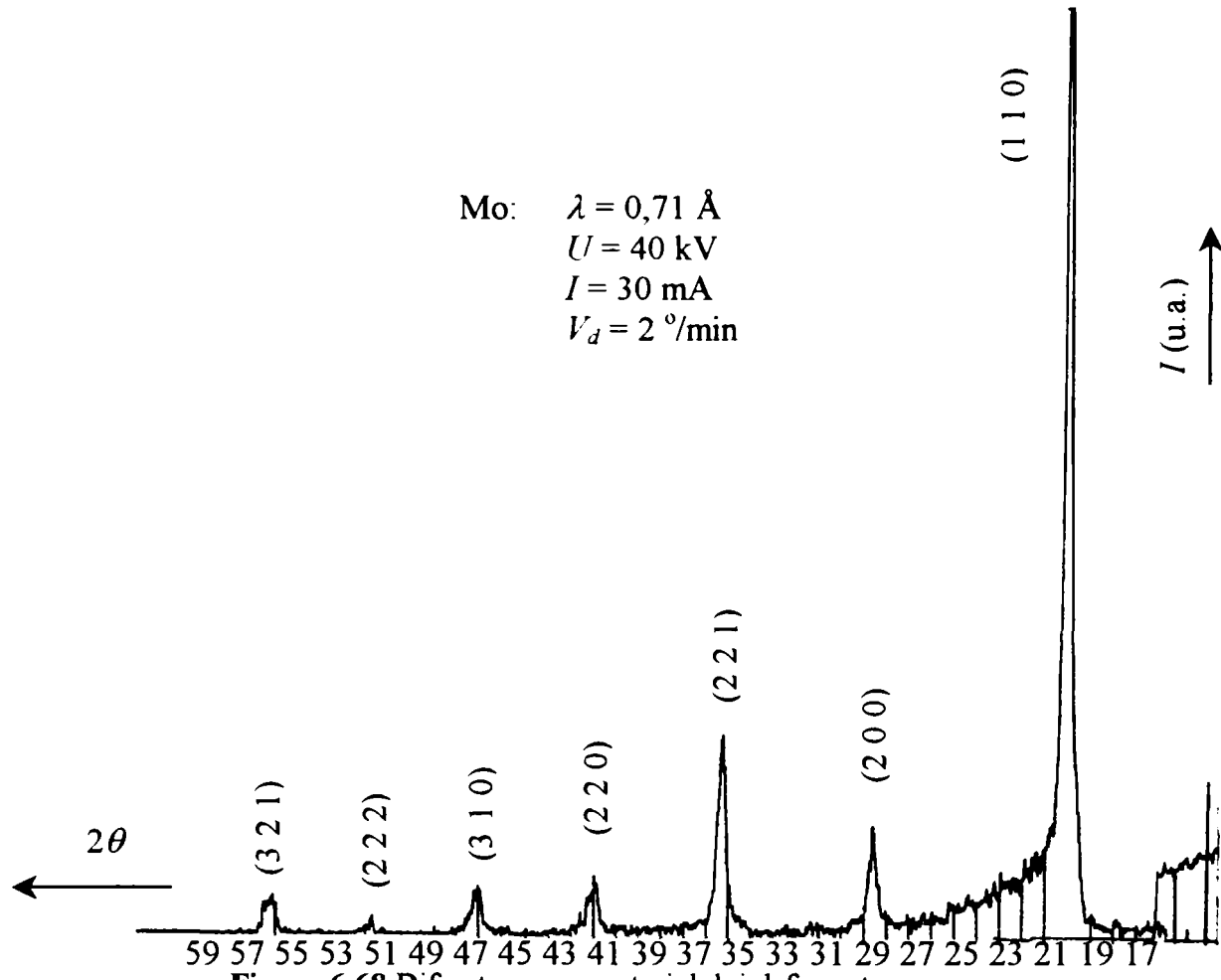
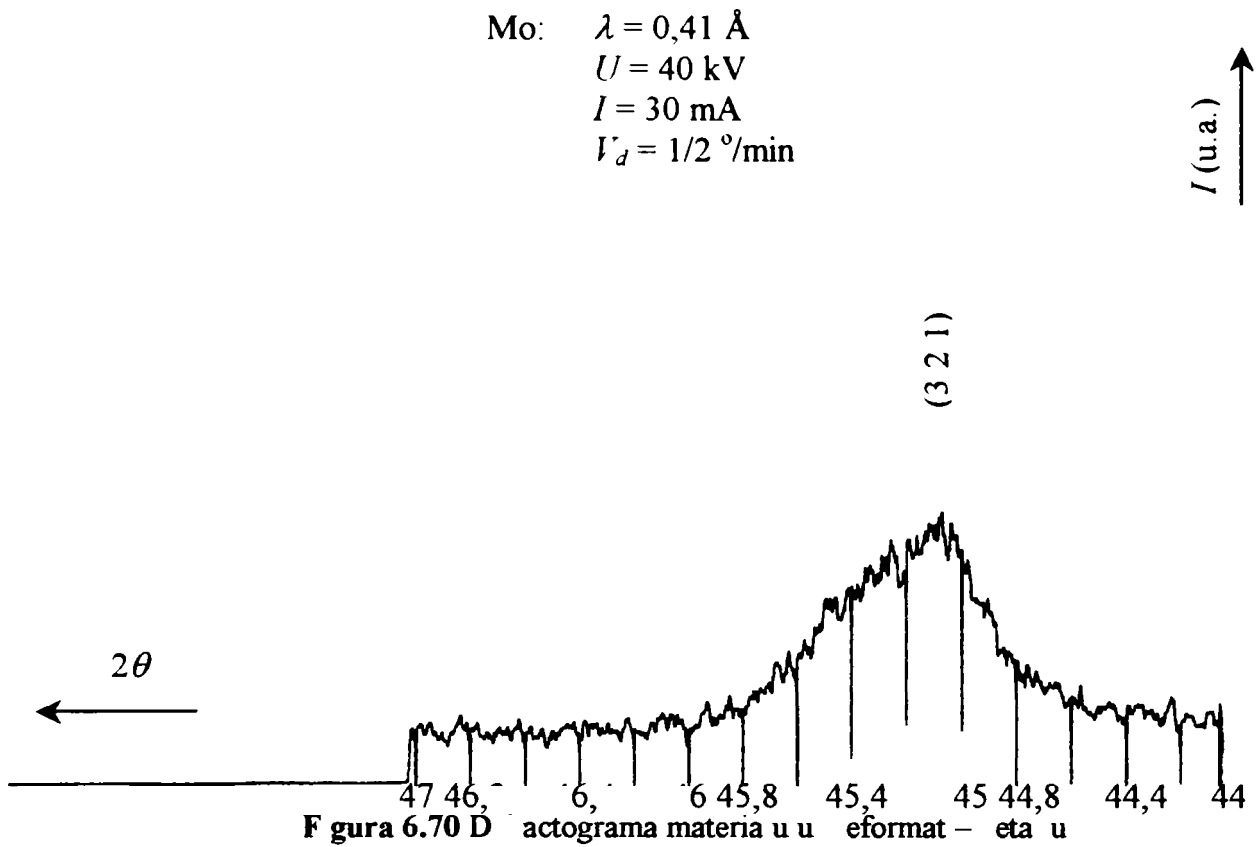


