

Domeniul Inginerie Industrială

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

Coordonator științific:

Prof. univ. dr. ing. Dumitru AMARANDEI

Doctorand:

Ing. Ioan TAMAȘAG

SUCEAVA
2021

**UNIVERSITATEA “ȘTEFAN CEL MARE” DIN SUCEAVA
FACULTATEA DE INGINERIE MECANICĂ, MECATRONICĂ ȘI
MANAGEMENT
Domeniul Inginerie Industrială**

Contribuții la studiul fenomenului de frecare la aşchiera cu scule cu tăiş a materialelor dure

Coordonator științific:

Prof. univ. dr. ing. Dumitru AMARANDEI

Doctorand:

Ing. Ioan TAMAȘAG

**SUCEAVA
2021**

Mulțumiri

Acum, la finalul stagiului doctoral, mă simt profund marcat de sentimente de fericire și împlinire care provin din mulțumirea profesională și personală a studiilor duse la bun sfârșit.

Pe această cale, doresc să le mulțumesc tuturor acelor oameni minunați care mi-au oferit consultanță științifică și care și-au rupt din timpul lor pentru a-mi oferi consiliere, sprijin și ajutor:

Mulțumesc conducerii Universității „Ștefan cel Mare” Suceava, domnului prorector *prof. univ. dr. ing.* **Mihai DIMIAN**, și conducerii Școlii doctorale de inginerie, prin directorul *prof. univ. dr. ing.* **Ioan MIHAI**, care mi-au acordat posibilitatea de a mă perfecționa în laboratoarele universității.

Domnul profesor **Dumitru AMARANDEI**, de la Universitatea ”Ștefan cel Mare,, din Suceava, a asigurat coordonarea și îndrumarea științifică a acestei teze. Domnia sa a fost un constant susținător științific, atât teoretic cât și experimental, și m-a ajutat și încurajat permanent și eficient în numeroase împrejurări în munca de cercetare. Sincere mulțumiri și sentimente de recunoștință pentru sprijinul acordat în elaborarea tezei de doctorat, pentru răbdarea, generozitatea, și înțelegerea dvs., precum și pentru întreaga contribuție la formarea mea ca cercetător. Vă mulțumesc pentru faptul că ați acceptat să-mi împărtășiți din bogata dumneavoastră experiență dobândită de-a lungul anilor de studiu, altfel mi-ar fi fost mult mai greu să realizez această teză.

Deosebită grațitudine datorez membrilor comisiei de îndrumare: domnului *prof. univ. dr. ing. habil.* **Costel MIRONEASA**, doamnei *prof. univ. dr. ing.* **Marilena GLOVNEA** și nu în ultimul rând domnului *conf. univ. dr. ing.* **Stelian ALACI** pentru timpul prețios acordat, pentru sfaturile științifice valoroase cât și pentru îndrumarea competentă și permanentă pe tot parcursul elaborării referatelor și a realizării acestei teze de doctorat.

De asemenea, mulțumesc distinșilor membri invitați din Comisia de doctorat: *prof. univ. dr. ing.* **Cătălin FETECĂU** de la Universitatea ”Dunărea de Jos,, din Galați, *prof. univ. dr. ing.* **Gheorghe OANCEA** de la Universitatea ”Transilvania,, din Brașov și *prof. univ. dr. ing.* **Nicolae BÂLC** de la Universitatea Tehnică din Cluj, pentru onoarea de a-mi analiza lucrarea și de a fi acceptat participarea în comisie.

Alese mulțumiri tuturor membrilor Departamentului de Mecanică și Tehnologii, cu care am avut onoarea de a colabora, pentru încurajare, suportul moral, material, științific și sprijinul dezinteresat acordat în perioada de elaborare a tezei. Aici, și în acest moment, se cuvine să-i aduc mulțumiri deosebite doamnei *șl. dr. ing.* **Irina Beșliu (Băncescu)**, care m-a consiliat permanent și mi-a fost alături mai ales la partea de experimentare și diseminare a rezultatelor cercetării.

Pentru răbdare, înțelegere, suportul moral, financiar și atmosfera pe care mi-au creat-o permanent în toți acești ani, nu în ultimul rând, mulțumesc familiei care a depus un efort cel puțin egal cu al meu.

Suceava, septembrie 2021

Cuprins

		*
Introducere	1	1
Capitolul I . Stadiul actual al cercetărilor privind fenomenul de frecare la aşchierea materialelor dure	3	3
1.1. Fenomenul de frecare	3	-
1.1.1 Definiţii	3	-
1.1.2. Studii şi cercetări ale fenomenului de frecare	3	-
1.1.3. Fizica fenomenului de frecare	5	-
1.1.4. Importanţa industrială a tribologiei proceselor de aşchiere	5	-
1.2. Stadiul actual privind aşchierea materialelor dure	6	3
1.2.1. Generalităţi	6	3
1.2.2. Aşchierea materialelor dure	7	-
1.2.3. Rezistenţa şi forţele de aşchiere	8	-
1.2.3.1. Rezistenţa la aşchiere.....	8	-
1.2.3.2. Structura fizică a forţelor de aşchiere din procesul HPM	10	-
1.2.4. Scule utilizate la aşchierea materialelor dure	11	-
1.2.4.1. Precizări privind geometria constructivă şi funcţională a sculelor utilizate la aşchierea materialelor dure	12	-
1.2.4.2. Particularităţi geometrice constructive ale părţii aşchietoare a sculelor utilizate la aşchierea materialelor dure	13	-
1.2.4.3. Materialul sculelor utilizate la aşchierea materialelor dure	15	-
1.2.5. Puterea şi energia de aşchiere	16	-
1.2.6. Medii de aşchiere în procesele HPM	18	-
1.2.7. Formarea aşchiilor în procesul HPM	19	-
1.2.8. Parametrii regimului de aşchiere	20	-
1.2.9. Fenomenul termic în cadrul proceselor HPM	20	-
1.3. Stadiul actual al cercetărilor teoretice şi experimentale privind prelucrarea prin aşchiere a materialelor dure	22	-
1.3.1. Cercetări privind fenomenul termic şi de frecare în procesele HPM	22	3
1.3.1.1. Cercetări privind fenomenul de frecare în procesele HPM	22	-
1.3.1.2. Cercetări privind fenomenul termic asupra proceselor HPM	24	-
1.3.1.3. Cercetări privind calitatea suprafeţelor în procesele HPM	25	-
1.3.2. Cercetări privind factorii de influenţă asupra proceselor de prelucrare a materialelor dure	26	4
1.4. Necesitatea şi oportunitatea unor noi cercetări privind mărimea forţelor de deformare plastică şi de frecare la aşchierea materialelor dure	30	4
Capitolul II. Stadiul actual privind metodologia şi aparatura pentru determinarea forţei de deformare plastică şi de frecare la aşchierea materialelor dure	32	7
2.1. Metode analitice şi empirice pentru studiul fenomenului de frecare	32	7
2.1.1. Metode analitice pentru studiul fenomenului de frecare	32	7
2.1.2. Modele empirice pentru determinarea forţelor de aşchiere	39	8
2.2. Metodologie experimentală şi aparatură utilizată la studiul fenomenului de frecare la aşchierea materialelor dure	43	9
2.3. Concluzii	47	9

Capitolul III. Contribuții teoretice privind modelarea componentelor fizice ale forțelor de frecare la aşchierea materialelor dure	49	11
3.1. Principiul modelului	49	11
3.1.1. Model fizic pentru scule cu tăiş	51	11
3.1.2. Model matematic	51	12
3.2. Contribuții privind extinderea modelului funcție de geometria funcțională a sculei	54	13
3.2.1. Principiul modelului extins la geometria funcțională a sculei	54	13
3.2.2. Modelul matematic extins la geometria funcțională a sculei	55	14
3.3. Verificarea modelului propus	57	15
3.3.1. Particularizarea modelului propus	57	15
3.3.2. Validarea experimentală a modelului și discuții	59	17
3.3.2.1. Aparatură și condiții de experimentare	59	17
3.3.2.2. Validarea experimentală modelului	64	21
3.4. Studiu comparativ privind influența parametrilor de lucru și a geometriei sculei asupra componentelor F_x , F_y , F_z , F , F_N , F_α , și $F_{N\alpha}$ la strunjirea oțelului carbon	70	27
3.5. Concluzii finale privind validarea modelului	73	30
3.6. Utilizarea metodei cu elemente finite pentru studiul distribuției presiunii și a temperaturii din zona de aşchiere – studiu comparativ	76	31
3.6.1. Cercetări privind evaluarea presiunii pe suprafețele de contact ale sculei ..	76	31
3.6.2. Concluzii	79	33
 Capitolul IV. Metodologie și aparatură utilizată la studiul componentelor fizice ale forței de aşchiere la prelucrarea materialelor dure	80	35
4.1. Echipamentul utilizat pentru studiul structurii fizice ale forței de aşchiere la prelucrarea materialelor dure	81	36
4.2. Aparatura utilizată pentru studiul structurii fizice ale forței de aşchiere, a temperaturii și a calității suprafețelor la prelucrarea materialelor dure	83	38
4.3. Plan de experimente pentru studiul structurii fizice ale forțelor de aşchiere la prelucrarea materialelor dure	84	39
4.3.1. Condiții de experimentare pentru stabilirea curbelor de variație	84	39
4.3.2. Modelarea matriceală Taguchi	84	39
4.3.2.1 Prelucrarea datelor	86	41
 Capitolul V. Cercetări experimentale privind influența principalilor factori asupra fenomenului de frecare la prelucrarea materialelor dure	90	42
5.1. Influența factorilor principali asupra componentelor forței de aşchiere la aşchierea materialelor dure	93	45
5.1.1. Influența factorilor principali asupra componentei F_x	95	-
5.1.2. Influența factorilor principali asupra componentei F_y	98	-
5.1.3. Influența factorilor principali asupra componentei F_z	101	-
5.2. Influența factorilor principali asupra componentelor fizice ale forței de aşchiere și a coeficienților de frecare la aşchierea materialelor dure	104	-
5.2.1. Influența factorilor principali asupra componentei F	104	-
5.2.2. Influența factorilor principali asupra componentei F_N	109	-
5.2.3. Influența factorilor principali asupra componentei F_α	114	-
5.2.4. Influența factorilor principali asupra componentei $F_{N\alpha}$	119	-
5.2.5. Influența factorilor principali asupra coeficientului de frecare μ_γ	124	-
5.2.6. Influența factorilor principali asupra coeficientului de frecare μ_α	129	-

5.3. Rezultate și discuții. Concluzii	134	45
Capitolul VI. Cercetări experimentale privind influența fenomenului de frecare asupra calității suprafețelor, temperaturii și formei așchiilor	138	48
6.1. Cercetări privind forma așchiilor la așchiera materialelor dure	138	48
6.2. Cercetări privind calitatea suprafețelor la așchiera materialelor dure	143	52
6.3. Considerații privind uzura sculelor	150	57
6.4. Cercetări privind fenomenul termic la așchiera materialelor dure	151	58
6.5. Rezultate, discuții și concluzii	158	63
Capitolul VII. Concluzii finale și direcții viitoare de cercetare	161	66
7.1. Concluzii finale	161	66
7.2. Direcții viitoare de cercetare	162	67
Bibliografie	163	68

INTRODUCERE

Dezvoltarea continuă a tehnologiilor de fabricație a constituit o preocupare continuă pentru mediul academic și industrial, ceea ce a condus la apariția de materiale noi, cu caracteristici mecanice și de uzinare modificate, în raport cu materialele clasice, și a unor echipamente și metode de prelucrare adecvate. În acest context, literatura de specialitate face referire la o serie de tehnologii de prelucrare neconvenționale precum prelucrarea cu viteze mari, prelucrarea ultrasonică, prelucrarea asistată de vibrații, prelucrarea cu scânteie electrică, prelucrarea electrochimică sau cu laser [BAL'17], fabricația aditivă [COS'19, TAM'21, BLA'21], matrițare incrementală [BES'21, BES'21-1, NAS'21], etc.

Așa cum se precizează în mai multe referințe bibliografice industriale și de cercetare, atenția specialiștilor din domeniul industrial a fost orientată către posibilitățile de prelucrare a materialelor dure și dificile (oțeluri și fonte dure, materiale refractare, aliaje de titan etc.) în condiții tehnice și economice optime. Ca o consecință a aşchierii cu viteze mari și din dorința reducerii lanțurilor de producție a apărut aşchiera materialelor dure cu scule cu tăiș, ca operație finală de finisare rapidă și de mare randament.

Au fost elaborate și strategii comune de studiu a acestor tehnologii, la care au participat și colaborat specialiști din mai multe domenii, în primul rând fabricanții, constructorii de mașini-unelte și scule [AMA'05]. Solicitățile mecanotermice, importante în acest caz, și geometria complexă a sculelor, microgeometria suprafețelor active, tratamentul termic aplicat și acoperirile cu straturi de ameliorare a uzurii, sunt aspecte determinate pentru prelucrarea materialelor cu durități ridicate, alături de durata de viață a sculelor și precizia de prelucrare a pieselor [DAV'13, AST'10].

Interesul industrial ridicat pentru aceste tehnologii, mai ales în domenii precum cel al aeronauticii, automotivelor, se datorează, în principal, reducerii importante a costurilor și cheltuielilor, prin micșorarea timpilor pe ciclu, diminuarea timpilor operativi și de administrare a sculelor, la operațiile de finisare după tratamentul termic final și asigurarea unei calități foarte bune a suprafețelor prelucrate. În plus, tehnica aşchierii materialelor dure este recunoscută ca fiind una din tehnologiile de prelucrare cheie pentru mărirea capacității de producție cu performanțe tehnice și economice ridicate.

Prelucrarea materialelor dure și dificile, costisitoare prin tehnologii clasice, a constituit și constituie o provocare datorită proprietăților specifice ale materialelor (cum ar fi conductivitatea termică scăzută și duritatea ridicată a titanului, caracterul abraziv al oțelului inoxidabil etc.), rezistenței și ductilității ridicate, ecruisării rapide etc.

În funcție de combinația acestor proprietăți, fizica procesului de aşchiere a materialelor dure și dificile este esențial modificată și mai puțin studiată, apărând astfel necesitatea continuării cercetărilor teoretice și experimentale de raționalizare a proceselor de prelucrare privitor la nivelul forțelor de aşchiere, structura lor fizică (componentele de frecare și deformare plastică), formarea și ruperea aşchiilor, fenomenul de frecare, dinamica și stabilitatea procesului, precizia și calitatea suprafețelor prelucrate.

Ca și în cazul aşchierii clasice, literatura de specialitate publicată în domeniu și practica industrială cunoscută în legătură cu prelucrarea materialelor dure și dificile a evidențiat că unul din factorii cu influență majoră este frecarea care însoțește aceste procese.

Lucrarea de față este structurată în șapte capitole, și a fost orientată către studiul fenomenului de frecare la aşchiera materialelor dure, respectiv: *Capitolul 1*, în care se prezintă conceptul de frecare care însoțește procesul de prelucrare a materialelor dure, precum și stadiul actual privind structura fizică a forței de aşchiere și cercetările legate de aceste aspecte. Necesitatea și oportunitatea abordării unor astfel de subiecte sunt concluziile formulate la finalul capitolului; *Capitolul 2* prezintă stadiul actual privind metodologiile și aparatura utilizată la investigarea fenomenului de frecare, aplicabile și în cazul prelucrării materialelor dure; Analiza critică a stadiului actual prezentat în capitolul 1 și 2, a demonstrat și necesitatea elaborării unui nou model teoretico-experimental de evaluare a componentelor fizice ale forței de aşchiere, care s-a realizat în *Capitolului 3*; În *capitolul 4*, este prezentată metodologia și aparatura de cercetare utilizată pentru cercetare; *Capitolele 5 și 6* sunt dedicate cercetării experimentale a procesului de aşchiere a materialelor dure, privind mărimea componentelor forței de aşchiere și implicațiile acestora asupra calității suprafețelor, a temperaturii și a formelor aşchiilor degajate, efectuată în cadrul laboratorului de Tehnologia Construcțiilor de Mașini din cadrul Facultății de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management al Universității “Ștefan cel Mare” din Suceava; *Capitolul final* al lucrării prezintă concluziile, contribuțiile aduse de autor și direcțiile viitoare de cercetare.

CAPITOLUL I

Stadiul actual al cercetărilor privind fenomenul de frecare la aşchierea materialelor dure

1.2. Stadiul actual privind aşchierea materialelor dure

1.2.1. Generalităţi

În literatura de specialitate, prelucrarea materialelor dure se regăseşte sub denumirea de Hard Machining (HM) sau Hard Part Machining (HPM) şi se defineşte prin prelucrarea materialelor cu durităţi cuprinse între 45-75 HRC [HUA'05], deşi, de obicei, prelucrarea se face asupra materialelor cu durităţi cuprinse între 58-68 HRC [DAV'11].

Principalele teste pentru metoda HPM s-au efectuat iniţial prin strunjire (Hard Turning, HT) [CHO'04, CEP'08, CEP'11], după care s-au extins şi la alte procedee cum ar fi frezarea (Hard Milling) [GOP'10], broşarea etc.

1.3.1.1. Cercetări privind fenomenul de frecare în procesele HPM

Cercetările efectuate relativ la fenomenul de frecare, au fost realizate în corelaţie cu manifestarea altor fenomene sau factori de influenţă care însoţesc procesul de aşchiere [KAR'07, BOU'07, CES'09, GOP'10, HON'11, TAK'14, MOH'15, WIL'17, SAH'09, SUR'12, VAR'14]. Astfel, unii autori s-au preocupat de studiul variaţiei *coeficientului de frecare* şi corelaţia lui cu uzura sculelor, geometria sculelor şi materialele prelucrate [GRZ'13, GRZ'13-2, GRZ'14, KAR'07, KAS'18, MIL'16].

Milutinović şi **Ljubodrag** [MIL'16], propun un model pentru studiul fenomenului de frecare, adaptat după modelul lui Merchant pentru aşchierea ortogonală, cu care studiază coeficientul de frecare de pe suprafaţa de aşezare la aşchierea dură a oţelului 60WCrV7 (duritate 55÷60 HRC) cu scule CBN (tip TNMA 160404).

Rezultatele obţinute experimental au permis autorilor să traseze pentru coeficientul de frecare de pe suprafaţa de aşezare, μ_a , dependenţa din figura 1.29.

Rezultatele obţinute experimental au permis autorilor să traseze pentru coeficientul de frecare de pe suprafaţa de aşezare, μ_a , dependenţa din figura 1.29., care evidenţiază că, pentru condiţii de lucru constante, coeficientul de frecare este constant, iar în funcţie de viteza de aşchiere, înregistrează valori descrescătoare din domeniul 0,2÷0,5, tabelul 1.1.

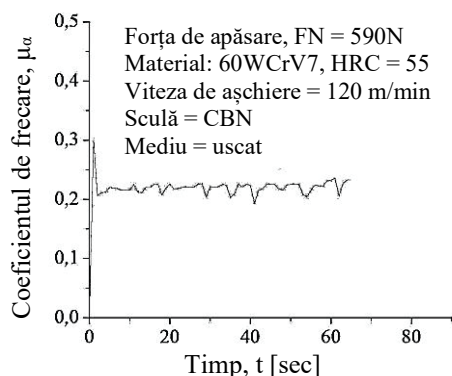


Fig. 1.29. Dependenta coeficientului de frecare μ_a pe suprafața de aşezare determinat experimental [MIL'16].

Tabel 1.1. Valorile coeficientului de frecare experimentale şi calculate

Regimul de aşchiere	Coeficientul de frecare, μ , măsurat	Coeficientul de frecare, μ , calculat
$v_c = 120 \text{ m/min}$ $f = 0,181 \text{ mm/rot}$	0,22	0,19
$v_c = 60 \text{ m/min}$ $f = 0,04 \text{ mm/rot}$	0,43	0,38

Xiangyi Ren ș.a. [XIA'19], au studiat variația uzurii la aşchiera la temperaturi ridicate, apropiate de cele dezvoltate în procesele HPM, utilizând metoda pin-disc (Pin-on-Disk).

Testele s-au realizat pe oțelul rapid cu concentrație ridicată de titan, FeTi70, și aliajul bogat în calciu, FeSi60Ca28, cu durități de 59 HRC, și pini din oțel rapid cu o concentrație mare de nitruri CBN și oțel de scule bogat în vanadiu, T15 (echivalent W12Cr4V5Co5). În figura 1.30., este dată dependența coeficientului mediu de frecare de temperatura mediului de lucru, de unde se constată o variație descrescătoare de formă aproximativ liniară.

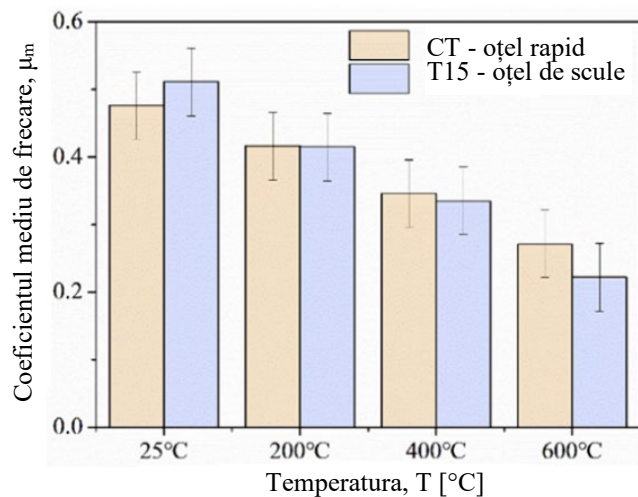


Fig. 1.30. Variația coeficientului de frecare funcție de temperatura de aşchiere [XIA'19].

1.3.2. Cercetări privind factorii de influență asupra proceselor de prelucrare a materialelor dure

Kishor Kumar Gajrani ș.a., [KIS'19], au studiat performanța procesului de aşchiere HPM funcție de mediul de aşchiere și regimul de lucru la uzinarea oțelului de scule AISI H13 (echivalent 4Cr5MoSiV1), cu duritate de 56±2 HRC, cu medii de aşchiere uscate, ude și Minimum Quantity Cutting Fluid (MQL) sub formă de emulsii biodegradabile, și au măsurat și calculat forțele de aşchiere și coeficientul de frecare pe suprafața de degajare, μ , după modelul Merchant. Cu datele obținute, s-au trasat dependențele coeficientului de frecare funcție de avansul de lucru pentru diferite medii de aşchiere, figura 1.41.

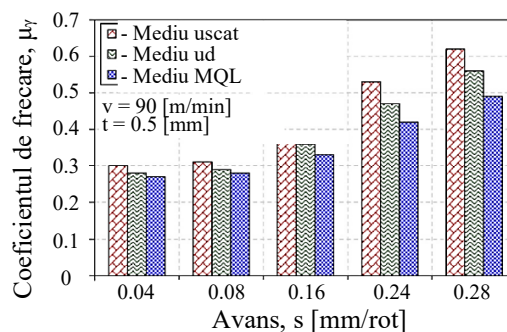


Fig. 1.41. Variația coeficientului de frecare, μ , funcție de avansul de lucru [KIS'19].

1.4. Necesitatea și oportunitatea unor noi cercetări privind mărirea forțelor de deformare plastică și de frecare la aşchiera materialelor dure

Din punct de vedere fizic, fenomenele de frecare care însoțesc procesul de aşchiere au fost studiate de mulți oameni de știință, ingineri și cercetători, ceea ce a condus la contribuții deosebite și multă literatură de specialitate publicată în domeniu. Cu toate rezultatele obținute până în prezent, aceste aspecte continuă să fie subiecte de studiu datorită evoluțiilor din domeniul materialelor sculelor și echipamentelor, pe de o parte, și insuficienței datelor utilizate la modelarea fenomenelor de frecare, pe de altă parte.

Stadiul actual privind forțele de deformare plastică și de frecare evidențiază că majoritatea studiilor au fost realizate la aşchiera materialelor netratate termic [GRZ'13, GRZ'13-2, GRZ'14] și la aşchiera HSM [AMA'96, AMA'96-1, AMA'95]. În cazul tehnologiilor de prelucrare HPM, deși studiile privind structura fizică a forțelor de aşchiere sunt foarte puține și

uneori neelocvente, permit, totuşi, formularea unor concluzii privind fizica şi parametrii specifici ai procesului de aşchiere, factorii de influenţă, tabelul 1.3.

Tabel 1.3. Parametrii regimului de aşchiere, cupluri de materiale şi medii de aşchiere utilizate la aşchierea materialelor dure.

Regim			Material sculă	Material piesă	Geometrie	Mediu
v, m/min	s, mm/rot	t, mm				
100-250	0,1-0,5	0,5<	CBN cu sau fără înveliș; PcBN; Scule ceramice;	Durități >45HRC 100Cr6 AISI 51200	Cu teșitură Fără teșitură	Uscat MQL

Literatura de specialitate evidențiază că cercetările privind fizica procesului de aşchiere, fenomenul termic, de uzură, regimul de aşchiere şi durabilitatea sculelor nu s-au produs simultan în cadrul unui studiu ci dispersat în mai multe lucrări şi decalat în timp în funcție de interesul cercetătorilor. Din cauza dificultăților de investigare şi modelare a acestor aspecte, cercetările privind structura fizică a forțelor de aşchiere sunt puține şi sporadice, unele probleme privind fenomenele de frecare, deformare plastică, formarea aşchiilor, nivelul forțelor şi calitatea suprafețelor generate prin aceste tehnologii rămânând în continuare neelucidate.

Studiile privind forțele de deformare plastică şi de frecare, s-au realizat mai ales cu referire la variația coeficientului de frecare pe suprafața de aşezare [MIL'16; WAN'03], iar în majoritatea cazurilor informațiile au fost obținute experimental folosind dispozitive tribometrice.

Din bibliografia consultată, referitoare la prelucrarea materialelor clasice, se conturează o serie de concluzii care pot fi valabile şi pentru aşchierea materialelor dure:

- raportul dintre forța de deformare plastică şi de frecare ($\mu=F/F_N$) depinde de cuplul de materiale aflate în contact;
- raportul dintre forța de deformare plastică şi de frecare ($\mu=F/F_N$) depinde de viteza relativă între suprafețele de frecare;
- studiul coeficientului de frecare pentru aşchierea HPM s-a făcut cu rezultate unanim acceptate pentru suprafața de aşezare, $\mu_a = 0,2 \div 0,3$;
- componentele fizice ale forței de aşchiere pe suprafețele de contact (F , F_N , F_a , F_{Na}) şi coeficienții de frecare variază cu regimul de lucru;
- unele aspecte privind variația componentelor forței de aşchiere funcție de viteza de aşchiere sunt contradictorii;
- coeficientul de frecare pe suprafața de degajare a sculei are valori cuprinse între $0,6 \div 1,3$ pentru aşchierea materialelor clasice.



Unele investigații privind tehnologiile HPM s-au realizat, şi unele rezultate sunt cunoscute, în acest moment, relativ la mărimea şi modul de variație a forțelor de frecare, de deformare plastică şi coeficientul de frecare, mai multe la prelucrarea materiale netratate termic şi foarte puține sau lipsesc complet, la procesele HPM. Astăzi, datorită perfecționărilor aduse materialelor sculelor şi a mașinilor unelte, a apărut posibilitatea prelucrării materialelor tratate cu durități mult mai mari. O problemă neabordată, care a fost şi este actuală şi vizată de cercetători şi ingineri din industrie, este ridicarea productivității procesului de aşchiere a materialelor dure. A mai apărut necesitatea de a se stabili cum variază forța de aşchiere şi componentele ei pentru materiale cu durități superioare şi dacă metodele cunoscute şi utilizate pentru materiale netratate se pot aplica şi în cazul procesului HPM. Unele dependențe experimentale care dau global variația forței de anumiți parametri (regim, geometrie, cuplu materiale în contact, mediu de aşchiere etc.) există, însă existența unor relații de calcul precise

pentru calculul forțelor implicate în procesul HPM, în anumite condiții date, ar fi utile în proiectarea tehnologică și constructivă (a sculelor, a mașinilor unelte etc.).

Pentru realizarea acestor deziderate este necesar ca mai întâi să fie cercetată structura fizică a forțelor de aşchiere și aceasta cu atât mai mult cu cât **Poulachon** și **Konig** au arătat că la aşchiera materialelor dure mecanismul formării aşchiilor este diferit față de cel prezent la aşchiera materialelor netratate și că este influențat de temperatură, frecare și gradul de deformare plastică. Stabilirea procentului de reprezentare a componentelor fizice în forța totală, dezvoltată în procesele HPM, ar putea avea implicații în procesul de fabricație a sculelor aşchietoare, dimensionarea mașinilor unelte, analiza cu element finit etc.

În concluzie, procesul de prelucrare HPM este o tehnologie actuală, care prezintă multiple avantaje, mai ales prin înlocuirea operațiilor de rectificare cu finisarea cu scule pe tăiş, și care impune cercetări teoretice și experimentale continue, iar contribuțiile sunt bine venite.

Lămurirea problemelor legate de fenomenul de frecare și mărimile componentelor fizice forțelor de aşchiere (forțelor de frecare și de deformare) constituie o necesitate actuală la cunoașterea proceselor prelucrare a materialelor dure și poate avea efecte pozitive atât pentru domeniul industrial cât și cel academic.

Capitolul II

Stadiul actual privind metodologia și aparatura pentru determinarea forței de deformare plastică și de frecare la aşchierea materialelor dure

În acest capitol sunt prezentate cele mai importante modele analitice și empirice pentru determinarea forțelor de frecare, a forțelor normale și a raportului dintre ele, aplicabile și în cazul prelucrării materialelor dure.

2.1. Metode analitice și empirice pentru studiul fenomenului de frecare

2.1.1. Metode analitice pentru studiul fenomenului de frecare

Primul model analitic a fost dezvoltat de către **Merchant** în 1945 [MER'45], acesta deschizând calea către studiul analitic al forțelor de frecare și de deformare plastică.

Acest model simplificat, scris în funcție de ipotezele Ernst-Merchant, nu ia în considerare toți parametrii de aşchiere: viteza de aşchiere, proprietățile materialului prelucrat, etc., și nici nu simulează perfect condițiile în care pot fi stabilite unghiurile de degajare a aşchiei.

Modelul Ernst-Merchant a fost baza de plecare pentru multe alte modele de determinare a forțelor de aşchiere, completate cu teoria planelor de alunecare-forfecare („slip–line”) și tehnici posibile de determinare cât mai precisă a unghiului de forfecare, Φ .

N.N. Zorev, [ZOR'63], în 1963, consideră că forțele de pe suprafața de degajare sunt influențate de lungimea de contact a aşchiei cu scula.

În scopul prezicerii unghiului de degajare a aşchiei și a forțelor implicate în procesul de aşchiere, **Usui ș.a.**, [USU'78], au dezvoltat un model analitic bazat pe modelul lui Merchant, figura 2.3.

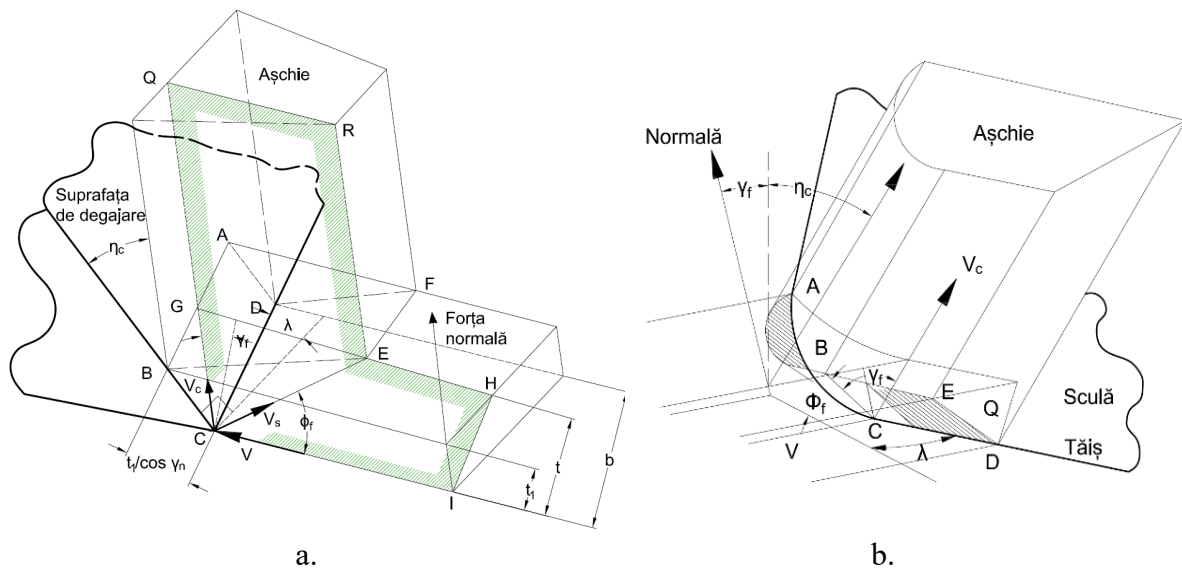


Fig. 2.3. Modelul fizic Usui [STR'02].

Alți autori au analizat structura și mărimea forței de aşchiere luând în considerare o componentă suplimentară dată de uzura sculei [WAN'99, WAN'03, MIL'16].

R. Rusinek ș.a., [RUS'14], plecând de la modelul lui Wiercigroch, [WIE'01], au dezvoltat un model pentru structura fizică a forțelor de aşchiere cu care s-au studiat autovibrațiile provocate de fenomenul de frecare la aşchierea ortogonală, figura 2.6.

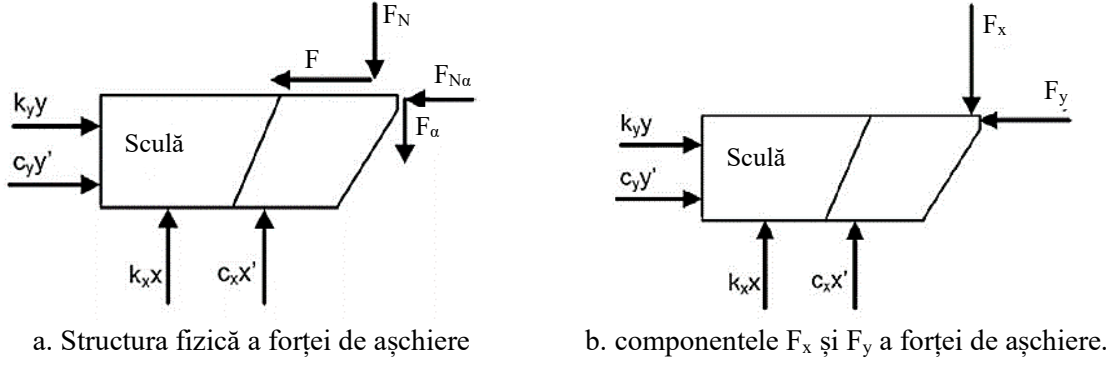


Fig. 2.6. Dispunerea componentelor forței de așchiere [RUS'14].

Bahi ș.a., [BAH'11], a dezvoltat un model termomecanic, asemănător cu cel propus anterior de Ozlu, [OZL'09], și Zorev, [ZOR'63], pentru a explica fenomenul curgerii materialului și prelungirea zonei de alunecare după ce tensiunea de forfecare ajunge la zero, figura 2.10.

Autorii propun pentru calculul componentelor fizice ale forței de așchiere și a coeficientului de frecare din zona de alunecare de pe suprafața de degajare, relațiile 2.32 și 2.33.

