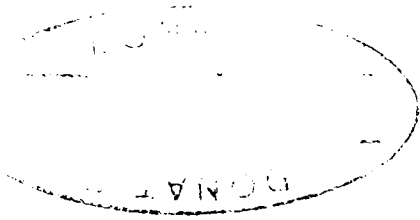


UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

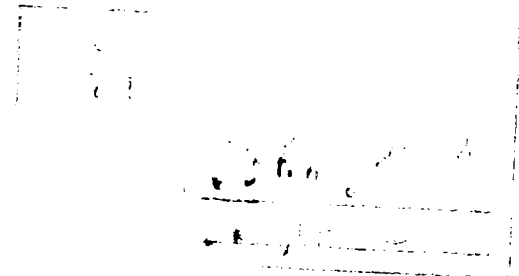


ing. TEODOR IOAN TRĂȘCĂ

T E Z Ă D E D O C T O R A T

Contribuții la optimizarea proceselor de
fabricație a matrițelor cu miezuri din cristale
sintetice pentru extrudarea pastelor făinoase

Conducător științific:
prof.dr.ing. VASILE POPOVICI



BIBLIOTECA CENTRALA
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Timișoara, 2003

CUPRINS

1. INTRODUCERE	1
2. EVOLUȚIA PRODUCERII PASTELOR FĂINOASE	4
2.1. Istoric	4
2.2. Stadiul actual al producției pastelor făinoase	6
2.3. Obiectivele tezei de doctorat	12
3. STADIUL DE DEZVOLTARE A UTILAJELOR PENTRU PRODUCEREA PASTELOR FĂINOASE	14
3.1. Tipuri de utilaje pentru producerea pastelor făinoase	14
3.2. Componentele principale ale utilajului pentru producerea pastelor făinoase și rolul lor	18
3.3. Matrița de extrudat paste făinoase	22
3.3.1. Tipuri de matrițe – Tipuri de paste făinoase	22
3.3.2. Materiale utilizate la confecționarea corpului matriței	33
3.3.3. Materiale utilizate la confecționarea miezurilor din matriță	36
3.3.4. Tehnici de proiectare a matrițelor	42
3.3.5. Tehnici de realizare a matrițelor	43
3.3.5.1. Corectarea muchiilor	44
3.3.5.2. Maximizarea duratei de viață a miezului matriței	45
3.3.5.3. Miezi cu diametre largi	47
3.3.5.4. Stabilitatea Teflonului	48
3.4. Concluzii	50
4. CONTRIBUȚII PRIVIND DETERMINAREA UNUI MODEL SISTEMIC GENERALIZAT PENTRU PROCESUL TEHNOLOGIC DE FABRICAȚIE A MATRIȚELOR DE EXTRUDAT PASTE FĂINOASE	51

4.1. Sistemul generalizat de acțiune tehnologică la fabricarea matrițelor de extrudat paste făinoase	51
4.2. Structura sistemului de acțiune tehnologică directă la fabricarea matrițelor de extrudat paste făinoase	54
4.3. Modelul intrări – ieșiri generalizat pentru procesul tehnologic de fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase	56
4.4. Analiza globală a sistemului de fabricație a matrițelor de extrudat paste făinoase	62
4.5. Concluzii	68
5. STUDIU PRIVIND POSIBILITĂȚILE DE REALIZARE A MATRIȚELOR DE EXTRUDAT PASTE FĂINOASE CU MIEZURI DIN SAFIRE ARTIFICIALE	69
5.1. Considerații generale	69
5.2. Safirul artificial	69
5.3. Metode de creștere a monocristalelor de safir artificial din topitură	72
5.3.1. Regimul termic al creșterii monocristalelor de safir din topitură	72
5.3.2. Tehnica de creștere Verneuil	76
5.3.3. Tehnica de tragere Czochralski	79
5.3.4. Prelucrarea cristalelor sintetice obținute prin tehnicile Verneuil și Czochralski	81
5.3.5. Tehnica de tragere Stepanov	85
5.3.6. Tehnica de tragere EFG	87
5.3.7. Studiul condițiilor de cristalizare a safirului sintetic	89
5.3.8. Obținerea cristalelor sintetice direct în profilul dorit, în instalația „Saphirom”	98
5.4. Concluzii	104

6. ALUATUL PENTRU PASTE FĂINOASE	106
6.1. Caracteristicile aluatului	106
6.1.1. Calitatea făinii	106
6.1.2. Umiditatea aluatului	107
6.1.3. Consistența aluatului	109
6.1.4. Temperatura aluatului	110
6.2. Modelarea aluatului	113
6.3. Curgerea aluatului prin matrița de extrudare. Elemente de reologie	119
6.3.1. Elemente de reologie generală	119
6.3.2. Bazele procesului de extrudare a aluatului de paste făinoase	122
6.3.3. Elemente de reologie a aluatului de paste făinoase	126
6.3.4. Studiu reologic pentru curgerea aluatului de paste din punct de vedere al condițiilor de extrudare	131
6.4. Concluzii	138
7. CERCETĂRI EXPERIMENTALE	139
7.1. Generalități	139
7.2. Strategii de experimentare	140
7.3. Metode de analiză statistică	146
7.4. Rezultatele cercetărilor experimentale	155
7.4.1. Standul experimental	155
7.4.2. Analiza statistică a datelor experimentale	162
7.4.2.1. Modelarea experimentală a gradului de uzură	162
7.4.2.2. Modelarea experimentală a presiunii în interiorul canalului de extrudare	173
7.5. Concluzii	187
8. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE	189

8.1. Concluzii generale	189
8.2. Contribuții originale	191
8.2.1. Contribuții în domeniul cercetării teoretice	191
8.2.2. Contribuții în domeniul cercetării experimentale	192
BIBLIOGRAFIE	194
DICȚIONAR DE ACRONIME ȘI NOTAȚII	203

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

În procesul tehnologic de fabricare prin extrudare a pastelor făinoase, matrița de extrudare joacă rolul primordial în ceea ce privește forma și dimensiunea finală a pasteii.

În prezent, marile concerne producătoare de paste făinoase (Niccolai Trafile, Landucci – Italia) se confruntă cu două mari probleme: productivitatea și rezistența matrițelor. Plecând de la aceste considerente, în prezenta lucrare s-au realizat cercetări cu privire la optimizarea experimentală a gradului de uzură a canalului interior al pastilei din componența matriței de extrudat paste făinoase, prin prisma corelării factorilor de influență asupra acestuia, și anume temperatura aluatului, umiditatea aluatului și rotația melcului.

De asemenea, pornind de la cerințele impuse procesului de modelare prin extrudare a pastelor făinoase cu implicații directe asupra matrițelor – organul principal modelare – s-a găsit soluția înlocuirii materialelor tradiționale (materiale metalice – bronz, oțel inoxidabil; materiale plastice – Teflon) cu materiale noi, și anume din monocristale de safir artificial, care în comparație cu cele realizate din materiale, prezintă următorul avantaj primordial: forma și configurația pasteii făinoase modelată prin extrudare prin matrițe din safire artificiale sunt conforme cu cerințele impuse, datorate suprafeței oglindă pe care o oferă suprafața activă de extrudare din safir, a coeficientului de frecare mic.