Figura 6.67 Difractograma materialului de bază





Difractogramele evidențiază prezența majoritară a feritei în structură. Difractograma stratului deformat (figura 6.68) diferă față de cea a metalului de bază prin faptul că toate maximele de difracție au lățimi mai mari cauzate de apariția unor tensiuni reziduale, ca urmare a solicitărilor din timpul încercării.

Prezența acestor tensiuni este mai evidentă la compararea spectrelor de difracție ce cuprind maximul corespunzător planului (321) trasat cu viteze mai mici (figura 6.69 și 6.70).

Măsurătorile dimensionale efectuate pe came după rulaje și raportate la măsurătoarea de la 5000 km, sunt prezentate în tabelele 6.15, 6.16 și 6.17.



Tabelul 6.15 Valorile măsurătorilor camelor pentru motorul 481091, durata de funcționare 29000 kmh

Nr. camei	Planul	Pe direcția I – I			Pe direcția II – II		
		Înainte de 5000 km	După 10000 km	29000 km	Înainte de 5000 km	După 10000 km	29000 km
1	A-A	32,120	32,120	32,105	27,040	27,035	27,030
	B-B	32,120	32,120	32,105	27,040	27,035	27,030
2	A-A	32,120	32,120	32,110	27,035	27,035	27,030
	B-B	32,120	32,120	32,110	27,035	27,035	27,030
3	A-A	32,120	32,120	32,115	27,035	27,035	27,030
	B-B	32,120	32,120	32,115	27,035	27,035	27,030
4	A-A	32,125	32,120	32,120	27,030	27,030	27,030
	B-B	32,125	32,120	32,120	27,030	27,030	27,026
5	A-A	32,120	32,120	32,120	27,030	27,030	27,026
	B-B	32,120	32,120	32,120	27,030	27,030	27,026
6	A-A	32,120	32,110	32,110	27,030	27,030	27,022
	B-B	32,120	32,110	32,110	27,030	27,030	27,022
7	A-A	32,120	32,105	32,100	27,030	27,030	27,020
	B-B	32,120	32,105	32,100	27,030	27,030	27,020
8	A-A	32,125	32,105	32,102	27,030	27,030	27,025
	B-B	32,125	32,105	32,102	27,030	27,030	27,025

Tabelul 6.16 Valorile măsurătorilor camelor pentru motorul 701089, durata de funcționare 30188 kmh

Nr. camei	Planul	Pe direcția I – I			Pe direcția II – II		
		Înainte de 5000 km	După 10000 km	30188 km	Înainte de 5000 km	După 10000 km	30188 km
1	A-A	32,125	32,120	32,110	27,030	27,025	27,020
	B-B	32,125	32,120	32,110	27,030	27,025	27,020
2	A-A	32,130	32,120	32,110	27,035	27,020	27,020
	B-B	32,130	32,120	32,110	27,035	27,020	27,020
3	A-A	32,125	32,120	32,115	27,030	27,020	27,020
	B-B	32,125	32,120	32,115	27,030	27,020	27,020
4	A-A	32,130	32,115	32,105	27,035	27,025	27,025
	B-B	32,130	32,115	32,105	27,035	27,025	27,025
5	A-A	32,125	32,115	32,105	27,030	27,020	27,020
	B-B	32,125	32,115	32,105	27,030	27,020	27,020
6	A-A	32,125	32,120	32,110	27,020	27,020	27,020
	B-B	32,125	32,120	32,110	27,020	27,020	27,020
7	A-A	32,135	32,120	32,108	27,030	27,020	27,018
	B-B	32,135	32,120	32,108	27,030	27,020	27,018
8	A-A	32,120	32,115	32,110	27,025	27,020	27,020
	B-B	32,125	32,105	32,102	27,030	27,030	27,025