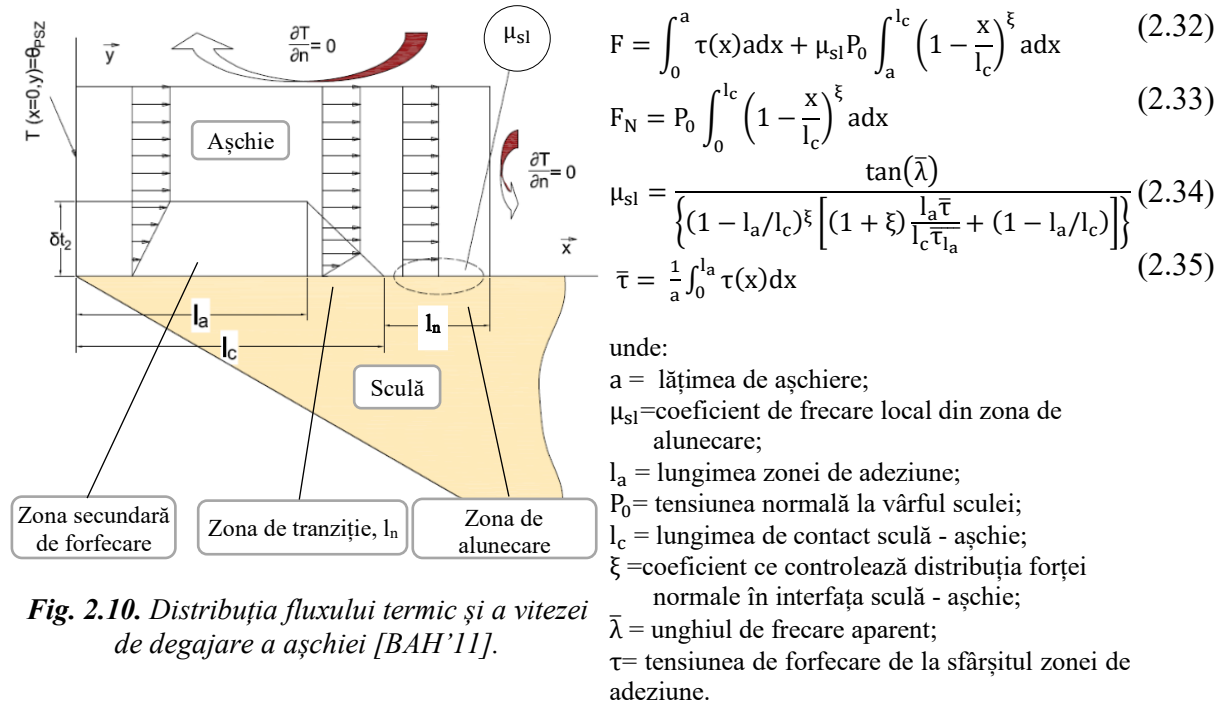


Fig. 2.10. Distribuția fluxului termic și a vitezei de degajare a așchiei [BAH'11].

2.1.2. Modele empirice pentru determinarea forțelor de așchiere

De obicei, modelele empirice sunt derivate din interpolarea curbilor de dependență și au semnificație fizică scăzută. Principalul dezavantaj al folosirii acestor modele este faptul că au validitate scăzută în diferite cazuri specifice, dând naștere la dubii privind eficiența lor. Deoarece aceste metode sunt independente de mecanica așchierii, modelele empirice și mecaniciste oferă rezultate doar pentru așchieria tridimensională (oblică), de cele mai multe ori principiul așchierii ortogonale fiind ignorat.

2.2. Metodologie experimentală și aparatură utilizată la studiul fenomenului de frecare la aşchiera materialelor dure

Metodele experimentale utilizate pentru determinarea coeficientului de frecare μ și/sau a componentelor F , F_N , F_α și $F_{N\alpha}$ sunt permanent dezvoltate de către cercetători. Rezultatele obținute folosind aceste metode sunt fie pentru studiul tribologic direct al contactului materialelor [FET'05], fie pentru validarea modelelor analitice dezvoltate de către autori, așa cum se prezintă și în lucrările [GRZ'14, OZL'09, PEN'20, MIL'16]. În literatura de specialitate sunt date diverse clasificări a metodelor și echipamente de investigare, dar cea mai reprezentativă a fost descrisă în lucrările [GRZ'14, GRZ'16, GRZ'19] și se prezintă astfel:

1. tensiometre sau a dinamometre piezoelectrice pentru măsurarea directă a forțelor implicate în procesul de aşchiere, denumite și *tribometre de tipul 1*;
2. dispozitive sau ansambluri de elemente ce formează un sistem pentru simularea contactului a două suprafețe. Aceste sisteme se numesc tribosisteme sau *tribometre de tipul 2*;
3. *tribometre sau tribosisteme de tipul 3*, special dezvoltate și adaptate pentru simularea efectivă a procesului de aşchiere.

Cercetările experimentale efectuate de diferiți autori s-au referit în special la cazul aşchierii ortogonale, figura 2.16. De obicei, aceste construcții sunt realizate sub forma variantei pin-on-disk, figura 2.16 a, [GRZ'19]. Cele mai populare construcții folosesc în configurația tribometrului un vârf în contact cu piesa de prelucrat. În acest fel, schema aşchierii prezentată în figura 2.16.f. este similară procesului de aşchiere ortogonală a unui disc folosind o sculă reală cu un unghi de degajare negativ.

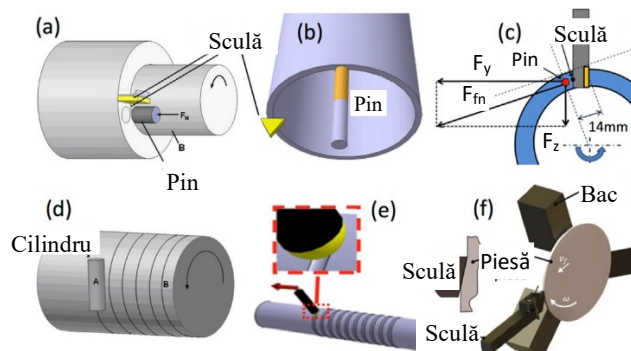


Fig. 2.16. Tribometre pentru studiul fenomenului de frecare din timpul aşchierii [GRZ'19].

Figura 2.16e., prezintă o variantă îmbunătățită a celei precedente deoarece vârful este în contact permanent cu o suprafață nouă prin simularea avansului de aşchiere. Astfel de tribosisteme au fost folosite de foarte mulți autori [MAT'16, NAI'13, BON'08, CLA'10, ZEM'14] în activitatea de cercetare a procesului de aşchiere.

2.3. Concluzii

Cercetările mai vechi și cele prezente în domeniu evidențiază mai multe abordări, în legătură cu modelele empirice - mecaniste și analitice utilizate la studiul forțelor de frecare și de deformare plastică la aşchiere. Pentru determinarea forțelor de frecare, de deformare plastică și a coeficientului de frecare s-au elaborat în timp diverse modele pentru calcul teoretic și determinare experimentală. Din păcate, majoritatea modelelor sunt dezvoltate pentru aşchiera materialelor normale, dar dintre acestea o parte au fost utilizate sau pot fi utilizate la determinarea forțelor și coeficientului de frecare în cazul prelucrării materialelor dure.

În figura 2.22., sunt prezentate unele dintre principalele contribuții aduse de diferiți autori la studiul fenomenului de frecare de la primele începuturi și până în anul 2020.

Modelul Merchant [MER'44], considerat ca fiind primul model mai complet și apropiat de realitate, a fost succedat de apariția și a altor modele analitice până în anul 1970 când încep să fie utilizate modelele mecaniciste și empirice. Analiza publicațiilor relative la fenomenul de frecare și de deformare plastică la aşchiere evidențiază complexitatea acestor fenomene și faptul că fiecare autor a selectat factori de influență diferiți de la o aplicație la alta.

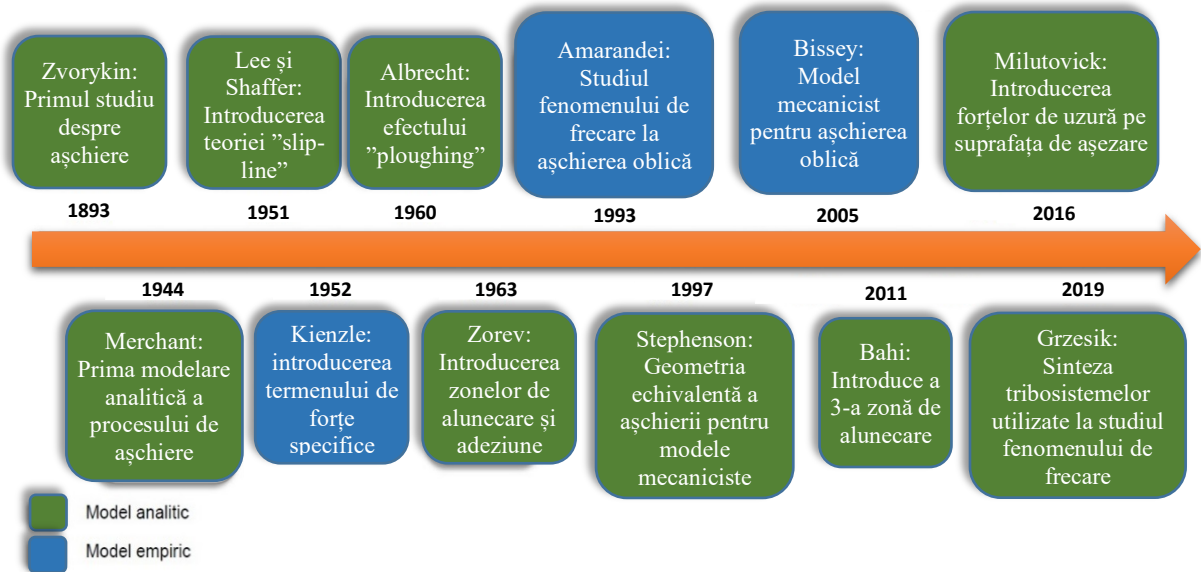


Fig.2.22. Cronologia contribuțiilor aduse asupra studiului fenomenului de frecare (după [GER'13]).

Înțelegerea și modelarea procesului de aşchiere, inițiat de către Merchant în anul 1944 [MER'44], a contribuit foarte mult la menținerea acestei tehnologii la nivel înalt, în ciuda problemelor legate de materialele dure (de înaltă performanță). Literatura de specialitate consultată reliefează faptul că, odată cu dezvoltarea de noi materiale și geometrii de scule precum și creșterea performanțelor mașinilor-unelte, optimizarea proceselor de aşchiere din punct de vedere al siguranței, stabilității și calității a constituit o preocupare constantă pentru cercetători și producători. În acest context, forțele de aşchiere devin principalii parametri de ieșire din procesul de aşchiere care trebuie luați în considerare pentru a controla fizica și dinamica lui complexă. În prezent, în prelucrarea materialelor dure este necesară prezicerea forțelor de aşchiere. Mai mult decât atât, aceste preziceri contribuie la îmbunătățirea geometriei sculelor, învelișului exterior al plăcuțelor sau chiar și a strategiilor de prelucrare. Cunoașterea cu precizie a forțelor de aşchiere poate contribui la proiectarea optimă a diferiților parametri de lucru: geometria sculelor, vibrațiile, astfel reducându-se defectele microstructurale, comportamentul dinamic al sistemelor de fabricație etc.

Cercetările de laborator și industriale, bazate pe modele și teste experimentale, au fost frecvent folosite de majoritatea autorilor [VOS'17, SMO'14, ZEM'08, ZEM'09, HED'91]. Majoritatea construcțiilor tribometrice dezvoltate pentru a simula procesul de aşchiere, nu țin cont de toți factorii posibili care influențează fenomenele de frecare. Cele mai apropiate de realitate și cu rezultate bune au fost modelele experimentale și construcțiile care s-au realizat pentru simularea aşchierii ortogonale. În plus, majoritatea construcțiilor dinamometrice și a tribosistemelor simulează într-o oarecare măsură procesul de aşchiere ortogonal dar caracteristicile aşchierii oblice, prezente în 90% din procedeele de aşchiere, sunt neglijate. Totodată, fenomenul de frecare din zona de aşchiere implică nu numai suprafața de degajare a sculei ci tot ansamblul sculă-așchie și sculă-piesă, ceea ce tribosistemele dezvoltate până în prezent nu pot studia, acestea fiind limitate la contactul direct a două suprafețe.

Metodele experimentale pot fi folosite în scopul validării metodelor analitice atât timp cât modelul matematic este utilizat pentru determinarea forțelor sau a coeficientului de frecare la aşchiera ortogonală.

CAPITOLUL III

Contribuții teoretice privind modelarea componentelor fizice ale forțelor de frecare la aşchierea materialelor dure

3.1. Principiul modelului

Pentru a determina *componentele fizice ale forței de aşchiere* (frecare și deformare plastică), se propune un model pentru aşchierea oblică, în două variante, *cu tăiș rectiliniu* și *cu tăiș generalizat*, poziționate în raport cu un sistem de axe de coordonate triortogonal drept M_{xyz} , legat de sculă, cu originea în punctul de pe tăiș considerat, M , și axa M_z , orientată după direcția vectorului viteză de aşchiere.

3.1.1. Model fizic pentru scule cu tăiș

Pentru descrierea modelului fizic și pentru a vizualiza poziția și direcția componentelor fizice ($\vec{F}$, $\vec{F}_N$, $\vec{F}_\alpha$, $\vec{F}_{N\alpha}$) a forțelor de aşchiere, s-a considerat secțiunea din planul secant la tăiș, figura 3.2., în care sunt prezentate proiecțiile componentelor forței de aşchiere din sistemul de axe M_{xyz} , legat de sculă și identic cu cel la care se raportează dinamometrul. În acest scop sistemului M_{xyz} i s-a aplicat trei rotații cu unghiurile k , λ și γ în jurul axelor M_z , M_y și respectiv M_x .

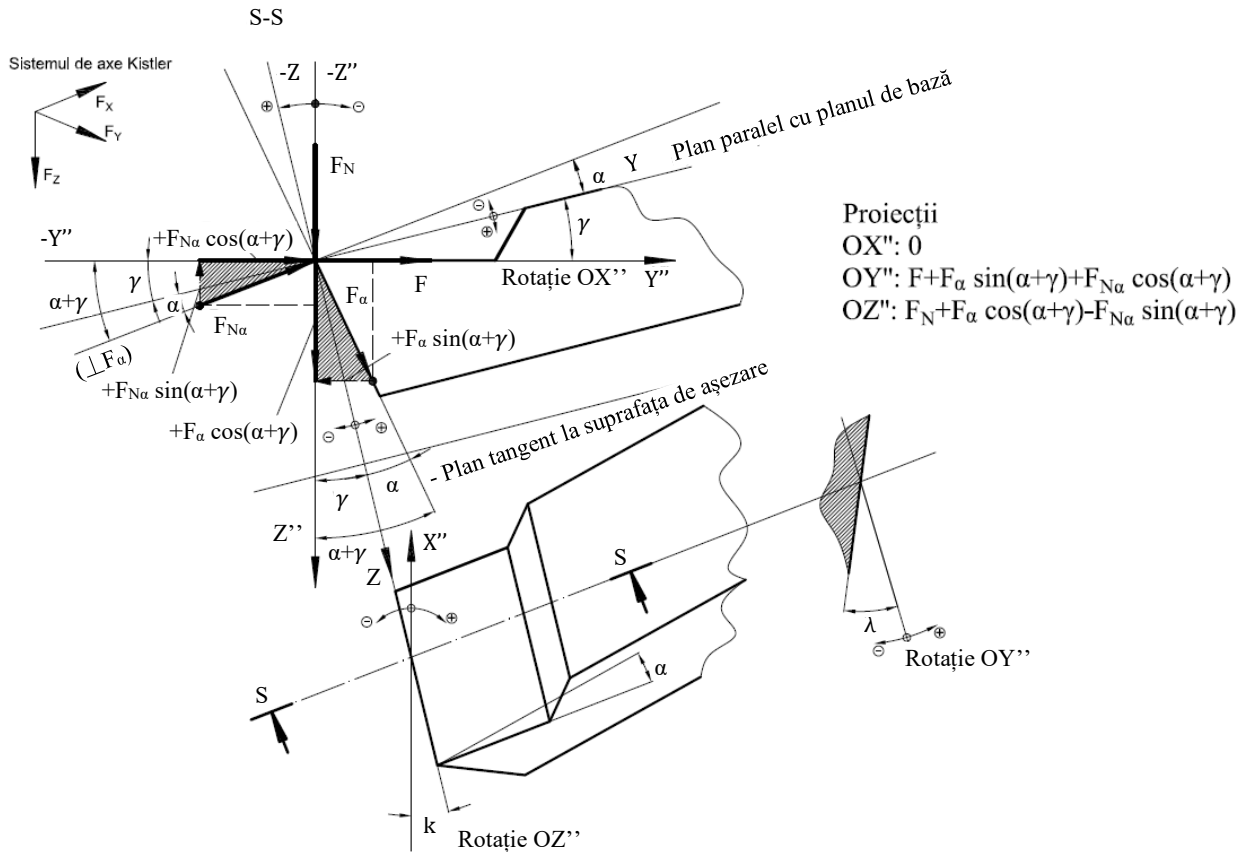


Fig. 3.2. Proiecția componentelor fizice ale forței de aşchiere în planul secant.

În sistemul echivalent $M_{x''y''z''}$, cu planul $M_{x''y''}$ tangent la suprafața de degajare, se pot scrie relațiile matematice care leagă componentele fizice ale forței de aşchiere (F , F_N , F_α și $F_{N\alpha}$) cu componentele forței de aşchiere din sistemul legat de dinamometru M_{xyz} .

3.1.2. Model matematic

Modelul matematic pentru componentele fizice F , F_N , F_α și $F_{N\alpha}$, se poate scrie sub forma (3.8):

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} = M_{tot} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ F \\ F_N \end{bmatrix} + R_X(\alpha+\gamma) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ F_{N\alpha} \\ F_\alpha \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

în care M_{tot} este matricea produs pentru suprafața de degajare, și $R_X(\alpha+\gamma)$ este matricea rotației pentru suprafața de aşezare.

$$M_{tot} = \begin{bmatrix} \cos(\lambda)\cos(k) & \cos(\gamma)\sin(k) + \sin(\gamma)\cos(k)\sin(\lambda) & \cos(\gamma)\cos(k)\sin(\lambda) - \sin(\gamma)\sin(k) \\ -(\cos(\lambda)\sin(k)) & \cos(\gamma)\cos(k) - \sin(\gamma)\sin(\lambda)\sin(k) & -(\sin(\gamma)\cos(k)) - \cos(\gamma)\sin(\lambda)\sin(k) \\ -\sin(\lambda) & \sin(\gamma)\cos(\lambda) & \cos(\gamma)\cos(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Rotirea cu unghiul $(\alpha+\gamma)$, a sistemului de axe din planul secant la tăiş, permite definirea proiecțiilor componentelor de pe suprafața de aşezare, F_α și $F_{N\alpha}$, pe axele sistemului rezultat, relația (3.6).

$$R_X(\alpha+\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha+\gamma) & \sin(\alpha+\gamma) \\ 0 & -\sin(\alpha+\gamma) & \cos(\alpha+\gamma) \end{bmatrix}; \quad (3.6)$$

În aceste condiții, matricile coloană asociate componentelor fizice ale forței de aşchiere, din plan secant, se pot exprima cu relațiile (3.7), iar între proiecțiile forței de aşchiere F_x , F_y și F_z , din sistemul de axe M_{xyz} , și componentele fizice F , F_N , F_α și $F_{N\alpha}$, din sistemul $M_{x''y''z''}$, se poate scrie relația (3.8).

$$\begin{bmatrix} 0 \\ F \\ F_N \end{bmatrix}; \text{ respectiv } \begin{bmatrix} 0 \\ F_{N\alpha} \\ F_\alpha \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Cu notațiile a_i , b_j , c_k și d_l pentru parametrii directori ai componentelor F , F_N , F_α și $F_{N\alpha}$ se pot scrie relațiile (3.23) care reprezintă un sistem nedeterminat de trei ecuații cu patru necunoscute.

$$\begin{aligned} F_x &= |F| \cdot a_1 + |F_N| \cdot b_1 + |F_\alpha| \cdot c_1 + |F_{N\alpha}| \cdot d_1 \\ F_y &= |F| \cdot a_2 + |F_N| \cdot b_2 + |F_\alpha| \cdot c_2 + |F_{N\alpha}| \cdot d_2 \\ F_z &= |F| \cdot a_3 + |F_N| \cdot b_3 + |F_\alpha| \cdot c_3 + |F_{N\alpha}| \cdot d_3 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Ridicarea nedeterminării și rezolvarea sistemului anterior de ecuații se poate face utilizând una din cele două metode utilizate în lucrările [AMA'95, AMA'97, AMA'05, AMA'07]:

- prin cunoașterea uneia dintre componente, posibilitate ce se poate materializa prin determinarea componentei de frecare de pe suprafața de aşezare, F_α , după una dintre metodele descrise în referințele menționate. În acest caz, noul sistem de ecuații ia forma rezolvabilă (3.24):

$$\begin{aligned} F_x - |F_\alpha| \cdot d_1 &= |F| \cdot a_1 + |F_N| \cdot b_1 + |F_{N\alpha}| \cdot c_1 \\ F_y - |F_\alpha| \cdot d_2 &= |F| \cdot a_2 + |F_N| \cdot b_2 + |F_{N\alpha}| \cdot c_2 \\ F_z - |F_\alpha| \cdot d_3 &= |F| \cdot a_3 + |F_N| \cdot b_3 + |F_{N\alpha}| \cdot c_3 \end{aligned} \quad (3.24)$$

- prin cunoașterea coeficientului de frecare de pe una dintre suprafețele active ale sculei, de exemplu prin cunoașterea coeficientului de frecare pe suprafața de așezare, μ_α , sistemul de ecuații (3.24) ia forma (3.25), sau prin cunoașterea coeficientului de frecare de pe suprafața de degajare, μ_γ , forma (3.26):

$$\begin{aligned} F_x &= |F| \cdot a_1 + |F_N| \cdot b_1 + C_1 \cdot |F_\alpha| \\ F_y &= |F| \cdot a_2 + |F_N| \cdot b_2 + C_2 \cdot |F_\alpha| \\ F_z &= |F| \cdot a_3 + |F_N| \cdot b_3 + C_3 \cdot |F_\alpha| \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} F_x &= |F| \cdot A_1 + |F_{N\alpha}| \cdot c_1 + |F_\alpha| \cdot d_1 \\ F_y &= |F| \cdot A_2 + |F_{N\alpha}| \cdot c_2 + |F_\alpha| \cdot d_2 \\ F_z &= |F| \cdot A_3 + |F_{N\alpha}| \cdot c_3 + |F_\alpha| \cdot d_3 \end{aligned} \quad (3.26)$$

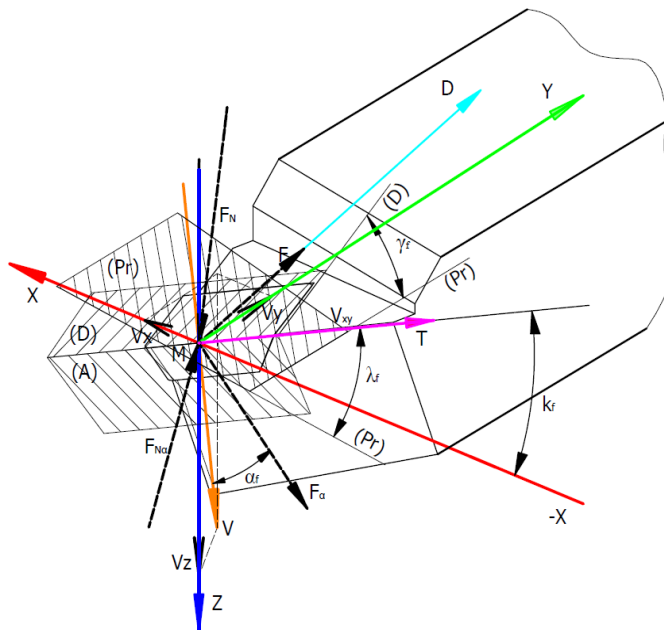
în care, coeficienții $C_{i(i=1,2,3)}$ și $A_{i(i=1,2,3)}$ se determină cu relațiile (3.27) dacă este cunoscut unul dintre coeficienții de frecare μ_γ sau μ_α .

$$C_i = d_i + c_i \cdot \mu_\alpha; \quad A_i = a_i + b_i \cdot \mu_\gamma \quad (3.27)$$

3.2. Contributii privind extinderea modelului la scule definite prin geometrie funcțională

3.2.1. Principiul modelului extins la geometria funcțională a sculei

Modelul prezentat în subcapitolul anterior poate fi exprimat și în funcție de unghiurile funcționale ale sculei, figura 3.3.



Notății:

- D – direcția de degajare a așchiei în planul tangent la suprafața de degajare (D);
- $\vec{V}$ – vectorul vitezei de așchiere;
- v_x, v_y, v_z – proiecțiile vectorului vitezei de așchiere pe axele M_x, M_y și M_z ;
- α_f – unghi de așezare funcțional format între vectorul vitezei de așchiere V și planul tangent la suprafața de așezare (D);
- λ_f – unghi de înclinare funcțional format dintre tangenta la tăiș T și planul de presiune Pr ;
- γ_f – unghi de degajare funcțional format dintre planul de presiune Pr și planul tangent la suprafața de degajare (D) măsurat în planul format dintre vectorul vitezei de așchiere $\vec{V}$ și direcția de degajare a așchiei D ;
- k_f – unghi de atac funcțional format între direcția V_x și tangenta la tăiș T ;
- T – Tangenta la tăiș în punctul M .

Fig. 3.3. Principiul modelului fizico-geometric pentru un dinte așchietor în funcție de unghiurile funcționale.

3.2.2. Modelul matematic extins la geometria funcțională a sculei

Extinderea modelului prezentat în subcapitolul 3.1, scris în funcție de geometria constructivă a sculei, se face, așa cum s-a precizat anterior, prin rotirea sistemului din planul secant în poziția în care axa M_z'' se suprapune peste suportul vectorului viteză, figura 3.4.

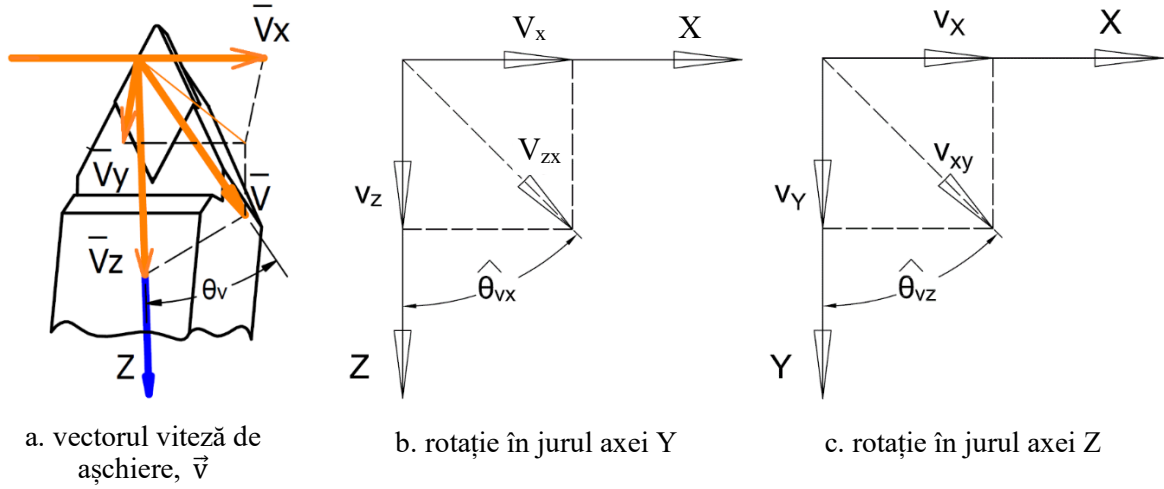


Fig. 3.4. Vectorul vitezei de aşchiere și rotațiile necesare pentru stabilirea unghiurilor funcționale

Poziția vectorului viteză de aşchiere $\vec{v}$ este definită de cosinii directori, relațiile (3.28), în care, pentru cazul strunjirii longitudinale, componentele vitezei de aşchiere sunt date de relațiile 3.29, unde s_l și s_t sunt avansul longitudinal și respectiv transversal.

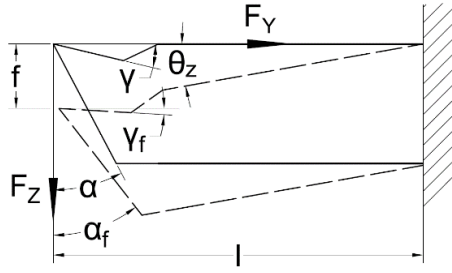
$$\cos(\widehat{v, x}) = \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}; \cos(\widehat{v, y}) = \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}; \cos(\widehat{v, z}) = \frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \quad (3.28)$$

$$v_x = \frac{s_l \cdot n}{1000}; v_y = \frac{s_t \cdot n}{1000}; v_z = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}. \quad (3.29)$$

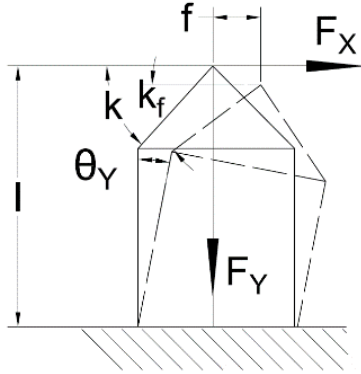
Rezultatul transformărilor va fi matricea produs (3.32), care aplicată sistemului de axe $M_{x''y''z''}$, conduce la relația (3.33).

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} = \left\{ M_{\text{tot}} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ F \\ F_N \end{bmatrix} + R_X(\alpha+\gamma) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ F_{N\alpha} \\ F_\alpha \end{bmatrix} \right\} \cdot M_V \quad (3.33)$$

În plus, dacă se ia în considerare variația geometriei funcționale datorată celor mai importante deformații elastice ale sculei, sub acțiunile componentelor F_z și F_x , figura 3.5, expresia (3.33) capătă forma (3.36).



a. rotație după axa MX



b. rotație după axa MZ

Fig. 3.5. Deformațiile elastice ale sculei în timpul procesului de aşchiere în plan orizontal și vertical

$$R_Z = \begin{bmatrix} \cos(-\theta_z) & \sin(-\theta_z) & 0 \\ -\sin(-\theta_z) & \cos(-\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.34)$$

în care unghiul θ_z se calculează cu relația:

$$\theta_z = \arctg \frac{f}{l} = \arctg \frac{F_Z \cdot l^3}{3EI_Z \cdot l} = \arctg \frac{F_Z \cdot l^2}{3EI_Z}$$

$$R_Y = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix}, \quad (3.35)$$

în care unghiul θ_y se calculează cu relația:

$$\theta_y = \arctg \frac{f}{l} = \arctg \frac{F_X \cdot l^3}{3EI_Z \cdot l} = \arctg \frac{F_X \cdot l^2}{3EI_Z}$$

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} = \left\{ M_{tot} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ F \\ F_N \end{bmatrix} + R_X(\alpha+\gamma) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ F_{N\alpha} \\ F_\alpha \end{bmatrix} \right\} \cdot M_V \cdot M_{def} \quad (3.36)$$

3.3. Verificarea modelului propus

În scopul validării modelului propus, pentru început, se face verificarea veridicității din trei puncte de vedere: particularizarea acestuia pentru cazul în care toate unghiurile sunt 0, pentru cazul aşchierii ortogonale, și pentru cazul în care valorile componentelor vitezei de aşchiere sunt zero, după care, în continuare, se va face validarea experimentală prin compararea rezultatelor obținute cu cele oferite de literatura de specialitate pentru situații similare.

3.3.1. Particularizarea modelului propus

I. Particularizarea pentru cazul aşchierii cu geometrie nulă în regim static

$\gamma = 0^\circ$; $\alpha = 0^\circ$; $k = 0^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $v_x = 0$; $v_y = 0$; $v_z = 0$;

Sistemul de ecuații (3.23) devine:

$$\begin{aligned} F_X &= |F| \cdot 0 + |F_N| \cdot 0 + |F_\alpha| \cdot 0 + |F_{N\alpha}| \cdot 0 = 0 \\ F_Y &= |F| \cdot 1 + |F_N| \cdot 0 + |F_\alpha| \cdot 0 + |F_{N\alpha}| \cdot 1 = F + F_{N\alpha} \\ F_Z &= |F| \cdot 0 + |F_N| \cdot 1 + |F_\alpha| \cdot 1 + |F_{N\alpha}| \cdot 0 = F_N + F_\alpha \end{aligned} \quad (3.49)$$

În figura 3.6.a se poate observa poziția forțelor locale de aşchiere rezultate în cazul particularizării modelului pentru situația în care toate unghiurile sunt 0.

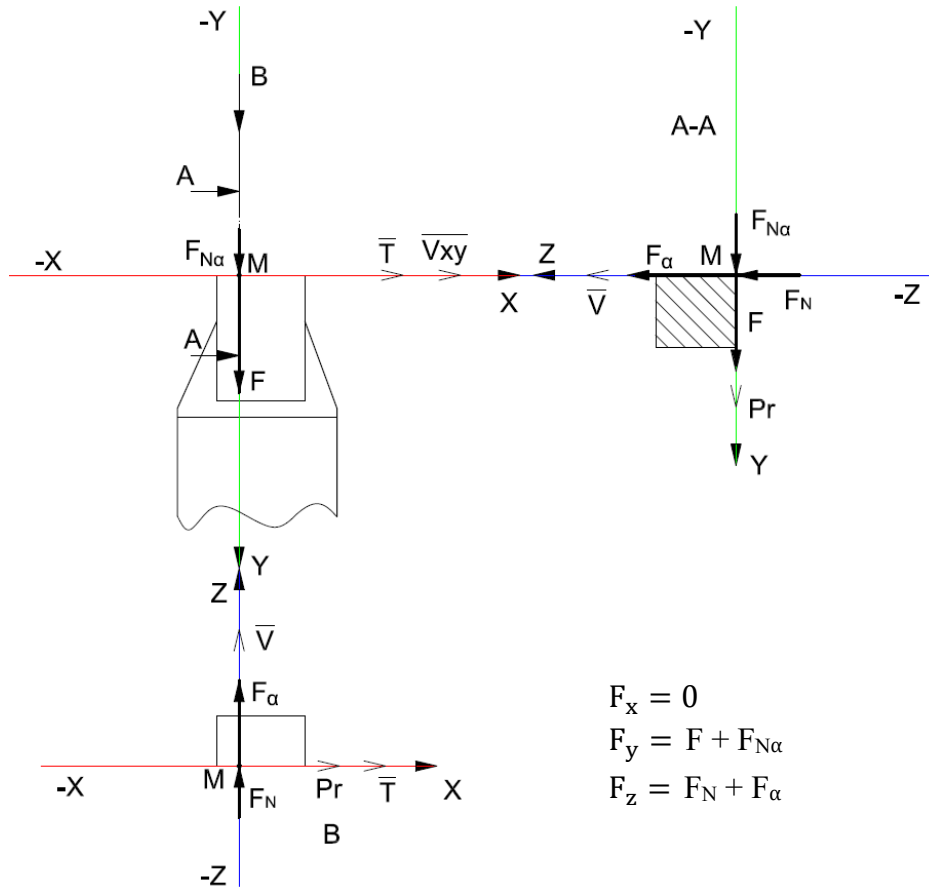


Fig. 3.6.a Particularizarea modelului pentru geometrie nulă în regim static.

II. Particularizarea pentru cazul strunjirii ortogonale:

În cazul strunjirii ortogonale, unghiurile constructive ale scule ($\gamma, \alpha, k, \lambda$), parametrii regimului de lucru (v_x, v_y, v_z) și parametrii directori ai forțelor iau valorile de mai jos.

$$\begin{aligned} \gamma &= 0^\circ; \alpha = 10^\circ; k = 0^\circ; \lambda = 0^\circ; \\ v_x &= 0^\circ; v_y = 0.18 \text{ mm/rot}; v_z = 157 \text{ m/min}; \end{aligned}$$

Iar sistemul de ecuații (3.23) ia forma (3.50).

$$\begin{aligned} F_x &= |F| \cdot -0.001 + |F_N| \cdot 0.001 + |F_\alpha| \cdot -0.001 + |F_{N\alpha}| \cdot 0.001 \\ F_y &= |F| \cdot 1 + |F_N| \cdot 0 + |F_\alpha| \cdot 0.174 + |F_{N\alpha}| \cdot 0.985 \\ F_z &= |F| \cdot 0 + |F_N| \cdot 1 + |F_\alpha| \cdot 0.985 + |F_{N\alpha}| \cdot -0.174 \end{aligned} \quad (3.50)$$

Reprezentarea grafică a strunjirii ortogonale, realizată în figura 3.6, evidențiază corectitudinea și veridicitatea acestui caz particular.