În capitolul 2 este prezentată evoluția fabricării pastelor făinoase în lume, cu stadiul actual în lume, precum și obiectivele tezei de doctorat.

Capitolul 3 cuprinde un studiu asupra tipurilor de utilaje pentru producerea pastelor făinoase, componentelor acestora și prezintă corelația dintre diferitele tipuri de matrițe de extrudat și sortimentele de paste făinoase. De asemenea sunt prezentate materialele utilizate în prezent pentru matrițele de extrudat.

Practica proceselor de fabricație a pastelor făinoase, cunoaște forme diversificate, care fac destul de dificilă o clasificare unanim acceptată a proceselor tehnologice de fabricație a acestora. Astfel, obiectivul capitolului 4 a fost acela de a realiza o clasificare generală, care prin conceptul de continuitate să permită o legătură cu modelarea matematică ulterioară analizei sistemice. S-a realizat astfel un sistemul de acțiune tehnologică generalizat. De asemenea s-a definit și conceput un model intrări-ieșiri generalizat pentru procesul tehnologic de fabricare a matrițelor de la extruderea de paste făinoase.

În capitolul 5 s-a realizat un studiu privind posibilitățile de realizare a matrițelor de extrudat paste făinoase cu miezuri din safire artificiale. Se prezintă astfel avantajele implementării safirului artificial în construcția matriței de extrudat paste făinoase. De asemenea se analizează diferitele tehnici de tragere a monocristalelor de safir și se recomandă prioritar metoda EFG datorită preciziei și economicității.

Datorită caracterului interdisciplinar al subiectului abordat în prezenta teză de doctorat, capitolul 6 abordează elemente de tehnologie alimentară, cu privire la modelarea, din punct de vedere tehnologic, a aluatului de paste făinoase. De asemenea autorul analizează aspectele reologice ale curgerii aluatului prin matriță și influența acestora asupra corpului matriței.

Capitolul 7 prezintă fundamentul teoretic referitor la metodele statistico – matematice folosite în scopul optimizării propuse. De asemenea, pe lângă strategiile de experimentare și metodele de analiză statistică, se prezintă

standul experimental utilizat pentru realizarea cercetărilor experimentale și se realizează o analiză statistică a datelor experimentale.

Capitolul 8 prezintă concluziile finale asupra lucrării, contribuțiile aduse și sugestiile privind eventualele direcții de continuare a cercetărilor.

Folosesc acest prilej pentru a mulțumi conducătorului științific, domnului prof.dr.ing. Vasile Popovici, pentru acceptarea mea la pregătirea tezei de doctorat și din partea căruia am beneficiat de îndrumarea competentă și plină de tact, fiind încurajat de bunăvoința și exigența îmbinate într-o complementaritate firească.

De asemenea mulțumiri se cuvin tuturor aceluia care m-au sprijinit pe parcursul realizării acestei lucrări.

CAPITOLUL 2

EVOLUȚIA PRODUCERII PASTELOR FĂINOASE

2.1. Istoric

Pastele făinoase constituie un aliment consumat universal. Cunoscute probabil de mult timp de către civilizațiile chineză și mediteraneene, pastele făinoase sunt în prezent apreciate și consumate în toată lumea: multiplele posibilități de fabricație, facilitatea transportului, aptitudinea excelentă de conservare și depozitare, buna calitate nutrițională și igienică sunt factori care favorizează consumul pastelor făinoase.

În realitate, istoria pastelor făinoase datează de 7000 de ani, când omul abandonează viața nomadă și devine fermier, învață să semene pământul și să recolteze. La astfel naștere istoria grâului, și istoria pastelor începe cu istoria grâului. Omul începe să proceseze grâul, să îl macine, să obțină astfel făină și aceasta să o amestece cu apă. Multe secole înainte de naștere lui Christos, grecii și etrușcii produc și consumă primele tipuri de paste. Primul indiciu istoric asupra existenței unor similitudini cu pastele datează din secolul întâi înainte de Christos, la civilizația greacă. Termenul grecesc de „laganon” a fost utilizat pentru a defini un strat foarte plat de pastă tăiată în fâșii. Din grecescul „laganon” derivă cuvântul latin „laganum”, pe care Cicero îl folosește în scrierile sale. În Satira VI din Cartea Întâi, versul 115, Horațiu descrie prânzul său fugar, în componența căruia intra „lagane”.

Arabii din deșert au fost primii care au uscat pastele, pentru a le conserva perioade mai lungi de timp. Astfel ei au fabricat cilindrii înguști de paste cu orificii interioare pentru a se putea usca mai repede. Cel mai vechi document este o carte scrisă de Ibran' al Mibrad (secolul al IX-lea), care descrie un fel culinar foarte popular în triburile de beduini și berberi și care

încă se mai mănâncă și astăzi în Siria și Liban. Acest fel de mâncare se numește „rista” și este un fel de macaroane uscate.

Prima capitală istorică a pastelor este orașul Palermo, deoarece prima atestare istorică privind producerea pastelor uscate la nivel artizanal – industrial datează din secolul al XI-lea în Sicilia, o regiune care la acea vreme a fost puternic influențată de cultura arabă. Descrierea pastelor făcută de Ibran' al Mibrad relevă o mare varietate de paste deja din secolul al IX-lea. Știința și tehnologia producerii pastelor a fost probabil transmisă de către arabi în timpul ocupației Siciliei între secolele IX – XI. În jurul anului 1154, cu mult înainte de nașterea lui Marco Polo, geograful arab Al-Idrisi arată că în Trabia, o regiune la 30 km distanță de Palermo, se produc paste făinoase denumite „triyān”, de la cuvântul arab „itrija”, încă folosit și astăzi și derivat din cuvântul rădăcină „tari”, care înseamnă umed, proaspăt. În Sicilia și astăzi se întâlnesc denumirile de „tria bastarda” și „vermiceddi di tria”.

Pentru prima oară într-o scriere literară, „maccheroni” sunt menționate în „Decameronul” (1348 – 1353) lui Boccaccio, când Maso del Saggio descrie țara lui Bengodi: este descrisă existența unui munte întreg de brânză Parmesan, cu care oamenii nu făceau nimic altceva dar produceau „maccheroni” pe care le fierbeau.

Primele denumiri pentru pastele făinoase au fost cele de tagliatella, tagliolino, fettuccina. Inițial, ele erau produse cu o presă – melc. Aluatul era amestecat cu ajutorul unor prăjini și introdus în presă. „Fabricile” artizanale au evoluat rapid ca număr, astfel încât în secolul al XVII-lea, prin lege papală (1641), papa Urban VIII a „limitat” vânzarea de paste prin stabilirea unei distanțe minime de 24 m între un magazin și altul.

Din producții familiale, fabricarea pastelor se dezvoltă ca și producție publică și mai târziu afacere, moment în care apar Statute ale Artei Pastelor (Arti dei Pastai): 28 mai 1574 la Genova, 1577 în Savona, 1579 în Napoli,

1605 în Palermo, 11 august 1646 în Roma. Astfel ia naștere o nouă ramură industrială, care, la fel ca majoritatea activităților industriale, se dezvoltă cu rapiditate în secolul al XIX-lea.