Tabelul 6.17 Valorile măsurătorilor camelor pentru motorul 481088, durata de funcționare 36530 kmh

Nr. camei	Planul	Pe direcția I – I			Pe direcția II – II		
		Înainte de 5000 Km	După 10000 Km	36530 Km	Înainte de 5000 Km	După 10000 Km	36530 Km
1	A-A	32,120	32,120	32,105	27,015	27,015	27,010
	B-B	32,120	32,120	32,105	27,015	27,015	27,010
2	A-A	32,130	32,115	32,110	27,030	27,025	27,025
	B-B	32,130	32,115	32,110	27,030	27,025	27,025
3	A-A	32,130	32,120	32,120	27,030	27,020	27,018
	B-B	32,130	32,120	32,120	27,030	27,020	27,018
4	A-A	32,125	32,120	32,120	27,030	27,025	27,020
	B-B	32,125	32,120	32,120	27,030	27,025	27,020
5	A-A	32,125	32,120	32,118	27,035	27,025	27,025
	B-B	32,125	32,120	32,118	27,035	27,025	27,025
6	A-A	32,130	32,120	32,110	27,020	27,015	27,015
	B-B	32,130	32,120	32,110	27,020	27,015	27,015
7	A-A	32,120	32,120	32,110	27,025	27,025	27,018
	B-B	32,120	32,120	32,110	27,025	27,025	27,018
8	A-A	32,120	32,120	32,115	27,020	27,020	27,015
	B-B	32,120	32,120	32,115	27,020	27,020	27,015

În tabelul 6.18 se prezintă uzurile pentru arborii cu came ai celor trei motoare de referință.

Tabelul 6.18 Uzuri specifice de referință ( $\mu/1000$  km)

Cama nr.	Plan de măsurare	Motor seria, numărul de circulație			
		382858		360055	
		1-AG-5036, 0 – 85000 km		1-AG-5037, 0 – 85000 km	
		I – I	II – II	I – I	II – II
1	A-A	0,73	0,73	1,09	0,30
	B-B	0,73	0,73	1,09	0,30
2	A-A	0,61	0,55	1,46	0,84
	B-B	0,61	0,55	1,46	0,84
3	A-A	0,79	0,49	1,09	0,12
	B-B	0,79	0,49	1,09	0,12
4	A-A	0,73	0,24	0,85	0,24
	B-B	0,73	0,24	0,85	0,24
5	A-A	0,73	0,30	0,73	0,37
	B-B	0,73	0,30	0,73	0,37
6	A-A	0,79	0,43	1,22	0,24
	B-B	0,79	0,43	1,22	0,24
7	A-A	0,73	0,37	1,34	0,18
	B-B	0,73	0,37	1,34	0,18
8	A-A	0,73	0,30	1,22	0,18
	B-B	0,73	0,30	1,22	0,18
Uzuri specifice medii		I – I; 0,76			
		II – II; 0,33			



În tabelul 6.19 sunt prezentate valorile medii pentru cele trei motoare luate în studiu. În aceste tabele, deoarece autoturismele au realizat rulaje diferite, s-au determinat uzurile specifice ( $\mu/1000$  km). S-au calculat, de asemenea, uzurile medii pentru fiecare ax cu came.

**Tabelul 6.19** Valorile medii pentru cele trei motoare

	Motor 1		Motor 2		Motor 3		Motoare de referință	
<b>Rulaj (km)</b>	5000 – 30188		5000 – 36300		5000 – 39000		382858; 36005; 0-85000	
<b>Dirrecția</b>	I – I	II – II	I – I	II – II	I – I	II – II	I – I	II – II
<b>Uzura medie specifică</b>	0,46	0,29	0,69	0,36	0,41	0,24	0,760	0,330

Se constată că uzurile, pe direcțiile I – I și II – II, în cazul camelor nitrurate ionic, sunt, în general, mai mici decât cele de pe motoarele de referință.

Probele efectuate nu au putut verifica cu certitudine constanța calității axelor cu came nitrurate, datorită numărului mic de axe cu came încercate.

Din punct de vedere al aspectului suprafețelor de lucru la cuplul ax came – tacheți, axele cu came nitrurate se comportă corespunzător.

Analiza microscopică a stratului nitrurat evidențiază o uzură mai accentuată a vârfului camei comparativ cu cercul de bază.



a)



b)

**Figura 6. 71** Aspectul microscopic al stratului superficial după încercarea la uzare a camelor nitrurate, MO 250x, artac nital: a) pe cercul de bază; b) la vârful camei

În figura 6.71 a) se distinge stratul de compuși, în zona vârfului camei, chiar și după încercarea la uzare, în timp ce, în figura 6.71 b) acest strat este deja înlăturat, ca urmare a procesului de uzare. Stratul superficial prezintă o uzură accentuată, mai cu seamă în vecinătatea filoanelor de grafit.