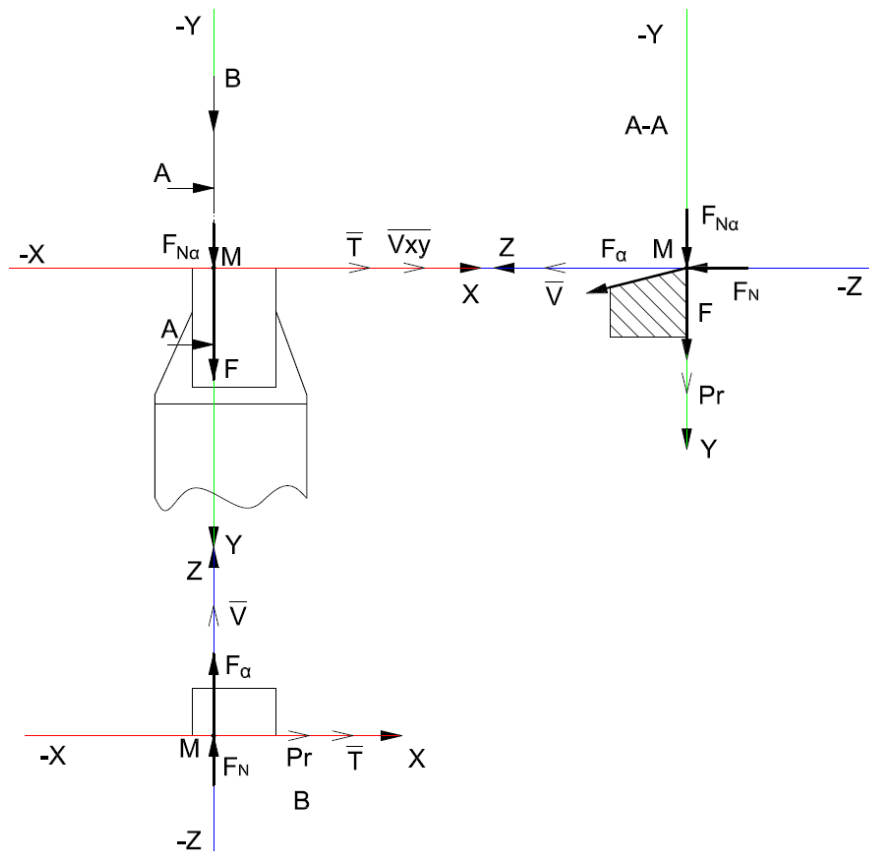


Fig. 3.6.b. Particularizarea modelului pentru cazul aşchierii ortogonale.

3.3.2. Validarea experimentală a modelului și discuții

Pentru a studia variația componentelor frecare și de deformare plastică la aşchiere, cu modelul și metodologia propusă, s-a procedat la o validare experimentală prealabilă constând din determinarea valorilor acestor componente în condițiile de testare utilizate anterior de alți autori. În acest scop, s-a folosit modelul generalizat descris de sistemul (3.25), în care s-au luat în considerare diferite geometrii pentru scula aşchietoare.

3.3.2.1. Aparatura și condiții de experimentare

Pentru înlăturarea nedeterminării sistemului de ecuații (3.25) s-a recurs la determinarea coeficientului de frecare de pe suprafața de aşezare cu ajutorul tribometrului de construcție proprie, descris în lucrarea [TAM'19], figura 3.7.

Soluția constructivă a dispozitivului, prezentată în fig 3.7, constă în esență dintr-un corp dispozitiv, proiectat la o formă care să permită montajul pe dinamometrul Kistler 9257B (aflat în dotarea laboratorului), pe care este montat corpul port plăcuță 1, prevăzut cu ghidaj pentru deplasarea pe verticală și poziționarea plăcuței. Corpul port plăcuță este compus dintr-un corp dinte 2 (port plăcuță) fixat cu ajutorul șurubului 3, care permite și blocajul dintelui în poziția dorită. Pe dinte se fixează plăcuța 11 cu ajutorul bridei 12 și șurubul de fixare 15.

Pentru a da posibilitatea poziționării plăcuței 11 în raport cu aza Z, plăcuța și brida 12 sunt poziționate pe suportul intermediar 13, care se poate roti în jurul axei șurubului de fixare-blocare 7.

Pentru integrarea dispozitivului în lanțul de dimensiuni a dinamometrului Kistler, suportul dinamometrului 5 este înlocuit cu un alt suport reproiectat la care lungimea a fost modificată (micșorată), fixat pe dinamometrul Kistler care la rândul lui și el fixat pe sania transversală a SN 320x750.

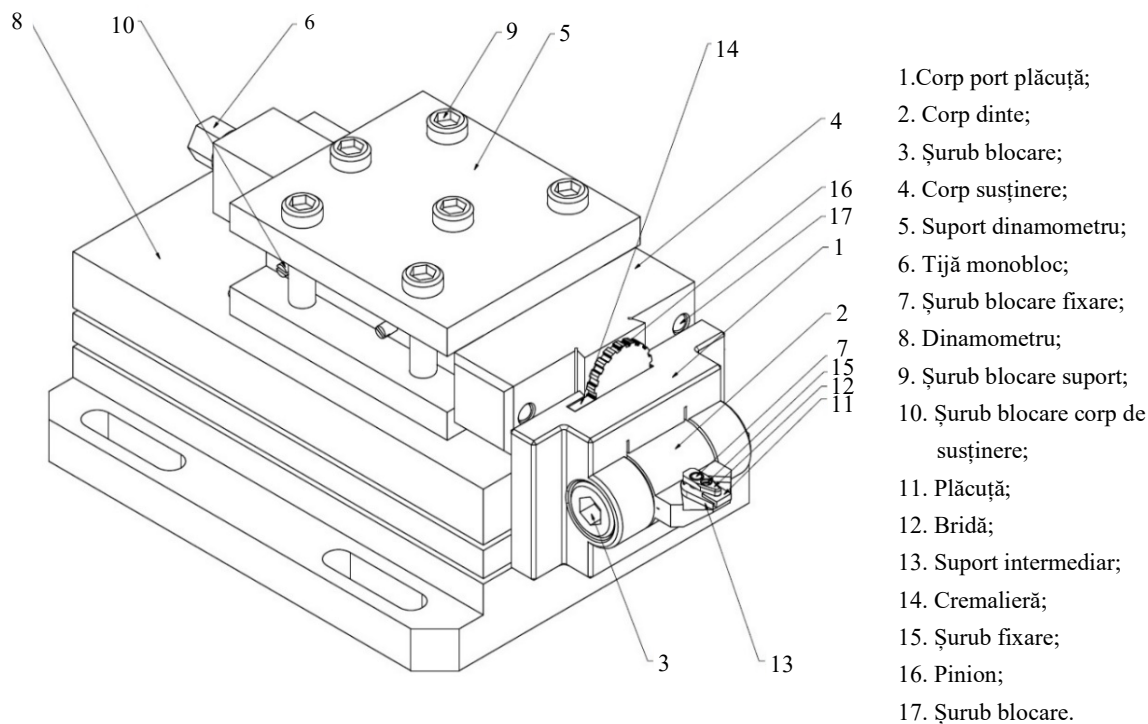


Fig. 3.7. Dispozitivul tribometric montat pe dinamometrul Kistler.

Deplasarea controlată pe verticală a corpului dintelui 1 în interiorul canalului coadă de rândunică se face cu ajutorul cremalierii 14, care angrenează cu pinionul 16, construit monobloc cu tija de antrenare 6.

Tija de antrenare 6 este introdusă în corpul de susținere 4, prevăzut cu urechi de blocare. Pentru acționare, tija este prevăzută cu o suprafață hexagonală de deschidere $S=12$ mm pentru a utiliza o cheie standardizată

Blocarea deplasării pe verticală a corpului port plăcuță 1, se face cu șuruburile de blocare 17, introduse în locașurile special prevăzute în corpul de susținere 4. Menținerea și blocarea pe axa C (mișcare de rotație) a corpului dinte 2, se realizează cu ajutorul șurubului 3.

Montarea suportului 5 pe dinamometrul Kistler 8 se face cu ajutorul șuruburilor 9, iar blocarea corpului de susținere 4 în suport se face cu ajutorul șuruburilor 9 și 10.

Pentru a regla dispozitivul pentru o anumită poziție (geometrie a sculei) se procedează conform figurii 3.8.a. astfel:

Poziția verticală (OZ) – Se deplasează corpul port plăcuță 1 prin rotirea tijei 6 ce face contact între pinionul 16 și cremaliera 14, rotirea acestuia făcându-se prin capătul tijei cu ajutorul unei chei standardizate cu deschiderea $S=12$. Blocarea în poziția dorită se face prin strângerea șuruburilor de blocare 17 montate în locașurile standardizate practicate în corpul de susținere 4. În momentul strângerii, șuruburile împing corpul port plăcuță creându-se blocarea.

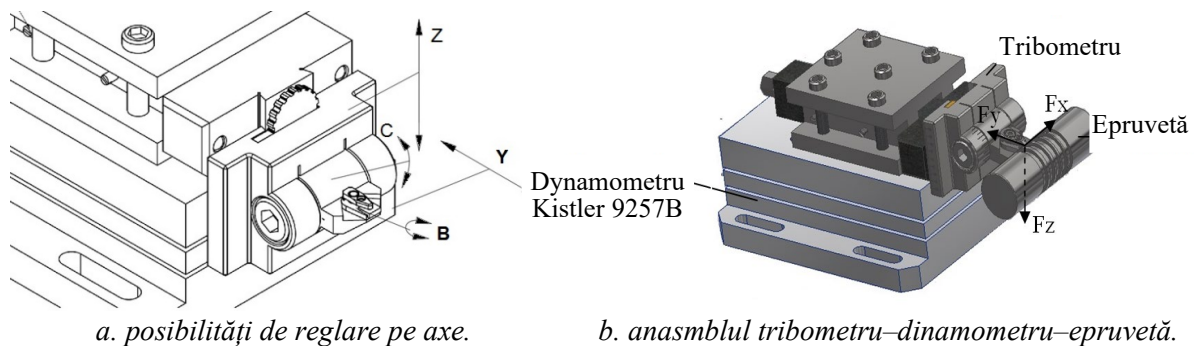


Fig. 3.8. Descrierea constructivă a tribometrului.

Poziția în planul OXY – Rotire după axa OX – Axa B – Deplasarea plăcuței 11, pe axa de rotație B, se face cu ajutorul suportului intermediar 13. Plăcuța este fixată pe suport cu ajutorul bridei 12, aceasta la rândul ei fiind blocată cu șurubul 15 de suportul intermediar 13.

Deplasarea după axa OY – Deoarece trebuie respectată lungimea dimensiunii dinamometrului pentru translația pe direcția OY, în raport cu dinamometrul pe OY, nu s-au prevăzut posibilități de mișcare. Există posibilitatea deplasării pe axa OY a întregului ansamblu dinamometru-tribometru prin deplasarea saniei transversale.

Tribometrul, proiectat și realizat într-o manieră flexibilă, cu posibilitate de reglare pentru a materializa diferite valori pentru unghiul de atac, unghiurile de degajare și așezare, este montat pe un dinamometru piezoelectric Kistler tip 9257B, de mare sensibilitate, care permite măsurarea componentelor forței de aşchiere (F_x , F_y și F_z). Plăcuța, montată mecanic cu bridă pe dispozitivul tribometric care, la rândul lui, este fixat pe dinamometrul Kistler, este apăsată pe eprubeta, executată din materialul supus cercetării, până la atingerea, pe suprafața de contact, a presiunii dorite, figura 3.8.b.

Coefficientul de frecare a fost determinat prin raportarea valorilor componente F_z (de frecare, în acest caz) la valorile componente F_y (forța de presiune). Tribometrul este capabil să materializeze geometrii diferite de scule de aşchiere prin re poziționarea plăcuței în dispozitiv, permițând astfel să se determine coeficientul de frecare de pe cele două suprafețe active ale sculei, de degajare respectiv așezare.

În scopul simulării unghiului de așezare, și pentru înlăturarea posibilității de aşchiere efectivă, a fost necesară o supraînălțare a dispozitivului tribometric conform figurii 3.9.

Valoarea înălțimii necesară simulării efective a unghiului de așezare este dată de relația (3.51), în care s-a notat cu R, raza piesei de prelucrat; cu h, distanța supraînălțării; și cu α unghiul de așezare.

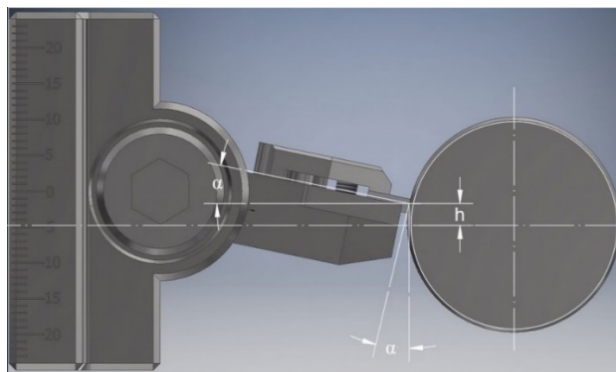
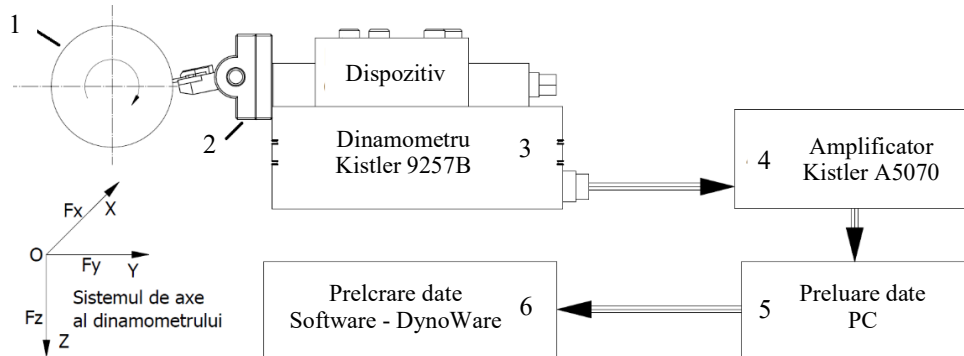


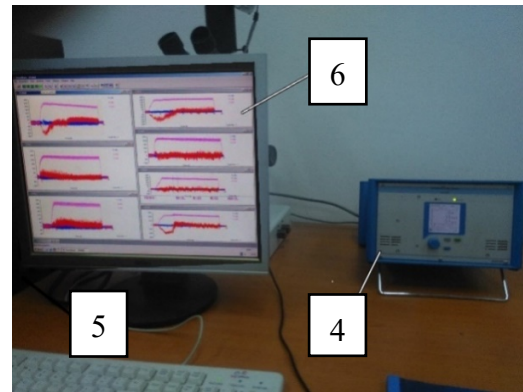
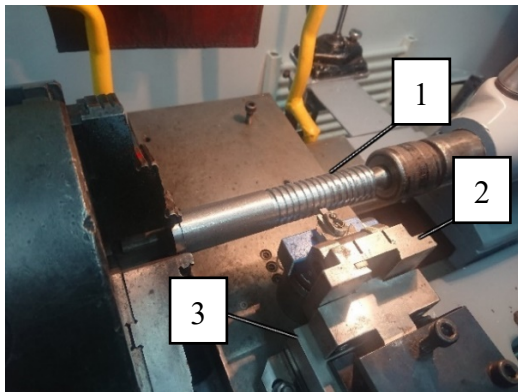
Fig. 3.9. Supraînălțarea plăcuței pentru simularea unghiului de așezare.

$$h = R \cdot \tan(\alpha) \quad (3.51)$$

Lanțul de măsurare alcătuit din epruveta, 1, dispozitivul tribometric, 2, dinamometrul, 3, preamplificatorul, 4, calculatorul PC, 5, și un program specializat de prelucrare a datelor, prezentat în figura 3.10, a fost utilizat atât pentru determinarea coeficienților de frecare cât și pentru studiul influenței asupra acestora a parametrilor de lucru (v , s , t) și a geometriei sculei, condițiile de experimentare fiind cele descrise în tabelele 3.1 și 3.2.



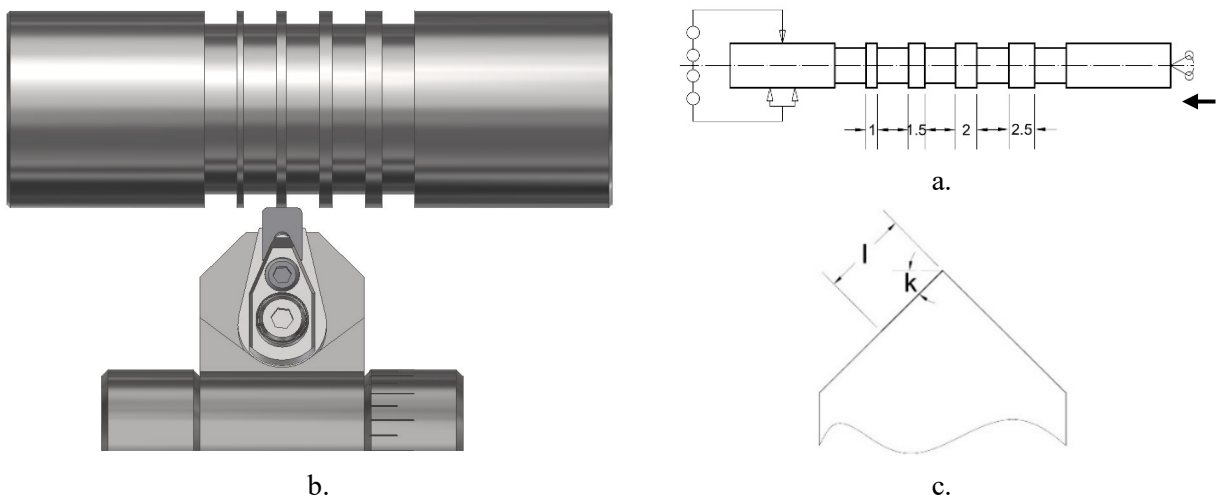
a.



b.

Fig. 3.10. Schema lanțului de măsurare (a) și elementele sale componente (b).

Epruveta, 1, de formă cilindrică cu diametrul exterior de 30 mm, a fost executată din oțel C45 (echivalent AISI 1045) după modelul geometric prezentat în figura 3.11.



b.

c.

Fig. 3.11. Epruveta din oțel C45 (echivalent 1045), (a), și poziționarea ei pe strung (b)

Tabel 3.1. Condiții de testare

Nr. exp.	Material plăcuță	Material piesă	Turație, [rot/min]	Diametrul piesei, D, [mm]	Adâncime, t, [mm]	Viteza de aşchiere, v, [m/min]
1	Plăcută P20	C45 (echivalent AISI 1045)	1250	30	0,7	117,50
2					1,1	
3					1,4	
4					1,7	

Tabel 3.2. Geometria sculei.

Unghi de degajare, γ [°]	Unghi de aşezare, α [°]	Unghi de atac, k [°]	Unghi de înclinare, λ [°]
0	10	0	0

Valoarea lăţimilor segmentelor supuse testelor (lungimea de contact dintre sculă şi segment) poate fi justificată prin simularea adâncimii de aşchiere conform figurii 3.11c şi relaţiei (3.54).

$$t = l \cdot \sin(k) \quad (3.52)$$

Determinările experimentale pentru validarea modelului prezentat anterior au fost efectuate pe un strung universal SN 320x750. Scula a fost montată într-un dinamometru piezoelectric de tip 9257B produs de firma KISTLER.

Materialul prelucrat a fost un oţel carbon de calitate, C45 EN 10083-1, echivalent AISI 1045, utilizat frecvent în construcţia de maşini.

Ca parte aschietoare a sculei s-a folosit o placuţă metaloceramică P20 cu geometria dată de suportul port sculă PCLNR 2525M 12.

3.3.2.2. Validarea experimentală a modelului

Validarea modelului propus s-a realizat din două puncte de vedere:

1. din perspectiva dispozitivului tribometric utilizat pentru determinarea experimentală a coeficientului de frecare de pe suprafaţa de aşezare, folosit apoi la rezolvarea sistemului de ecuaţii (3.23) în vederea determinării componentelor fizice ale forţelor de aşchiere;
2. din punct de vedere al veridicităţii rezultatelor teoretico-experimentale generate de modelul exprimat de relaţiile 3.8 şi 3.33.

În ce priveşte exactitatea şi încrederea în rezultatele experimentale obţinute cu tribometrul, relativ la coeficientul de frecare de pe suprafaţa de degajare sau aşezare, în primă fază s-a organizat şi efectuat un set de experimente, simulând procesul aşchierii ortogonale cu valori pentru parametrii de desfăşurare daţi în tabelul 3.5.

Tabel 3.5. Valori experimentale pentru coeficientul de frecare μ_a pentru oţelul C45.

Nr. crt.	Regim de lucru			Geometrie				Rezultate experimentale,		
	v, [m/min]	t, [mm]	l, [mm]	k, [°]	γ , [°]	α , [°]	λ , [°]	F _y , [N]	F _z , [N]	$\mu_a = F_z / F_y$
1	117,81	0,7	1,0	0	0	6	0	106,880	29,624	0,277
2		1,1	1,5					137,331	37,751	0,275
3		1,4	2,0					219,000	53,786	0,254
4		1,7	2,5					317,084	75,630	0,239

Cu rezultatele experimentale obținute, pentru F_y și F_z , s-au determinat cu relația lui Coulomb valorile coeficientului de frecare de pe suprafața de așezare. Dependența $\mu_a = \mu_a(t)$, trasată cu valorile din tabelul anterior, și prezentată în figura 3.12, evidențiază că rezultatele obținute sunt comparabile, pentru regimurile de lucru și geometriile din tabelul 3.5, cu cele prezentate și în lucrările altor autori [MIL'16, PUL'12, PUL'14, REC'08].

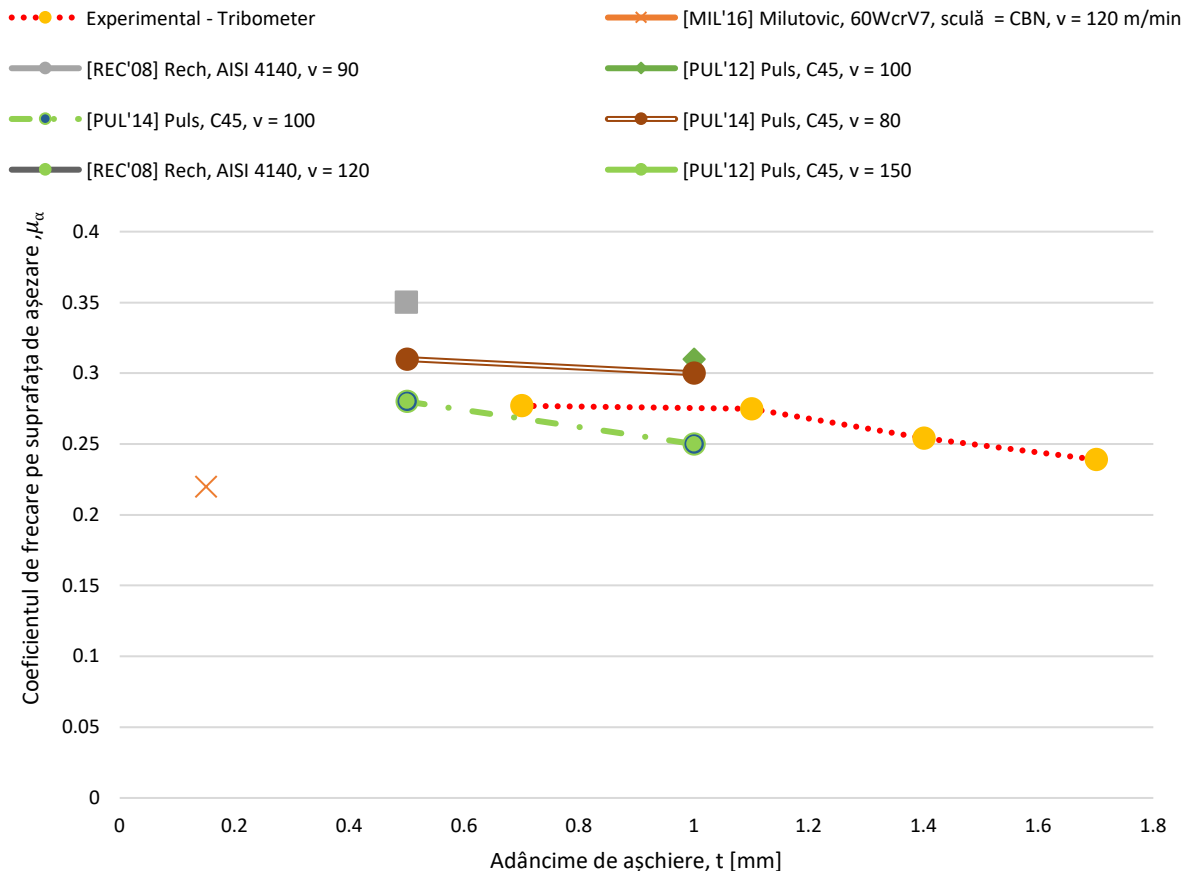


Fig. 3.12. Variația coeficientului de frecare de pe suprafața de așezare, μ_a , în funcție de adâncimea de așchiere, t .

Precizia și încrederea în rezultatele experimentale obținute cu tribometrul a fost testată și prin stabilirea cu exactitate dacă aceste valori conțin erori grosolane. În acest scop, literatura de specialitate oferă mai multe metode, printre care și testul Grubbs [ION'04]. Valorile obținute pentru trei valori ale avansului (tabelul 3.6), folosind schema de experimentare prezentată în figura 3.13, sunt date în tabelele 3.7 - 3.9.

Tabel 3.6. Condiții de experimentare în scopul determinării erorilor grosolane.

Nr. crt.	Regim de lucru				Geometrie			
	v , [m/min]	s , [mm/rot]	D , [mm]	l , [mm]	k , [°]	γ , [°]	α , [°]	λ , [°]
1	117.81	0,18	30	0.7	45	0	6	0
2		0,28						
3		0,36						

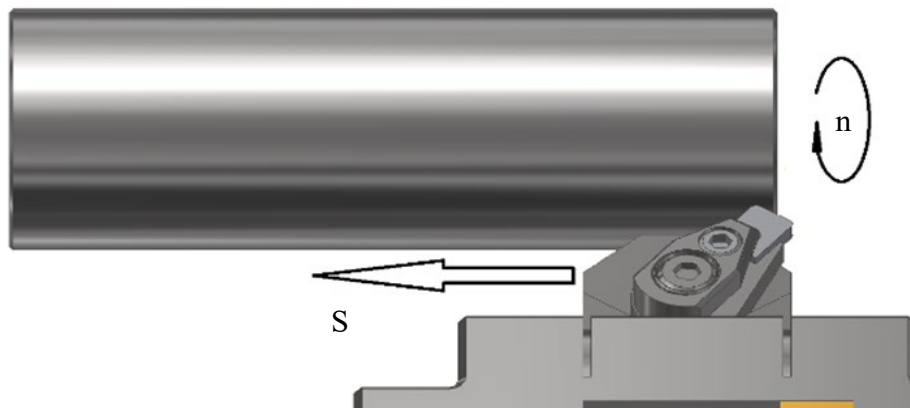


Fig. 3.13. Poziționarea tribometrului pentru determinarea erorilor grosolane.

Considerând viabile măsurătorile, efectuate cu tribometrul prezentat anterior, s-a procedat în continuare la validarea modelului matematic, dat de relațiile (3.25), pentru cazul așchierii semiortogonale. În acest scop, s-a organizat, pentru determinarea coeficientului de frecare, μ_a , un al doilea set de încercări, în cadrul unui plan de experimente Tagouchi L_{3^3} , la care parametrii regimului de lucru și geometria sculei au luat valori din tabelul 3.10.

Tabel 3.10. Plan de experimente Tagouchi tip L_{3^3} (3 factori: unghiul de atac, viteză și avans, cu 3 niveluri).

Nr.	Parametri de intrare							
	Material	Unghi de degajare, γ , [°]	Unghi de așezare, α , [°]	Unghi de înclinare, λ , [°]	Unghi de atac, K , [°]	Viteza de așchiere, v [m/min]	Avans, s [mm/rot]	Adâncime, t , [mm]
1	C45	-6	6	-6	90	98,91	0,18	0,7
2							0,28	0,7
3							0,36	0,7
4						125,6	0,18	0,7
5							0,28	0,7
6							0,36	0,7
7						157	0,18	0,7
8							0,28	0,7
9							0,36	0,7
10					70	98,91	0,18	0,7
11							0,28	0,7
12							0,36	0,7
13						125,6	0,18	0,7
14							0,28	0,7
15							0,36	0,7
16						157	0,18	0,7
17							0,28	0,7
18							0,36	0,7
19					45	98,91	0,18	0,7
20							0,28	0,7
21							0,36	0,7
22						125,6	0,18	0,7
23							0,28	0,7
24							0,36	0,7
25						157	0,18	0,7
26							0,28	0,7
27							0,36	0,7

Cu rezultatele obținute pentru componentele F_x , F_y și F_z (anexa 3), în condițiile de aşchiere anterioare, s-au calculat, cu relațiile 3.25, valorile celorlalte componente fizice ale forței de aşchiere, prezentate în tabelul 3.11.

Tabel 3.11. Rezultate teoretico-experimentale obținute la strunjirea oțelului C45, folosind modelul care utilizează unghiurile constructive.

Nr.	Parametri de intrare			Rezultate experimentale			Parametri obținuți folosind modelul prezentat					
	Unghi de atac	Viteza de aşchiere	Avans	Valori determinate cu dinamometrul Kistler			Valori determinate cu modelul propus, relația (3.8)					Coeficientul de frecare, μ_a , determinat cu tribometrul
	k [°]	v [m/min]	s [mm/rot]	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F [N]	F_N [N]	F_a [N]	F_{Na} [N]	μ_γ	μ_a
1	90	98,91	0,18	167,98	216,61	289,63	140,53	269,93	37,26	190,08	0,521	0,196
2			0,28	201,77	317,74	406,70	163,37	375,91	51,88	280,45	0,435	0,185
3			0,36	207,63	370,70	463,77	163,78	428,08	57,40	327,99	0,383	0,175
4		125,6	0,18	174,09	217,08	302,11	145,10	284,96	35,35	189,04	0,509	0,187
5	70	98,91	0,28	203,27	328,85	405,26	164,93	375,47	51,03	291,62	0,439	0,175
6			0,36	191,35	332,62	445,80	148,61	416,63	49,17	290,93	0,357	0,169
7		157	0,18	158,30	209,06	285,81	130,67	271,18	31,17	182,30	0,482	0,171
8			0,28	183,78	288,36	382,49	146,66	362,86	38,85	252,24	0,404	0,154
9			0,36	173,40	317,85	433,58	131,33	409,37	42,34	276,73	0,321	0,153
10	45	98,91	0,18	236,68	317,21	423,72	224,76	411,51	40,08	188,16	0,546	0,213
11			0,28	279,12	445,30	541,82	263,14	514,21	60,59	289,88	0,512	0,209
12			0,36	309,25	556,40	665,83	287,58	628,97	73,63	377,61	0,457	0,195
13		125,6	0,18	244,21	304,76	413,09	232,96	409,02	32,76	173,34	0,57	0,189
14			0,28	271,38	408,53	531,19	254,59	518,64	44,69	255,34	0,491	0,175
15			0,36	276,88	454,99	604,21	255,65	590,54	46,70	291,86	0,433	0,16
16		157	0,18	218,15	268,55	373,30	207,41	375,72	23,25	150,00	0,552	0,155
17			0,28	242,04	360,00	499,82	224,95	494,31	34,29	219,84	0,455	0,156
18			0,36	208,81	414,94	556,93	186,11	545,46	36,78	280,76	0,341	0,131
19	30	98,91	0,18	222,29	359,87	397,76	312,43	409,21	25,50	82,25	0,763	0,31
20			0,28	290,66	526,47	557,49	408,51	564,09	42,03	159,19	0,724	0,264
21			0,36	311,06	608,98	632,56	437,16	633,75	51,18	211,50	0,69	0,242
22		125,6	0,18	249,96	379,21	410,27	351,34	431,04	20,47	71,31	0,815	0,287
23			0,28	305,02	520,78	553,35	428,70	564,94	39,15	139,33	0,759	0,281
24			0,36	288,53	579,24	605,32	405,49	606,08	48,02	207,87	0,669	0,231
25		157	0,18	238,16	350,01	400,55	334,74	427,79	12,23	54,13	0,782	0,226
26			0,28	282,36	464,40	526,94	396,84	554,74	19,51	106,62	0,715	0,183
27			0,36	393,85	603,13	799,31	553,48	852,66	13,50	92,48	0,649	0,146

Figura 3.14 prezintă o comparație între coeficienții de frecare măsurați pentru suprafața de aşchiere cu tribometrul prezentat în secțiunea a 3.2.2 a lucrării, pentru cele trei valori ale avansului de prelucrare și a vitezei de aşchiere considerate în experimentele care au fost efectuate (anexa 4). Valorile corespunzătoare obținute pentru coeficientul de frecare în cadrul planului de Taguchii pot fi considerate o validare a modelului propus deoarece sunt foarte

apropiate cu cele obținute de alți autori [MIL'16, PUL'12, PUL'14, SMO'14, REC'16, REC'08].

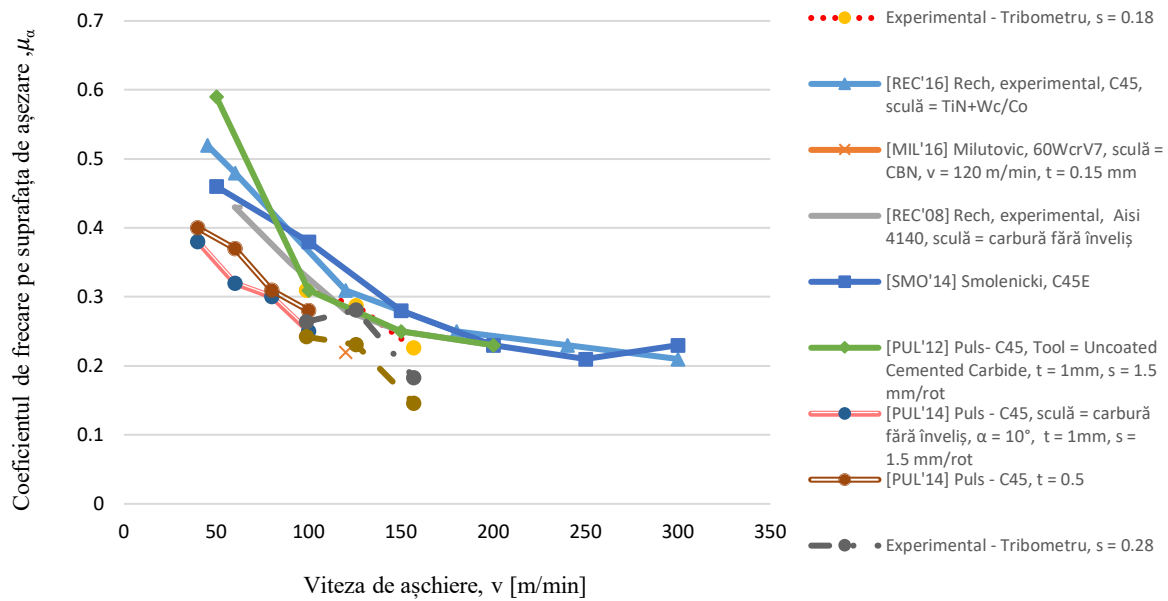


Fig. 3.14. Variația coeficientului de frecare de pe suprafața de așezare, μ_a , în funcție de viteza de aşchiere, v .

Validarea modelului descris de relațiile (3.27), realizată pentru cazul aşchierii semiortogonale, cu valorile parametrilor de lucru și geometrici ai sculei conform tabelului 3.13, rezultă și din dependențele trasate pentru coeficientul de frecare și componentele F , F_N , F_α , $F_{N\alpha}$ prezentate în figurile 3.15 ÷ 3.18.

Se constată că, valorile obținute pentru coeficientul de frecare pe suprafața de degajare prezintă o tendință de apropiere destul de mare de variațiile similare evidențiate de literatura de specialitate, ocupând o poziție mediană.