Prima referire explicită la cele două utilaje principale de producere a pastelor făinoase – amestecătorul (malaxorul) și presa – este făcută într-un poem al contelui Francesco de Lemene (1634 – 1704), „Della discendenza e nobilita de' maccheroni”, publicat în 1654 la Modena. În poemul lui, Lemene descrie genealogia eroului său Maccarone și povestește cum Pasta s-a născut din Făină ca mamă, care dă naștere fiului natural numit Gnocco și altor copii cu trei tați, Cannella (rulou), Amestecătorul și Presa. Cu Cannella ea dă naștere la Polenta și Lasagna. Dar cel mai renumit fiu, Maccarone, ia naștere din Presă. Descendentul lui Maccarone este Fidelino, tatăl lui Pestarino.

Matrița pentru extrudare este amintită prima oară în 1630 de către Giambattista Basile, ca fiind partea cu diferite orificii care determină diferite tipuri de paste.

Prima presă hidraulică pentru extrudarea macaroanelor datează din anul 1882, constând dintr-un cilindru vertical în care aluatul de pastă este împins de către o forță hidraulică. Aluatul este astfel forțat să treacă prin orificiile extruderului.

2.2. Stadiul actual al producției pastelor făinoase

Națiunea în care se consumă cel mai mult paste, în raport cu alte popoare, este bineînțeles *Italia*. Fiecare italian mănâncă aproximativ 70 grame paste pe zi, ceea ce înseamnă circa 28 kilograme pe an. Cu o producție de 2534887 tone de paste făinoase pe an, industria italiană de

paste făinoase se situează pe primul loc în lume în acest sector. Circa 88% din producția totală este cea de paste uscate, fabricate exclusiv din făină obținută din grâu dur. Industria italiană de paste făinoase, în anul 1994, se prezintă statistic astfel: 167 fabrici de paste făinoase, cu o producție de 2534887 tone, din care 2239643 paste uscate din făină (88%), 159002 tone paste cu adaos de ouă, 63942 tone paste cu diferite adaosuri și 72300 tone paste înghețate; din acestea, 1551600 tone sunt consumate pe piața internă, ceea ce înseamnă 28 kg paste pe cap de locuitori, iar 938287 tone sunt livrate la export.

În *figura 2.1* se poate observa evoluția și destinația exportului de paste făinoase italiene, în tone, pe perioada 1974 – 1994, defalcată ca producție totală, producție destinată exportului în Comunitatea Europeană și producție destinată exportului în alte țări.

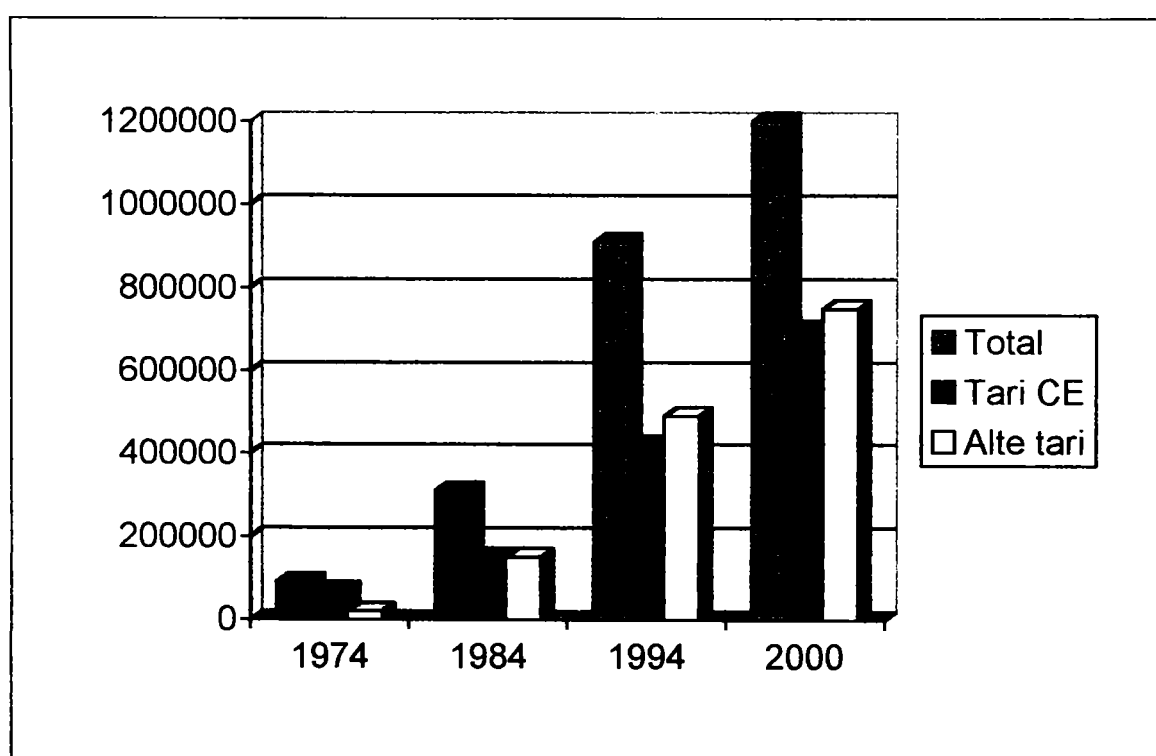


Figura 2.1 – Evoluția și destinația exportului de paste făinoase italiene, în tone, după [2]

Consumul de paste făinoase în lume, exprimat în kg pe cap de locuitor, este următorul: Italia (28); Venezuela (12,7); Tunisia (11,7); Cile (10); Elveția (9,6); Statele Unite, Grecia (9); Portugalia, Franța, Argentina, Canada, Turcia, Germania, Benelux, Suedia, Brazilia, Spania și Austria (între 8 și 4 kg pe cap de locuitor).

Interesul din ce în ce mai mare pentru pastele făinoase determină inițierea diverselor programe de mediatizare, respectiv de cercetare a acestora: prima intervenție în acest sens are loc în anul 1987, și anume activitatea promoțională a Uniunii Fabricanților Italiani de Paste Făinoase (U.N.I.P.I. – Unione Industriali Pastai Italiani – fondată în 1968) intitulată “De ce paste?” (“Di che pasta sei?”). Această campanie publicitară este transmisă de cele mai importante canale de televiziune italiene – Canale 5, Italia 1 și Rete 4 – cu mesajul următor: pastele nu îngrașă, sunt nutritive și asigură energie pentru o activitate umană dinamică.

Pe parcursul anilor 1989 – 1990, U.N.I.P.I., în colaborare cu Ministerul public al educației și Ministerul Agriculturii, realizează o campanie publicitară colectivă pentru a realiza o adevărată revoluție a pastelor alimentare în școli. Circa 1600 de școli au participat la un joc – concurs, intitulat “O lume a pastelor” (“Un mondo di pasta”). S-a realizat astfel o emisiune televizată prin canalul Rete 4, intitulată “Joc ... și paste” (Gioco ... e pasta”), în fiecare duminică, între 22 aprilie și 3 iunie 1990.