## **Cap. 7. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE**

### **7.1 Rezultate teoretice și experimentale**

Studiile și cercetările efectuate în legătură cu posibilitatea și rezultatele aplicării procesului de nitrurare ionică la piesele de autoturisme supuse unor intense solicitări la uzare au evidențiat avantajele acestui procedeu de durificare:

- posibilități largi de reglare a compoziției chimice și structurii stratului nitrurat, precum și o uniformitate crescută a acestuia;
- durata tratamentului este de 2...5 ori mai redusă în comparație cu alte procedee de nitrurare;
- consumul de energie electrică este mai redus, în general, de două până la patru ori;
- consumul de gaze pentru formarea mediului de lucru este extrem de redus;
- nu este necesară reglarea și măsurarea disocierii amoniacului;
- piesele nitrurate prezintă stabilitate dimensională și de formă crescute, deformațiile având valori minime;
- piesele tratate prezintă caracteristici fizico – termice îmbunătățite;
- intervalul de temperaturi în care se poate efectua tratamentul este mult mai larg (350°C...600°C);
- reproductibilitatea înaltă a rezultatelor, ca urmare a nivelului înalt de automatizare și reglare a parametrilor;
- posibilitatea opririi și reluării ciclului de nitrurare pe parcursul tratamentului (inerție termică redusă, limitată la piese și diapozitive de susținere);
- depasivare automată a suprafețelor destinate nitrurării, prin pulverizare catodică în faza inițială a procesului;
- protejare relativ simplă a unor zone împotriva nitrurării (posibilitatea protejării mecanice prin obturarea cavităților, respectiv ecranarea prin plăci metalice a suprafețelor exterioare sau protejare cu vopsele speciale);
- procedeul este nepoluant, igiena și condițiile de lucru sunt ameliorate;





- nu sunt necesare prelucrări mecanice ulterioare, eventual doar o ușoară lustruire (procedeul răspunde vechiului vis al tehnicienilor de a durifica piesele după finalizarea prelucrărilor mecanice);
- procedeul poate fi automatizat complet, prin programare electronică; manopera și supravegherea sunt minime, un operator putând deservi până la 10 instalații de nitrurare;
- instalațiile nu sunt supuse decât în mică măsură uzurii, durata lor de utilizare fiind foarte mare; excepție fac doar componentele sistemului de vidare și ale celui electronic de stingere a descărcărilor în arc, precum și unii izolatori din recipient, care se uzează mai repede; în general, se apreciază că necesarul anual de piese de schimb nu reprezintă mai mult de 2% din valoarea instalației.

Pentru implementarea procedurii de nitrurare ionică în producția de serie a unor repere de autoturisme, au fost analizate și punctele slabe ale acestui tratament termochimic și s-au căutat soluțiile tehnologice moderne, care permit depășirea acestor dezavantaje:

- Instalațiile au un preț de cost ridicat, constând dintr-un complex de utilaje din domeniul gazelor rarefiate și al tensiunilor înalte cu un nivel înalt de automatizare. Acest dezavantaj devine neînsemnat în cadrul producției de piese pentru autoturisme la care, dată fiind producția de serie, costurile utilajelor se amortizează într-un timp redus;
- Gradul de utilizare a spațiului de lucru din recipient este mai redus, fiind posibilă ecranarea reciprocă a pieselor. Perfecționările aduse procedurii (metoda TC, cu plasmă pulsantă) au permis depășirea acestor obstacole, fiind posibilă nitrurarea unor încărcături compacte, realizate din piese de forme și mărimi diferite.
- Există unele dificultăți la nitrurarea orificiilor mici și lungi (este necesară plasarea de electrozi secundari), a cavităților apropiate (se impun reglaje precise pentru evitarea fenomenelor de “catod dublu”). Nitrurarea cu plasmă pulsantă, un procedeu modern de nitrurare ionică, permite eliminarea acestor neajunsuri și asigură un strat nitrurat uniform, inclusiv în interiorul orificiilor adânci și al canelurilor.
- Nitrurarea ionică în variantă clasică prezintă unele dificultăți la nitrurarea simultană a pieselor de dimensiuni și configurații diferite. Acest dezavantaj poate fi evitat prin folosirea procedurii de nitrurare TC, care permite nitrurarea unor șarje din piese de forme și dimensiuni diferite.



- Sunt necesare uneori dispozitive complexe și numeroase pentru a asigura un contact electric bun, o repartiție simetrică și o densitate corespunzătoare realizării de temperaturi și procese omogene;
- Exploatarea și întreținerea instalațiilor de nitrurare ionică reclamă personal de înaltă calificare, în special, în domeniul electronic.

## **7.2 Contribuții originale**

### **7.2.1 Contribuții generale**

Studiile documentare și cercetările experimentale efectuate în cadrul lucrării au permis o apreciere justificată cu argumente asupra posibilităților de utilizare a nitrurării ionice în producția reperelor pentru autoturisme. S-a evidențiat modul în care noile realizări în domeniul producției de instalații de nitrurare ionică și noile rezultate ale cercetărilor în domeniu, publicate în literatură, pot contribui la o mai bună adaptare a procedurii clasice de nitrurare ionică, la cerințele tot mai exigente impuse de acerba concurență de pe piața actuală de autoturisme.

### **7.2.2 Contribuții în plan tehnologic**

În lucrare au fost analizate în detaliu tehnologiile de fabricare și, mai cu seamă, cele de durificare superficială a elementelor componente a două sisteme sollicitate puternic la uzură:

*Sistemul cămașă de cilindru – segmenti;*

*Sistemul arbore cu came – tacheți.*

Pentru sistemul *cămașă de cilindru – segmenti* a fost analizat efectul nitrurării ionice a cămășii de cilindru asupra comportării în exploatare a celor două componente. Încercările experimentale au urmărit:

- modificarea dimensiunilor și a formei geometrice atât pentru cămași, cât și pentru segmenti, în urma tratamentelor superficiale aplicate;
- structura inițială a cămășilor și segmentilor;
- structura straturilor superficiale obținute în urma tratamentelor aplicate;
- duritatea obținută după aplicarea tratamentului de suprafață;



- rezistența la uzare adezivă, determinată pe cupluri de uzură realizate din epruvete, în diferite variante de tratament;
- rugozitatea înainte și după tratament.
- comportarea unor seturi motor pe standurile de încercare, în condițiile funcționării a 350 ore, (cca. 50000 km parcurși), comparativ cu seturi motor din fabricația de serie.