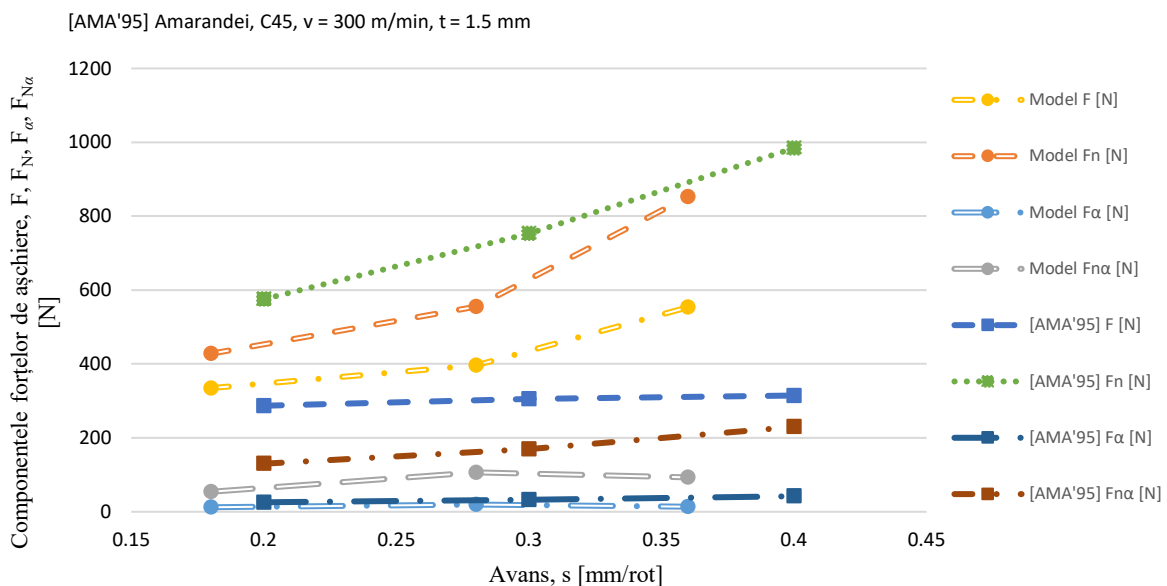


Fig. 3.15. Variația componentelor F , F_N , F_α și $F_{N\alpha}$, în funcție de avansul de lucru, s .

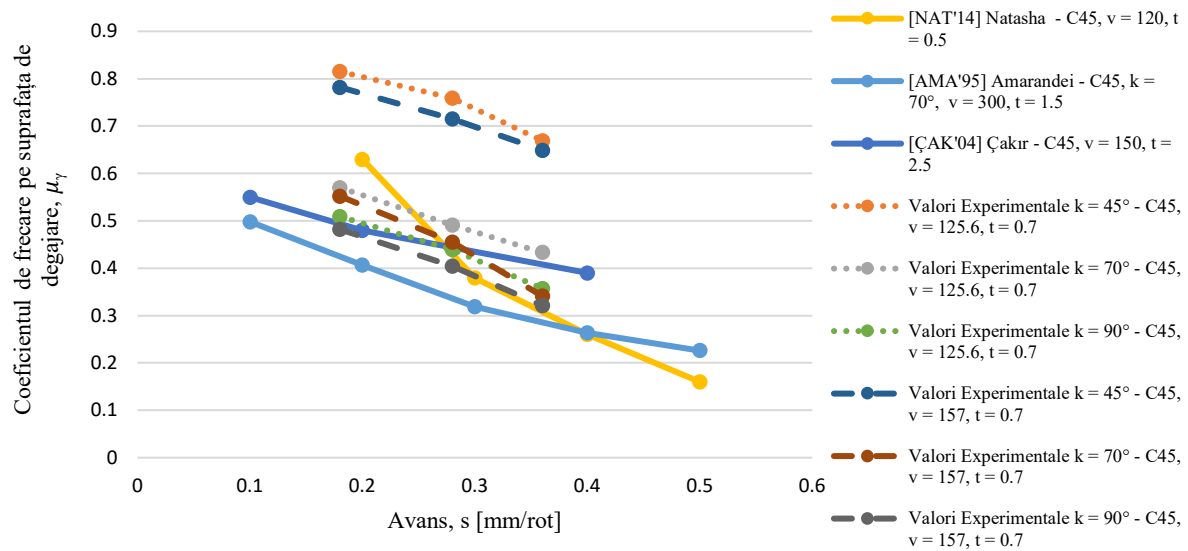


Fig. 3.16. Variația coeficientului de frecare de pe suprafața de degajare, μ_γ , în funcție de avansul de lucru, s .

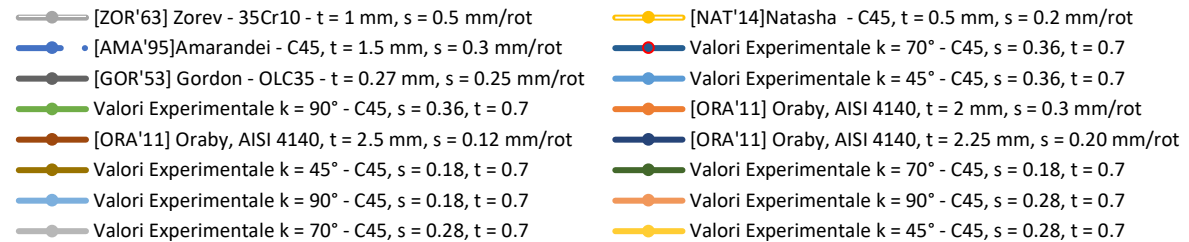


Fig. 3.17. Grafic comparativ al valorilor coeficientului de frecare de pe suprafața de degajare, μ_γ , în funcție de viteza principală de așchiere, v .

Parametrii de lucru utilizați: [AMA'95] Amarandei, C45, $v = 300$ m/min, $t = 1.5$ mm; [Çak'04] Çakır - C45, $v = 150$, $t = 2.7$ mm; [SIL'12] Silva, C45, $v = 70$ m/min, $t = 2.7$ mm.

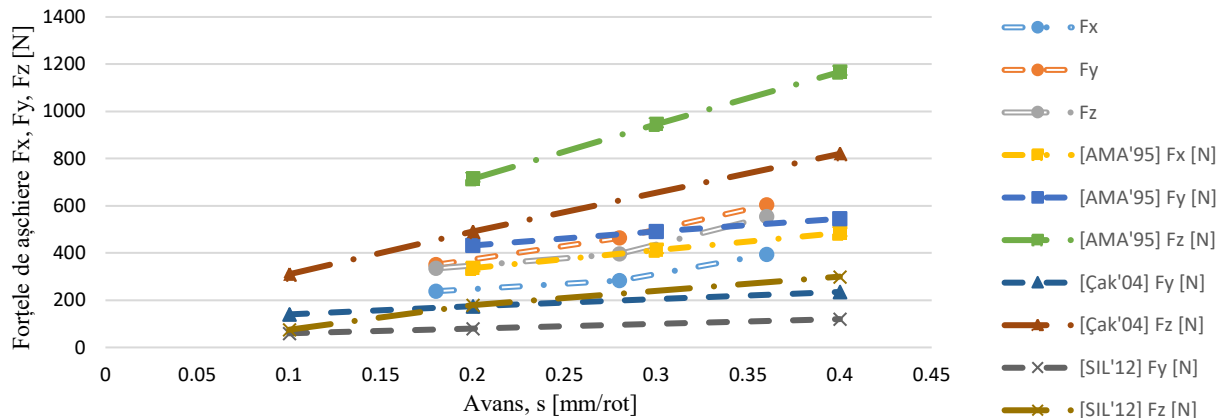


Fig. 3.18. Grafic comparativ al valorilor forțelor de aşchiere, în funcție de avansul de prelucrare, s , în raport cu cele oferite de literatura de specialitate.

* *
*

Din analiza rezultatelor experimentale, prezentate în acest subcapitol, au rezultat câteva concluzii:

- particularizarea modelului propus pentru cazul aşchierii ortogonale conduce la un caz particular al modelului Merchant [MER'45], iar dispunerea forțelor conform figurilor 3.2 și 3.3, corespunde situației reale;
- variația coeficientului de frecare pe suprafața de degajare și alura curbelor traste cu rezultatele obținute, în intervalul de viteze 90-160 m/min, este asemănătoare cu variațiile obținute de alți autori la prelucrări similare cu viteze din același interval, figura 3.17;
- alura curbelor de variație ale componentelor forțelor de aşchiere F_x , F_y și F_z , trasate cu valorile din tabelul 3.11, este asemănătoare cu alura curbelor oferite de literatura de specialitate [AMA'95, ÇAK'04, LEO'12] iar valorile componentelor fizice și ale coeficienților de frecare, calculate cu modelul propus pentru aceiași parametri de lucru valori apropiate ca în lucrările [AMA'95, NAT'14, GOR'53, ORA'11], se încadrează în rezultatele obținute de ceilalți autori figura 3.17;
- testele Grubbs pentru erori grosolane, realizate conform referinței [ION'04], evidențiază că ele nu depășesc 3,5%.

Având în vedere aceste constatări putem trage concluzia că se poate utiliza modelul propus pentru studierea forțelor de deformare plastică, de frecare și a coeficienților de frecare la aşchiere cu o precizie suficient de bună.

3.4. Studiu comparativ privind influența perametrilor de lucru și a geometriei sculei asupra componentelor F_x , F_y , F_z , F , F_N , F_α și $F_{N\alpha}$, la strunjirea otelului carbon

Stadiul actual privind mecanismele fenomenului de frecare la aşchiere, prezentat în capitolul I, a evidențiat că cei mai importanți factori care influențează componentele forțele de aşchiere sunt condițiile de aşchiere (temperatura, viteza, avansul și adâncimea de aşchiere, geometria sculei și mediul de aşchiere), natura și structura cuplului de materiale în contact și starea de tensiuni. O lege generală de dependență globală, în funcție de toți acești factori de influență, este greu de stabilit și, de aceea, cercetătorii care s-au ocupat de studiul procesului de

așchiere, au recurs adesea la cunoașterea legilor particulare de variație a diverselor fenomene în funcție de fiecare parametru care influențează procesul.

Plecând de la cele prezentate anterior, în acest subcapitol s-a urmărit influența vitezei, avansului și adâncimii de așchiere, a geometriei sculei prin unghiurile de atac, k , de degajare, γ , de așezare, α , și de înclinare a tăișului, λ . Valorile teoretico-experimentale, obținute după metodologia descrisă în acest capitol pentru strunjirea oblică a oțelului C 45, cu parametrii de lucru luând valori din tabelul 3.10, sunt date în tabelul 3.11, pentru geometria constructivă a sculei, și pentru geometria funcțională, în tabelul 3.12.

Cu datele experimentale prezentate în tabelele 3.11 și 3.12 s-au trasat curbele de variație ale forței de frecare de pe suprafața de degajare a sculei, F , forței de deformare plastică, F_N , forței de frecare pe suprafața de așezare, F_α și ale forței normale la această suprafață, $F_{N\alpha}$.

Tabel 3.12. Rezultate experimentale obținute la strunjirea oțelului C45, folosind modelul care utilizează unghiurile funcționale.

No.	Parametri de intrare			Rezultate experimentale			Parametri obținuți folosind modelul prezentat					
	Unghi de atac	Viteza de așchiere	Avans	Valori determinate cu dinamometrul Kistler			Valori determinate cu modelul propus, relația (3.34)					Coeficientul de frecare, μ_α , determinat cu tribometru
	k_f [°]	v [m/min]	s [mm/rot]	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F [N]	F_N [N]	F_α [N]	$F_{N\alpha}$ [N]	μ_γ	
1	90	98,91	0,18	167,98	216,61	289,63	140,71	269,90	37,29	190,24	0,521	0,196
2			0,28	201,77	317,74	406,70	163,78	375,84	51,96	280,85	0,436	0,185
3			0,36	207,63	370,70	463,77	164,41	427,97	57,51	328,62	0,384	0,175
4		125,6	0,18	174,09	217,08	302,11	145,28	284,93	35,38	189,21	0,51	0,187
5			0,28	203,27	328,85	405,26	165,36	375,41	51,10	292,01	0,44	0,175
6			0,36	191,35	332,62	445,80	149,18	416,52	49,28	291,57	0,358	0,169
7		157	0,18	158,30	209,06	285,81	130,84	271,16	31,20	182,47	0,483	0,171
8			0,28	183,78	288,36	382,49	147,04	362,79	38,91	252,64	0,405	0,154
9			0,36	173,40	317,85	433,58	131,87	409,25	42,44	277,39	0,322	0,153
10	70	98,91	0,18	236,68	317,21	423,72	224,86	411,45	40,12	188,34	0,547	0,213
11			0,28	279,12	445,30	541,82	263,40	514,11	60,66	290,24	0,512	0,209
12			0,36	309,25	556,40	665,83	288,03	628,80	73,76	378,24	0,458	0,195
13		125,6	0,18	244,21	304,76	413,09	233,05	408,97	32,79	173,51	0,57	0,189
14			0,28	271,38	408,53	531,19	254,81	518,54	44,75	255,74	0,491	0,175
15			0,36	276,88	454,99	604,21	255,96	590,39	46,80	292,51	0,434	0,16
16		157	0,18	218,15	268,55	373,30	207,49	375,68	23,28	150,16	0,552	0,155
17			0,28	242,04	360,00	499,82	225,12	494,21	34,36	220,25	0,456	0,156
18			0,36	208,81	414,94	556,93	186,40	545,31	36,87	281,47	0,342	0,131
19	45	98,91	0,18	222,29	359,87	397,76	312,39	409,16	25,53	82,37	0,764	0,31
20			0,28	290,66	526,47	557,49	408,49	564,00	42,09	159,43	0,724	0,264
21			0,36	311,06	608,98	632,56	437,19	631,52	51,34	212,15	0,692	0,242
22		125,6	0,18	249,96	379,21	410,27	351,31	430,99	20,50	71,41	0,815	0,287
23			0,28	305,02	520,78	553,35	428,68	546,85	39,21	139,55	0,759	0,281
24			0,36	288,53	579,24	605,32	405,51	605,95	48,10	208,22	0,669	0,231
25		157	0,18	238,16	350,01	400,55	334,69	427,74	12,26	54,26	0,782	0,226
26			0,28	282,36	464,40	526,94	396,75	554,65	19,56	106,91	0,715	0,183
27			0,36	393,85	603,13	799,31	553,01	852,41	13,63	93,36	0,649	0,146

Rezultatele obținute folosind modelul prezentat pentru diferiți parametri ai regimului de așchiere sunt prezentate în figurile 3.19 – 3.24. Figurile reflectă componentele forței de așchiere de pe suprafețele de degajare și așezare și variația coeficienților de frecare în funcție de viteza de așchiere, avansul de lucru și unghiul de atac. Pentru cazul luării în considerare a geometriei funcționale, rezultatele sunt prezentate în figurile 3.25- 3.30.

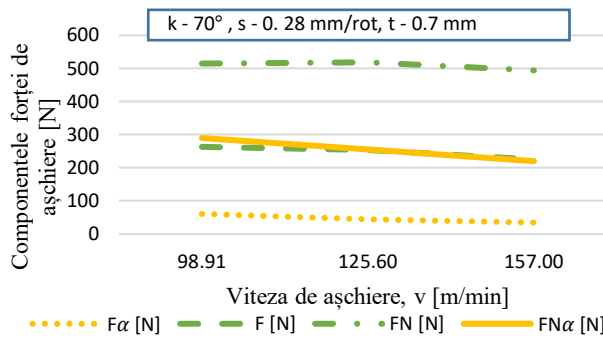


Fig. 3.19. Efectul vitezei de așchiere, v , asupra componentelor F , F_N , F_a și $F_{N\alpha}$.

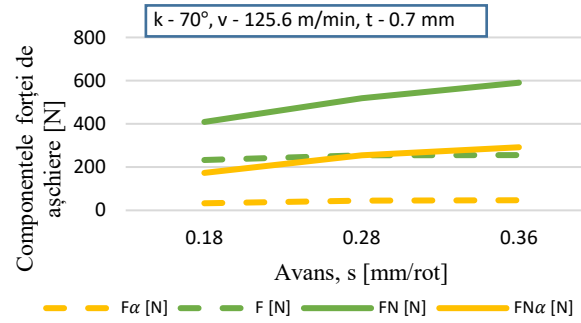


Fig. 3.20. Efectul avansului, s , asupra componentelor F , F_N , F_a și $F_{N\alpha}$.

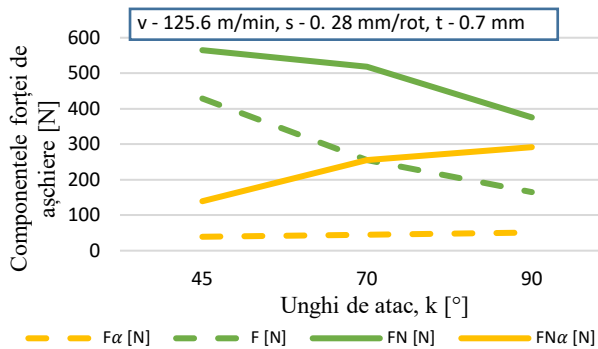


Fig. 3.21. Efectul unghiului de atac, k , asupra componentelor F , F_N , F_a și $F_{N\alpha}$.

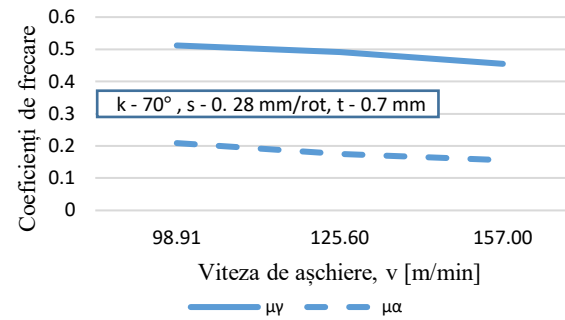


Fig. 3.22. Efectul vitezei de așchiere, v , asupra coeficienților de frecare μ_γ și μ_α .

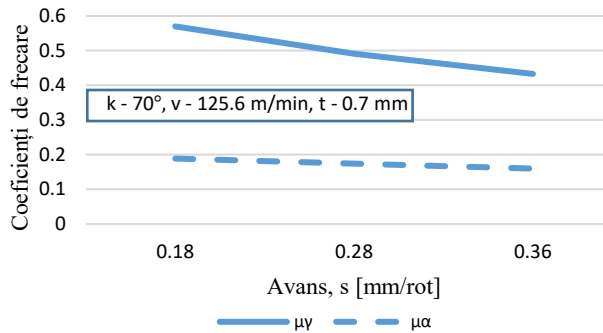


Fig. 3.23. Efectul avansului, s , asupra coeficienților de frecare μ_γ și μ_α .

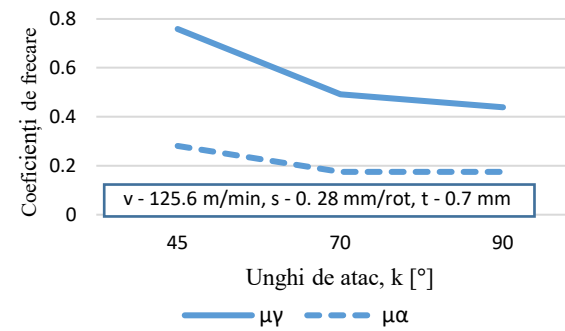


Fig. 3.24. Efectul unghiului de atac, k , asupra coeficienților de frecare μ_γ și μ_α .

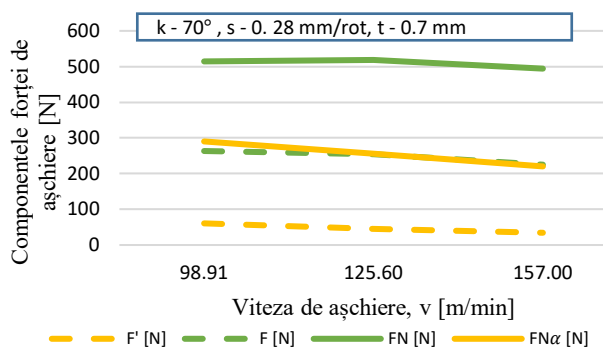


Fig. 3.25. Efectul vitezei de așchiere, v , asupra componentelor F , F_N , F_a și $F_{N\alpha}$.

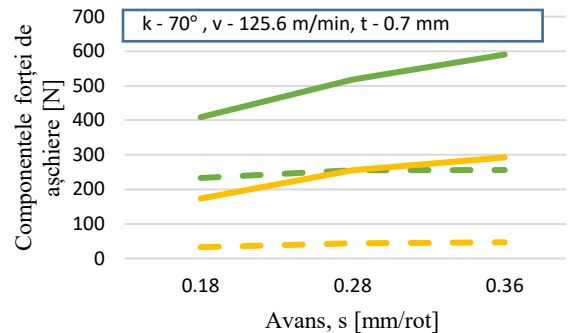


Fig. 3.26. Efectul avansului, s , asupra componentelor F , F_N , F_a și $F_{N\alpha}$.

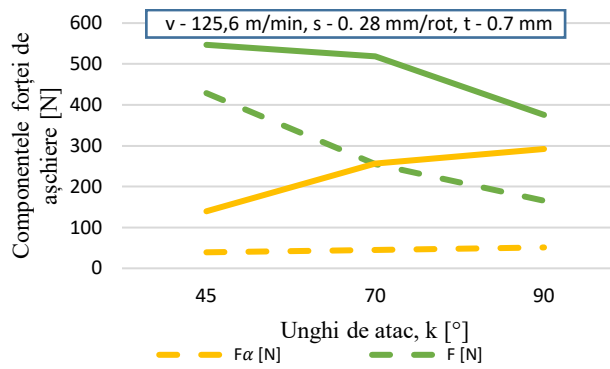


Fig. 3.27. Efectul unghiului de atac, k , asupra componentelor F , F_N , F_α și $F_{N\alpha}$.

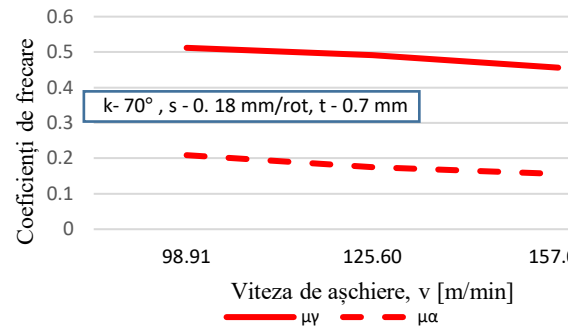


Fig. 3.28. Efectul vitezei de aşchiere, v , asupra coeficienților de frecare μ_γ și μ_α .

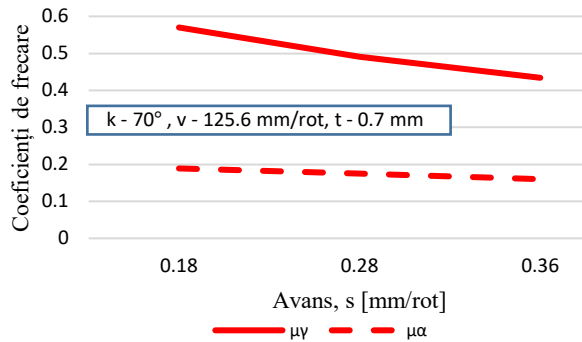


Fig. 3.29. Efectul avansului, s , asupra coeficienților de frecare μ_γ și μ_α .

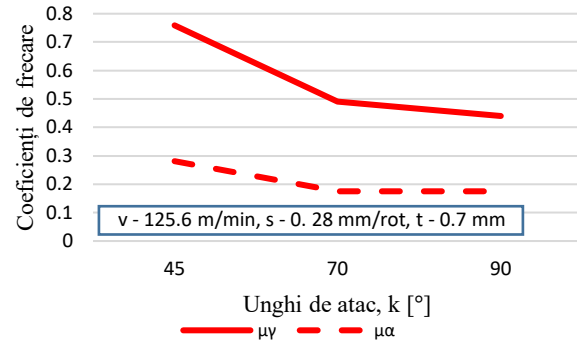


Fig. 3.30. Efectul unghiului de atac, k , asupra coeficienților de frecare μ_γ și μ_α .

3.5. Concluzii finale privind validarea modelului

Lucrările științifice și rezultatele care au fost publicate referitoare la problematica componentelor fizice ale forțelor de aşchiere au constituit una dintre cele mai importante și disputate tematici de cercetare. De aceea, aceste teme sunt mereu actuale și se mențin astfel datorită progresului permanent din domeniul materialelor, tehnologiilor, construcțiilor de echipamente sau scule etc. Cercetările efectuate și rezultatele obținute în acest capitol sunt importante din trei puncte de vedere:

- modelarea fizico-matematică a procesului de aşchiere în scopul determinării componentelor fizice ale forțelor de aşchiere;
- construcția și realizarea unui dispozitiv tribometric, cu poziționare flexibilă a părții aşchietoare, pentru determinarea coeficientului de frecare de pe suprafața de aşezare sau degajare a sculei;
- studiul influenței parametrilor de lucru și a geometriei sculei asupra structurii fizice a forței de aşchiere în vederea validării modelului propus.

În acest sens, a fost dezvoltat un model matematic descris printr-un sistem de ecuații, rezolvabil dacă este cunoscut unul dintre coeficienții de frecare de pe interfețele de contact ale sculei cu aşchia sau cu suprafața prelucrată. A fost propusă o metodă proprie de evaluare experimentală a coeficientului de frecare de pe suprafața de aşezare, utilizând un dispozitiv tribometric, de concepție și execuție proprie, cu posibilitate de reglare a geometriei sculei și a poziției ei în raport cu axele sistemului legat de sculă sau sistemul tehnologic. De asemenea,

sunt prezentate și cercetările experimentale efectuate și rezultatele obținute, relativ la mărimea componentelor fizice ale forțelor de aşchiere și a coeficientului de frecare, în cadrul unui plan de experimente Taguchii 3³.

3.6. Utilizarea metodei cu elemente finite pentru studiul distribuției presiunii și a temperaturii din zona de aşchiere – studiu comparativ

Modelul propus, în capitolul anterior, realizat în ipoteza că forțele care acționează pe tăiș sunt concentrate într-un punct, M, nu ține cont de distribuția componentelor fizice pe toată lungimea de contact a tăișului. În continuare se face o analiză a acestor aspecte plecând de la constatările lui Zorev [ZOR'63]. Conform acestui autor, presiunile pe suprafețele active ale sculei, pentru cazul aşchierii ortogonale, au variațiile din figura 3.31, unde, se observă că, în plan secant la tăiș, curbele de distribuție a presiunilor pe suprafața de degajare și aşezare sunt de tip parabolic.

Majoritatea referirilor la aceste aspecte, evidențiate de literatura de specialitate, nu prezintă modul de distribuție a acestor presiuni pentru cazul aşchierii materialelor dure. De aceea, în continuare, se vor dezvolta o serie de cercetări teoretice cu scopul de a evidenția variațiile de presiune pentru cazul aşchierii materialelor dure.

3.6.1. Cercetări privind evaluarea presiunii pe suprafețele de contact ale sculei

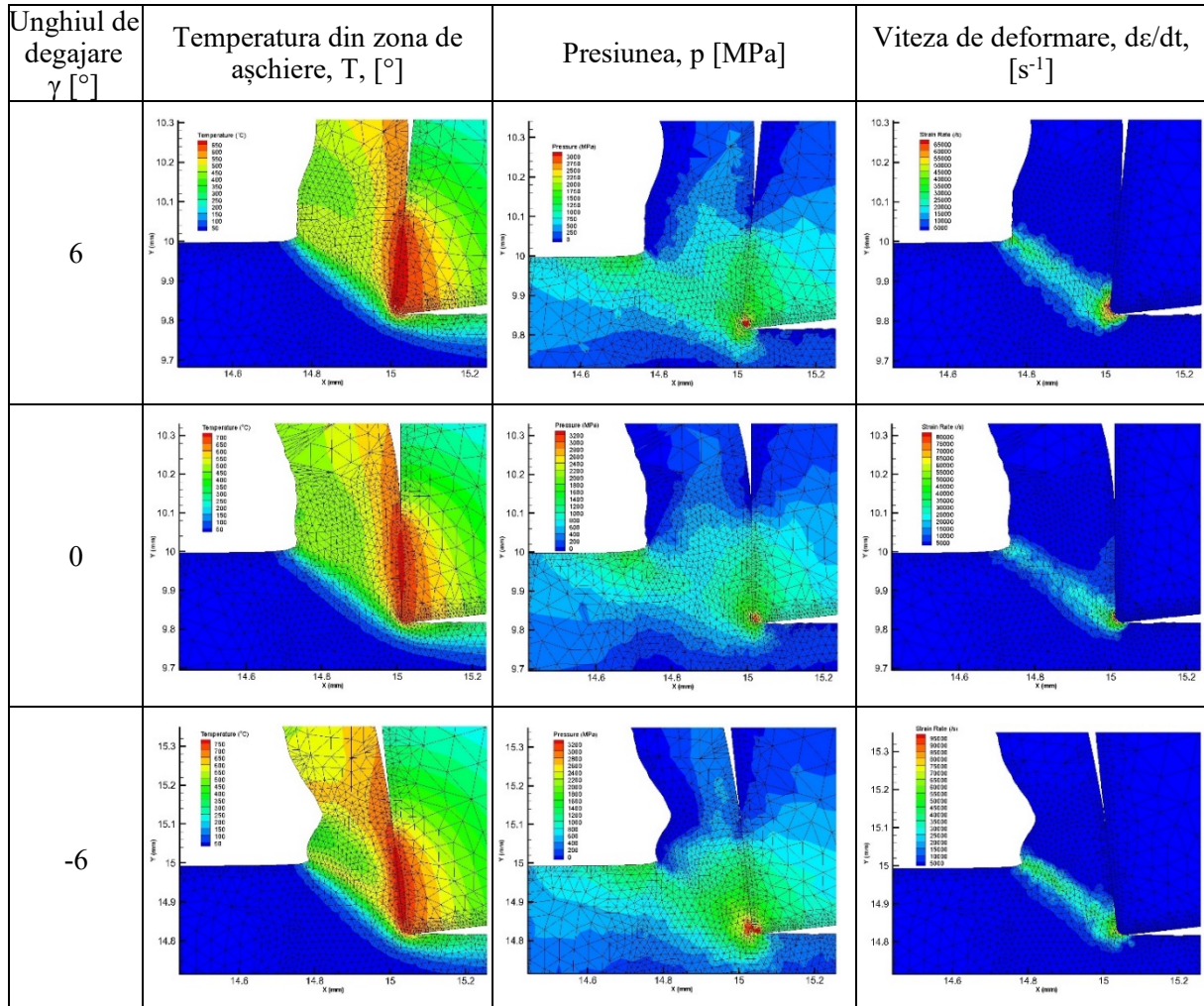
Pentru simularea teoretică a distribuției presiunii pe suprafețele active ale sculei, s-a aplicat metoda analizei cu element finit (FEA) pentru cazul aşchierii ortogonale, utilizând programul ThirdWaveSystems ADVANTEDGE 7.1. Valorile parametrilor regimului de aşchiere au fost cele date în tabelul 3.15, materialele prelucrate au fost C45, pentru verificarea veridicității rezultatelor obținute și oțelul 100Cr6, tratat termic, iar scula o plăcuță de tip CBN cu geometria din tabelul 3.15.

Tabel 3.15. Geometria sculei și parametri regimului de aşchiere.

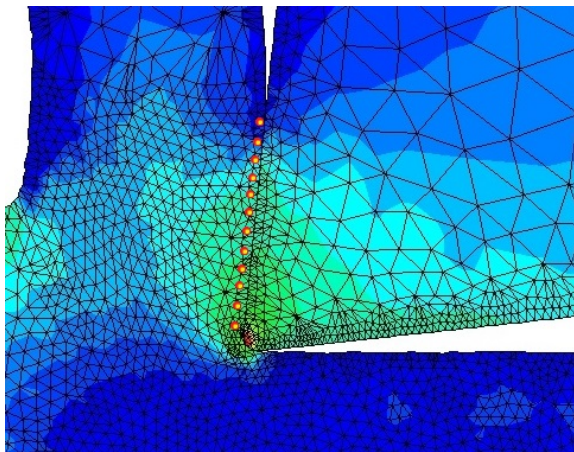
Unghi de atac, κ [°]	Unghi de degajare, γ [°]	Unghi de aşezare, α [°]	Unghi de înclinare, λ [°]	Viteza de aşchiere, v [m/min]	Avans, s [mm/rot]	Adâncime, t [mm]
0°	6	6	0	157	0,18	1
	0					
	-6					

Parametrii monitorizați în cadrul simulărilor cu programul ADVANTEDGE au fost temperatura, presiunea pe suprafețele de contact și viteza de deformare, rezultatele obținute fiind date în tabelele 3.16 și 3.17, care confirmă rezultatele obținute și de alți autori.

Se poate observa că prin creșterea unghiului de degajare, crește atât temperatura cât și presiunea. Distribuția presiunilor pe suprafețele active ale sculei își păstrează forma pentru toate valorile unghiului de degajare, iar valorile presiunii pe suprafața de degajare, obținute prin analiza punctelor din zona imediat apropiată suprafeței de degajare conform figurii 3.33, pot fi comparate cu cele regăsite în literatura de specialitate.

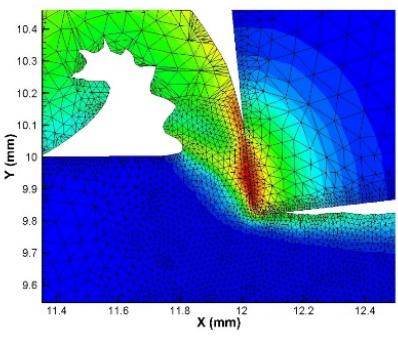
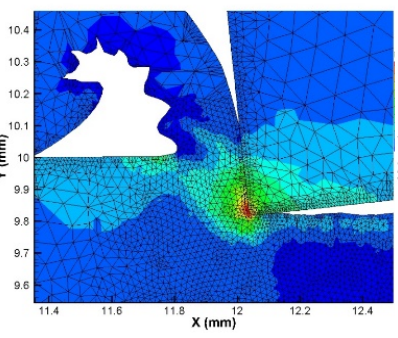
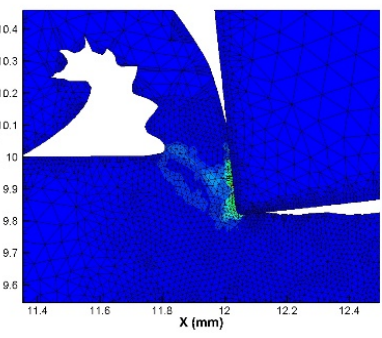
Tabel 3.17. Reprezentarea grafică a rezultatelor simulărilor cu element finit.

În cazul testelor HPM, efectuate cu oțelul 100Cr6, tratat la o duritate de 59-61HRC, s-a folosit aceeași plăcuță din nitrură cubică de bor (CBN) și același valori pentru parametrii regimului de lucru (tabelul 3.15) iar pentru geometria sculei doar unghi de degajare negativ.

**Fig. 3.33.** Punctele analizate

Rezultatele obținute, date în tabelul 3.19, evidențiază similitudinea distribuției presiunii pe suprafețele active ale sculei dintre aşchierea clasică și aşchierea HPM. Presiunea cea mai mare a fost înregistrată lângă tăişul sculei, urmând să scadă către punctul de desprindere a aşchiei. Valorile obținute în urma simulării sunt comparabile cu cele obținute de alți autori, care sunt sintetizate în capitolul 1.

Tabel 3.19. Rezultatele simulărilor procesului HPM prin analiza FEA.

Temperatura maximă înregistrată: $T = 1123.08 [^{\circ}\text{C}]$	Presiunea maximă înregistrată: $P = 5009.18 [\text{MPa}]$	Viteza de deformare, $d\varepsilon/dt$, [s^{-1}]
		

O analiză comparativă a rezultatelor obținute conduce la concluzia că, în cazul aşchierii materialelor dure, presiunea pe suprafețele active ale sculei are aceeași variație ca și în cazul aşchierii materialelor mai moi.

3.6.2. Concluzii

Analiza cu element finit a procesului de strunjire a materialului 100Cr6, tratat termic la 60 HRC, a permis formularea unor concluzii:

- distribuția presiunii pe suprafața de degajare la aşchiera materialelor dure este asemănătoare cu distribuția presiunii la aşchiera materialelor mai moi;
- temperatura maximă înregistrată la aşchiera oțelului 100Cr6 este cu aproximativ 50% mai mare față de temperatura înregistrată la aşchiera oțelului carbon C45, netratat termic (28 HRC), aspect confirmat și de informațiile oferite de literatura de specialitate;
- deși literatura de specialitate oferă informații substanțiale privind distribuția presiunii pe suprafața de degajare pentru aşchiera ortogonală, aceasta nu oferă informații despre distribuția presiunii în planul tăişului pe toată lungimea de contact a suprafețelor active; Referiri despre variația forțelor de aşchiere în planul tăişului au fost făcute în trecut de Belousov, Granovsky, etc [BEL'80, GRA'85], care au sugerat că, pe lungimea tăişului, forțele variază datorită valorilor vitezei de aşchiere date de adâncimea de aşchiere;
- considerând aceste aspecte valide, se poate presupune că variația presiunii pe suprafața de degajare este atât o funcție de lungimea de contact a aşchierii cu suprafața de degajare cât și de lungimea de contact a piesei cu scula, putând constitui o viitoare direcție de cercetare.