Pe parcursul anului școlar 1990/1991, U.N.I.P.I. reia jocul – concurs “Un mondo di pasta”, în colaborare cu redacția “Topolino” de la Walt Disney, care a difuzat jocul în rândul cititorilor săi tineri, a selecționat colaboratorii, a clasificat participanții și a distribuit premiile învingătorilor.

U.N.I.P.I. organizează o masă rotundă cu titlul “Educația alimentară în școli, o siguranță a producătorilor” (“L’educazione alimentare a scuola, la parola ai produttori”) și vizite ale studenților în câteva fabrici italiene de paste

făinoase, cu scopul de elaborare a unei cercetări monografice despre paste, redactată de copii și profesori în cadrul unui program experimental, intitulat “Pastele – este păcat să nu le mănânci” (“La pasta, è peccato non mangiarla”).

Rezultatele acestor experimente încurajează U.N.I.P.I. în continuarea campaniei de informare și educație alimentară. Pe parcursul anului școlar 1991/1992 se distribuie în școlile medii un ghid didactic, intitulat “Pastele” (“La Pasta”), realizat în colaborare cu Oficiul de Studii și Programare al Ministerului Educației Publice și Ministerului Agriculturii. Acest ghid constă într-o casetă video ce conține un documentar interesant despre paste și un ghid operativ pentru profesori, care prezintă pastele, într-un mod modern și eficace, din punct de vedere istoric, productiv și nutrițional.

Plecând de la aceste premize, U.N.I.P.I. sponsorizează un program intitulat “Fără paste nimic nu se poate” (“Senza pasta non si core”) și propune un scenariu cu tema “Olimpiada pastelor” (“Olimpiadi della pasta”), inspirat din dualitatea paste și sport. Scopul este de a realiza un concurs cu premii pentru pasionații de paste și sport, concurs intitulat “Referendumul pastelor” (“Il Pasta Referendum”). Acest concurs a avut succes, astfel încât revista “Topolino” de la Walt Disney a realizat o monografie despre paste și sport.

În ultimii ani U.N.I.P.I. reușește astfel să realizeze o campanie de convingere a consumatorilor, și anume că pastele sunt un aliment ce conduce la un stil de viață dinamic, sănătos și sportiv.

În anul 1993, U.N.I.P.I., împreună cu Școala de Sport și Institutul Științific de Sport al Comitetului Olimpic Național Italian (CONI), a realizat o casetă video cu titlul “Alimentația atleților” (“A tavola da Atleta”), care își propune să formeze sportivi și tehnicieni din toate disciplinele, formare în care alimentația trebuie să fie corectă și în care consumul de paste joacă un rol fundamental. După prezentarea casetei în Aula Magna a Școlii de Sport a

CONI, ea este distribuită în școlile și centrele de formare ale CONI, ca instrument didactic pentru informarea corectă asupra influenței unei alimentații corespunzătoare asupra randamentului sportiv. În cursul anului 1994, procesul de difuzare a acestei casete se extinde și în școli, prezentând rezultatele primei faze a difuzării casetei, nerenunțând la obiectivul continuării publicității în lumea sportivă, pentru evidențierea proprietăților nutritive și dietetice ale pastelor – indispensabile pentru o alimentație sănătoasă și un randament fizic maxim.

Pentru încheierea fiecărei campanii de promovare a pastelor, U.N.I.P.I. organizează, împreună cu Academia Italiană Gastronomică (Accademia Italiana della Cucina), o gală, "Pasta în concert" ("Pasta in concerto"). Prima gală are loc în 1991. În 1992, în Japonia, în orașele Kyoto și Osaka, sunt organizate două seri de prezentare a pastelor italiene, având finalitatea în publicarea unei broșuri, în italiană și japoneză, intitulată "Pastele italiene în Japonia: o colaborare culturală" ("La pasta italiana in Giappone: un matrimonio culturale"), în care sunt prezentate pastele italiene și rezultatele cercetărilor realizate. Tot în 1992 are loc gala din Franța și cea din San Diego. La toate aceste gale participă specialiști, nutriționiști, politicieni, economiști. Încununarea acestor gale este cea din 1992, cu ocazia aniversării a 500 de ani de la descoperirea Americii, gală încheiată cu spectacolul de deschidere a stagiunii Operei din San Francisco, cu opera "Tosca" de Puccini.

Ca o sinteză a celor prezentate anterior, se poate spune că pastele au devenit în prezent o adevărată ramură culturală, nu numai un important aliment de consum.

În **Venezuela**, țară situată pe locul al doilea în ceea ce privește consumul de paste făinoase pe cap de locuitor (12,7kg), ia ființă Asociația Venezueleană a Pastelor Făinoase (AVEPASTAS – Asociación Venezolana

de Pastas). În această țară, pastele sunt sinonime cu nutriția, sunt acceptate de toată populația, ceea ce reflectă importanța acestui aliment, care este competitiv în concurența cu celelalte alimente ce au la bază ca materie primă făina de porumb, porumbul făcând parte din istoria alimentației venezuelene. Secretul pastelor venezuelene este calitatea primă a făinii, care permite o amestecare uniformă, cu bune caracteristici ale glutenului. După producerea pastelor în familii, în anii 1960 este instalată prima linie industrială automată de producere continuă a pastelor, cu o capacitate de producție între 400 și 1000 kg pe oră, ajungând ca în prezent să se producă 2000 – 3000 kg pe oră. La nivelul anului 1995, în Venezuela există 50 fabrici de paste făinoase, ce produc 80 de tipuri de paste.

În **Statele Unite** se identifică două obiective pentru publicitatea pastelor făinoase: în primul rând, eforturile de promovare a pastelor în toate țările lumii, iar în al doilea rând, posibilitatea organizării la nivel mondial a unei campanii de promovare a pastelor.

În Statele Unite există 113 fabrici de paste făinoase, localizate în 37 de state. Estimarea consumului de paste la nivelul Statelor Unite este de 2,5 bilioane de kg (în anul 1994), din care 74% paste uscate, iar restul congelate sau refrigerate. Asociația Națională de Paste Făinoase (NPA – National Pasta Association), fondată în anul 1904 (sub denumirea de atunci de Asociația Națională a Producătorilor de Macaroane – National Macaroni Manufactures Association), finanțează, începând din anul 1940, un program de promovare a pastelor. În anii 1990, mesajul acestui program este “paste: de trei ori pe săptămână” (“pasta: three times a week”), prin care se prezintă consumatorilor avantajele consumului de paste: sunt sănătoase, diferite și economice. Programul include o broșură distribuită în 10000 de restaurante, precum și o casetă video cu scop educațional, distribuită școlilor. În America, octombrie este luna pastelor.

2.3. Obiectivele tezei de doctorat

Obiectivele cercetărilor întreprinse în prezenta lucrare se referă la aspecte legate de optimizarea procesul de prelucrare a matrițelor de extrudat paste făinoase.