În urma nitrurării ionice, valorile de microduritate în stratul superficial au fost de 857 – 1150 HV0,02, față de 45 HRC pentru camele de referință.

Abaterile dimensionale și geometrice produse în urma nitrurării nu au condus la scoaterea cămășilor din toleranțele impuse.

Încercările efectuate pe stand de uzură (segment cromat – cămașă netratată, segment netratat – cămașă netratată, segment nitroferoxat – cămașă netratată, segment nitroferoxat – cămașă durificată și segment netratat – cămașă nitrurată) au evidențiat că cea mai bună comportare la uzură, pentru ambele elemente ale cuplului cămașă – segment a avut-o cuplul cămașă nitrurată ionic – segment nitroferoxat .

Încercările efectuate pe stand de motor, pe 5 seturi motor echipate cu cămăși și segmenti cu diferite tratamente superficiale, au relevat o comportare mult mai bună a cămășilor de cilindru nitrurate (la setul încercat pe stand în condiții de uzură accelerată – 120 h și de durabilitate 350 h, cămășile nitrurate în cuplu cu segmentii durificați au prezentat o uzură cu cca. 30 % mai mică față de cămășile din fabricația de serie).

Pentru sistemul *camă – tacheți* au fost analizate cupluri care au cuprins arbore cu came în stare turnată, respectiv arbore cu came nitrurat și tacheți carbonitruați.

Încercările la uzură ale motoarelor echipate cu came și tacheți conform programului de încercări, au fost făcute atât pe stand, cât și pe autoturisme.

Prin măsurarea uzurii camelor și aprecierea calității suprafeței de lucru a tacheților prin analiză macroscopică, microscopie optică și microscopie electronică, s-a constatat o mai bună comportare a camelor nitrurate față de cele turnate, încercate în aceleași condiții.

### **7.2.3 Contribuții la interpretarea structurilor, a cineticii și mecanismului de formare a straturilor superficiale prin nitrurare ionică**

În lucrare sunt analizate structurile cristaline, compozițiile chimice, grosimile de strat și condițiile de formare pentru toate fazele care se formează în timpul procesului de nitrurare ionică.



A fost analizată influența diferiților parametri tehnologici (compoziția chimică și presiunea atmosferei, temperatura, durata de niturare) asupra structurii și caracteristicilor straturilor obținute.

Întrucât o mare parte din piesele de autoturisme intens solicitate la uzare sunt realizate din fontă cenușie, a fost studiată comportarea acestor materiale la niturare ionică. Cercetările au avut în vedere, în primul rând fontele cu grafit nodular fiind luate în studiu și fontele ADI, fonte cenușii forjabile și durificabile prin tratamente termomecanice, care par a avea perspective deosebite în producția de serie specifică pieselor de autoturisme.



## **Bibliografie**

- 1 – Plasma Nitriding in Comparison with Gas Nitriding, Plasma Technik Grun GmbH
- 2 – C. A. Santos, Composição superficial e propriedades mecânicas e tribológicas de aços - carbono implantados com nitrogênio, Porto Alegre, 1987, Tese (Doutorado) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- 3 – A.S.W. Kurney, R.M. Mohan, R.M. Mallya, Nitriding of steels – an overview. In: GUPTON, P.S., ed. The heat treating source book, Metals Park, ASM, 1986, p. 127-33
- 4 – B. Edenhofer, Production ionitriding. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS, comp. Source book on nitriding, Metals Park, 1986, p.181-5
- 5 – W. L. Kovacs, Comercial and economic trends in ion nitriding/ carburizing; In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ION NITRIDING/CAR-BURIZING, 2, Cincinnati, 1989, Proceedings. Materials Park, ASM International, 1989, p.5-17
- 6 – J. Georges, TC Plasma Nitriding, Plasma Metal S. A., L-1817 Luxembourg, 2000
- 7 – S.M. Rossnagel, J.J. Cuomo, W.D. Westwood, Handbook of plasma processing technology – fundamentals, etching, deposition and surface interactions, New Jersey. Noyes, 1989, 523p
- 8 – I. Carțiș, Tratamente termochimice, Ed. Facla, 1988
- 9 – L. Petitjean, A. Ricard, Emission spectroscopy study of N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> glow discharge for metal surface nitriding, Journal of Physics D: Applied Physics, v.17, p.919-29, 1984
- 10 – N.A.G. Ahmed, Ion plating technology. New York, Wiley, 1987, p. 171
- 11 – C. Ruset, The influence of pressures on temperature uniformity on the plasma nitriding process. Heat Treatment of Metals, v.3, p.81-4, 1991
- 12 – L. Petitjean, Etude d'une decharge electrique dans un melange azote-hydrogene pour la nitruration de surfaces metalliques, Orsay, Universidad Paris – Sud, 1982. 153p. (Rapport L.P.198)
- 13 – M. Palacios, O. Salas, M. Muñoz, J. Oseguera, P. Schabes Retchkiman, Nitride nanophases in a plasma – assisted surface modified steel, ITESM – CEM, DGI, Mexico
- 14 – A. N. Timoshevskii, V. A. Timoshevskii, B. Z. Yanchitsky and V. A. Yavna, Electronic structure, hyperfine interactions and disordering effects in iron nitride Fe<sub>4</sub>N, Institute of Magnetizm, Kiev, Ukraine