CAPITOLUL IV

Metodologie și aparatură utilizată la studiul componentelor fizice ale forței de așchiere la prelucrarea materialelor dure

La analiza metodelor analitice și experimentale de determinare a componentelor fizice ale forțelor de așchiere din literatura de specialitate, prezentată în capitolele 1 și 2, s-a constatat că majoritatea autorilor care fac referiri exprese la structura forțelor de așchiere a materialelor dure, propun metode și modele care nu satisfac în totalitate cerințele unei cercetări reale a problemelor legate de structura fizică a forțelor de așchiere, la prelucrarea HPM, care depind atât de geometria sculei cât și de factori precum regimul și condițiile de așchiere. Aceste aspecte au făcut să apară necesitatea extinderii modelelor existente și luarea în considerare a geometriei funcționale care depinde de factorii menționați anterior.

Din analiza structurii programului de cercetare (figura 4.1), se vede că s-au parcurs deja o serie de etape: etapa testelor folosind geometria constructivă și etapa extinderii modelului pentru geometria funcțională.

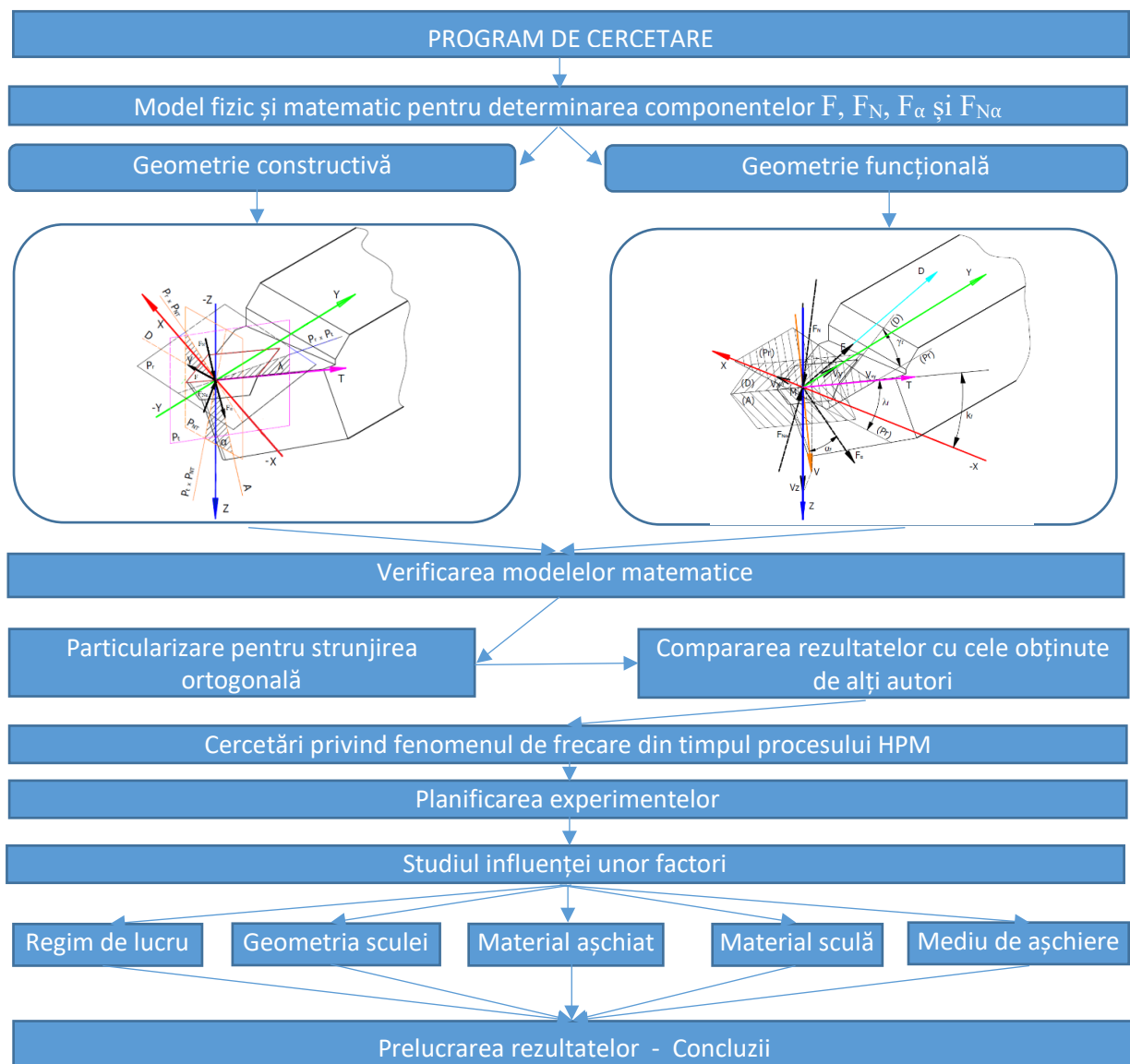


Fig. 4.1. Schema programului de cercetare experimentală.

4.1. Echipamentul utilizat pentru studiul structurii fizice ale forțelor de așchiere la prelucrarea materialelor dure

Pentru realizarea programului de cercetare experimental, prezentat în figura 4.1, s-au utilizat următoarele echipamente tehnologice și de cercetare:

Mașina Unealtă: Strung normal SN 320x750, cu posibilitatea de reglare a turației în domeniul $[31.5 \div 1600]$ rot/min și a avansului $[0.03 \div 3.52]$ mm/rot, având caracteristicile tehnice din anexa 1.

Scule: pentru efectuarea testelor experimentale de așchiere s-au utilizat trei suporti de sculă cu geometriile prevăzute în planul de cercetare (PCLNR 2525M 12, CSBNL 2525M 12 și CSDNN 2525M 12), echipați cu plăcuțe de proveniență Sandvik Coromant și Seco Tools, figura 4.2.

Dispozitive: pentru testele experimentale, vizând coeficientului de frecare pe suprafața de așezare, s-a utilizat tribometrul de construcție proprie descris în capitolul 3, figura 3.7.

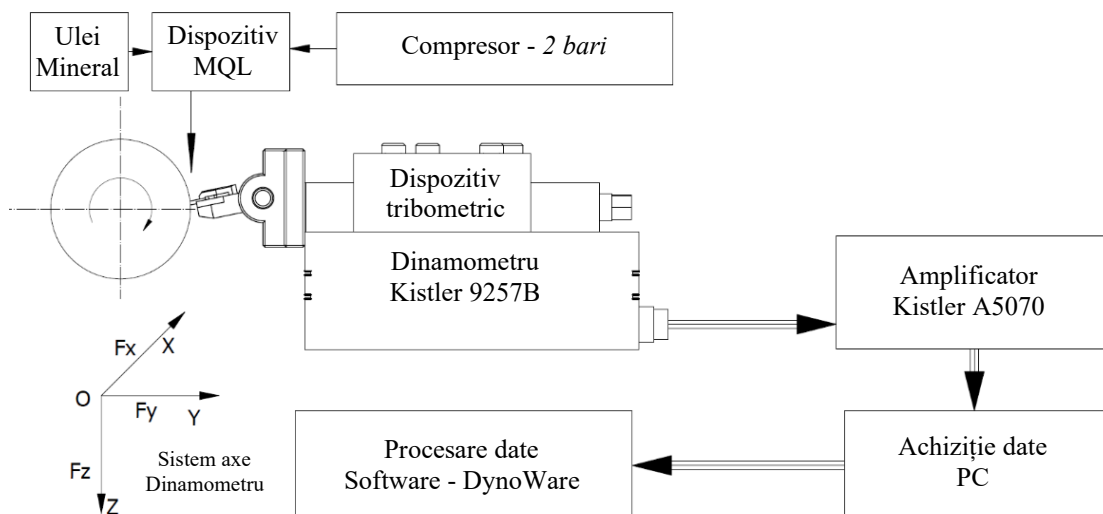
Materialele prelucrate: au fost bare din oțel aliat 100C_r6, X210C_r12 și 90M_nC_rV8, tratate termic la durități din intervalul 55÷65 HRC. Calitatea materialului prelucrat, caracteristicile mecanice, inclusiv duritatea rezultată în urma tratamentului termic, sunt date în *Certificatul de calitate*, anexa 5. Semifabricatele utilizate ca probe au fost arbori netezi.

Lațul de măsurare, utilizat la testele experimentale, cu o structură îmbunătățită conform figurii 4.3, cuprinde și un dispozitiv de răcire, cu presiune reglabilă în intervalul 1,8-2,2 bari, construit după tehnica MQL (Minimum Quantity Lubricant), pe bază de aer comprimat și particule de ulei Valona MS 7023 HC (anexa 6).

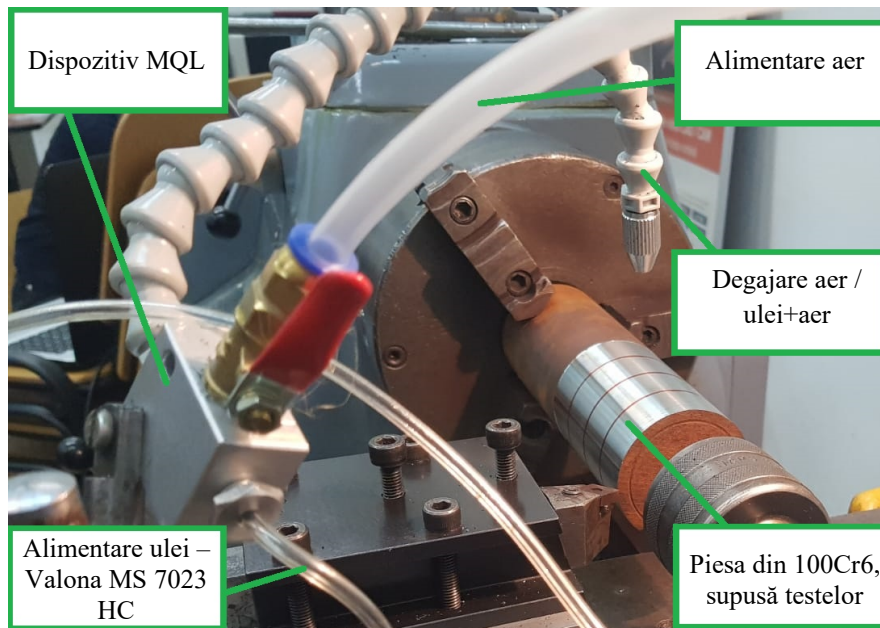


Fig. 4.2. Plăcuțe Sandvik Coromant și Seco Tools

- a. CNGA120408S01030A-7025,
- b. CNGA120408S02035A-7015,
- c. CNGA120408S-01525L1WZB-CH2540.



a. Structura lanțului de măsurare.



b. Schema de aşchiere şi dispozitivul de răcire-ungere MQL.

Fig.4.3. Structura generală a lanțului de măsurare.

Pentru determinarea forțelor cu tribometrul montat pe dinamometrul Kistler, s-a utilizat schema și reglajul dat în figura 4.4, iar calculul coeficientul de frecare de pe suprafața de aşezare s-a realizat cu relația (4.1), obținută prin rotația sistemului de axe în jurul axei O_x cu unghiul α .

$$\mu = \frac{F_y \cdot \cos(\alpha) - F_z \cdot \sin(\alpha)}{F_y \cdot \sin(\alpha) + F_z \cdot \cos(\alpha)} \quad (4.1)$$

Reglarea tribometrului la geometria dorită s-a realizat conform metodologiei descrisă în capitolul patru.

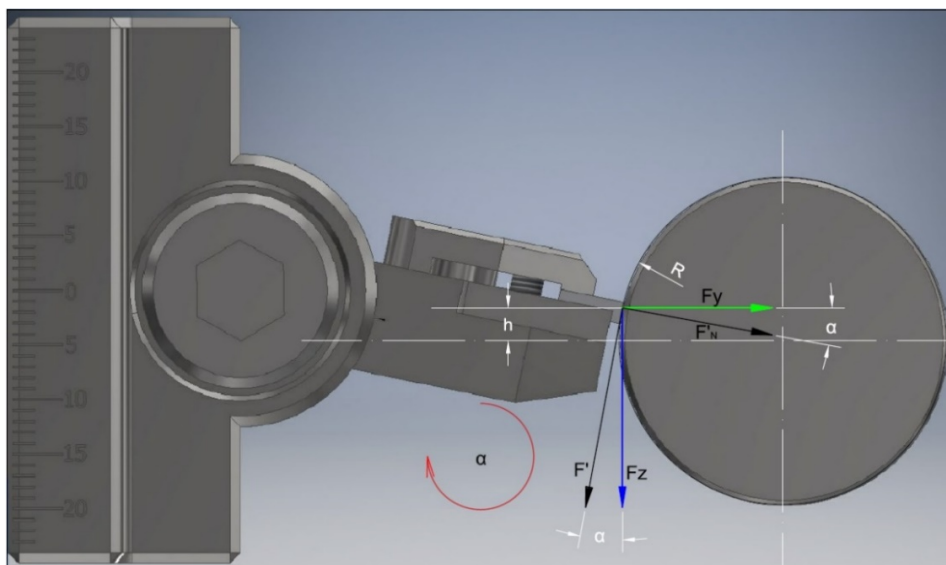


Fig. 4.4. Poziționarea tribometrului în raport cu suprafața prelucrată.

La toate testele experimentale, forța normală la suprafața de aşezare s-a realizat prin deplasarea saniei transversale cu aproximativ 0,1 mm, cea ce corespunde unei apăsări de aproximativ 300 N (valoare determinată pe amplificatorul Kistler). Valorile experimentale ale

componentelor F_a și F_{Na} s-au determinat de pe curbele înregistrate cu dinamometrul pentru momentul cuplării avansului, imediat după stabilizarea procesului de aşchiere, figura 4.5. Aceste determinări s-au realizat în ipotezele: absența vibrațiilor (autovibrațiilor) care însoțesc procesul de aşchiere și ipoteza menținerii calității de stare fixă a sistemului tehnologic. În această situație, s-a lucrat cu media rezultatelor obținute pentru zona stabilizată (evitându-se valorile înregistrate la capetele intervalelor de variație, până la atingerea calității de stare fixă).

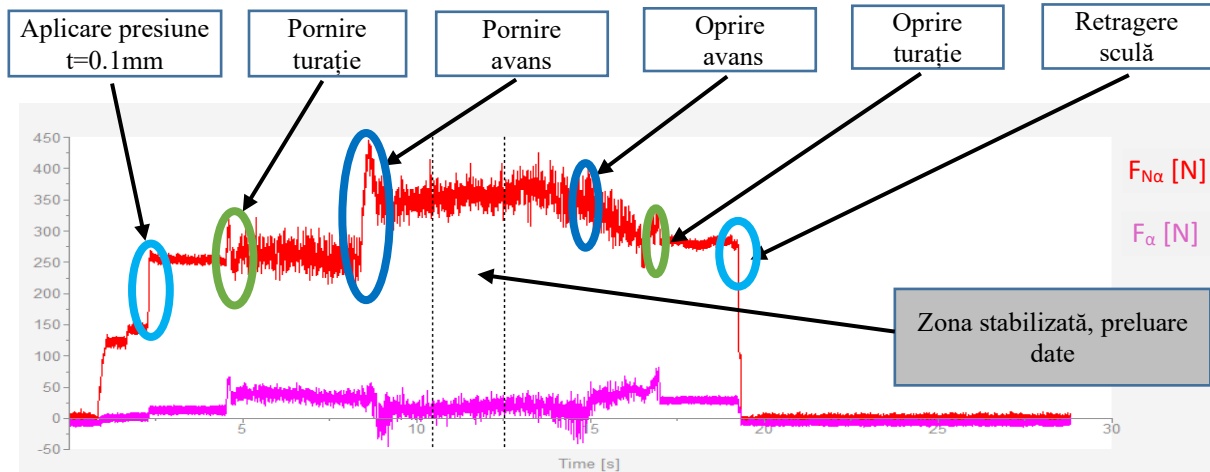


Fig. 4.5. Determinarea experimentală a componentelor F_a și F_{Na} .

4.2. Aparatura utilizată pentru studiul structurii fizice a forțelor de aşchiere, a temperaturii și a calității suprafețelor la prelucrarea materialelor dure

Aparatura utilizată pentru realizarea programului experimental și analiza procesului de aşchiere prin strunjire a materialelor dure a constat din:

1. Pentru studiul forțelor:

- dinamometrul Kistler 9257B, cu descrierea tehnică prezentată în Anexa 2;
- preamplificatorul Kistler 5070 legat la dinamometru, Anexa 2.1;
- un PC + software DynoWare pentru prelucrarea și analiza datelor.

2. Pentru studiul temperaturii:

- o cameră cu termoviziune tip x6540sc, fără contact direct, de producție FLIR, figura 4.6;
- un PC + software FLIR ResearchIR Max pentru analiza datelor obținute.

Amplasarea camerei de termoviziune s-a realizat astfel încât să se poată capta imaginile din zona de contact sculă-probă și zonele adiacente unde este prezent mediul de aşchiere.

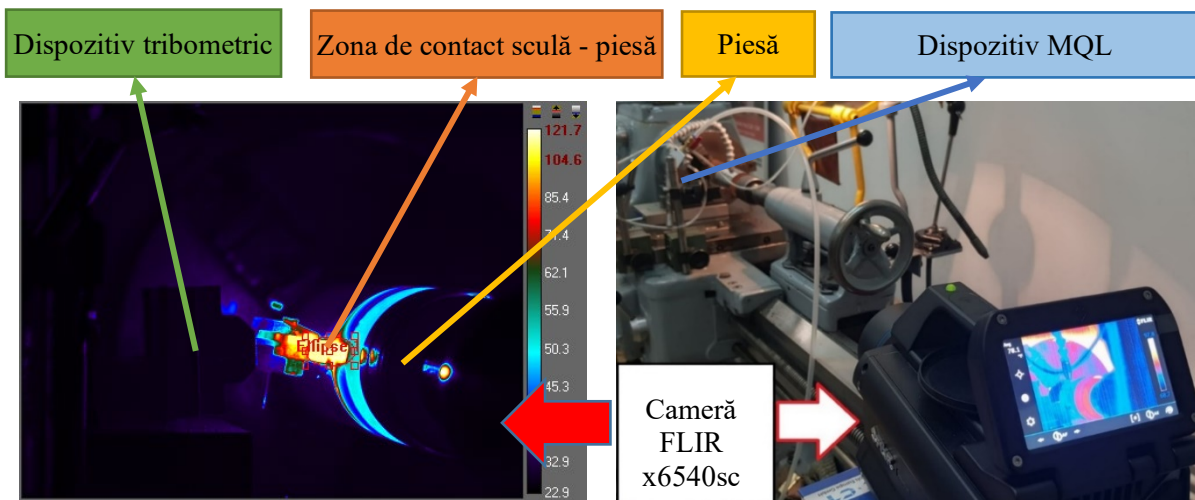


Fig. 4.6. Amplasarea camerei FLIR x6540sc.

3. **Calitatea suprafețelor** a fost evaluată în două moduri, utilizând aparatura prezentată în figura 4.7, formată din:
- rugozimetrul *pertometru Mahr+software MarSurf XR 20*, cu contact direct;
 - cu microscopul confocal, fără contact, *Mahr CWM100+software MountainsLab 7.1*.

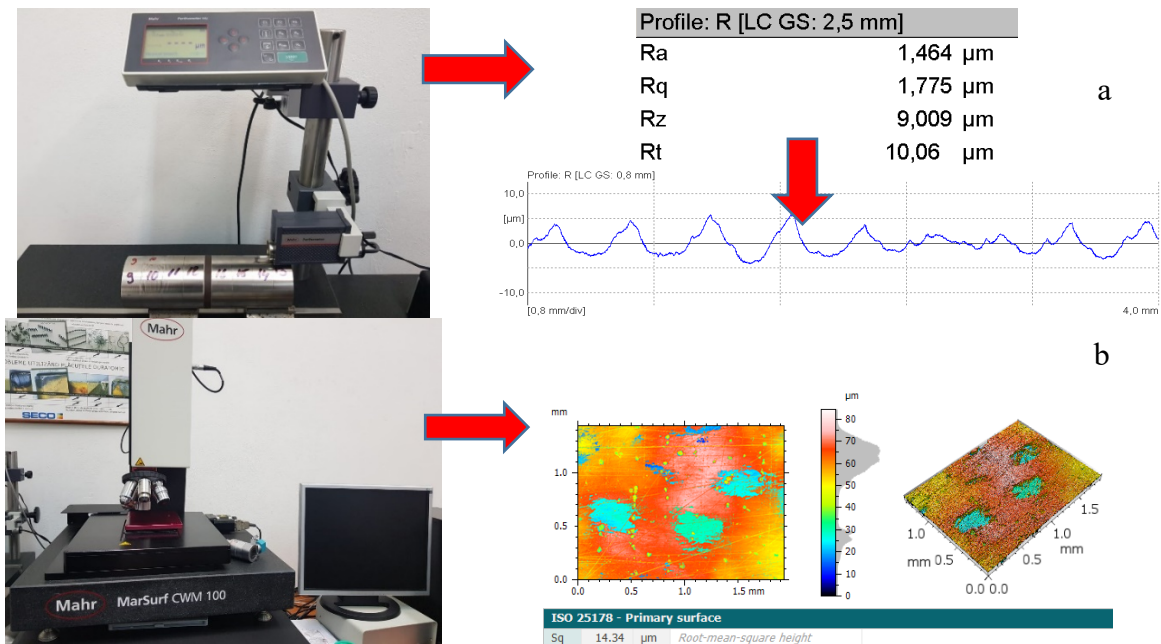


Fig. 4.7. Rugozimetrul Mahr (a) și microscopul confocal Mahr CWM100 (b).

4.3. Plan de experimente pentru studiul structurii fizice ale forțelor de aşchiere la prelucrarea materialelor dure

Obiectivul cercetărilor efectuate a fost de a stabili dependențe privind structura fizică a forțelor de aşchiere în funcție de factorii importanți de influență, evidențiați în primul capitol al lucrării. Pentru ca activitatea de investigare experimentală să se desfășoare în condiții optime s-a procedat la utilizarea metodei de planificare experimentală Taguchi, descrisă în continuare.

4.3.1. Condiții de experimentare pentru stabilirea curbelor de variație

Testele experimentale au fost repetate de trei ori în aceleași condiții de aşchiere, pentru eliminarea valorilor aberante și stabilirea nivelului de încredere pe baza testului Grubbs, prezentat în lucrarea [ION'04] și detaliat în capitolul 4. Rezultatele obținute pentru parametrul statistic G, s-au comparat cu valorile critice, G_{critic} , date de literatura de specialitate [ION'04], pentru un coeficient de încredere $1-\alpha = 0.99$.

4.3.2. Modelarea matriceală Taguchi

În conformitate cu lucrarea [ION'04], stabilirea numărului de experimente din planul Taguchi necesită respectarea a două condiții: *regula ortogonalității*, conform căreia toate acțiunile disjuncte trebuie să fie ortogonale între ele; și *regula gradelor de libertate*, care impune că numărul minim de experiențe trebuie să fie cel puțin egal cu numărul de grade de libertate ale modelului studiat.

Din analiza stadiului actual, efectuată în primele capitole, a rezultat că principalii factori de influență sunt materialul prelucrat, regimul de aşchiere, tipul și geometria sculei și condițiile de aşchiere. În funcție de importanța lor, în cercetările efectuate în continuare s-au reținut doar factorii dați în tabelul 4.1., fiecare având câte două nivele de variație, pentru care s-a propus modelul 4.2.

$$Y \approx M + v + s + t + k + \text{Plăcuță} + \text{Mediu} + v \times s + v \times t + v \times \text{mediu} + s \times t \quad ;(4.2)$$

Nivele: 2 2 2 2 2 2x2 2x2 2x2 2x2
 Grade de 1 1 1 1 1 1 1 1 1
 libertate: $\Sigma = 11$

Tabelul 4.1 . Nivelele factorilor studiați.

Factori	v [m/min]	s [mm/min]	t [mm]	k [°]	Tip plăcuță	Mediu
Nivele	2	2	2	2	2	2
Valori	1	120	0.1	0,2	PcBN	Uscat
	2	253	0.28	0,4	CBN+TiN	MQL

Astfel, utilizând metoda planificării experimentelor Taguchi, numărul de experimente se reduce la 16 experiențe (2^4), față de planul factorial complet care necesită $2^6=64$ de experimente.

Tabelul 4.2. Condiția de ortogonalitate.

v 2	*									
s 2	2^2	*								
t 2	2^2	2^2	*							
k 2	2^2	2^2	2^2	*						
Plăcuță 2	2^2	2^2	2^2	2^2	*					
Mediu 2	2^2	2^2	2^2	2^2	2^2	*				
$v \times s$ 2^2	*	*	2^3	2^3	2^3	2^3	*			
$v \times t$ 2^2	*	2^3	*	2^3	2^3	2^3	*	*		
$v \times \text{mediu}$ 2^2	*	2^3	2^3	2^3	2^3	*	2^3	2^3	*	
$s \times t$ 2^2	2^3	*	*	2^3	2^3	2^3	*	*	2^4	*
	2	2	2	2	2	2	2^2	2^2	2^2	2^2
	v	s	t	k	Plăcuță	Mediu	$v \times s$	$v \times t$	$v \times \text{mediu}$	$s \times t$

Planul Taguchi experimental căutat, care satisface condițiile anterioare, este de tip L_{16} (2^4 – tabelele 4.3 și 4.4), cu graful liniar asociat prezentat în figura 4.8 [ION'04].

Tabel 4.3. Plan Taguchi $L_{16}(2^4)$, asociat modelului 4.4., cu interacțiuni.

Nr exp.	v	s	$v \times s$	t	$v \times t$	$s \times t$	k	Tip plăcuță	mediu	$v \times \text{mediu}$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1
5	1	2	2	1	1	2	1	2	1	1
6	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2
7	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2
8	1	2	2	2	2	1	2	1	1	1
9	2	1	2	1	2	1	1	1	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	2	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	2	1	2
14	2	2	1	1	2	2	2	1	2	1
15	2	2	1	2	1	1	1	2	2	1
16	2	2	1	2	1	1	2	1	1	2

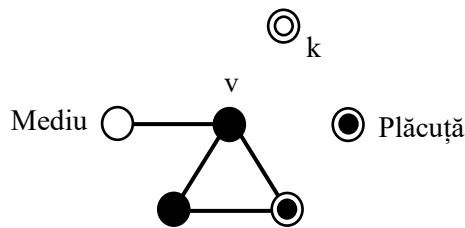


Fig. 4.8. Graful modelului.

Tabel 4.4. Plan Taguchi $L_{16}(2^4)$, asociat modelului 4.4., fără interacțiuni.

Nr exp.	v	s	t	k	Tip plăcuță	Mediu	Y
1	1	1	1	1	1	1	Y1
2	1	1	1	2	2	2	Y2
3	1	1	2	1	1	2	Y3
4	1	1	2	2	2	1	Y4
5	1	2	1	1	2	1	Y5
6	1	2	1	2	1	2	Y6
7	1	2	2	1	2	2	Y7
8	1	2	2	2	1	1	Y8
9	2	1	1	1	1	1	Y9
10	2	1	1	2	2	2	Y10
11	2	1	2	1	1	2	Y11
12	2	1	2	2	2	1	Y12
13	2	2	1	1	2	1	Y13
14	2	2	1	2	1	2	Y14
15	2	2	2	1	2	2	Y15
16	2	2	2	2	1	1	Y16

4.3.2.1. Prelucrarea datelor

Formele politropice ale ecuațiilor de regresie, asemănătoare celor utilizate și de alți autori pentru componentele F_x , F_y și F_z [TAN'15], determinate cu programul Minitab, se pot scrie și utilizând metodologia prezentată în bibliografia [ION'04], având forma generală dată de relația 4.14.

$$F = C \cdot v^{a_1} \cdot s^{a_2} \cdot t^{a_3} \cdot k^{a_4} \cdot p^{a_5} \cdot m^{a_6} \quad (4.14)$$

Analiza Variației / Importanța Factorilor

Programul Minitab oferă posibilitatea aplicării metodologiei ANOVA și a testului Fisher, analiză care permite ierarhizarea influenței factorilor pentru un nivel de semnificație (notat cu α), stabilit aprioric de cercetător, în funcție de interes. De obicei, în calculele ingineresti, acest nivel de semnificație se stabilește pentru un risc de maxim 5%. Când valoarea rezultată din testul Fisher (P-Value) este mai mică decât nivelul de semnificație înseamnă că factorul este semnificativ din punct de vedere statistic.

CAPITOLUL V

Cercetări experimentale privind influența principalilor factori asupra fenomenului de frecare la prelucrarea materialelor dure

Așa cum s-a precizat și în capitolele anterioare, asupra fenomenului de frecare la prelucrarea materialelor dure au influențe importante următorii factori: regimul de așchiere (v , s , t), geometria sculei, cuplul de materiale în contact și mediul de așchiere.

Aplicarea metodei de planificare a experimentelor Taguchi, prezentată în capitolul anterior, utilizată pentru a propune legi de dependență, impune cunoașterea variațiilor particulare pentru fiecare factor luat în considerare. În acest context, în acest capitol, se studiază influența factorilor menționați anterior asupra mărimii componentelor fizice ale forței de așchiere, la prelucrarea prin strunjire a oțelului dur (100Cr6), cu duritatea cuprinsă între 58÷62 HRC, utilizând metodologia prezentată în figura 5.1., întocmită pe baza programului de cercetare experimental, figura 4.1., prezentat în capitolele patru și cinci.

Valorile obținute experimental, sau prin calcul, cu modelul fizic propus în capitolul patru, sunt date în tabelul 5.1 și Anexele 7 și 8.

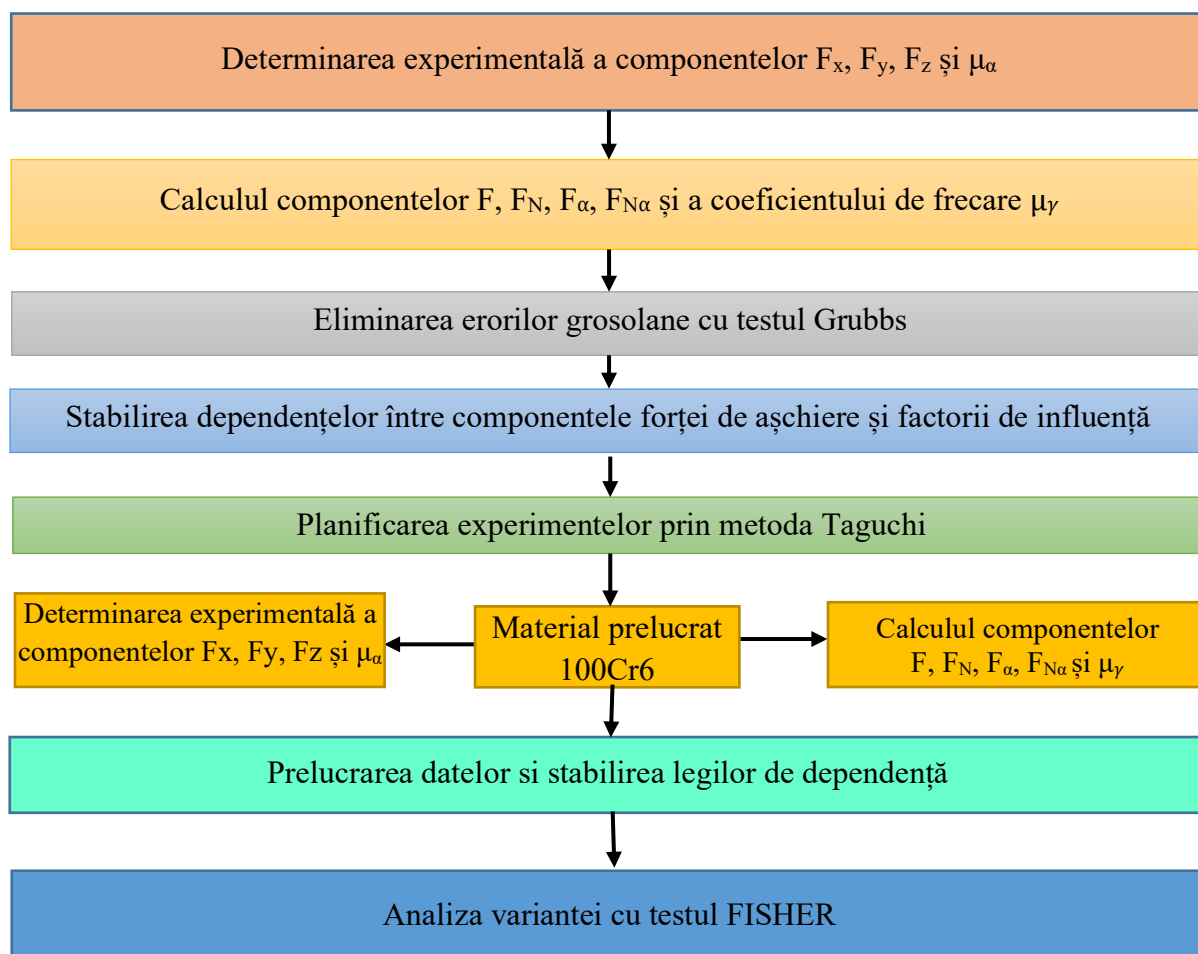


Fig. 5.1. Program experimental.

Tabel 5.1. Valorile experimentale și calculate pentru componentele forței de așchiere în funcție de principalii factori de influență.

Nr. crt.	Factori		Viteza de aşchiere			Avansul de prelucrare			Adâncimea de aşchiere			Unghiul de atac		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Material		100Cr6											
2	Diametrul, mm		60											
3	Turația, rot/min		630	1000	1250	1000								
4	Viteza, m/min		120	188	235	188								
5	Avans, mm/rot		0,1			0,1	0,18	0,28	0,1					
6	Adâncime, mm		0,2						0,2	0,3	0,4	0,2		
7	Geometrie sculă	Tip plăcuță	PcBN											
8		k, [°]	90									45	70	90
9		γ, [°]	-6											
10		α, [°]	6											
11		λ, [°]	-6											
12		r, [mm]	0,8											
13	Mediu de aşchiere		Uscat											
14	Valori măsurate experimental pentru trei teste executate în aceleaşi condiţii de lucru	F _x , [N]	63,3	55,55	48,04	55,55	55,2	58,32	55,55	95,79	132,8	67,64	61,968	55,55
			63,64	59,03	45,95	59,03	54,82	63,21	59,03	99,97	133,6	71,48	63,067	59,03
			58,7	56,26	49,25	56,26	58,43	64,94	56,26	97,92	136,4	65,68	62,09	56,26
15		F _y , [N]	237,1	206,3	163,9	206,3	213,9	248,9	206,3	282,9	332,6	267,80	220,1	206,3
			247,3	197,1	157,7	197,1	212,6	263,1	197,1	287,3	334,9	271,50	222,6	197,1
			232,7	209,3	159,98	209,3	216,8	266,7	209,3	283,5	337,4	265,10	226,2	209,3
16		F _z , [N]	113,2	99,735	92,68	99,735	134,9	183,4	99,735	147,8	184,4	116,85	115,3	99,735
			107,3	103,3	88,98	103,3	136,7	187,8	103,3	155,6	188,3	117,918	116,1	103,3
			103,7	102,7	89,93	109,7	143,6	190,5	109,7	154,5	193,4	114,35	115,8	109,7
17		μ _a	0,169	0,151	0,138	0,151	0,15	0,146	0,151	0,154	0,171	0,165	0,159	0,151
			0,177	0,158	0,135	0,158	0,151	0,141	0,158	0,155	0,165	0,173	0,161	0,158
			0,171	0,155	0,14	0,155	0,154	0,143	0,155	0,163	0,164	0,175	0,158	0,155
18	F, [N]	55,227	48,01	40,38	48,01	44,08	42,60	48,01	84,25	118,56	95,20	59,94	48,01	
		56,591	51,08	38,55	51,08	43,51	47,10	51,08	87,69	118,78	100,60	61,10	51,08	
		51,636	48,53	41,88	48,53	46,50	48,65	48,53	85,92	121,03	92,44	60,09	48,53	
19	F _N , [N]	81,075	75,50	76,12	75,50	110,23	155,44	75,50	115,97	143,75	96,90	92,65	75,50	
		71,393	79,55	73,47	79,55	112,01	159,57	79,55	123,27	149,36	97,05	92,86	79,55	
		71,221	77,31	73,70	77,31	118,13	161,47	77,31	120,42	154,75	92,21	92,39	77,31	
20	F _a , [N]	38,75	30,05	21,59	30,05	30,45	34,07	30,05	41,86	54,54	30,91	29,89	30,05	
		42,57	29,93	20,32	29,93	30,43	34,86	29,93	42,79	52,91	32,39	30,60	29,93	
		38,624	31,28	21,39	31,28	31,59	35,84	31,28	44,33	52,92	32,76	30,66	31,28	
21	F _{Na} , [N]	229,29	198,99	156,45	198,99	202,99	233,38	198,99	271,78	318,97	187,31	187,98	198,99	
		240,506	189,40	150,50	189,40	201,50	247,20	189,40	276,07	320,69	187,23	190,07	189,40	
		225,872	201,81	152,79	201,81	205,10	250,62	201,81	271,94	322,66	187,22	194,07	201,81	
22	μ _γ	0,681	0,64	0,53	0,64	0,40	0,27	0,64	0,71	0,83	0,98	0,65	0,64	
		0,793	0,64	0,53	0,64	0,39	0,30	0,64	0,73	0,80	1,04	0,66	0,64	
		0,725	0,63	0,57	0,63	0,39	0,30	0,63	0,71	0,78	1,00	0,65	0,63	

Tabel 5.1. Valorile experimentale și calculate pentru componentele forței de așchiere în funcție de principalii factori de influență (continuare).