Autorul și-a propus ca, pe baza studiilor bibliografice întreprinse, să efectueze un studiu teoretic pentru identificarea tuturor mărimilor caracteristice ce intervin în procesul de fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase. De asemenea s-a avut în vedere analizarea principalelor materiale din care se confecționează matrițele.

Având în vedere toate aspectele rezultate din studiile teoretice propuse, s-a avut în vedere găsirea unei soluții optime în ceea ce privește matrița de extrudat paste făinoase, care să răspundă cel mai bine din punct de vedere tehnico – economic.

Astfel, autorul propune introducerea unui nou material pentru miezurile matrițelor, și anume safirul artificial. Analizând tehnicile de creștere a monocristalelor de safir, se propune găsirea aceleia care să corespundă cel mai bine cerințelor impuse privind precizia și reducerea la minim a prelucrărilor ulterioare.

Un alt obiectiv al tezei de doctorat a fost acela de a analiza din punct de vedere reologic curgerea aluatului de paste făinoase prin canalele de extrudare din matriță și analizarea efectului curgerii asupra pereților interiori ai canalelor.

Pe baza acestor date s-a propus realizarea unui stand experimental, a unei matrițe în care să fie introduse miezuri din diferite materiale, astfel încât să se analizeze abaterile de la dimensiune în aceleași condiții de lucru pentru

materialele supuse analizei. Pe baza datelor experimentale s-a propus alegerea unei strategii de experimentare statistico-matematice care să permită optimizarea gradului de uzură al pastilelor matriței de extrudat, din punct de vedere al factorilor de influență identificați.

CAPITOLUL 3

STADIUL DE DEZVOLTARE A UTILAJELOR PENTRU PRODUCEREA PASTELOR FĂINOASE

3.1. Tipuri de utilaje pentru producerea pastelor făinoase

Principalele tipuri de utilaje pentru producerea pastelor făinoase, ale căror scheme sunt prezentate în figura 3.1, sunt:

- prese cu un melc (a, b) sau doi melci (c), la care matrița este montată paralel (b, c) sau perpendicular (a) pe direcția de extrudare;
- prese cu valțuri (d), la care cele două valțuri de presare se rotesc în sens contrar, antrenând aluatul pe care-l presează în matrița de modelare;
- prese hidraulice (e), formate dintr-un cilindru cu piston prevăzut în partea inferioară cu matrița de modelare.

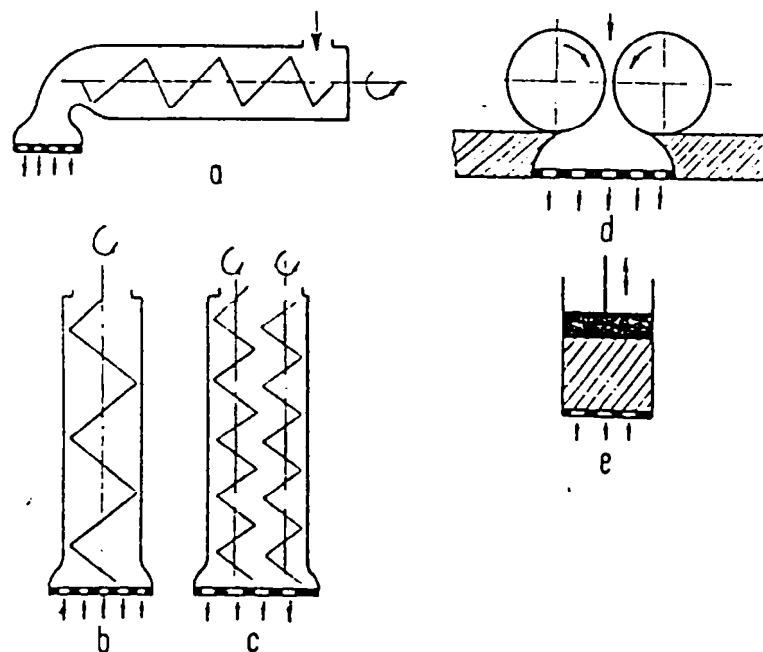


Figura 3.1 – Scheme ale utilajelor de producere a pastelor făinoase

Prelucrarea aluatului prin ștanțare constă din modelarea lui prin presare cu o matriță specială sau prin laminare sub forma unei benzi subțiri de aluat, urmată de ștanțarea propriu-zisă sau de tăiere în funcție de sortimentele fabricate.

Cel mai frecvent utilizat procedeu de producere a pastelor făinoase este acela prin extrudare (presare) cu melc. În *figura 3.2* este prezentată schema *utilajului de producere a pastelor făinoase prin extrudare (presa cu melc)*. Un astfel de utilaj se compune în principal dintr-o pâlnie de alimentare (1), incinta de presare (2), camera de uniformizare a presiunii (3), melcul de presare – extrudare (4), suportul matriței de modelare prin extrudare (5) și matrița (8). De asemenea, în schemă s-au figurat zonele de încărcare cu aluatul pentru paste făinoase (6) și zona de presare (7).

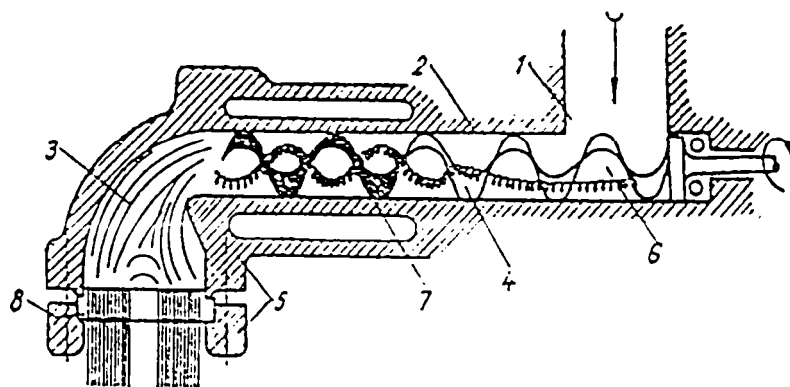


Figura 3.2 – Schema utilajului de producere a pastelor făinoase prin extrudare – presa cu melc

Deoarece presele cu melc pentru producerea pastelor făinoase au funcționare continuă, alimentarea lor cu aluat se face treptat pe măsura antrenării acestuia de către melc. Pentru aceasta presele sunt cuplate cu un frământător continuu.

Un alt procedeu de producere a pastelor făinoase este acela prin presare cu valțuri. O astfel de instalație de modelare, a cărei schemă se prezintă în *figura 3.3*, este formată dintr-o pereche de valțuri (1), care antrenează aluatul de paste din pâlnia de alimentare. Aluatul este împins între valțuri cu un dispozitiv de batere cu funcționare periodică (2). Valțurile împing aluatul în camera de uniformizare a presiunii (3), de unde aluatul este forțat să treacă prin matrița de modelare (4). Fiecare valț este prevăzut cu două cuțite (5), (6), care îndepărtează resturile de aluat, evitându-se astfel aglomerarea aluatului pe suprafața exterioară a valțurilor.