- 15 – C. Weissmantel, Deposition of metastable films by ion beam and plasma techniques Proc. IX IVC - ICSS, p. 299-308, 1983.
- 16 – V. Dusek, J. Musil, Microwave plasmas in surface treatment technologies, Czechoslovak Journal of Physics, v.40, p. 1185-205, Dez. 1989.
- 17 – D.H. Jack,; K. H. Jack, Invited review: carbides and nitrides in steel, Materials Science and Engineering, v. 11, p. 1-27, 1973.
- 18 – J. Slycke, L. Sproge, Kinetics of the gaseous nitrocarburising process, Surface Engineering, 1989, Vol. 5, nr. 2, p. 125 – 140
- 19 – J. L. Marchand, H. Michel, D. Ablitzer, M. Gantois, A. Richard, J. Szekely, Mathematical formulation of the ion nitriding process, International Seminar of Plasma Heat Treatment – Science and Tehnology, 21 on 23 September 1987
- 20 – H. Michael, M. Gantois, Proceeding of the 18<sup>th</sup> Int. Conf. On Heat Treatment of Materials, May 1980, Detroit (A.S.M.)
- 21 – C. Leroy, H. Michael, M. Gantois, Scripta Met., 17 (1983), p. 879
- 22 – A. Richard, Tropical Invited Lecture, XVII th ICPIG, Budapest (1985)
- 23 – M. Capitelli, C. Gorse, A. Richard, J. Chem. Phys., 80 (1984), p. 149
- 24 – B. F. Gordiets, Sh. S. Mamedov, L. A. Shelepin, Sov. Phys. JETP, 40 (4) (1975), p. 640 – 646
- 25 – M. Capitelli, M. Dilonardo, C. Gorse, J Chem. Phys., 56 (1981), p. 29 – 42
- 26 – A. Richard, Raport L. P. N<sup>o</sup> 216, L.P.G.P., Université de Paris sud, Orsay (1986)
- 27 – Y. Sun, T. Bell, A numerical model of plasma nitriding of low alloy steels, School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham, Birmingham, UK (2002)
- 28 – H. C. F. Rozendaal, E. J. Mittemeijer, P. F. Colijn and P. J. Van Der Schaaf, Metall. Trans., 14A (1983) 395
- 29 – J. Pan, M. Hu, L. Mao, W. Tang, Z. Xu and Y. Tang, Heat Treatment Shanghai '83, The Metals Society, London, 1984, p. 111
- 30 – J. Pavlossoglou, Härt. Techn. Mitt., 169 – 176 (32) (1977) 215 – 223
- 31 – K. H. Jack, Heat Treatment '73, The Metals Society, London, 1975, p.53
- 32 – B. J. Lightfoot and D. H. Jack, Heat Treatment '73, The Metals Society, London, 1975
- 33 – J. A. Mohandesi and R. Priestner, Heat Treatment '81, The Metals Society, London, 1983, p.207
- 34 – J. L. Meijering, Adv. Mater. Res., 15 (1971) 1
- 35 – D. Heger and D. Bergner, Härt. Techn. Mitt., 46 (1991) 331 – 338



- 36 – L. F. Xia and M. F. Yan, *Acta Metall. Sin.*, 24B (1988) 248
- 37 – A. Brokman, *Mater. Sci. Eng.*, 40 (1979) 261
- 38 – B. Edenhofer, *Heat Treat. Met.*, 1 (1) (1974) 23
- 39 – M. Hudis, *J. Appl. Phys.*, 44 (1973) 1489
- 40 – G. G. Tibbets, *J. Appl. Phys.*, 44 (1974) 5072
- 41 – A. Brokman, *J. Appl. Phys.*, 52 (1981) 468
- 42 – Y. Sun, C. Newby, E. Strobach and T. Bell, in *Environmental and Energy Efficient Heat Treatment Technologies*, p46, Proc. 4th Int. Seminar of IFHT, Sept. 1993, Beijing, International Academic Publisher, Beijing, 1993
- 43 – J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, Clarendon Press, Oxford, 1956
- 44 – A. Marciniak, *Surf. Eng.*, 1 (1985) 283
- 45 – B. Edenhofer and T. J. Bewley, *Heat Treatment '76*, London, The Metals Society, 1978,
- 46 – Rembges Wolfgang, *Industrie automobile – Nitruration et nitrocarburation au plasma*, *Traitement Thermique* 253/92
- 47 – P. Collignon, *Advances in equipment for plasma nitriding and carburizing*. In: GUPTON, P.S., ed. *The heat treating source book*, Metals Park, ASM, 1986, p. 115-8
- 48 – B. Schweer, *Neue Entwicklungen zur automatischen Prozessführung bei Anlagen fuer das Plasmanitrieren*, *HTM*, 33 (1978)
- 49 – *Pulse Plasma Nitriding. Process Description*, Plasma Technik Grün GmbH, Deutschland/ Germany (2000)
- 50 – Uwe Huchel, Siegfried Strämke, Jeremy Cockrem, *Surface Engineering By Pulsed Plasma Nitriding in Automotive Industries*, Eltro GmbH (2003)
- 51 – H. –J. Spies, „Optimierung des Gebrauchsvehaltens von Bauteilen durch Randschichtbehandlung”, TU Bergakademie Freiberg, 26. – 28.09.1995
- 52 – J. Betyold, G. Laudin, S. Strämke, U. Huchel, „Pulsplasmanitrieren von Nockenwellen in der Fertigung”, *Härterei Techn. Mitteilungen* 49 (1994) 3, p. 186 – 190
- 53 – U. Huchel, S. Strämke, „Dewaxing and Pulsed Plasma Nitriding in one step – Production Experiences”, Proc. European Conference on Advances in Structural PM Component Production Munich Trade Fair Centre, Germany, Oct. 15 – 17.1997
- 54 – \*\*\*, Patents DP 33 22 341; US 46 45 981
- 55 – U. Huchel, S. Strämke, *Dewaxing and Pulsed Plasma Nitriding in One Step – Production Experience*, Eltro GmbH, Baesweiler, Germany (2000)