Nr. crt.	Factori		Tipul plăcuței			Materialul prelucrat			Mediul de aşchiere		
			13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	Material		100Cr6			X210CR12	100Cr6	90MnCrV8	100Cr6		
2	Diametrul, mm					60					
3	Turația, rot/min		1250			1000					
4	Viteza, m/min		235			188					
5	Avans, mm/rot		0,1								
6	Adâncime, mm		0,2								
7	Geometrie sculă	Tip plăcuță	PcBN	CBN	CBN+PVD TiN	CBN					
8		k, [°]	90								
9		γ, [°]	-6								
10		α, [°]	6								
11		λ, [°]	-6								
12		r, [mm]	0,8								
13	Mediu de aşchiere		Uscat						Uscat	AC	MQL
14	Valori măsurate experimental pentru trei teste executate în aceleași condiții de lucru	F _x , [N]	48,04	40,07	47,86	88,37	55,55	59,56	55,55	65,81	109,10
			45,95	36,18	48,19	79,5	59,03	62,38	59,03	65,5	108,177
			49,25	44,7	49,07	82,29	56,26	62,59	56,554	61,45	106,4
15		F _y , [N]	163,9	162,4	145,3	220	206,3	195,4	206,3	243,9	277,92
			157,7	162,4	177,0	216,4	197,1	201	197,1	237,4	273,89
			159,98	161,86	191,7	218,1	209,3	206,9	202	247,198	280,3
16		F _z , [N]	92,68	87,91	100,3	151	99,735	111,1	99,735	109,8	161,714
			88,98	83,80	110,2	151,5	103,3	112,5	103,3	109,994	163,246
			89,93	88,03	109,7	147,9	109,7	113,3	93,395	109,76	162,629
17		μ _a	0,138	0,210	0,236	0,131	0,151	0,135	0,151	0,139	0,132
			0,135	0,216	0,230	0,142	0,158	0,138	0,158	0,144	0,133
			0,14	0,207	0,225	0,134	0,155	0,139	0,155	0,152	0,139
18	F, [N]	40,38	34,134	40,536	74,96	48,01	50,29	48,01	57,46	95,29	
		38,55	30,81	40,507	66,27	51,08	53,09	51,08	58,15	94,18	
		41,88	38,66	41,709	69,28	48,53	53,32	48,53	53,51	92,75	
19	F _N , [N]	76,12	59,195	72,719	133,13	75,50	92,17	75,50	84,00	138,19	
		73,47	53,606	76,275	130,91	79,55	92,53	79,55	83,90	139,93	
		73,70	60,429	73,321	128,97	77,31	92,34	77,31	79,79	136,63	
20	F _a , [N]	21,59	32,909	32,588	27,12	30,05	25,16	30,05	32,78	34,93	
		20,32	33,982	38,967	28,90	29,93	26,49	29,93	33,02	34,63	
		21,39	32,279	41,514	27,54	31,28	27,51	31,28	36,41	37,13	
21	F _{Na} , [N]	156,45	156,633	138,201	207,01	198,99	186,39	198,99	235,82	264,62	
		150,50	157,177	169,533	203,55	189,40	191,98	189,40	229,33	260,40	
		152,79	156,013	184,551	205,48	201,81	197,91	201,81	239,50	267,14	
22	μ _f	0,53	0,577	0,557	0,56	0,64	0,55	0,64	0,69	0,69	
		0,53	0,575	0,531	0,51	0,64	0,57	0,64	0,69	0,67	
		0,57	0,64	0,569	0,54	0,63	0,58	0,63	0,67	0,68	

5.1. Influența factorilor principali asupra componentelor forței de aşchiere la aşchiera materialelor dure

Urmărind etapele prezentate în figura 5.1, s-a procedat la verificarea erorilor grosolane folosind testul Grubbs, ulterior realizându-se curbele de variație, utilizând valorile obținute în tabelul 5.1. Alura curbelor de dependență a permis stabilirea tipului de variație (liniar sau neliniar) și, pe această bază, s-au stabilit nivele de variație ale fiecărui factor luat în studiu, în cadrul unui plan Taguchi, la care s-a aplicat în final analiza ANOVA (testul Fisher).

5.3. Rezultate și discuții. Concluzii

Similar capitoului 4, cercetările experimentale efectuate și rezultatele obținute, relativ la mărimea componentelor fizice a forțelor de aşchiere și a coeficientului de frecare au permis întocmirea tabelelor 5.141 și 5.142, unde s-au prezentat sensul și procentul lor de variație, care au permis formularea următoarelor concluzii:

a) Influența vitezei de aşchiere – asupra componentelor forței de aşchiere studiate, inclusiv a coeficienților de frecare pe suprafețele active, este similară ca la aşchiera prin metode clasice. Rezultatele experimentale obținute evidențiază o scădere a acestora la creșterea valorilor vitezei de lucru.

Forța de frecare pe suprafața de degajare, F , a înregistrat o scădere de până la 9% în primul domeniu de viteze, urmat de o scădere de 18%, în al doilea domeniu de viteze (figura 5.21, tabelul 5.141), în timp ce *forța normală pe suprafața de degajare, F_N* , are o ușoară tendință liniară de variație, înregistrând doar o scădere de 8% pe întreg domeniul de viteze analizat (figura 5.32, tabelul 5.141). *Coeficientul de frecare pe suprafața de degajare, μ_γ* , scade cu până la 20% pentru același domeniu de viteze (figura 5.65, tabelul 5.141). Pe suprafața de aşezare, componentele fizice studiate au înregistrat scăderi mai mari comparativ cu cele de pe suprafața de degajare. Pentru *forța de frecare pe suprafața de aşezare, F_α* , s-a înregistrat o scădere cu un procent de 62% (figura 5.43, tabelul 5.141), pentru *forța de normală pe suprafața de aşezare, $F_{N\alpha}$* , o scădere totală de 40% (figura 5.54, tabelul 5.141) iar pentru *coeficientul de frecare pe suprafața de aşezare, μ_α* , o diminuare de 22% (figura 5.76, tabelul 5.141).

b) Influența avansului de lucru asupra structurii fizice a forțelor de aşchiere, prezentată în figurile 5.22, 5.33, 5.44, 5.55, 5.66 și 5.77, evidențiază creșteri substanțiale aproape pentru toate componentele (de până la 105% pentru componenta F_N și 24% pentru $F_{N\alpha}$) cu excepția componentei de frecare pe suprafața de degajare, care înregistrează o scădere medie de 7%, contribuind la o variație de până la 54% a coeficienților de frecare.

c) Influența adâncimii de aşchiere, în cazul strunjirii oțelului 100Cr6, tratat termic, este evidențiată de rezultatele prezentate în figurile 5.23, 5.34, 5.45, 5.56, 5.67 și 5.78, de unde se observă că au loc creșteri importante: cu până la 143% pentru F , cu 93% F_N , cu 76% F_α și 63% $F_{N\alpha}$. Coeficienții de frecare au avut variații cuprinse între 13% și 26%, pentru μ_γ , respectiv între 2 și 8% pentru μ_α .

d) Influența unghiului de atac, a fost cercetată pentru unghiuri de atac principal, k , din intervalul $45^\circ \div 90^\circ$, și s-a constatat că, la valori crescătoare ale acestui unghi, componentele fizice ale forței de aşchiere scad pe suprafața de degajare și cresc pe suprafața de aşezare, la prelucrarea oțelului 100cr6.

Forța de frecare pe suprafața de degajare, F , înregistrează o scădere de 37%, pentru unghiuri de atac aparținând intervalului $[45^\circ, 70^\circ]$ și 18,5%, pe intervalul $[70^\circ, 90^\circ]$, figura 5.24. *Forța normală pe suprafața de degajare, F_N* , înregistrează o scădere medie de 19%, figura 5.35. iar *coeficientul de frecare, μ_γ* , scade în medie cu 37%, figura 5.68.

e) Influența cuplului de materiale în contact. Se observă că valorile mari ale componentelor fizice se obțin în cazul utilizării plăcuțelor din CBN acoperite PVD cu nitru de titan (TiN), figurile 5.25., 5.36, 5.47, 5.58, 5.69. 5.80.

f) Influența mediului de aşchiere, la prelucrarea materialelor dure, față de aşchiera obișnuită, componentele fizice ale forței de aşchiere și coeficienții de frecare, de pe interfețele de contact, cresc la utilizarea mediilor de aşchiere.

Astfel, *forța de frecare*, F , prezintă cele mai mari valori în cazul utilizării mediului de aşchiere MQL, când se înregistrează o creștere de 91%, răcirea cu aer comprimat, când creșterea este doar de 15%. Cele mai mici valori corespund aşchierii uscate, figura 5.27. *Forța normală*, F_N , crește cu 78% pentru mediul MQL și doar cu 7% în cazul răcirii cu aer comprimat, figura 5.38.

Pe suprafața de aşezare, *componentele* F_a și F_{Na} prezintă variații similare cu cele obținute pentru suprafața de degajare, F și F_N , figurile 5.49 și 5.60. Valorile mici ale componentei F_a , s-au obținut la aşchiera uscată, iar în cazul utilizării celorlalte două medii de răcire valori mărite cu 12% , în cazul aerului comprimat, și 17%, în mediul MQL. Forța normală, F_{Na} , crește cu 34% în cazul răcirii cu MQL față de aşchiera uscată.

Coeficientul de frecare, μ , variază diferit pe suprafețele de contact: pe suprafața de degajare înregistrând o creștere de aproximativ 8% pentru mediul MQL și 7%, la utilizarea aerului comprimat, iar *coeficientul de frecare*, μ_a , scade în medie cu 13% pentru MQL respectiv 6% în cazul aerului comprimat, figurile 5.71 și 5.82.

Variațiile diferite a componentelor fizice funcție de mediul de aşchiere, la prelucrarea materialelor dure comparativ cu aşchiera clasică, pot fi explicate prin prezența sau absența fenomenului de „înmuiere termică” datorată încălzirii sau răcirii materialului prelucrat.

Concluzii

- Variația componentelor F_x , F_y și F_z , în cazul aşchierii materialelor dure, în ceea ce privește variațiile legate de regimul de lucru (v , s , t), este asemănătoare cu variațiile observate și de către alți autori din literatura de specialitate. Aceleași tendințe au fost observate și în cadrul acestei lucrări, în capitolul 4, unde s-au verificat tendințele obținute la aşchiera oțelului C45.

- Conform rezultatelor găsite în literatura de specialitate, se poate observa că, în cazul variațiilor componentelor de aşchiere în raport cu mediul de aşchiere, valorile obținute au fost mai mari atunci când s-au utilizat medii de aşchiere diferite de mediul uscat. Acest fenomen a fost observat atât în cazul stabilirii legilor de variație (tabelele 5.2÷5.8, și figurile 5.2÷5.8), cât și la planificarea experimentală Taguchi (tabelele 5.9, 5.19, 5.29 și figurile 5.9, 5.13 și 5.17).

- Analiza varianței a evidențiat că cei mai semnificativi factori au fost parametrii regimului de aşchiere (s și t), acestea având contribuții de peste 30% asupra variației componentelor. Contrar altor rezultate găsite în literatura de specialitate privind variația acestor componente la aşchiera materialelor clasice, factorul viteză de aşchiere a avut o contribuție nesemnificativă, aceasta nedepășind 1%. Ceilalți factori luați în considerare au avut contribuții cuprinse între 5 și 20%.

- Rezultatele obținute în urma determinărilor experimentale confirmă rezultatele găsite în literatura de specialitate și evidențiază că, față de aşchiera materialelor mai moi, componenta dominantă este cea pe direcție transversală, F_y .

- Variațiile componentelor de frecare și de deformare plastică, F , F_N , F_a și F_{Na} , sunt asemănătoare cu cele obținute în cazul cercetărilor făcute asupra oțelului carbon C45, din capitolul 4. La fel ca și în cazul componentelor F_x , F_y și F_z , factorul viteză de aşchiere s-a prezentat a fi nesemnificativ, influențele cele mai mari avându-le factorii regimului de aşchiere: avansul de lucru și adâncimea de aşchiere.

- Comparativ cu rezultatele obținute pentru componentele F_x , F_y și F_z , în cazul componentelor F , F_N , F_a și F_{Na} , unul dintre factorii cu o contribuție semnificativă este și unghiul de atac, unde acesta a guvernat o tendință descrescătoare pentru componentele de pe suprafața

de degajare (figurile 5.24 și 5.35) și o tendință crescătoare pentru componentele de pe suprafața de aşezare (figurile 5.46 și 5.57).

- În ceea ce privește mediul de aşchiere, valorile componentelor determinate experimental cât și a celor calculate analitic folosind metodologia prezentată în capitolul 4, au prezentat creșteri semnificative atunci când s-au utilizat medii de aşchiere diferite de cel uscat.

- Deși coeficientul de frecare de pe suprafața de aşezare, μ_α , determinat experimental, a prezentat variații descrescătoare în medii de aşchiere diferite de uscat, coeficientul de frecare pe suprafața de degajare, μ_γ , a avut același comportament precum componentele F , F_N , F_α și $F_{N\alpha}$.

- S-au stabilit o serie de relații politropice de dependență pentru fiecare componentă în parte, în care s-au luat în considerare toți factorii de influență importanți, toate prezentând o eroare medie de sub 5%. Având în vedere aceste constatări putem trage concluzia că se pot utiliza modelele politropice propus pentru studierea forțelor de deformare plastică, de frecare și a coeficienților de frecare la aşchiere cu o precizie suficient de bună pentru cazul aşchierii oțelului 100Cr6.

- valorile obținute experimental pentru coeficientul de frecare pe suprafața de aşezare μ_α , sunt cuprinse în plaja $0.1 \div 0.3$, fapt ce confirmă rezultatele regăsite în literatura de specialitate obținute de König [KON'93] și Milutovik [MIL'16], pentru materiale dure, și diverși autori [AMA'95, REC'08, BAN'14, REC'13, GRZ'13, GRZ'13-2, GRZ'14], pentru cupluri de materiale diferite, la viteze de aşchiere din gama utilizată în cadrul acestui capitol, ridicând astfel gradul de încredere privind corectitudinea rezultatelor obținute.

CAPITOLUL VI

Cercetări experimentale privind influența fenomenului de frecare asupra calității suprafețelor, temperaturii și geometriei așchiilor

Fenomenul de frecare, conform stadiului actual, prezentat în capitolul 1, are implicații directe asupra condițiilor calitative impuse procesului de prelucrare prin așchiere, precum calitatea suprafețelor, forma așchiilor, uzura sculelor și precizia dimensională datorată fenomenului termic.

În acest sens, în acest capitol, urmând programul de cercetare propus în figura 6.1, s-a realizat analiza influenței fenomenului termic asupra procesului de așchiere a oțelurilor dure. Aparatura și metodologia de investigare utilizată a fost prezentată în capitolul 5, iar parametrii de desfășurare a procesului de așchiere au fost cei stabiliți în testele experimentale descrise în tabelul 6.1.

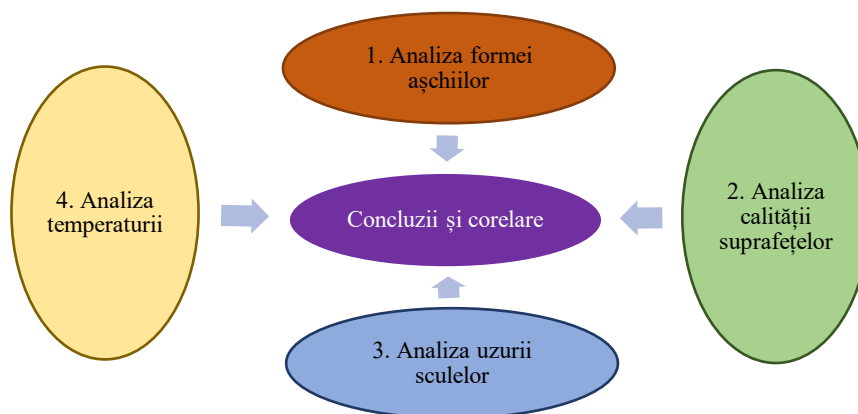
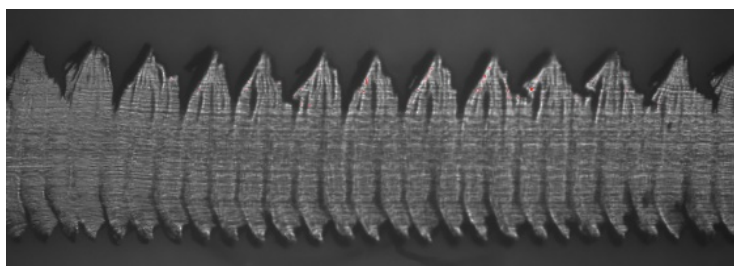


Fig. 6.1. Program de cercetare

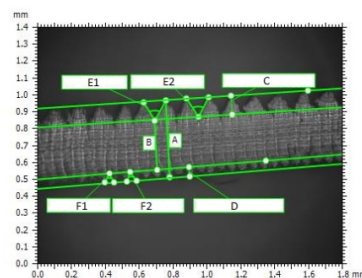
6.1. Cercetări privind forma așchiilor la așchieria materialelor dure

Subiectul formei așchiilor rezultate de la prelucrarea materialelor dure a fost o preocupare constantă pe parcursul derulării programelor experimentale din această lucrare, dar și în alte lucrări publicate de autor pe parcurs [TAM'20].

Imaginile despre forma așchiilor rezultate în urma determinărilor experimentale au fost prelevate cu microscopul Optika și se găsesc în tabelul 6.1. Concomitent, utilizând posibilitățile de investigare ale microscopului Mahr CWM100, s-au putut efectua analize privind forma și dimensiunile așchiilor degajate la prelucrare, figura 6.2.a. Prelucrarea informațiilor obținute s-a realizat cu programul Mountainslab 7 instalat pe PC-ul microscopului, figura 6.2.b., și s-a putut constata și evalua forma și dimensiunile așchiilor specifice prelucrării materialelor dure.



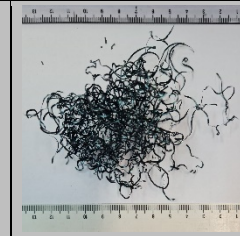
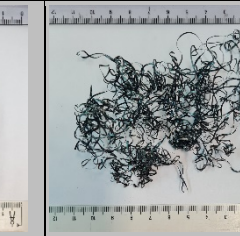
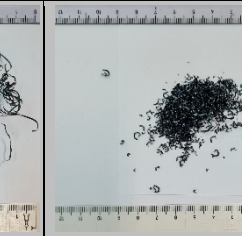
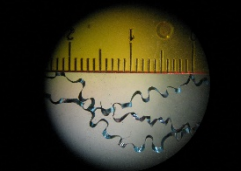
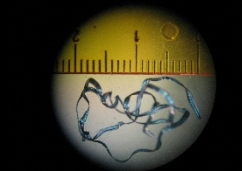
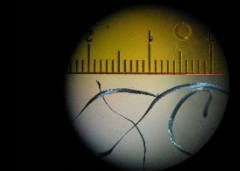
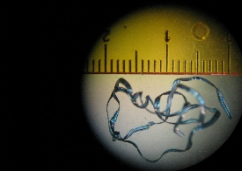
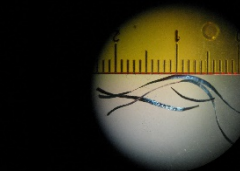
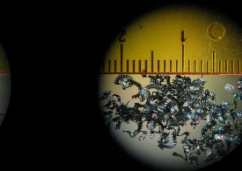
a.



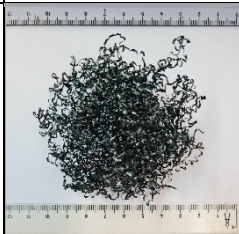
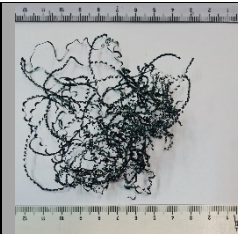
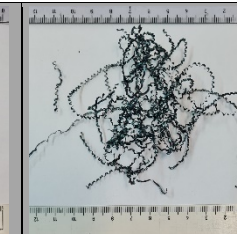
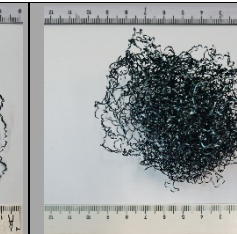
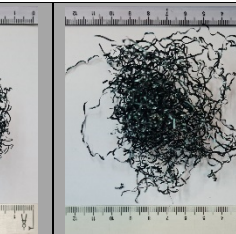
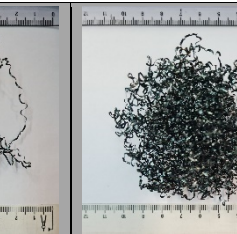
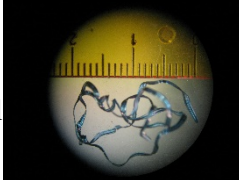
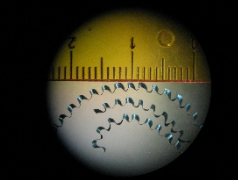
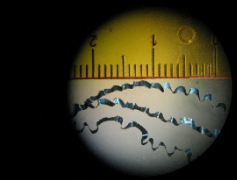
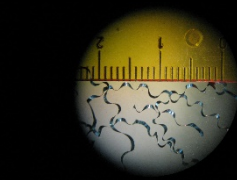
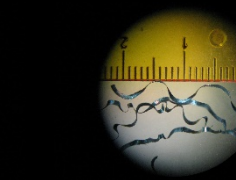
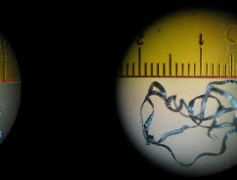
b.

Fig. 6.2. Analiza așchiilor rezultate.

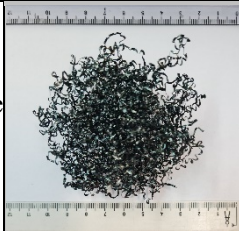
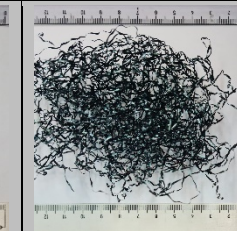
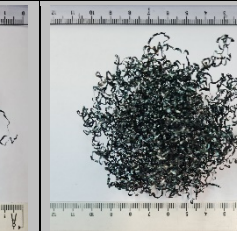
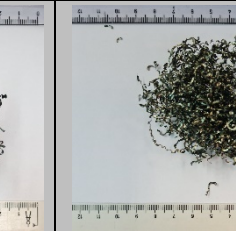
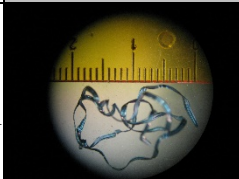
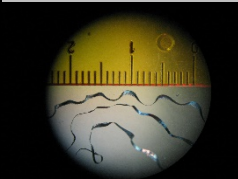
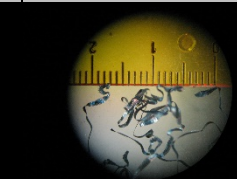
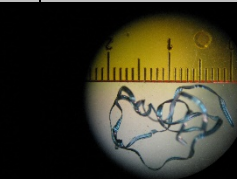
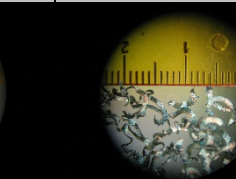
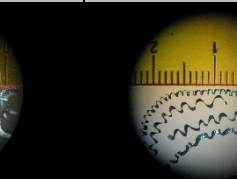
Tabel 6.1. Forma așchiilor rezultate la prelucrarea materialelor dure.

Nr. crt.	Factori		Viteza			Avans		
			1	2	3	4	5	6
1	Material		100Cr6					
2	Diametrul, mm		60					
3	Turația, rot/min		630	1000	1250	1000		
4	Viteza, m/min		120	188	235	188		
5	Avans, mm/rot		0,1			0,1	0,18	0,28
6	Adâncime, mm		0,2					
7	Geometrie sculă	Tip plăcuță	CBN					
8		k, [°]	90					
9		γ , [°]	-6					
10		α , [°]	6					
11		λ , [°]	-6					
12		r, [mm]	0,8					
13	Mediu de așchiere		Uscat					
15	Așchii	Imagini de ansamblu						
		Imagini realizate cu microscopul Optica.						

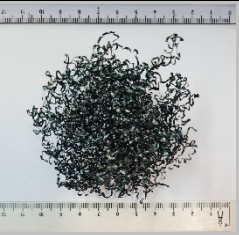
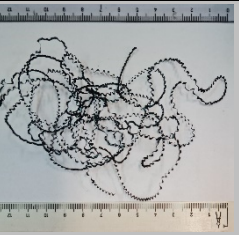
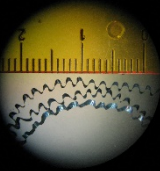
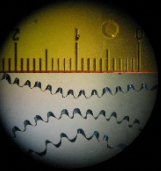
Tabel 6.1. Forma așchiilor rezultate la prelucrarea materialelor dure (continuare).

Nr. crt.	Factori		Adâncime			Unghi de atac		
			7	8	9	10	11	12
1	Material							
2	Diametrul, mm		C120					
3	Turația, rot/min		1000					
4	Viteza, m/min		188					
5	Avans, mm/rot		0,1					
6	Adâncime, mm		0,2	0,3	0,4	0,2		
7	Geometrie sculă	Tip plăcuță	CBN					
8		k, [°]	90			45	70	90
9		γ , [°]	-6					
10		α , [°]	6					
11		λ , [°]	-6					
12		r, [mm]	0,8					
13	Mediu de aşchiere		Uscat					
15	Aşchii	Imagine de ansamblu						
		Imagini realizate cu microscopul Optica						

Tabel 6.1. Forma așchiilor rezultate la prelucrarea materialelor dure (continuare).

Nr. crt.	Factori	Material plăcuță			Material prelucrat			
		13	14	15	16	17	18	
1	Material	100Cr6			100Cr6	C120	90MnCrV8	
2	Diametrul, mm	60						
3	Turația, rot/min	1250			1000			
4	Viteza, m/min	235			188			
5	Avans, mm/rot	0,1						
6	Adâncime, mm	0,2						
7	Geometri	Tip plăcuță	PcBN	CBN	CBN+PVD TiN	PcBN		
8	e sculă	k, [°]	90					
9		γ , [°]	-6					
10		α , [°]	6					
11		λ , [°]	-6					
12		r, [mm]	0,8					
13	Mediu de aşchiere	Uscat						
15	Aşchii	Imagine de ansamblu						
		Imagini realizate cu microscopul Optica						

Tabel 6.1. . Forma așchiilor rezultate la prelucrarea materialelor dure (continuare)

Nr. crt.	Factori		Material plăcuță		
			19	20	21
1	Material		100Cr6		
2	Diametrul, mm		60		
3	Turația, rot/min		1000		
4	Viteza, m/min		188		
5	Avans, mm/rot		0,1		
6	Adâncime, mm		0,2		
7	Geometrie	Tip plăcuță	CBN		
8	sculă	k, [°]	90		
9		γ , [°]	-6		
10		α , [°]	6		
11		λ , [°]	-6		
12		r, [mm]	0,8		
14	Mediu de așchiere		Uscat	Aer Comprimat	MQL
15	Așchii	Imagine de ansamblu			
		Imagini realizate cu microscopul Optica			

6.2. Cercetări privind calitatea suprafețelor la așchiera materialelor dure

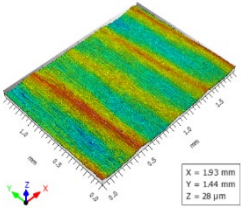
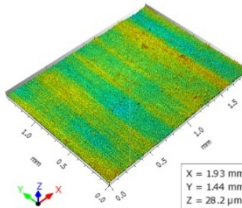
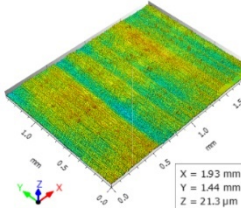
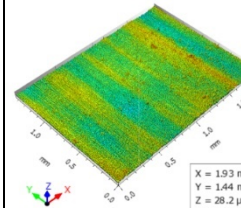
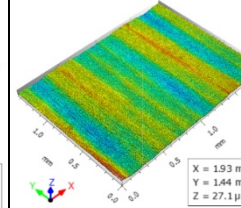
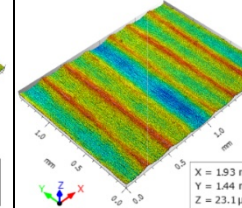
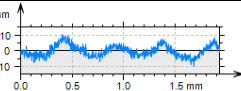
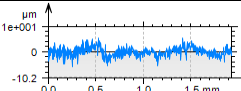
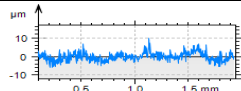
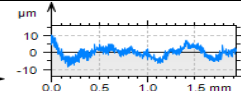
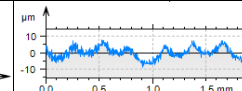
Cercetările sunt numeroase, în ceea ce privește analiza calității suprafețelor prelucrate, literatura de specialitate oferind o multitudine de informații legate de acest aspect [ROU'10, DHA'07, KHI'10, KAD'09, SAN'08], inclusiv studiul calității suprafețelor prelucrate prin procedeul HPM [AOU'12, CHA'10, DER'09].

Concluzia unanimă, rezultată din analiza literaturii de specialitate, este că asupra variației rugozității, au influență majoră aceeași factori care determină și fenomenele termice și de frecare. Principalii parametri de influență rămân viteza, avansul și adâncimea de lucru, iar dintre aceștia o influență mai mare o are avansul, aspect datorat faptului că odată cu creșterea valorilor lui se modifică și structura fizică a forțelor de așchiere.

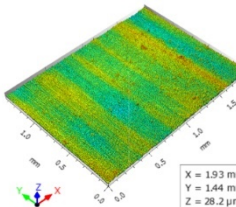
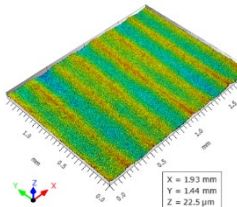
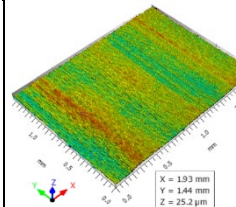
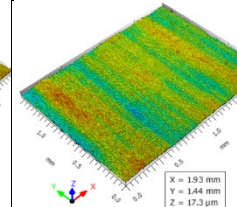
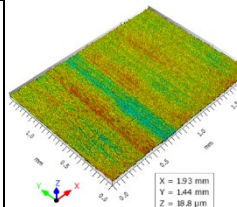
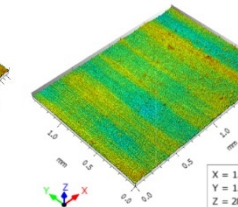
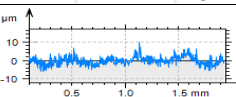
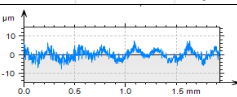
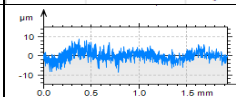
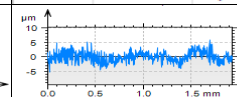
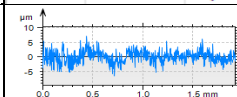
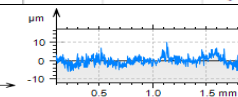
La creșterea durtății materialului prelucrat, asistăm la o îmbunătățire datorită tendinței de rupere a așchiilor în zona fragilă.

Informațiile privind implicațiile fenomenului de frecare care însoțește procesul de așchiere a materialelor dure asupra calității suprafețelor sunt puține și din acest motiv, în acest subcapitol, pentru testele experimentale de prelucrare, efectuate în capitolele anterioare, se procedează și la analiza calității suprafețelor rezultate (tabelul 6.2)..