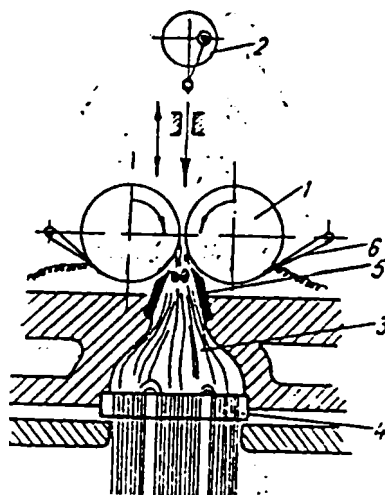


Figura 3.3 – Schema utilajului de producere a pastelor făinoase prin extrudare – presa cu valțuri

Un ultim tip de utilaje pentru producerea pastelor făinoase este prin ștanțare și tăiere, pentru tăierea în benzi subțiri (cum este cazul tăițelilor), prin trecerea unei folii de aluat printre două valțuri canelate, care se întrepătrund, sau pentru decuparea prin ștanțare, cu ajutorul unor dispozitive oscilante plane, care coborând pe foaia de aluat, taie bucăți cu forma dorită.

În figurile 3.4 și 3.5 sunt prezentate imagini din fabrici de producere a pastelor făinoase, și anume o *instalație de producere a pastelor lungi la temperaturi înalte (figura 3.4)* și o *instalație pentru producerea pastelor speciale la temperaturi înalte (figura 3.5)*.