- 56 – Strämke, S., Stein, W., Pulsation improves results in plasma nitriding, Wire world Int., Vol. 26, March/ April 1984
- 57 – Huchel, U., Industrielle Anwendungen des Pulsplasmanitrierens und Nachbehandlung der Nitrieschicht, Coating 6/1996 S. 215 – 217
- 58 – Diferent Plant Design. The Mono – Plant, Plasma Technik Grün GmbH
- 59 – Diferent Plant Design. The Shuttle – Plant, Plasma Technik Grün GmbH
- 60 – Diferent Plant Design. The Tandem – Plant, Plasma Technik Grün GmbH
- 61 – Enrique Camps, Fernando Becerril, a.o., Microwave Plasma Steel Nitriding Using Different H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> gas mixtures, (2001)
- 62 – L. Petijean and A. Ricard, J. Phys. D, Appl. Phys., 17 919 (1984)
- 63 – Enrique Camps, Oscar Olea, C. Gutiérrez-Tapia, Mayo Villagrán, Rev. Sci. Instrum. 66 3219 (1995)
- 64 – M. K. Lei and Z. L. Zhang, J. Vac. Sci. Technol. A13 2986 (1995)
- 65 – G. A. Collins, R. Hutchins, K. T. Short, J. Tendys, X. Li, M. Samandi, Surf. Coat. Technol., 74-75 417
- 66 – D. Hovorka, R. Čerstvý, J. Musil and J. Vlček, Microwave Plasma Nitriding of a low – alloy Steel, Department of Physics, University of West Bohemia, Czech Republic (2003)
- 67 – B.Edenhofer, Processus physique et metallurgique lors de la nitruration ionique dans le plasma d'une décharge luminescente, H.T.M. 1974, 29, nr. 2, page 10.
- 68 – \*\*\*, U. S. Patent, No 5989363
- 69 – B. Edenhofer, Heat Treatment of Metals, 1971, 1, 23 – 28 and 1972, 2, 58 – 67
- 70 – M. Hudis, Journal of Applied Physics, 1973, 44 (4), 1485 – 1496
- 71 – T. A. Marciniak, T. Karpinki, Industrial Heating, April 1980, XLVII, (4), 42 – 44
- 72 – A. Ricard, J. Deschamps, J. L. Godard, L. Falk, M. Michel, Materials Science and Engineering, 1991, A139, 9 – 14
- 73 – J. Bougdira, G. Henrion, M. Fabry, M. Remy, J. Cussenot, Materials Science and Engineering, 1991, A131, 15 - 19
- 74 – J. Musil, J. Vlček, M. Růžička, Recent Progress Plasma Nitriding, Department of Physics, University of WestBohemia, Czech Republic
- 75 – Benda M., Vlček J., Cibulka V., J. Musil, J. Vac. Sci. Technol. A, 1997, 15:2636
- 76 – D. Liedtke, Vergleich der verschiedenen Nitrierenverfahren und Kriterien für die Auswahl, Härtereie – Tehn. Mitt. 28 (1973) 4, p. 384 – 393