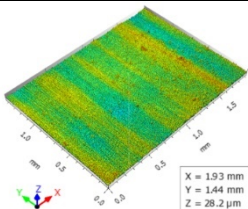
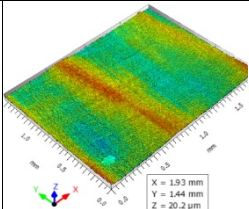
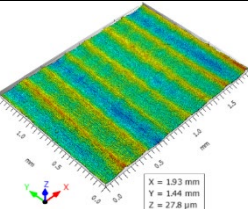
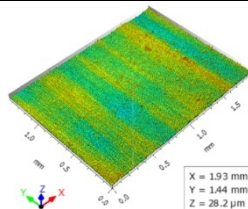
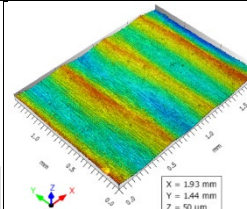
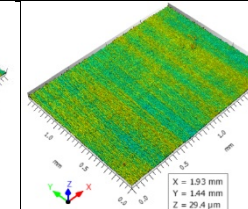
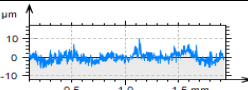
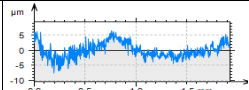
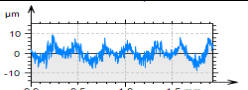
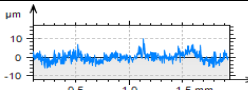
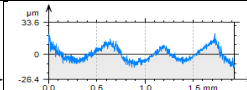
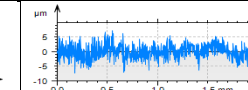
Tabel 6.2. Rugozitatea suprafețelor prelucrate

Nr. crt.	Factori		Viteza			Avans		
			1	2	3	4	5	6
1	Material		100Cr6					
2	Diametrul, mm		60					
3	Turația, rot/min		630	1000	1250	1000		
4	Viteza, m/min		120	188	235	188		
5	Avans, mm/rot		0,1			0,1	0,18	0,28
6	Adâncime, mm		0,2					
7	Geometrie sculă	Tip plăcuță	CBN					
8		k [°]	90					
9		γ [°]	-6					
10		α [°]	6					
11		λ [°]	-6					
12		r [mm]	0,8					
13	Mediu de așchiere		Uscat					
14	Calitatea suprafețelor (analizată cu microscopul MAHR CWM 100)	Profil 3D						
		Valoare Sq [μm]	ISO 25178 Sq 3.71 μm	ISO 25178 Sq 2.27 μm	ISO 25178 Sq 1.92 μm	ISO 25178 Sq 2.27 μm	ISO 25178 Sq 3.10 μm	ISO 25178 Sq 3.27 μm
		Valoare Sp [μm]	Sp 15.1 μm	Sp 15.7 μm	Sp 11.2 μm	Sp 15.7 μm	Sp 15.2 μm	Sp 11.7 μm
		Valoare Sz [μm]	Sz 28.0 μm	Sz 28.2 μm	Sz 21.3 μm	Sz 28.2 μm	Sz 27.1 μm	Sz 23.1 μm
		Profil Ra						
		Valoare Ra [μm]	ISO 4287 Rz 14.8 μm	ISO 4287 Rz 13.5 μm	ISO 4287 Rz 10.5 μm	ISO 4287 Rz 13.5 μm	ISO 4287 Rz 10.0 μm	ISO 4287 Rz 13.2 μm
			Rt 14.8 μm	Rt 13.8 μm	Rt 10.5 μm	Rt 13.8 μm	Rt 10.5 μm	Rt 13.2 μm
			Ra 2.44 μm	Ra 1.50 μm	Ra 1.33 μm	Ra 1.50 μm	Ra 1.52 μm	Ra 2.33 μm
			Rq 2.94 μm	Rq 2.01 μm	Rq 1.70 μm	Rq 2.01 μm	Rq 1.92 μm	Rq 2.77 μm

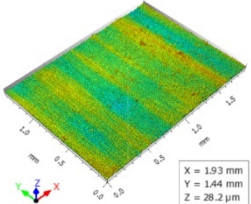
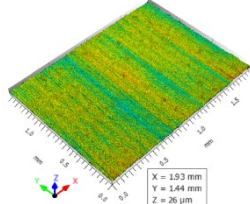
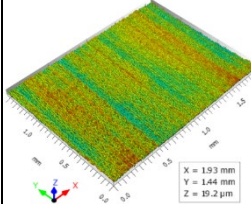
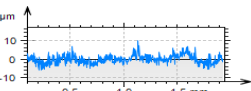
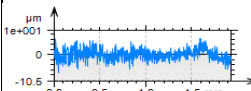
Tabel 6.2. Rugozitatea suprafețelor prelucrate

Nr. crt.	Factori		Adâncime			Unghi de atac				
			7	8	9	10	11	12		
1	Material									
2	Diametrul, mm		C120							
3	Turația, rot/min		1000							
4	Viteza, m/min		188							
5	Avans, mm/rot		0,1							
6	Adâncime, mm		0,2	0,3	0,4	0,2				
7	Geometrie sculă	Tip plăcuță	CBN							
8		k [°]	90			45	70	90		
9		γ [°]	-6							
10		α [°]	6							
11		λ [°]	-6							
12		r [mm]	0,8							
13	Mediu de aşchiere		Uscat							
14	Calitatea suprafeţelor (analizată cu microscopul MAHR CWM 100)	Profil 3D								
		Valoare Sq [µm]	ISO 25178		ISO 25178		ISO 25178		ISO 25178	
			Sq	2.27 µm	Sq	2.57 µm	Sq	2.77 µm	Sq	1.85 µm
			Sp	15.7 µm	Sp	12.2 µm	Sp	12.9 µm	Sp	9.00 µm
			Sz	28.2 µm	Sz	22.5 µm	Sz	25.2 µm	Sz	17.3 µm
			Sa	1.77 µm	Sa	2.09 µm	Sa	2.15 µm	Sa	1.46 µm
		Profil Ra								
		Valoare Ra [µm]	ISO 4287		ISO 4287		ISO 4287		ISO 4287	
			Rz	13.5 µm	Rz	12.0 µm	Rz	15.8 µm	Rz	9.24 µm
			Rt	13.8 µm	Rt	12.3 µm	Rt	15.9 µm	Rt	9.39 µm
			Ra	1.50 µm	Ra	1.85 µm	Ra	1.92 µm	Ra	1.19 µm
			Rq	2.01 µm	Rq	2.31 µm	Rq	2.46 µm	Rq	1.50 µm

Tabel 6.2. Rugozitatea suprafețelor prelucrate

Nr. crt.	Factori		Material plăcuță			Material prelucrat																																																																																												
			13	14	15	16	17	18																																																																																										
1	Material		60			100Cr6	C120	90MnCrV8																																																																																										
2	Diametrul, mm		60																																																																																															
3	Turația, rot/min		1250			1000																																																																																												
4	Viteza, m/min		235			188																																																																																												
5	Avans, mm/rot		0,1																																																																																															
6	Adâncime, mm		0,2																																																																																															
7	Geometrie sculă	Tip plăcuță	PcBN	CBN	CBN+PVD TiN	PcBN																																																																																												
8		k [°]	90																																																																																															
9		γ [°]	-6																																																																																															
10		α [°]	6																																																																																															
11		λ [°]	-6																																																																																															
12		r [mm]	0,8																																																																																															
13	Mediu de aşchiere		Uscat																																																																																															
14	Calitatea suprafețelor (analizată cu microscopul MAHR CWM 100)	Profil 3D																																																																																																
		Valoare Sq [μm]	<table><tr><th colspan="3">ISO 25178</th></tr><tr><td>Sq</td><td>2.27</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sp</td><td>15.7</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sz</td><td>28.2</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>1.77</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 25178			Sq	2.27	μm	Sp	15.7	μm	Sz	28.2	μm	Sa	1.77	μm	<table><tr><th colspan="3">ISO 25178</th></tr><tr><td>Sq</td><td>2.32</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sp</td><td>10.9</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sz</td><td>20.2</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>1.84</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 25178			Sq	2.32	μm	Sp	10.9	μm	Sz	20.2	μm	Sa	1.84	μm	<table><tr><th colspan="3">ISO 25178</th></tr><tr><td>Sq</td><td>3.11</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sp</td><td>16.6</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sz</td><td>27.8</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>2.50</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 25178			Sq	3.11	μm	Sp	16.6	μm	Sz	27.8	μm	Sa	2.50	μm	<table><tr><th colspan="3">ISO 25178</th></tr><tr><td>Sq</td><td>2.27</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sp</td><td>15.7</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sz</td><td>28.2</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>1.77</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 25178			Sq	2.27	μm	Sp	15.7	μm	Sz	28.2	μm	Sa	1.77	μm	<table><tr><th colspan="3">ISO 25178</th></tr><tr><td>Sq</td><td>6.89</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sp</td><td>27.7</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sz</td><td>50.0</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>5.75</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 25178			Sq	6.89	μm	Sp	27.7	μm	Sz	50.0	μm	Sa	5.75	μm	<table><tr><th colspan="3">ISO 25178</th></tr><tr><td>Sq</td><td>2.52</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sp</td><td>16.5</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sz</td><td>29.4</td><td>μm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>1.99</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 25178			Sq	2.52	μm	Sp	16.5	μm	Sz	29.4	μm	Sa	1.99	μm
		ISO 25178																																																																																																
		Sq	2.27	μm																																																																																														
Sp	15.7	μm																																																																																																
Sz	28.2	μm																																																																																																
Sa	1.77	μm																																																																																																
ISO 25178																																																																																																		
Sq	2.32	μm																																																																																																
Sp	10.9	μm																																																																																																
Sz	20.2	μm																																																																																																
Sa	1.84	μm																																																																																																
ISO 25178																																																																																																		
Sq	3.11	μm																																																																																																
Sp	16.6	μm																																																																																																
Sz	27.8	μm																																																																																																
Sa	2.50	μm																																																																																																
ISO 25178																																																																																																		
Sq	2.27	μm																																																																																																
Sp	15.7	μm																																																																																																
Sz	28.2	μm																																																																																																
Sa	1.77	μm																																																																																																
ISO 25178																																																																																																		
Sq	6.89	μm																																																																																																
Sp	27.7	μm																																																																																																
Sz	50.0	μm																																																																																																
Sa	5.75	μm																																																																																																
ISO 25178																																																																																																		
Sq	2.52	μm																																																																																																
Sp	16.5	μm																																																																																																
Sz	29.4	μm																																																																																																
Sa	1.99	μm																																																																																																
Profil Ra																																																																																																		
Valoare Ra [μm]	<table><tr><th colspan="3">ISO 4287</th></tr><tr><td>Rz</td><td>13.5</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rt</td><td>13.8</td><td>μm</td></tr><tr><td>Ra</td><td>1.50</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rq</td><td>2.01</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 4287			Rz	13.5	μm	Rt	13.8	μm	Ra	1.50	μm	Rq	2.01	μm	<table><tr><th colspan="3">ISO 4287</th></tr><tr><td>Rz</td><td>8.71</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rt</td><td>8.71</td><td>μm</td></tr><tr><td>Ra</td><td>1.30</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rq</td><td>1.62</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 4287			Rz	8.71	μm	Rt	8.71	μm	Ra	1.30	μm	Rq	1.62	μm	<table><tr><th colspan="3">ISO 4287</th></tr><tr><td>Rz</td><td>15.5</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rt</td><td>15.7</td><td>μm</td></tr><tr><td>Ra</td><td>2.22</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rq</td><td>2.74</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 4287			Rz	15.5	μm	Rt	15.7	μm	Ra	2.22	μm	Rq	2.74	μm	<table><tr><th colspan="3">ISO 4287</th></tr><tr><td>Rz</td><td>13.5</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rt</td><td>13.8</td><td>μm</td></tr><tr><td>Ra</td><td>1.50</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rq</td><td>2.01</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 4287			Rz	13.5	μm	Rt	13.8	μm	Ra	1.50	μm	Rq	2.01	μm	<table><tr><th colspan="3">ISO 4287</th></tr><tr><td>Rz</td><td>23.5</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rt</td><td>23.5</td><td>μm</td></tr><tr><td>Ra</td><td>4.23</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rq</td><td>5.08</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 4287			Rz	23.5	μm	Rt	23.5	μm	Ra	4.23	μm	Rq	5.08	μm	<table><tr><th colspan="3">ISO 4287</th></tr><tr><td>Rz</td><td>14.1</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rt</td><td>14.2</td><td>μm</td></tr><tr><td>Ra</td><td>1.82</td><td>μm</td></tr><tr><td>Rq</td><td>2.33</td><td>μm</td></tr></table>	ISO 4287			Rz	14.1	μm	Rt	14.2	μm	Ra	1.82	μm	Rq	2.33	μm		
ISO 4287																																																																																																		
Rz	13.5	μm																																																																																																
Rt	13.8	μm																																																																																																
Ra	1.50	μm																																																																																																
Rq	2.01	μm																																																																																																
ISO 4287																																																																																																		
Rz	8.71	μm																																																																																																
Rt	8.71	μm																																																																																																
Ra	1.30	μm																																																																																																
Rq	1.62	μm																																																																																																
ISO 4287																																																																																																		
Rz	15.5	μm																																																																																																
Rt	15.7	μm																																																																																																
Ra	2.22	μm																																																																																																
Rq	2.74	μm																																																																																																
ISO 4287																																																																																																		
Rz	13.5	μm																																																																																																
Rt	13.8	μm																																																																																																
Ra	1.50	μm																																																																																																
Rq	2.01	μm																																																																																																
ISO 4287																																																																																																		
Rz	23.5	μm																																																																																																
Rt	23.5	μm																																																																																																
Ra	4.23	μm																																																																																																
Rq	5.08	μm																																																																																																
ISO 4287																																																																																																		
Rz	14.1	μm																																																																																																
Rt	14.2	μm																																																																																																
Ra	1.82	μm																																																																																																
Rq	2.33	μm																																																																																																

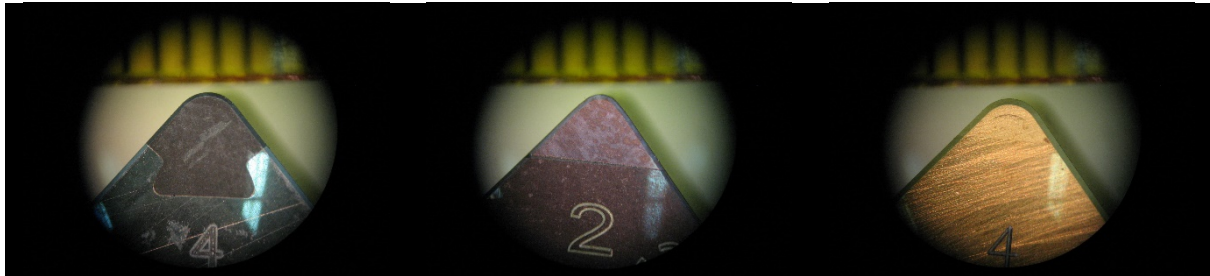
Tabel 6.2. Rugozitatea suprafețelor prelucrate.

Nr. crt.	Factori		Material plăcuță																																															
			19	20	21																																													
1	Material		100Cr6																																															
2	Diametrul, mm		60																																															
3	Turația, rot/min		1000																																															
4	Viteza, m/min		188																																															
5	Avans, mm/rot		0,1																																															
6	Adâncime, mm		0,2																																															
7	Geometrie	Tip plăcuță	CBN																																															
8	sculă	k [°]	90																																															
9		γ [°]	-6																																															
10		α [°]	6																																															
11		λ [°]	-6																																															
12		r [mm]	0,8																																															
13	Mediu de aşchiere		Uscat	Aer Comprimat	MQL																																													
14	Calitatea suprafeţelor (analizată cu microscopul MAHR CWM 100)	Profil 3D																																																
		Valoare Sq [µm]	<table><tr><th colspan="3">ISO 25178</th></tr><tr><td>Sq</td><td>2.27</td><td>µm</td></tr><tr><td>Sp</td><td>15.7</td><td>µm</td></tr><tr><td>Sz</td><td>28.2</td><td>µm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>1.77</td><td>µm</td></tr></table>	ISO 25178			Sq	2.27	µm	Sp	15.7	µm	Sz	28.2	µm	Sa	1.77	µm	<table><tr><th colspan="3">ISO 25178</th></tr><tr><td>Sq</td><td>2.16</td><td>µm</td></tr><tr><td>Sp</td><td>13.5</td><td>µm</td></tr><tr><td>Sz</td><td>26.0</td><td>µm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>1.67</td><td>µm</td></tr></table>	ISO 25178			Sq	2.16	µm	Sp	13.5	µm	Sz	26.0	µm	Sa	1.67	µm	<table><tr><th colspan="3">ISO 25178</th></tr><tr><td>Sq</td><td>2.20</td><td>µm</td></tr><tr><td>Sp</td><td>9.74</td><td>µm</td></tr><tr><td>Sz</td><td>19.2</td><td>µm</td></tr><tr><td>Sa</td><td>1.75</td><td>µm</td></tr></table>	ISO 25178			Sq	2.20	µm	Sp	9.74	µm	Sz	19.2	µm	Sa	1.75	µm
		ISO 25178																																																
		Sq	2.27	µm																																														
Sp	15.7	µm																																																
Sz	28.2	µm																																																
Sa	1.77	µm																																																
ISO 25178																																																		
Sq	2.16	µm																																																
Sp	13.5	µm																																																
Sz	26.0	µm																																																
Sa	1.67	µm																																																
ISO 25178																																																		
Sq	2.20	µm																																																
Sp	9.74	µm																																																
Sz	19.2	µm																																																
Sa	1.75	µm																																																
Profil Ra																																																		
Valoare Ra [µm]	<table><tr><th colspan="3">ISO 4287</th></tr><tr><td>Rz</td><td>13.5</td><td>µm</td></tr><tr><td>Rt</td><td>13.8</td><td>µm</td></tr><tr><td>Ra</td><td>1.50</td><td>µm</td></tr><tr><td>Rq</td><td>2.01</td><td>µm</td></tr></table>	ISO 4287			Rz	13.5	µm	Rt	13.8	µm	Ra	1.50	µm	Rq	2.01	µm	<table><tr><th colspan="3">ISO 4287</th></tr><tr><td>Rz</td><td>14.8</td><td>µm</td></tr><tr><td>Rt</td><td>14.8</td><td>µm</td></tr><tr><td>Ra</td><td>1.59</td><td>µm</td></tr><tr><td>Rq</td><td>2.04</td><td>µm</td></tr></table>	ISO 4287			Rz	14.8	µm	Rt	14.8	µm	Ra	1.59	µm	Rq	2.04	µm	<table><tr><th colspan="3">ISO 4287</th></tr><tr><td>Rz</td><td>10.9</td><td>µm</td></tr><tr><td>Rt</td><td>10.9</td><td>µm</td></tr><tr><td>Ra</td><td>1.55</td><td>µm</td></tr><tr><td>Rq</td><td>1.96</td><td>µm</td></tr></table>	ISO 4287			Rz	10.9	µm	Rt	10.9	µm	Ra	1.55	µm	Rq	1.96	µm		
ISO 4287																																																		
Rz	13.5	µm																																																
Rt	13.8	µm																																																
Ra	1.50	µm																																																
Rq	2.01	µm																																																
ISO 4287																																																		
Rz	14.8	µm																																																
Rt	14.8	µm																																																
Ra	1.59	µm																																																
Rq	2.04	µm																																																
ISO 4287																																																		
Rz	10.9	µm																																																
Rt	10.9	µm																																																
Ra	1.55	µm																																																
Rq	1.96	µm																																																

Analizând alura curbelor de variație a rugozității funcție de factorii considerați, se poate întocmi tabelul 6.10, de unde rezultă sensul și procentajul variației rugozității. Se constată o tendință de îmbunătățire a rugozității, la mărirea vitezei de așchiere, pentru valori din plaja 100÷250 m/min cu până la 78% de la primul domeniu până la ultimul. Avansul și adâncimea de așchiere au influență negativă asupra valorilor obținute, acestea crescând odată cu mărirea valorilor factorilor cu până la 44%, respectiv 22%. Unghiul de atac prezintă variații liniare de descreștere prin micșorarea valorilor unghiului de la 90° la 70° cu 11% și de la 90° la 45° cu 19%. Materialul sculei influențează într-un procent mai mare în cazul plăcuțelor și CBN+PVD TiN (37%), comparativ cu celălalt tip utilizat, CBN (2%). În ceea ce privește mediul de așchiere, se constată o variație mică de 5% și respectiv 3% atunci când s-au utilizat medii de așchiere diferite de cel uscat. Materialele prelucrate au prezentat rugozități diferite, la prelucrarea oțelului X210Cr12 rezultând o rugozitate mai mare cu 204% față de aceea obținută la prelucrarea oțelului 100Cr6, iar în cazul oțelului 90MnCrV8 doar 11%.

6.3. Considerații privind uzura sculelor

Fenomenul de frecare care însoțește procesul de aşchiere are și o influență majoră asupra uzurii sculelor. În legătură cu acest subiect s-au făcut numeroase cercetări [GRZ'13, GRZ'13-2, GRZ'14], dar nu suficiente pentru a formula o concluzie clară privind evoluția fenomenelor de frecare și uzură la prelucrarea materialelor dure și nici privind implicațiile lor în optimizarea și creșterea durabilității sculelor. În acest sens, în lucrarea de față s-a analizat evoluția uzurii sculelor cu plăcuțe din CBN, PcBN și CBN+PVD TiN, utilizate la testele experimentale de prelucrare a oțelurilor (capitolul 5). Imaginile privind starea părții aşchietoare a plăcutelor, înainte și după derularea testelor, sunt date în figurile 6.11, 6.12 și 6.13.

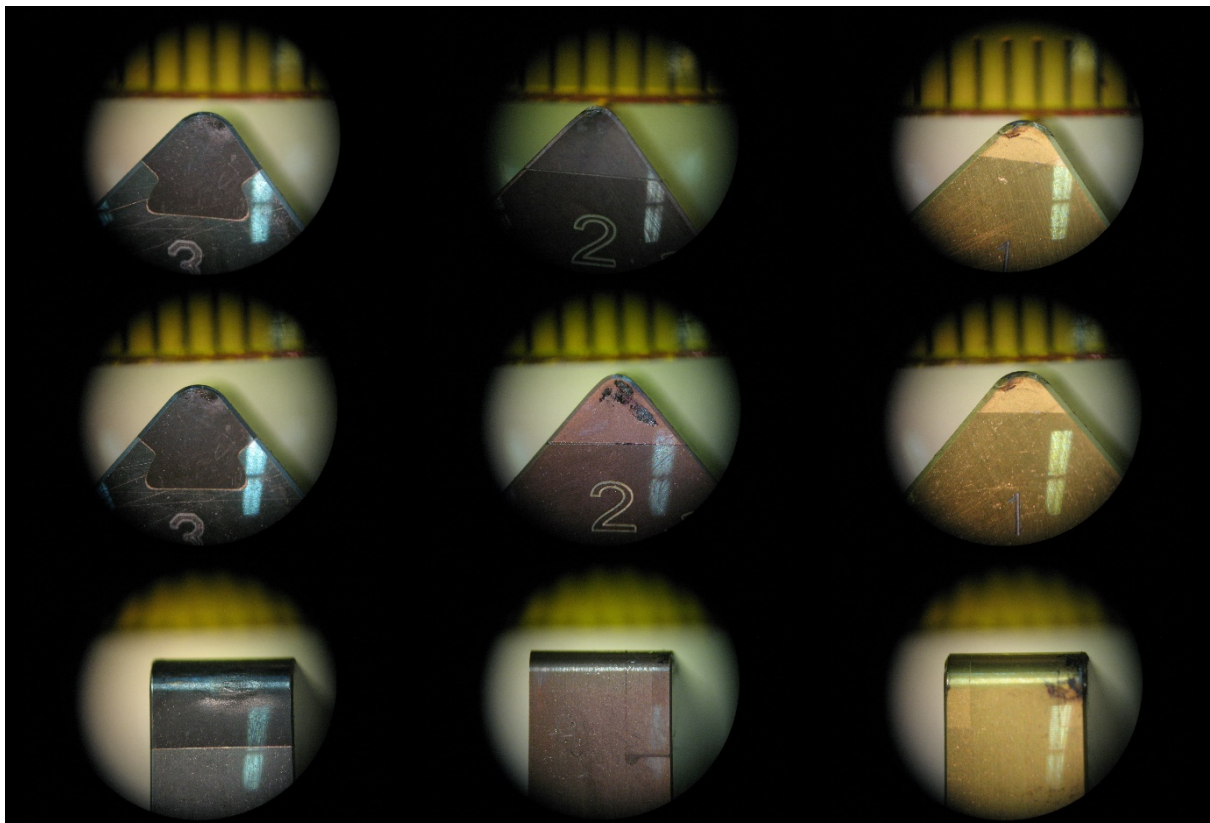


a. PcBN

b. CBN

c. CBN+TiN

Fig. 6.11. Imagini privind starea sculelor înainte de testele experimentale.

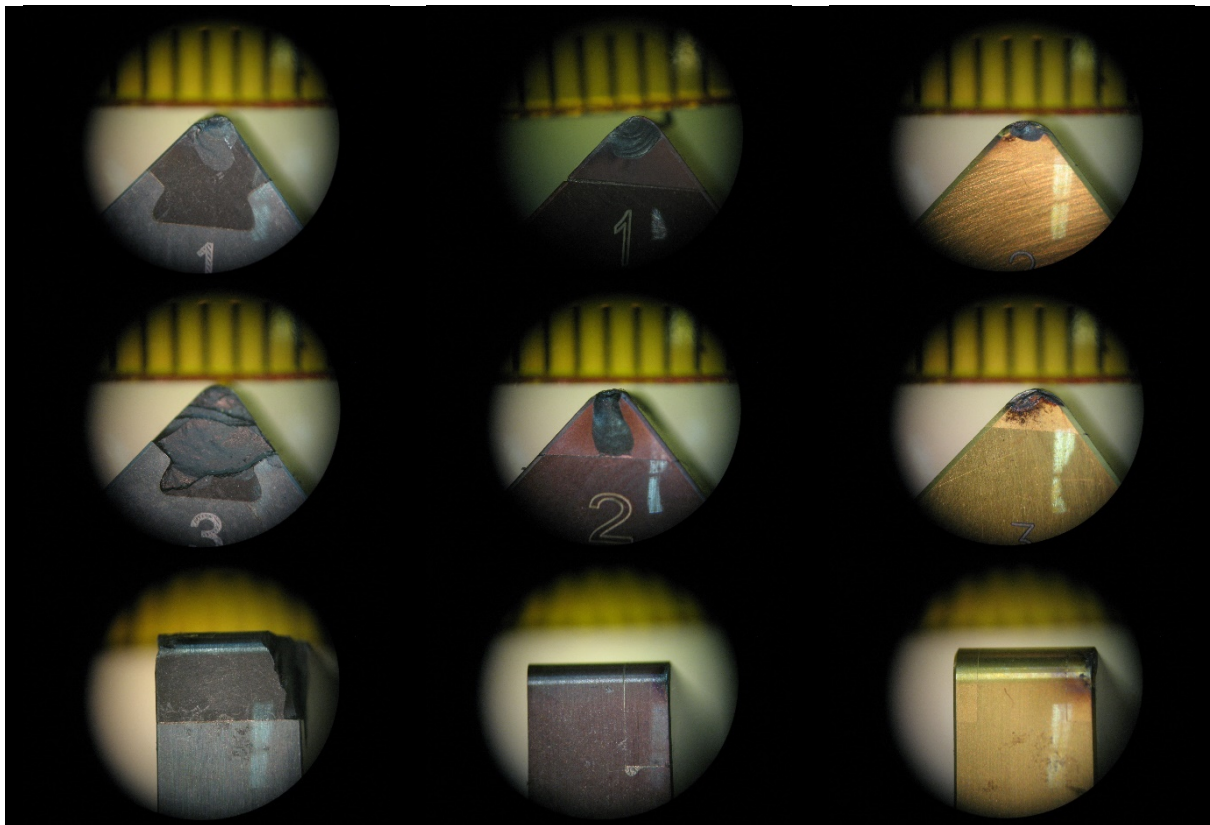


a. PcBN

b. CBN

c. CBN+TiN

Fig. 6.12. Imagini privind starea sculelor în timpul și după efectuarea testelor experimentale.



a. PcBN

b. CBN

c. CBN+TiN

Fig. 6.13. Imagini privind starea sculelor după atingerea uzurii catastrofale.

Imaginile prezentate în figurile anterioare, prelevate cu microscopul Optika, arată că plăcuțele prezintă ușoare urme de uzură, uneori nesemnificative, de forma fisurilor termice (figura 6.11)

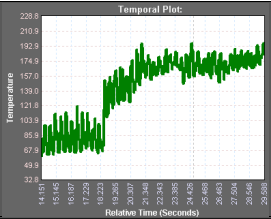
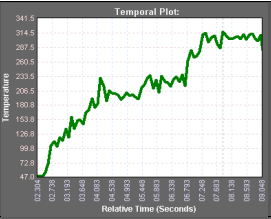
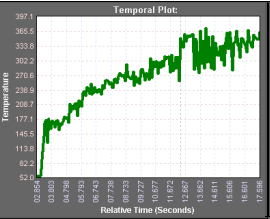
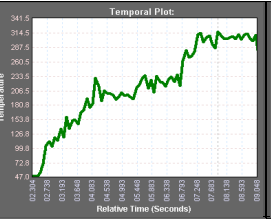
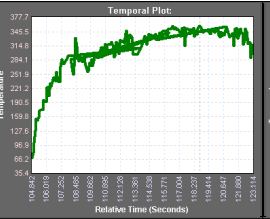
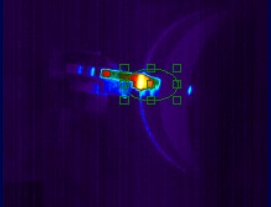
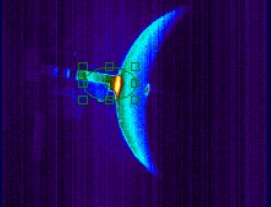
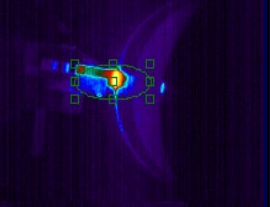
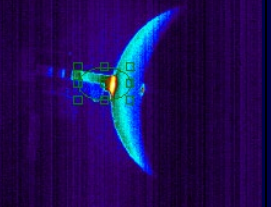
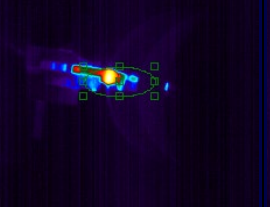
Totuși, în timpul determinărilor, în special la creșterea valorilor adâncimii și avansului de așchiere unele plăcuțe au prezentat uzuri catastrofale, figura 6.13.

Cercetările din literatura de specialitate scot în evidență că dintre cele cinci tipuri de uzură abrazivă, adezivă, oboseală, difuzie/dizolvare sau procese tribo-chimice [MOO'75, SHA'84, HUA'07], la sculele utilizate la așchiera HPM predomină uzura abrazivă [POU'01, KON'84, HOD'81, POU'04]. Se poate conchide că, la prelucrarea materialelor dure, uzura plăcuțelor pe bază de nitrură cubică de bor, se produce datorită temperaturilor ridicate și implicit micro-fisurilor termice de pe tăiș și zonele adiacente acestuia, care atunci când intensitatea procesului este suficientă pot conduce la uzuri catastrofale de tip crater.

6.4. Cercetări privind fenomenul termic la așchiera materialelor dure

Ca și procesul de frecare, fenomenul termic care însoțește procesul de așchiere influențează durata de viață și uzura sculelor. Literatura de specialitate consultată la analiza stadiului actual al acestei problematici [COZ'95, GRA'85], evidențiază că în procesul de așchiere există trei surse principale de căldură, figura 1.26, și constituie o provocare pentru ingineri și cercetători. În acest sens, în acest subcapitol, preocupările s-au axat pe investigarea interfeței de contact a sculei cu suprafața prelucrată. Valorile obținute determinate cu camera cu termoviziune FLIR, sunt date în tabelul 6.10.

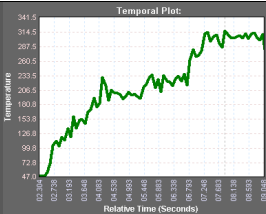
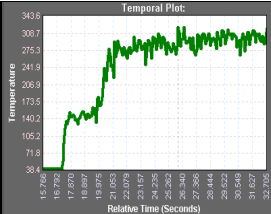
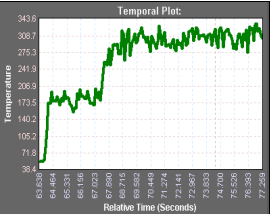
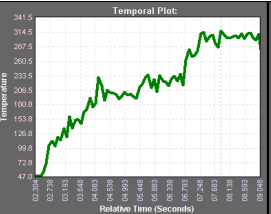
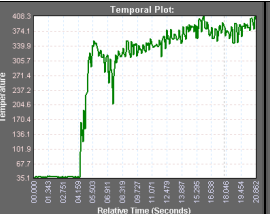
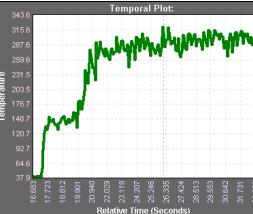
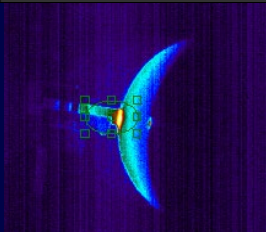
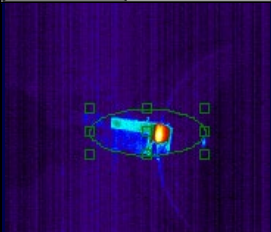
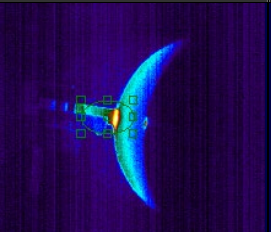
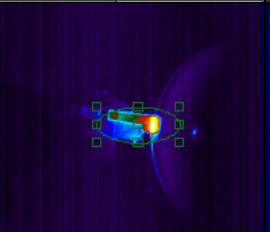
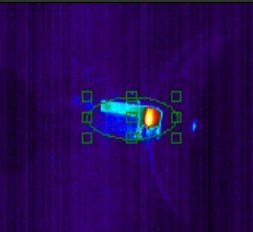
Tabel 6.10. Temperatura pe suprafața de aşezare la prelucrarea otelului.

Nr crt	Factori	Viteza			Avans		
		1	2	3	4	5	6
1	Material	100Cr6					
2	Diametrul, mm	60					
3	Turația, rot/min	630	1000	1250	1000		
4	Viteza, m/min	120	188	235	188		
5	Avans, mm/rot	0,1			0,1	0,18	0,28
6	Adâncime, mm	0,2					
7	Geometrie sculă	Tip plăcuță					
8		k [°]					
9		γ [°]					
10		α [°]					
11		λ [°]					
12		r [mm]					
13	Mediu de aşchiere	Uscat					
14	Fenomen termic	Grafic					
		Valori	Statistic [units] Mean [°C] < 44.9 Std. Dev. [°C] 20.4 Center [°C] (218.0, 254.0) < 60.8 Maximum [°C] (206, 251) 174.0 Minimum [°C] (227, 238) < 29.6 Number of Pixels 1625	Statistic [units] Mean [°C] < 61.9 Std. Dev. [°C] 33.1 Center [°C] (218.0, 254.0) < 75.0 Maximum [°C] (227, 255) > 316.7 Minimum [°C] (217, 271) < 16.5 Number of Pixels 1625	Statistic [units] Mean [°C] < 75.0 Std. Dev. [°C] 43.5 Center [°C] (205.0, 254.0) 229.4 Maximum [°C] (208, 251) > 350.7 Minimum [°C] (180, 268) < 14.4 Number of Pixels 2327	Statistic [units] Mean [°C] < 61.9 Std. Dev. [°C] 33.1 Center [°C] (218.0, 254.0) < 75.0 Maximum [°C] (227, 255) > 316.7 Minimum [°C] (217, 271) < 16.5 Number of Pixels 1625	Statistic [units] Mean [°C] < 81.3 Std. Dev. [°C] 57.1 Center [°C] (205.0, 254.0) < 112.4 Maximum [°C] (192, 249) > 357.3 Minimum [°C] (217, 270) < 19.3 Number of Pixels 2327
		Zonă					

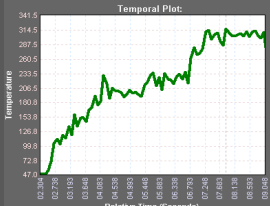
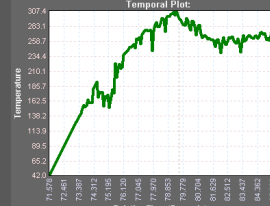
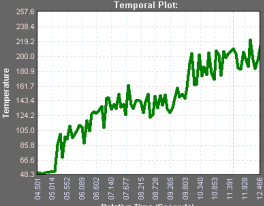
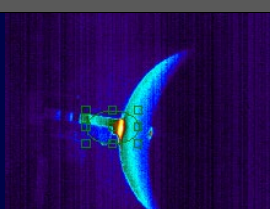
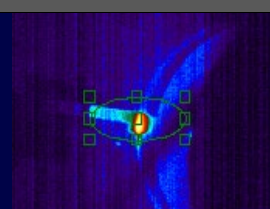
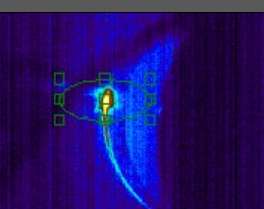
Tabel 6.10. Temperatura pe suprafața de așezare la prelucrarea oțelului. (continuare)

Nr. crt.	Factori	Adâncime			Unghi de atac			
		7	8	9	10	11	12	
1	Material	C120						
2	Diametrul, mm	1000						
3	Turația, rot/min	188						
4	Viteza, m/min	0,1						
5	Avans, mm/rot	0,2						
6	Adâncime, mm	0,2	0,3	0,4	0,2			
7	Geometrie sculă	CBN						
8	Tip plăcuță	90			45	70	90	
9	k [°]	-6						
10	γ [°]	6						
11	α [°]	-6						
12	λ [°]	0,8						
13	Mediu de aşchiere	Uscat						
14	Fenomen termic	Grafic						
		Valori	Statistic [units] Mean [°C] <> 61.9 Std. Dev. [°C] 33.1 Center [°C] [218.0, 254.0] < 75.0 Maximum [°C] [227, 255] > 316.7 Minimum [°C] [217, 271] < 16.5 Number of Pixels 1625	Statistic [units] Mean [°C] <> 53.7 Std. Dev. [°C] 32.2 Center [°C] [230.0, 253.0] < 80.8 Maximum [°C] [226, 255] > 323.9 Minimum [°C] [279, 257] < 43.7 Number of Pixels 3507	Statistic [units] Mean [°C] <> 71.9 Std. Dev. [°C] 43.6 Center [°C] [205.0, 254.0] > 301.3 Maximum [°C] [205, 251] > 338.7 Minimum [°C] [196, 270] < 18.4 Number of Pixels 2327	Statistic [units] Mean [°C] <> 66.2 Std. Dev. [°C] 33.9 Center [°C] [205.0, 254.0] < 126.6 Maximum [°C] [212, 252] 290.7 Minimum [°C] [172, 251] < 19.3 Number of Pixels 2327	Statistic [units] Mean [°C] <> 69.7 Std. Dev. [°C] 39.4 Center [°C] [205.0, 254.0] < 76.7 Maximum [°C] [224, 255] > 314.2 Minimum [°C] [165, 254] < 13.4 Number of Pixels 2327	Statistic [units] Mean [°C] <> 61.9 Std. Dev. [°C] 33.1 Center [°C] [218.0, 254.0] < 75.0 Maximum [°C] [227, 255] > 316.7 Minimum [°C] [217, 271] < 16.5 Number of Pixels 1625
		Zonă						

Tabel 6.10. Temperatura pe suprafața de aşezare la prelucrarea oțelului. (continuare)