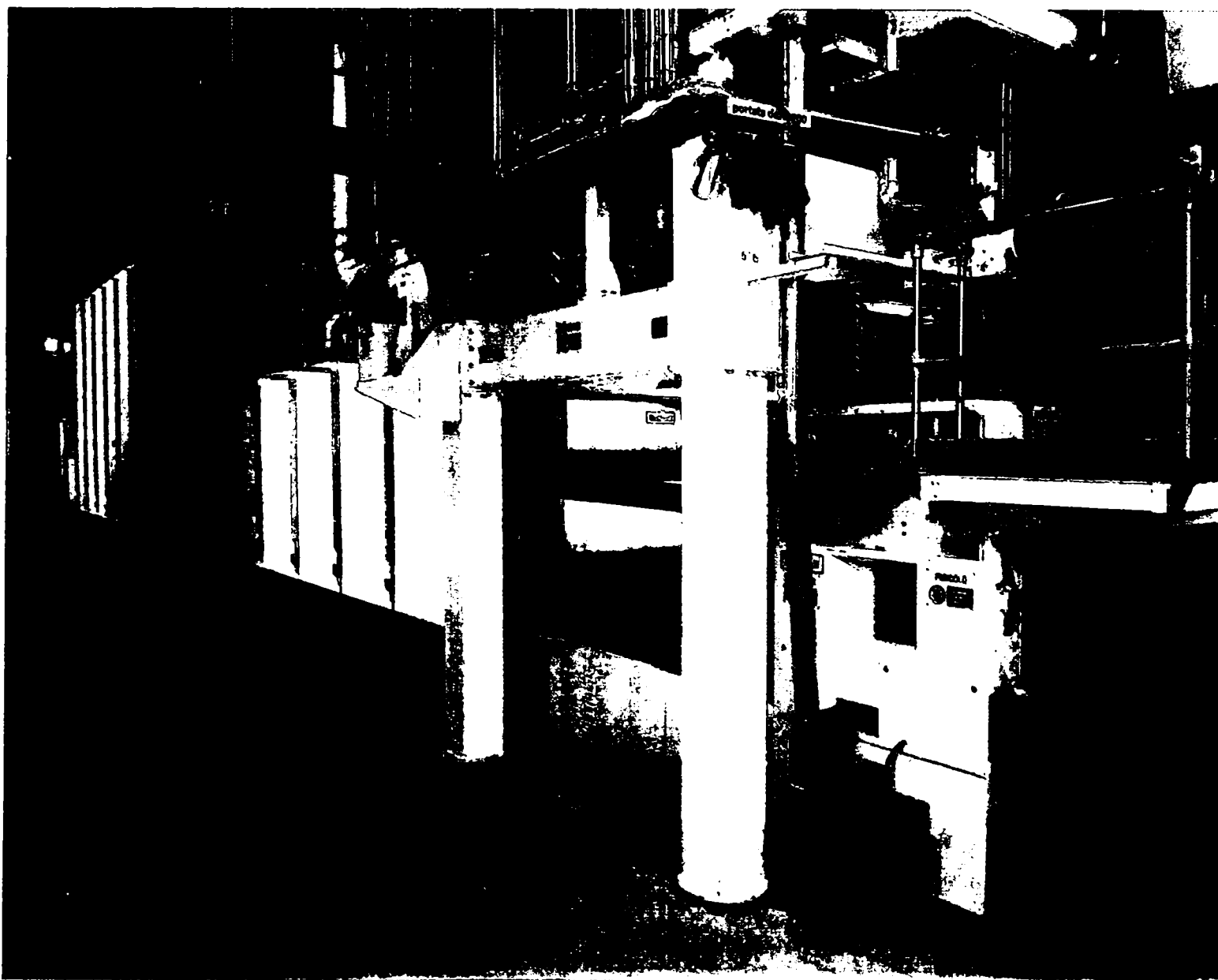


Figura 3.4 – Instalația de producere a pastelor lungi la temperaturi înalte

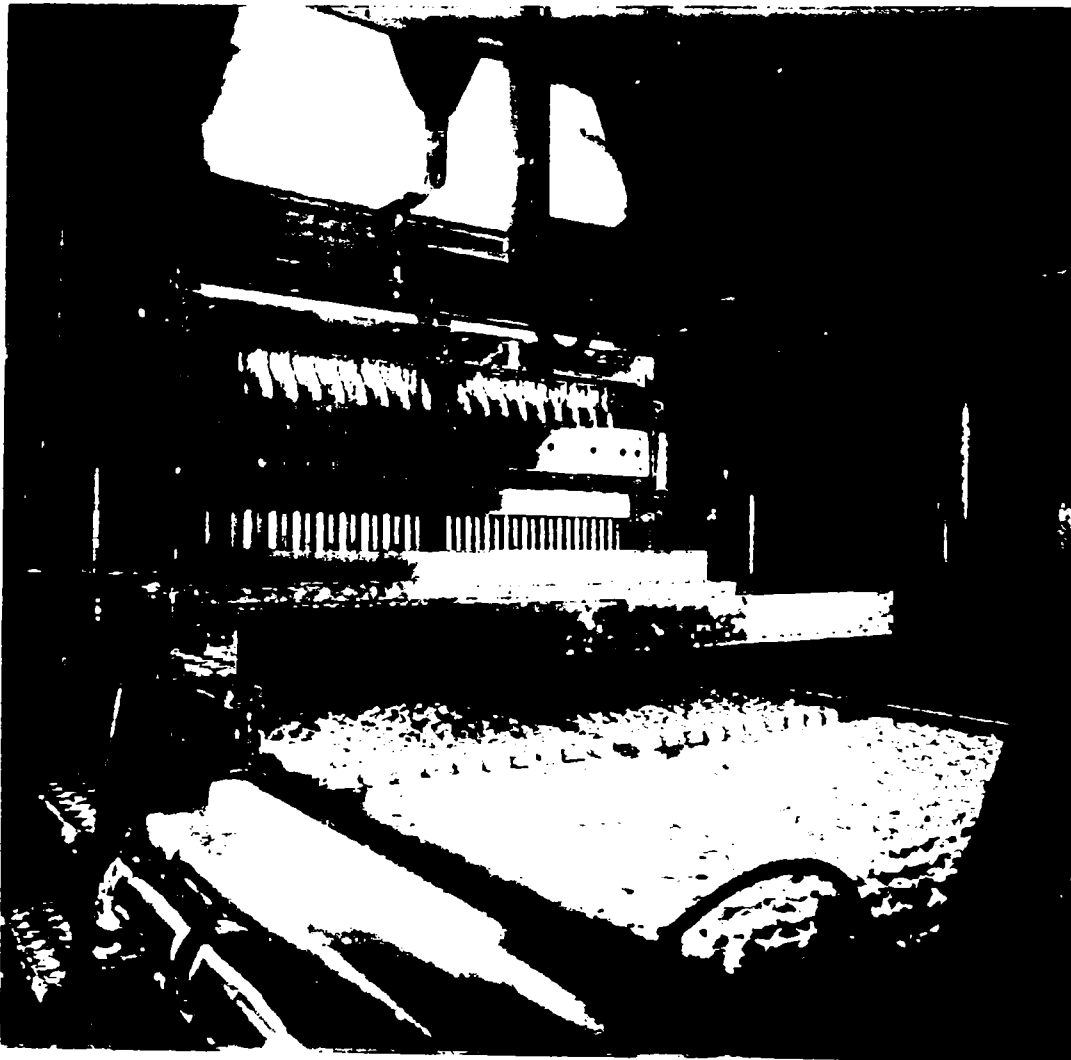


Figura 3.5 – Instalație de producere a pastelor speciale la temperaturi înalte

3.2. Componentele principale ale utilajului pentru producerea pastelor făinoase și rolul lor

Procesul tehnologic de producere a pastelor făinoase cuprinde în principal trei operații: *amestecarea materiilor prime* cu obținerea aluatului, *modelarea și extrudarea aluatului* cu obținerea pasteii, *uscarea pastelor umede* și obținerea produsului finit pregătit pentru ambalare și livrare.

În figura 3.6 este prezentată schema de principiu a unei instalații de producere a pastelor făinoase. Se disting utilajul propriu-zis de producere a pastelor făinoase (amestecare – presare – extrudare – modelare) (1), preuscătorul (2), uscătorul (3) și incinta de stabilizare (4).

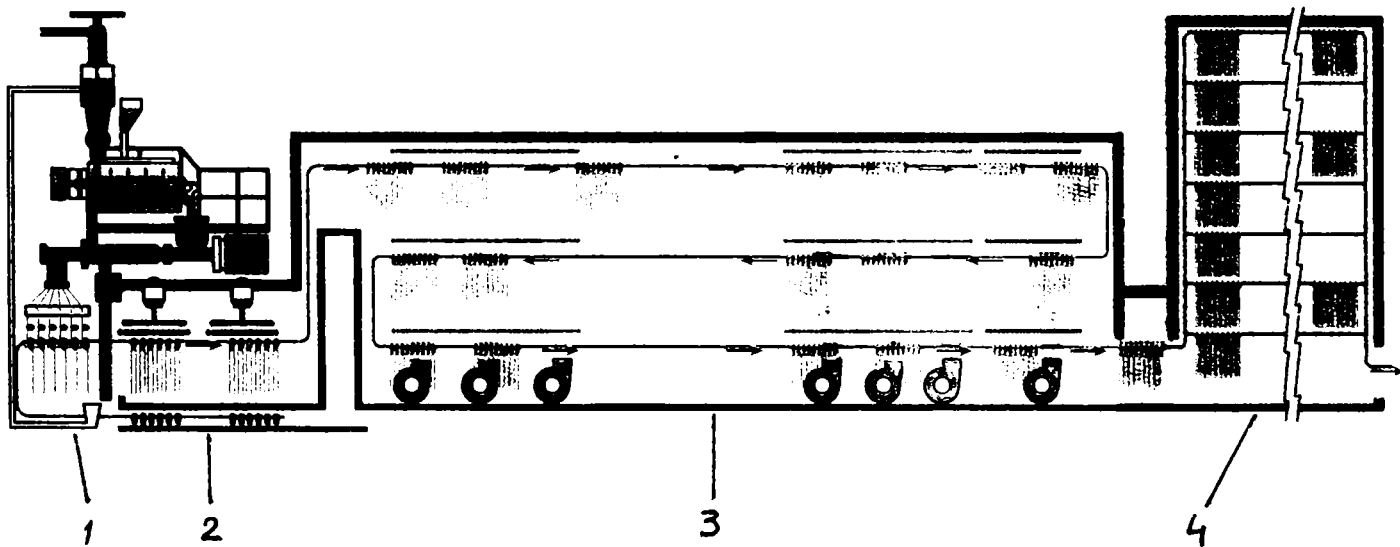


Figura 3.6 – Schema instalației de producere a pastelor făinoase

Utilajul propriu-zis de producere a pastelor făinoase (1 în figura 3.5) este prevăzut cu dozator automat pentru dozarea materiilor prime (2 în figura 3.7). Capacitatea dozatoarelor variază funcție de capacitatea de producție a liniei de fabricație.

Înainte ca faza de amestecare a materiilor prime – făina și apa – să aibă loc, acestea sunt supuse în prealabil unei operații de pre-amestecare, și anume într-un amestecător de mare viteză (2 în figura 3.6), pentru a distribui apa în granulele de făină într-un mod cât mai omogen. Viteza brațelor de amestecare în acest amestecător este foarte mare (900 rot/min) [1].

Operația propriu-zisă de amestecare are loc după așa-numita pre-amestecare. Particulele mici de făină (cu apă în exces) se omogenizează cu cele mari (cu necesar de apă). Amestecarea propriu-

zisă a făinii și apei are loc în amestecătorul de bază (principal) (3 în figura 3.7) care constă dintr-o cuvă de amestecare (6) în formă de W, în care sunt dispuse brațele de amestecare. Numărul acestora variază funcție de tipul preseii. Pe lângă cel de amestecare, brațele mai au și rolul de transport al aluatului de la intrare la ieșirea din cuva de amestecare.

Ultimul amestecător (4 în figura 3.7) diferă de celelalte datorită faptului că funcționează sub vacuum. Acest amestecător constă dintr-o cuvă de amestecare (6) amplasată transversal pe direcția de curgere a aluatului și prevăzută cu brațe de amestecare (5). Ea este prevăzută cu un capac din Plexiglas și închisă etanș cu garnituri.