- 77 – R. Chatterjee – Fischer, Überblick über das Nitrieren und Nitrocarburieren, Härterei – Techn. Mitt. 38 (1983) 1, p. 35 – 80
- 78 – F. K. Naumann, G. Langenschied, Beitrag zum System Eisen – Stickstoff – Kohlenstoff, Arch. Eisenhüttenw. 36 (1965) 9, p. 677 – 682
- 79 – C. Razim, U. Rodrian, Wear Behavior of Plasma Nitriding Treatments in Comparison with Conventional Nitriding Treatments in the Case of Crossed Helical Gears, International Seminar of Plasma Heat Treatment – Science and Tehnology, 21 on 23 September 1987
- 80 – K. –H. Habig, Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitrierten Stahl 42CrMo4, BAM – Berichte, Nr. 38 (1976)
- 81 – K. –H. Habig, R. Chaterjee – Fischer, F. Hoffmann, Untersuchung des Gleit- und Furchungverschleißes an thermochemisch behandelten Stählen, Z. Werkstofftechn. 13 (1982), p. 207 – 215
- 82 – D. Roempler, Erfahrungen mit dem Kerzzeitgasnitrieren im Getriebebau, Härterei – Techn. Mitt. 34 (1979) 5, p. 219 – 226
- 83 – R. Woska, Einfluß der Zusammensetzung der Nitrierschicht auf des Miscreibungsverhalten, Härterei – Tehn. Mitt. 38 (1983) 1, p. 10 – 17
- 84 – W. Pessel, Z. Borkowski, A. Szulborki, Untersuchung des Abreibwiderstands an ausgewählten konventionell und plasmanitrierten Teilen eines Dieselmotors, Härterei – Techn. Mitt. 36 (1981) 2, p. 75 – 80
- 85 – F. W. Eysell, Des Unterschied zwischen Gasnitrieren und Tenifer – Behandlung, Öster. Ing. –Z. 13 (1970) 5
- 86 – H. Tauscher, E. Stecher, Beitrag zum Verschleißverhalten badnitrierter und oberflächengehärteter Stahlteile, Ifl. – Mitt. 4 (1965), p. 220 – 224
- 87 – K. Keller, Vergleichsuntersuchungen an gas-, bad- und ionitrierten Maschinenteilen, Forschungsberichte des Landes Nordrhein – Westfalen, Nr. 2244 (1972)
- 88 – B. Edenhofer, Vergleich verschiedener Nitrierverfahren unter besonderer Berücksichtigung des Ionitrierens, Fachber. Oberflächentech, 12 (1974), p. 97 – 102
- 89 – C. Razim, U. Rodrian, Untersuchung zum Schichtaufbau und Verschleißverhalten hochbelasteter, nitrierter Schraubenräder, Härterei – Techn. Mitt. 40 (1985) 4, p. 141 – 149
- 90 – B. Prenosil, Einige neue Erkenntnisse über das Gefüge von um 600 °C in der Gasatmosphäre carbonitrierte Schichten, Härterei – Techn. Mitt. 28 (1973) 3, p. 157 – 164
- 91 – W. H. Kool, E. J. Mittemeijer, D. Schalkoord, Characterization of surface layers of nitried iron and steels, Microdinamica Acta (Wien), Suppl. 9 (1982), p. 349 – 372



- 92 – S. A. Levy, J. F. Libsch, J. D. Wood, A study of Fe-C-N alloys, Transact. Of Metallurgical Society of AIME, April 1969, Vol. 245, p. 753 – 758 and Source book on nitriding, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1977, p. 297 – 302
- 93 – D. Liedtke, J. Grosch, Über das Formänderungsverhalten nitrocarburierter Stähle, Härterei – Techn. Mitt. 41 (1986) 6, p. 373 – 386
- 94 – Hi 1 Nitron GmbH, Germany
- 95 – Edenhofer Bernd, Vergleich verschiedener Nitrierverfahren unter besonderer Berücksichtigung des Ionitrierers, HTM, 1988
- 96 – Traitement thermochimique par voie ionique Sulfonitrocarburation, groupe THERMI-LYON (2003)
- 97 – Traitement thermochimique en bains de sels SULFONITROCARBURATION, groupe THERMI-LYON
- 98 – S. Strämke, U. Huchel, J. Crummenauer, Pulsed Plasma Nitriding and Combined Process, Eltro GmbH, Baesweiler, Germany
- 99 – Puls Plasma Oxidation. Process Description, Eltro GmbH, Baesweiler, Germany
- 100 – S. Strämke, U. Huchel, J. Crummenauer, Pulsed Plasma Nitriding and Combined Process, Eltro GmbH, Baesweiler, Germany
- 101 – S. Strämke, Process and Apparatures for the Surface Treatment of Workpieces by Glow Discharge, US Patent 4, 645, 981, Feb. 24, 1987
- 102 – U. Huchel and S. Strämke, Nitrocarburieren und Oxidieren im Plasma, Proceedings Nitrieren und Nitrocarburieren, 24. – 26.04.1996, Weimar, p. 148 – 154
- 103 – M. Zlatanovic and T. Gredic, Matching of TiN coating structures by plasma nitriding of substrates, Vacuum, volume 44, number 2, 1993, p. 83 – 88
- 104 – T. Gredic and M. Zlatanovic, N. Popovic and Z. Bogdanov, Effect of plasma nitriding on the properties of (Ti, Al) N coatings deposited onto hot work steel substrates, Thin Solid Films, 228, 1993, p. 261 – 263
- 105 – M. Lake, E. Lugscheider, S. Strämke, U. Huchel and J. Crummenauer, Verfahrenskombination Pulsplasmanitrieren und Hartstoffbeschichten, Proceedings Nitrieren und Nitrocarburieren, 24. – 26.04.1996, Weimar, p. 231 – 240
- 106 – A Design Engineer's Digest of Ductile Iron, SORELMETAL, RTZ IRON & TITANIUM AMERICA, Eighth Edition (2002)
- 107 – \*\*\*, Plasma Technik Grün GmbH, Deutschland/ Germany



- 108 – D. Abăințancei, C. Hasegan, Motoare pentru automobile și tractoare, Vol. 1, Ed. Tehnică, București, 1988
- 109 – B. Grünwald, Teoria, construcția și calculul motoarelor pentru autovehicule rutiere, Ed. Didact. Și Pedag., 1969
- 110 – \*\*\*, Standard de ramură – Segmenti pentru motoare de vehicule și compresoare – Condiții tehnice generale de calitate – 486/86 aprobat la 19.01.1987
- 111 – \*\*\*, Brevet Invenție Dosar OSIM nr. 140320
- 112 – B. Stokes and P.A.S. ReedMaterials Research Group, Fatigue analysis of austempered ductile iron suitable for automotive camshaft applications, School of Engineering Sciences, University of Southampton, Highfield, Southampton. SO17 1BJ
- 113 – \*\*\*, Normă internă CCSITA Pitești
- 114 – Vermeșan G., Deac V., Bazele tehnologice ale nitrurării ionice, Editura Universitară, Sibiu, 1992