Nr crt	Factori	Material plăcuță			Material prelucrat																																																																																											
		13	14	15	16	17	18																																																																																									
1	Material	60			100Cr6	C120	90MnCrV8																																																																																									
2	Diametrul, mm	60																																																																																														
3	Turația, rot/min	1000																																																																																														
4	Viteza, m/min	188																																																																																														
5	Avans, mm/rot	0,1																																																																																														
6	Adâncime, mm	0,2																																																																																														
7	Geometrie sculă	Tip plăcuță	PcBN	CBN	CBN+PVD TiN	PcBN																																																																																										
8		k [°]	90																																																																																													
9		γ [°]	-6																																																																																													
10		α [°]	6																																																																																													
11		λ [°]	-6																																																																																													
12		r [mm]	0,8																																																																																													
13	Mediu de aşchiere	Uscat																																																																																														
14	Fenomen termic	Grafic																																																																																														
		Valori	<table><tr><td>Statistic [units]</td><td> </td></tr><tr><td>Mean [°C]</td><td>< 61.9</td></tr><tr><td>Std. Dev. [°C]</td><td>33.1</td></tr><tr><td>Center [°C]</td><td>(218.0, 254.0) < 75.0</td></tr><tr><td>Maximum [°C]</td><td>(227, 255) > 316.7</td></tr><tr><td>Minimum [°C]</td><td>(217, 271) < 16.5</td></tr><tr><td>Number of Pixels</td><td>1625</td></tr></table>	Statistic [units]		Mean [°C]	< 61.9	Std. Dev. [°C]	33.1	Center [°C]	(218.0, 254.0) < 75.0	Maximum [°C]	(227, 255) > 316.7	Minimum [°C]	(217, 271) < 16.5	Number of Pixels	1625	<table><tr><td>Statistic [units]</td><td> </td></tr><tr><td>Mean [counts]</td><td>< 43.8</td></tr><tr><td>Sum</td><td>N/A</td></tr><tr><td>Std. Dev. [counts]</td><td>28.5</td></tr><tr><td>Center [counts]</td><td>(263.0, 259.0) < 57.0</td></tr><tr><td>Maximum [counts]</td><td>(273, 261) > 320.8</td></tr><tr><td>Minimum [counts]</td><td>(264, 243) < 0.2</td></tr><tr><td>Number of Pixels</td><td>3507</td></tr></table>	Statistic [units]		Mean [counts]	< 43.8	Sum	N/A	Std. Dev. [counts]	28.5	Center [counts]	(263.0, 259.0) < 57.0	Maximum [counts]	(273, 261) > 320.8	Minimum [counts]	(264, 243) < 0.2	Number of Pixels	3507	<table><tr><td>Statistic [units]</td><td> </td></tr><tr><td>Mean [counts]</td><td>< 53.8</td></tr><tr><td>Sum</td><td>N/A</td></tr><tr><td>Std. Dev. [counts]</td><td>32.5</td></tr><tr><td>Center [counts]</td><td>(263.0, 259.0) < 173.1</td></tr><tr><td>Maximum [counts]</td><td>(265, 259) > 321.7</td></tr><tr><td>Minimum [counts]</td><td>(293, 247) < 0.2</td></tr><tr><td>Number of Pixels</td><td>3507</td></tr></table>	Statistic [units]		Mean [counts]	< 53.8	Sum	N/A	Std. Dev. [counts]	32.5	Center [counts]	(263.0, 259.0) < 173.1	Maximum [counts]	(265, 259) > 321.7	Minimum [counts]	(293, 247) < 0.2	Number of Pixels	3507	<table><tr><td>Statistic [units]</td><td> </td></tr><tr><td>Mean [°C]</td><td>< 61.9</td></tr><tr><td>Std. Dev. [°C]</td><td>33.1</td></tr><tr><td>Center [°C]</td><td>(218.0, 254.0) < 75.0</td></tr><tr><td>Maximum [°C]</td><td>(227, 255) > 316.7</td></tr><tr><td>Minimum [°C]</td><td>(217, 271) < 16.5</td></tr><tr><td>Number of Pixels</td><td>1625</td></tr></table>	Statistic [units]		Mean [°C]	< 61.9	Std. Dev. [°C]	33.1	Center [°C]	(218.0, 254.0) < 75.0	Maximum [°C]	(227, 255) > 316.7	Minimum [°C]	(217, 271) < 16.5	Number of Pixels	1625	<table><tr><td>Statistic [units]</td><td> </td></tr><tr><td>Mean [°C]</td><td>< 74.1</td></tr><tr><td>Std. Dev. [°C]</td><td>43.8</td></tr><tr><td>Center [°C]</td><td>(258.0, 261.0) < 66.6</td></tr><tr><td>Maximum [°C]</td><td>(272, 261) > 385.8</td></tr><tr><td>Minimum [°C]</td><td>(260, 244) < 17.4</td></tr><tr><td>Number of Pixels</td><td>2327</td></tr></table>	Statistic [units]		Mean [°C]	< 74.1	Std. Dev. [°C]	43.8	Center [°C]	(258.0, 261.0) < 66.6	Maximum [°C]	(272, 261) > 385.8	Minimum [°C]	(260, 244) < 17.4	Number of Pixels	2327	<table><tr><td>Statistic [units]</td><td> </td></tr><tr><td>Mean [°C]</td><td>< 52.2</td></tr><tr><td>Std. Dev. [°C]</td><td>31.3</td></tr><tr><td>Center [°C]</td><td>(258.0, 261.0) < 37.3</td></tr><tr><td>Maximum [°C]</td><td>(273, 261) > 309.7</td></tr><tr><td>Minimum [°C]</td><td>(297, 260) < 6.2</td></tr><tr><td>Number of Pixels</td><td>2327</td></tr></table>	Statistic [units]		Mean [°C]	< 52.2	Std. Dev. [°C]	31.3	Center [°C]	(258.0, 261.0) < 37.3	Maximum [°C]	(273, 261) > 309.7	Minimum [°C]	(297, 260) < 6.2	Number of Pixels	2327
		Statistic [units]																																																																																														
Mean [°C]	< 61.9																																																																																															
Std. Dev. [°C]	33.1																																																																																															
Center [°C]	(218.0, 254.0) < 75.0																																																																																															
Maximum [°C]	(227, 255) > 316.7																																																																																															
Minimum [°C]	(217, 271) < 16.5																																																																																															
Number of Pixels	1625																																																																																															
Statistic [units]																																																																																																
Mean [counts]	< 43.8																																																																																															
Sum	N/A																																																																																															
Std. Dev. [counts]	28.5																																																																																															
Center [counts]	(263.0, 259.0) < 57.0																																																																																															
Maximum [counts]	(273, 261) > 320.8																																																																																															
Minimum [counts]	(264, 243) < 0.2																																																																																															
Number of Pixels	3507																																																																																															
Statistic [units]																																																																																																
Mean [counts]	< 53.8																																																																																															
Sum	N/A																																																																																															
Std. Dev. [counts]	32.5																																																																																															
Center [counts]	(263.0, 259.0) < 173.1																																																																																															
Maximum [counts]	(265, 259) > 321.7																																																																																															
Minimum [counts]	(293, 247) < 0.2																																																																																															
Number of Pixels	3507																																																																																															
Statistic [units]																																																																																																
Mean [°C]	< 61.9																																																																																															
Std. Dev. [°C]	33.1																																																																																															
Center [°C]	(218.0, 254.0) < 75.0																																																																																															
Maximum [°C]	(227, 255) > 316.7																																																																																															
Minimum [°C]	(217, 271) < 16.5																																																																																															
Number of Pixels	1625																																																																																															
Statistic [units]																																																																																																
Mean [°C]	< 74.1																																																																																															
Std. Dev. [°C]	43.8																																																																																															
Center [°C]	(258.0, 261.0) < 66.6																																																																																															
Maximum [°C]	(272, 261) > 385.8																																																																																															
Minimum [°C]	(260, 244) < 17.4																																																																																															
Number of Pixels	2327																																																																																															
Statistic [units]																																																																																																
Mean [°C]	< 52.2																																																																																															
Std. Dev. [°C]	31.3																																																																																															
Center [°C]	(258.0, 261.0) < 37.3																																																																																															
Maximum [°C]	(273, 261) > 309.7																																																																																															
Minimum [°C]	(297, 260) < 6.2																																																																																															
Number of Pixels	2327																																																																																															
	Zonă																																																																																															

Tabel 6.10. Temperatura pe suprafața de așezare la prelucrarea oțelului. (continuare)

Nr. Factori		Material plăcuță																																																																		
crt.		19	20	21																																																																
1	Material	100Cr6																																																																		
2	Diametrul, mm	60																																																																		
3	Turația, rot/min	1000																																																																		
4	Viteza, m/min	188																																																																		
5	Avans, mm/rot	0,1																																																																		
6	Adâncime, mm	0,2																																																																		
7	Geometrie	Tip plăcuță																																																																		
8	sculă	CBN																																																																		
9		k [°]																																																																		
10		γ [°]																																																																		
11		α [°]																																																																		
12		λ [°]																																																																		
13	r [mm]			0,8																																																																
13	Mediu de aşchiere		Uscat	Aer Comprimat	MQL																																																															
14	Fenomen termic	Grafic																																																																		
		Valori	<table><tr><td colspan="2">Statistic [units]</td><td> </td></tr><tr><td>Mean [°C]</td><td>< 61.9</td><td></td></tr><tr><td>Std. Dev. [°C]</td><td>33.1</td><td></td></tr><tr><td>Center [°C]</td><td>(218.0, 254.0) < 75.0</td><td></td></tr><tr><td>Maximum [°C]</td><td>(227, 255) > 316.7</td><td></td></tr><tr><td>Minimum [°C]</td><td>(217, 271) < 16.5</td><td></td></tr><tr><td>Number of Pixels</td><td>1625</td><td></td></tr></table>	Statistic [units]			Mean [°C]	< 61.9		Std. Dev. [°C]	33.1		Center [°C]	(218.0, 254.0) < 75.0		Maximum [°C]	(227, 255) > 316.7		Minimum [°C]	(217, 271) < 16.5		Number of Pixels	1625		<table><tr><td colspan="2">Statistic [units]</td><td> </td></tr><tr><td>Mean [°C]</td><td>< 49.7</td><td></td></tr><tr><td>Std. Dev. [°C]</td><td>33.4</td><td></td></tr><tr><td>Center [°C]</td><td>(213.0, 249.0) < 175.7</td><td></td></tr><tr><td>Maximum [°C]</td><td>(214, 254) 295.8</td><td></td></tr><tr><td>Minimum [°C]</td><td>(250, 252) < -5.2</td><td></td></tr><tr><td>Number of Pixels</td><td>2327</td><td></td></tr></table>	Statistic [units]			Mean [°C]	< 49.7		Std. Dev. [°C]	33.4		Center [°C]	(213.0, 249.0) < 175.7		Maximum [°C]	(214, 254) 295.8		Minimum [°C]	(250, 252) < -5.2		Number of Pixels	2327		<table><tr><td colspan="2">Statistic [units]</td><td> </td></tr><tr><td>Mean [°C]</td><td>< 43.2</td><td></td></tr><tr><td>Std. Dev. [°C]</td><td>23.1</td><td></td></tr><tr><td>Center [°C]</td><td>(209.0, 253.0) 209.7</td><td></td></tr><tr><td>Maximum [°C]</td><td>(209, 253) 209.7</td><td></td></tr><tr><td>Minimum [°C]</td><td>(174, 249) < -14.6</td><td></td></tr><tr><td>Number of Pixels</td><td>2327</td><td></td></tr></table>	Statistic [units]			Mean [°C]	< 43.2		Std. Dev. [°C]	23.1		Center [°C]	(209.0, 253.0) 209.7		Maximum [°C]	(209, 253) 209.7		Minimum [°C]	(174, 249) < -14.6		Number of Pixels	2327	
		Statistic [units]																																																																		
Mean [°C]	< 61.9																																																																			
Std. Dev. [°C]	33.1																																																																			
Center [°C]	(218.0, 254.0) < 75.0																																																																			
Maximum [°C]	(227, 255) > 316.7																																																																			
Minimum [°C]	(217, 271) < 16.5																																																																			
Number of Pixels	1625																																																																			
Statistic [units]																																																																				
Mean [°C]	< 49.7																																																																			
Std. Dev. [°C]	33.4																																																																			
Center [°C]	(213.0, 249.0) < 175.7																																																																			
Maximum [°C]	(214, 254) 295.8																																																																			
Minimum [°C]	(250, 252) < -5.2																																																																			
Number of Pixels	2327																																																																			
Statistic [units]																																																																				
Mean [°C]	< 43.2																																																																			
Std. Dev. [°C]	23.1																																																																			
Center [°C]	(209.0, 253.0) 209.7																																																																			
Maximum [°C]	(209, 253) 209.7																																																																			
Minimum [°C]	(174, 249) < -14.6																																																																			
Number of Pixels	2327																																																																			
	Zonă																																																																			

Analiza dependențelor trasate cu datele din tabel permit cunoașterea temperaturii corespunzătoare unui anumit moment dar și a momentului în care starea termica nestaționară a procesului devine staționară. Constatări similare au făcut și alți autori cu rezultatele obținute de X.J. Ren ș.a. [REN'04].

Perioada de instabilitate maximă este de aproximativ de 30 de secunde după începerea procesului de așchiere, și depinde de valorile parametrilor regimului de lucru si mediul de așchiere utilizat, figura 6.21.

Mărimile și sensurile de variație a temperaturii de pe suprafața de așezate, în funcție de regimul de lucru (v, s, t) sunt prezentate în tabelul 6.18.

Creșterea valorilor avansului și adâncimii de așchiere produce creșteri de temperatură, iar prin micșorarea valorilor unghiului de atac principal de la 90° la 45°, scăderi ale temperaturii cuprinse între 1% și 8%.

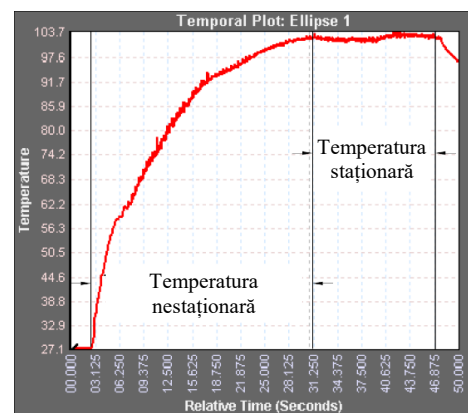


Fig. 6.21. Stări termice înregistrate la așchiera oțelului 100Cr6.

Materialul sculei are o influență nesemnificativă asupra temperaturii în procente medii de 1% pentru scula CBN și 2% pentru scula din CBN cu înveliș PVD de nitrură de titan (TiN). În ceea ce privește *mediul de aşchiere*, se constată o scădere medie de 7%, atunci când s-a utilizat ca mediu cu aerul comprimat și de 34% atunci când s-a utilizat mediul de aşchiere MQL. În schimb, *materialul prelucrat*, are o influență puternică asupra temperaturii de pe suprafața de aşezare înregistrând o creștere de 22%, la prelucrarea oțelului X210Cr12, și o scădere nesemnificativă de doar 2%, în cazul oțelului 90MnCrV8, față de valorile obținute la prelucrarea oțelului 100Cr6.

6.5. Rezultate, discuții și concluzii

În mod evident, temperatura din zona de aşchiere, studiată în subcapitolul precedent, este în legătură directă cu valorile obținute pentru componentele forței de aşchiere și coeficientul de frecare pe suprafața de aşezare. La fel ca și în cazul calității suprafețelor, exprimate prin valoarea rugozității suprafețelor prin termenul S_q , atât fenomenul de frecare cât și fenomenul termic au implicații directe asupra stării acestora.

Analiza și corelarea rezultatelor experimentale obținute, în această lucrare, privitor la variația componentelor fizice ale forței de aşchiere și a coeficienților de frecare cu temperatura din zona de contact și calitatea suprafeței prelucrate, a permis întocmirea tabelului 6.19. și formularea unor concluzii generale:

- utilizarea unor medii de aşchiere (diferite de cel uscat) conduce la răcirea zonei de aşchiere cu efect de reducere a „înmuierei termice locale”, figura 6.20., și astfel, la o creștere a valorilor componentelor forțelor de aşchiere și a coeficienților de frecare în procente cuprinse între 7 și 20%, în cazul aerului comprimat, și între 7 și 91% pentru mediul MQL;
- rugozitatea suprafețelor are o tendință de îmbunătățire la utilizarea diferitelor medii de aşchiere lichide, tendință confirmată și de literatura de specialitate [ONU'20];
- influența temperaturii asupra rugozității suprafețelor prelucrate prin metode HPM, s-a concretizat în micșorarea microasperităților cu 37%, în cazul aşchierii uscate, și o creștere în procent de 4%, în cazul unor medii diferite;
- coeficientului de frecare pe suprafața de aşezare scade cu până la 13% la utilizarea mediilor de aşchiere lichide, datorită scăderii în intensitate a „înmuierei termice locale” și a formării unei pelicule de lubrifiant pe interfața de contact;
- temperatura de pe interfața sculă-piesă, crește la creșterea valorilor parametrilor de regim (v , s , t);
- valorile mari ale vitezei de aşchiere, produc o scădere a mărimilor componentelor fizice a forțelor de aşchiere și o scădere a coeficienților de frecare de pe interfețele de contact ale sculei cu aşchia și suprafețele prelucrate. Rugozitatea suprafețelor generate la strunjirea materialelor dure se îmbunătățește la creșterea valorilor vitezei.
- valorile mari ale avansului de lucru, produc o influență contrară influenței vitezei, valorile componentelor fizice studiate crescând (mai ales componentele normale), ceea ce duce la micșorarea valorilor coeficienților de frecare;
- uzura sculelor este influențată de parametrii regimului de lucru, geometria sculei și condițiile de aşchiere. De remarcat este absența tășurilor de depunere și apariția predominantă a uzurilor de tipul „fisurilor termice”.

Tabel 6.19. Variațiile procentuale a influențelor produse de regimul de așchiere și unghiul de atac.

Nr. crt.	Factori		Viteza de aşchiere			Avansul de prelucrare		Adâncimea de aşchiere		Unghiul de atac		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Material		100Cr6									
2	Diametrul, mm		60									
3	Turația, rot/min		630	1000	1250	1000						
4	Viteza, m/min		120	188	235	188						
5	Avans, mm/rot		0,1			0,18	0,28	0,1				
6	Adâncime, mm		0,2				0,3		0,4	0,2		
7	Geometrie sculă	Tip plăcuță	PcBN									
8		k, [°]	90							45	70	
9		γ, [°]	-6									
10		α, [°]	6									
11		λ, [°]	-6									
12		r, [mm]	, 0,8									
13	Mediu de aşchiere		Uscat									
14	Valori măsurate experimental	F _x , [N]	Creşte 7%	-	Scade 16%	Scade 1%	Creşte 9%	Creşte 72%	Creşte 136%	Creşte 20%	Creşte 10%	
15		F _y , [N]	Creşte 17%	-	Scade 21%	Creşte 5%	Creşte 27%	Creşte 39%	Creşte 64%	Creşte 31%	Creşte 9%	
16		F _z , [N]	Creşte 12%	-	Scade 11%	Creşte 36%	Creşte 84%	Creşte 50%	Creşte 85%	Creşte 14%	Creşte 14%	
17		μ _a	Creşte 11%	-	Scade 11%	Scade 2%	Scade 7%	Creşte 2%	Creşte 8%	Creşte 11%	Creşte 3%	
18	Valori calculate	F, [N]	Creşte 9%	-	Scade 18%	Creşte 9%	Creşte 6%	Creşte 75%	Creşte 143%	Creşte 95%	Creşte 23%	
19		F _N , [N]	Creşte 4%	-	Scade 4%	Creşte 46%	Creşte 105%	Creşte 55%	Creşte 93%	Creşte 23%	Creşte 20%	
20		F _a , [N]	Creşte 31%	-	Scade 31%	Creşte 1%	Creşte 15%	Creşte 41%	Creşte 76%	Creşte 5%	Creşte 0.1%	
21		F _{Na} , [N]	Creşte 18%	-	Scade 22%	Creşte 3%	Creşte 24%	Creşte 39%	Creşte 63%	Creşte 5%	Creşte 3%	
22		μ _γ	Creşte 5%	-	Scade 15%	Scade 38%	Scade 54%	Creşte 13%	Creşte 26%	Creşte 58%	Creşte 3%	
23	Rugozitate	Sq [μm]	Creşte 63%	-	Scade 15%	Creşte 37%	Creşte 44%	Creşte 13%	Creşte 22%	Scade 19%	Scade 11%	
24	Temperatură	T [°C]	Scade 82%	-	Creşte 20%	Creşte 14%	Creşte 25%	Creşte 2%	Creşte 7%	Scade 1%	Scade 8%	

Tabel 6.19. Variațiile procentuale a influențelor produse de materialul sculei, materialul prelucrat și mediul de aşchiere.

Nr. crt.	Factori		Tipul sculei			Matetrialul prelucrat		Mediul de aşchiere	
			10	11	12	13	14	15	16
1	Material		100Cr6			X210CR12	90MnCrV8	100Cr6	
2	Diametrul, mm		60						
3	Turația, rot/min		1250			1000			
4	Viteza, m/min		235			188			
5	Avans, mm/rot		0,1						
6	Adâncime, mm		0,2						
7	Geometrie sculă	Tip plăcuță	PcBN	CBN	CBN+TiN	PcBN			
8		k, [°]	90						
9		γ, [°]	-6						
10		α, [°]	6						
11		λ, [°]	-6						
12		r, [mm]	0,8						
13	Mediu de aşchiere		Uscat					AC	MQL
14	Valori măsurate experimental	F _x , [N]	-	Scade 16%	Creşte 1%	Creşte 46%	Creşte 8%	Creşte 13%	Creşte 89%
15		F _y , [N]	-	Creşte 1%	Creşte 7%	Creşte 7%	Scade 2%	Creşte 20%	Creşte 37%
16		F _z , [N]	-	Scade 4%	Creşte 18%	Creşte 44%	Creşte 8%	Creşte 11%	Creşte 64%
17		μ _α	-	Creşte 53%	Creşte 67%	Scade 12%	Scade 11%	Scade 6%	Scade 13%
18	Valori calculate	F, [N]	-	Scade 14%	Creşte 2%	Creşte 43%	Creşte 6%	Creşte 15%	Creşte 91%
19		F _N , [N]	-	Scade 22%	Creşte 0.4%	Creşte 69%	Creşte 19%	Creşte 7%	Creşte 78%
20		F _α , [N]	-	Creşte 57%	Creşte 79%	Scade 8%	Scade 13%	Creşte 12%	Creşte 17%
21		F _{Nα} , [N]	-	Creşte 2%	Creşte 7%	Creşte 4%	Scade 2%	Creşte 19%	Creşte 34%
22		μ _γ	-	Creşte 10%	Scade 2%	Scade 16%	Scade 11%	Creşte 8%	Creşte 7%
23	Rugozitate	Sq [μm]	-	Creşte 2%	Creşte 2%	Creşte 204%	Creşte 11%	Scade 5%	Scade 3%
24	Temperatură	T [°C]	-	Creşte 1%	Creşte 2%	Creşte 22%	Scade 2%	Scade 7%	Scade 37%

CAPITOLUL VII

CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Concluzii generale

Analiza literaturii de specialitate consultată atât pentru stadiul actual privind fenomenul de frecare la aşchiera materialelor dure cât şi pentru metodele şi metodologiile utilizate de diverşi autori pentru studiul acestuia şi activităţile de cercetare ştiinţifică elaborate în această lucrare permit formularea unor concluzii finale:

1. Cercetările experimentale realizate pentru studiul fenomenului de frecare la aşchiera materialelor dure evidenţiază o similitudine în ceea ce priveşte modul de influenţă al diverşilor factori asupra structurii fizice ale forţei de aşchiere, cu rezultatele găsite în literatura de specialitate, având însă grade de influenţă diferite;
2. Modelele teoretice şi experimentale, dezvoltate în timp de diverşi autori, nu satisfac în totalitate fizica procesului de aşchiere indiferent de tipul acestuia (HPM, HSM etc.), deoarece nu iau în considerare toţi factorii implicaţi în proces (precum viteza de aşchiere, avansul de lucru etc.);
3. Modelele teoretice cuprind în principal geometria constructivă şi iau în vedere aşchiera ortogonală, neglijând factorii prezenţi în aşchiera oblică;
4. Modelele experimentale constau în dispozitive tribometrice care nu satisfac în totalitate condiţiile reale din procesul de aşchiere;
5. Rezultatele teoretico-experimentale evidenţiază că mediul de aşchiere diferit de cel uscat are influenţă negativă asupra fenomenului de frecare;
6. La simularea cu elemente finite, al procesului de aşchiere ortogonal HPM, s-a dovedit că, distribuţia presiunii pe suprafaţa de degajare este asemănătoare cu distribuţia presiunii valabile şi pentru procesul de aşchiere a materialelor clasice;
7. Modelul mecanicist elaborat în cadrul acestei lucrări permite evidenţierea importanţei utilizării unghiurilor funcţionale pentru studiul fenomenului de frecare, indiferent de tipul de aşchiere (HPM, HSM, aşchiere clasică etc.);
8. Dispozitivul tribometric utilizat în cadrul acestei lucrări permite studiul variaţiei temperaturii şi a fizicii procesului de aşchiere, strict izolat, din interfaţa sculă-piesă, din zona suprafeţei de aşezare, făcând abstracţie de suprafaţa de degajare, aspect ce poate contribui la o înţelegere mai bună a procesului de uzură pe direcţie transversală a sculelor.

Contribuţii personale

Prezenta activitatea de cercetare, realizată în cadrul tezei de doctorat, din punctul de vedere al autorului, constituie o contribuţie modestă privind fenomenul de frecare la aşchiere materialelor dure dar un posibil pas în faţă în ceea ce priveşte cunoaşterea fenomenelor fizice legate de aceste procese, şi permite enunţarea următoarelor serii de contribuţii personale:

a. Contribuţii de ordin general:

1. Realizarea unei sinteze privind fenomenul de frecare la aşchiera materialelor dure;
2. Realizarea unei sinteze privind metodologiile de studiu al fenomenului de frecare, utilizate pe plan internaţional;
3. Definirea procedurii de prelucrare prin aşchiere a materialelor dure.

b. Contribuţii în domeniul cercetării fundamentale:

4. S-a dezvoltat un model fizic al procesului de aşchiere, aplicabil şi la aşchiera materialelor dure, bazat pe extinderea modelelor constructive din literatura de specialitate la un model dinamic, specific unghiurilor funcţionale;
5. S-a conceput un model matematic pentru calculul componentelor fizice ale forţei de aşchiere;
6. S-a conceput şi realizat un dispozitiv tribologic original pentru determinarea coeficientului de frecare pe suprafaţa de aşzare;
7. Aplicarea metodei Taguchi de planificare a experimentelor în vederea determinării mărimilor componentelor fizice ale forţei de aşchiere;
8. S-au determinat factorii cu influenţă semnificativă asupra variaţiei componentelor fizice ale forţei de aşchiere şi a coeficienţilor de frecare;
9. S-a realizat un program de calcul pentru obţinerea valorilor teoretice ale modelului Taguchi;
10. S-au stabilit relaţii de calcul de formă politropică pentru componentele fizice ale forţei de aşchiere şi a coeficienţilor de frecare;
11. S-a studiat distribuţia presiunii pe suprafeţe active ale sculei la aşchiera materialelor dure prin metoda elementului finit;
12. S-au efectuat cercetări experimentale şi s-au trasat curbele de variaţie pentru componentele fizice ale forţei de aşchiere şi a coeficienţilor de frecare;
13. S-a realizat analiza formei aşchiilor rezultate din aşchiera materialelor dure;
14. S-a realizat analiza calităţii suprafeţelor la aşchiera materialelor dure;
15. S-au analizat sculele utilizate la aşchiera materialelor dure;
16. S-au comparat şi corelat rezultatele fenomenului de frecare cu rezultatele calitative din procesul de prelucrare HPM;
17. S-a realizat un program de calcul MathCad pentru calculul rapid al componentelor fizice ale forţei de aşchiere;
18. S-a validat modelul fizic şi matematic printr-un studiu comparativ la aşchiera oţelului carbon C45;
19. Unele cercetări efectuate în perioada de elaborare a tezei au constituit rapoarte în programul de cercetare derulat în cadrul proiectului MANSiD (Centru integrat de cercetare, dezvoltare şi inovare pentru Materiale Avansate, Nanotehnologii şi Sisteme Distribuite de fabricaţie şi control).

Direcţii viitoare de cercetare

Prin rezolvarea problematicii impuse de tema prezentei teze de doctorat s-a realizat un studiu amplu privind fenomenul de frecare la aşchiera materialelor dure. Acest aspect evidenţiază posibilităţile şi tendinţele viitoare de cercetare:

- Extinderea cercetărilor privind structura fizică a forţei de aşchiere şi pentru alte materiale atât metalice cât şi nemetalice;
- Extinderea modelului fizico-matematic pentru scule cu destinaţie specială;
- Extinderea cercetărilor şi a modelului fizico-matematic pentru alte procedee de prelucrare prin aşchiere;
- Studiul fenomenului de frecare în medii neconvenţionale (ex: criogenice, mediu controlat cu temperaturi mari etc.);
- Analiza formei aşchiilor degajate la prelucrarea altor materiale dure;
- Studiul distribuţiei presiunii în lungul tăişului;
- Studiul stabilităţii fenomenului de frecare la începutul şi la întreruperea procesului de prelucrare a materialelor dure (analiza calităţii de stare fixă a procesului de aşchiere);
- Extinderea cercetărilor în domeniul prelucrării materialelor dure în funcţie de duritatea materialelor prelucrate.

Bibliografie selectivă

- [AMA'05] Amarandei D., Ionescu R., *Prelucrarea cu mare viteză o tehnologie actuală*, Editura AGIR, București, 2005, ISBN:973-720-017-9.
- [AMA'06] Amarandei D., *Optimizarea Așchierii cu Viteze Mari cu Scule cu Tăiș*, Ed. Agir, București 2006.
- [AMA'08] Amarandei D., Ionescu R., Petrariu V., *Model for cutting edge tools in order to evaluate plastic deformation and friction forces at high speed machining*, Editura ASPE Proceeding, 2008.
- [AMA'95] Amarandei D., *Experimental method applied for modelling edge tool cutting with aim of evaluation the plastic deformation forces and friction forces at high speed machining*, 4*TH Yugoslav Conference of Tribology, 27-29 sept.1995, Belgrad.
- [AST'06] Astakhov V. P., *Tribology of Metal Cutting*, Tribology and Interface Engineering series 52, 2006.
- [AST'10] Astakhov, V. P., *Basic Definitions and Cutting tool Geometry, Single Point Cutting Tools, Geometry of Single-point Turning Tools and Drills*, Fundamentals and Practical Applications XXII, 565, 451 illus., Hardcover, 2010, ISBN: 978-1-84996-052-6.
- [BAL'17] Bâlc N., Vilău C., *Design for Additive Manufacturing, to produce assembled products, by SLS*, MATEC Web Conf. 121, 2017, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712104002>.
- [BEL'80] Belous V., *Sinteza sculelor așchietoare*. Editura Junimea, Iași, 1980.
- [BES'19] Beșliu I., **Tamașag I.**, *Effect of cooling condition over surface quality in turning of aluminium alloy 6082-T6*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 564 012009, 2019, doi:10.1088/1757-899X/564/1/012009.
- [BES'21] Beșliu I., **Tamașag I.**, Slătineanu L., *An Experimental Study on Incremental Forming Process of Polycarbonate Sheets*, Macromol. Symp. 395, 2000822, 2021.
- [BES'21-1] Beșliu I., **Tamașag I.**, Slătineanu L., Cerlincă D., *Study of Incremental forming process of polycarbonate sheets*, SAE Technocal Paper 2021-01-0835, 2021, doi:10.4271/2021-01-0835.
- [BLA'21] Blaj M., Oancea G., *Fused deposition modelling process: a literature review*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1009 012006, 2021.
- [CEP'08] Čep, R., Neslušan, M., Barišić, B., *Chip formation analysis during hard turning*, Strojarstvo, 50(6), 337-345, 2008.
- [CEP'11] Čep, R., Janasek, A., Martinicky, B., Sadilek, M., *Cutting tool life tests of ceramic inserts for car engine sleeves*, Tehnicki vjesnik-Technical Gazette 18(2), 203-209, 2011.
- [CHO'04] Chou, K., Song, H., *Tool nose radius effect on finish hard turning*, Journal of Materials Processing Technology 148, 259-268, 2004, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.029.
- [COS'19] Cosma C., Zaharia B., Berce P., Bâlc N., *Design for additive manufacturing to produce complex metal parts*, Ro. J. Techn. Sci. – Appl. Mechanics 64(3), 225–235, 2019.
- [COZ'92] Cozmîncă M., *Bazele generării suprafețelor pe mașini unelte*, partea I-a, I.P. Iași, 1992.
- [COZ'95] Cozmîncă M., Panait S., Constantinescu C., *Bazele Așchierii*, Editura “Gheorghe Asachi”, Iași, România, 1995, ISBN 973-9178-23-5.
- [DAV'11] Paulo Davim J., *Machining of Hard Materials*, Springer Springer London Dordrecht Heidelberg New York, 2011, DOI 10.1007/978-1-84996-450-0.
- [DAV'13] Paulo Davim J., *Tribology in Manufacturing Technology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, DOI: 10.1007/978-3-642-31683-8

- [GER'13] Dimitri Germain, ș.a., *From large-scale to micro machining: a review of force prediction models*, HAL Id: hal-00873860, 2013.
- [GOP'10] Bala Murugan Gopalsamy, Biswanath Mondal, Sukamal Ghosh, Kristian Arntz, Fritz Klocke, *Experimental investigations while hard machining of DIEVAR tool steel (50 HRC)*, Int J Adv Manuf Technol 51, 853–869, 2010.
- [GRZ'11] Grzesik W., *Machining of Hard Materials*, Chapter, 2011, DOI: 10.1007/978-1-84996-450-0_3.
- [GRZ'13-1] Grzesik W., Kowalczyk D., Żak K., *A new mechanistic friction model for the oblique cutting with tool wear effect*, Tribology International 66, 49–53, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2013.04.015>.
- [GRZ'19-2] Grzesik W., Rech J., *Methods and devices for measuring metal cutting friction and wear*, Mechanik 2, 2019.
- [HUA'05] Huang Y., Liang S.Y., *Modeling of cutting forces under hard turning conditions considering tool wear effect*, Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering 127, 262–270, 2005, DOI: 10.1115/1.1852571.
- [IAN'10] Gelu Ianuș, *Organe de Mașini partea I*, Ed. POLITEHNIUM, Iași, 2010, ISBN: 978-973-621-176-8.
- [ION'04] Ionescu R., Amarandei D., *Planificarea Experimentelor – eficiență și calitate*, Ed. Agir, București, România, 2004.
- [MIL'16] Milan Milutinovic, ș.a., *Cutting forces in hard turning comprising tool flank wear and its implication for the friction between tool and workpiece*, Tehnički vjesnik 23(5), 1373-1379, 2016, DOI: 10.17559/TV-20140903224947.
- [NAS'21] Nasulea D., Oancea G., *Simulations and Experiments in Single Point Incremental Forming Process. In: Kyratsis P., Davim J.P. (eds) Experiments and Simulations in Advanced Manufacturing. Materials Forming, Machining and Tribology*. Springer, Cham., 2021 https://doi.org/10.1007/978-3-030-69472-2_3.
- [OAN'81] Oancea N., ș.a., *Bazele așchierii și generării suprafețelor*, Ed. Didactică și Pedagogică București, 1981
- [SHR'17] Shreyes N. Melkote, Grzesik W., Outeiro J., Rech J., Schulze V., Attia H., Arrazola P.J., M'Saoubi R., Saldana C., *Advances in material and friction data for modelling of metal machining*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 66, 731-754, 2017.
- [TAM'19] **Tamașag I.**, Beșliu I., Amarandei D., *Design of a device for testing and analysing the friction coefficient during metal cutting*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 568, 2019.
- [TAM'20] **Tamașag I.**, Beșliu I., Amarandei D., *Experimental investigation on turning of case hardened 21NiCrMo2 cementation steel*, Tehnomus Journal - New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies, 2020, P - ISSN-1224-029X.
- [TAM'19] **Tamașag I.**, Beșliu I., Amarandei D., *Experimental investigation of cutting force variation along the tool cutting edge*, Tehnomus Journal - New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies, 2019, P - ISSN-1224-029X.
- [TAM'21] **Tamașag I.**, Beșliu I., Amarandei D., *Application of Reverse Engineering for Automotive Plastic Components – Case Study*, Macromolecular Symposia 395(1):2000265, 2021.