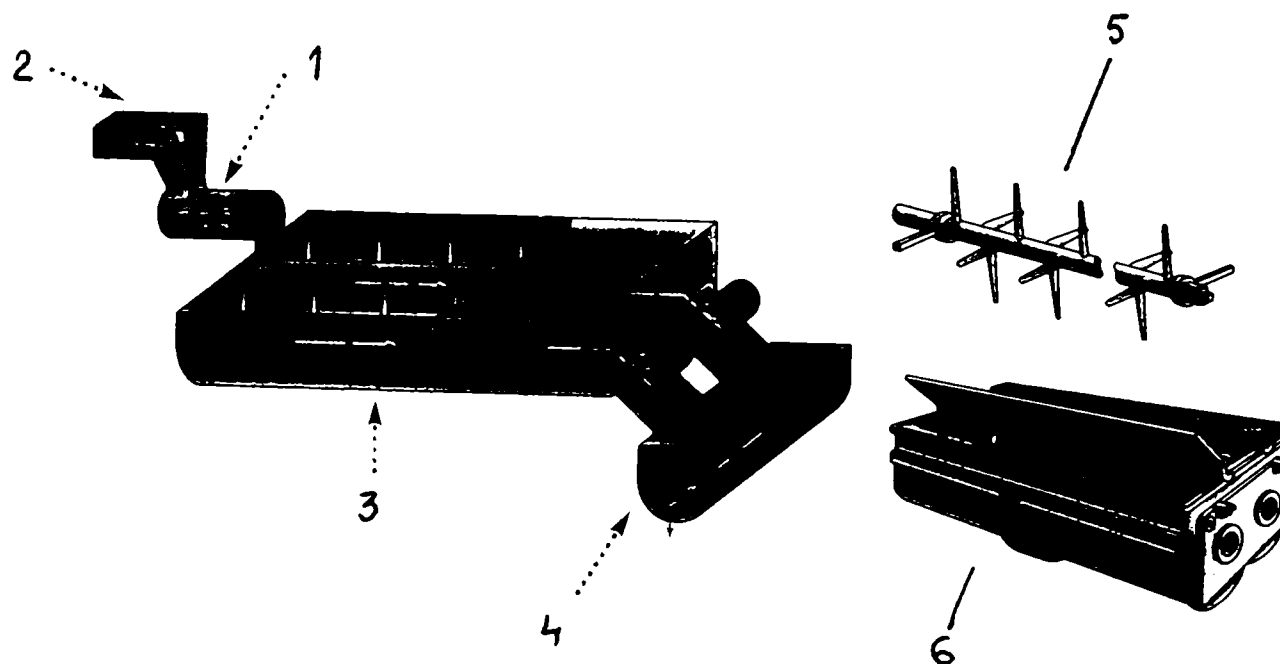


Figura 3.7 – Instalația de producere a pastelor făinoase – partea de pre-amestecare și amestecare

Operația de modelare a pastelor făinoase constă din două faze: comprimare și extrudare prin matriță. Din incinta de amestecare, aluatul trece în cea de comprimare (presare), la capătul căreia este presat în matrița de extrudare, unde este configurată forma pasteii făinoase. În timpul transportului către matriță are loc așa-numita amestecare a

aluatului. Astfel, acesta este complet omogenizat, ca rezultat al presiunii exercitate de melcul de extrudare. *Cilindrul și melcul de extrudare* sunt reprezentate în *figura 3.8*. Se deosebesc cilindrul și melcul de extrudare (1), sistemul de răcire al cilindrului (2), incinta de modelare (3) și matrița de extrudare (4).

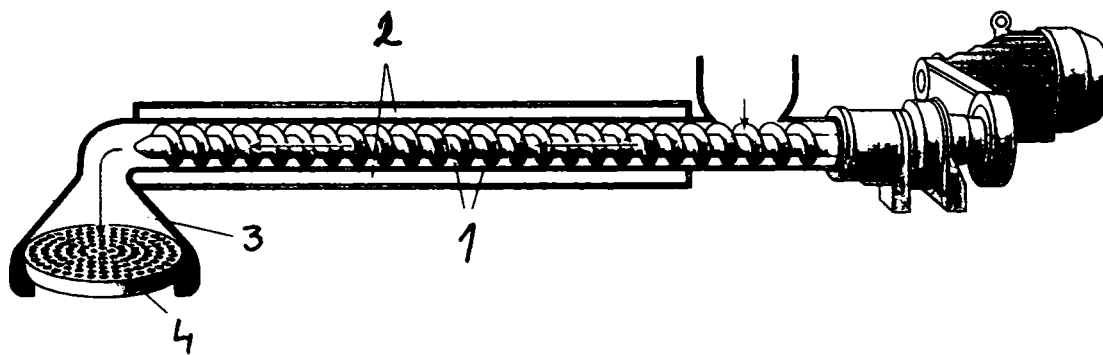


Figura 3.8 – Instalația de producere a pastelor făinoase – cilindrul și melcul de extrudare

Fazele de transport și presare a aluatului generează căldură, ceea ce are efecte negative asupra aluatului, care atinge valori critice ale temperaturi, cu coagularea proteinelor și astfel obținerea unei calități proaste a produsului finit. De aceea, căldura este controlată printr-un sistem de răcire cu apă, care menține temperatura cilindrului de presare la valori moderate.

3.3. Matrița de extrudat paste făinoase

3.3.1. Tipuri de matrițe – Tipuri de paste făinoase

Matrițele pentru modelarea aluatului reprezintă suportul pe care sunt amplasate orificiile de modelare și cu care sunt montate la prese. Matrițele sunt realizate dintr-un schelet de rezistență (corp), în care sunt prevăzute alveole pentru montarea pastilelor (cilindrilor) în care sunt prelucrate orificiile de modelare.

Matrițele se clasifică în funcție de grupa de sortimente ce urmează a fi fabricate astfel:

- matrițe *sub formă de disc* – se folosesc pentru toate grupele de sortimente, dar mai ales pentru pastele scurte;
- matrițe *dreptunghiulare* – se folosesc pentru fabricarea pastelor lungi.

Diversele tipuri de matrițe sunt indicate de către producători prin dimensiuni caracteristice, funcție de tipul (forma, dimensiunile) pastelor făinoase respective. Aceste dimensiuni sunt indicate în cataloagele firmelor producătoare lângă forma pastelor făinoase respective. Formele pastelor indicate în cataloage sunt cele reale (stare uscată), iar dimensiunile caracteristice însoțitoare sunt cele de la ieșirea pastei din matriță. Acest lucru trebuie avut în vedere, deoarece contractia pastei făinoase în timpul procesului de uscare este diferită, în funcție de materiile prime utilizate și tehnologia de modelare.

Matrițele sunt prevăzute cu *orificii de modelare*, care au forma specială produselor ce urmează a fi fabricate (*figura 3.9*):

- la *matrițele cilindrice (sub formă de disc)* orificiile de modelare sunt amplasate grupat, direct în corpul matriței;

- la *matrițele dreptunghiulare* orificiile sunt amplasate în două sau trei rânduri, astfel încât luate pe o vergea, firele de aluat să se așeze într-un singur șir fără a se suprapune.

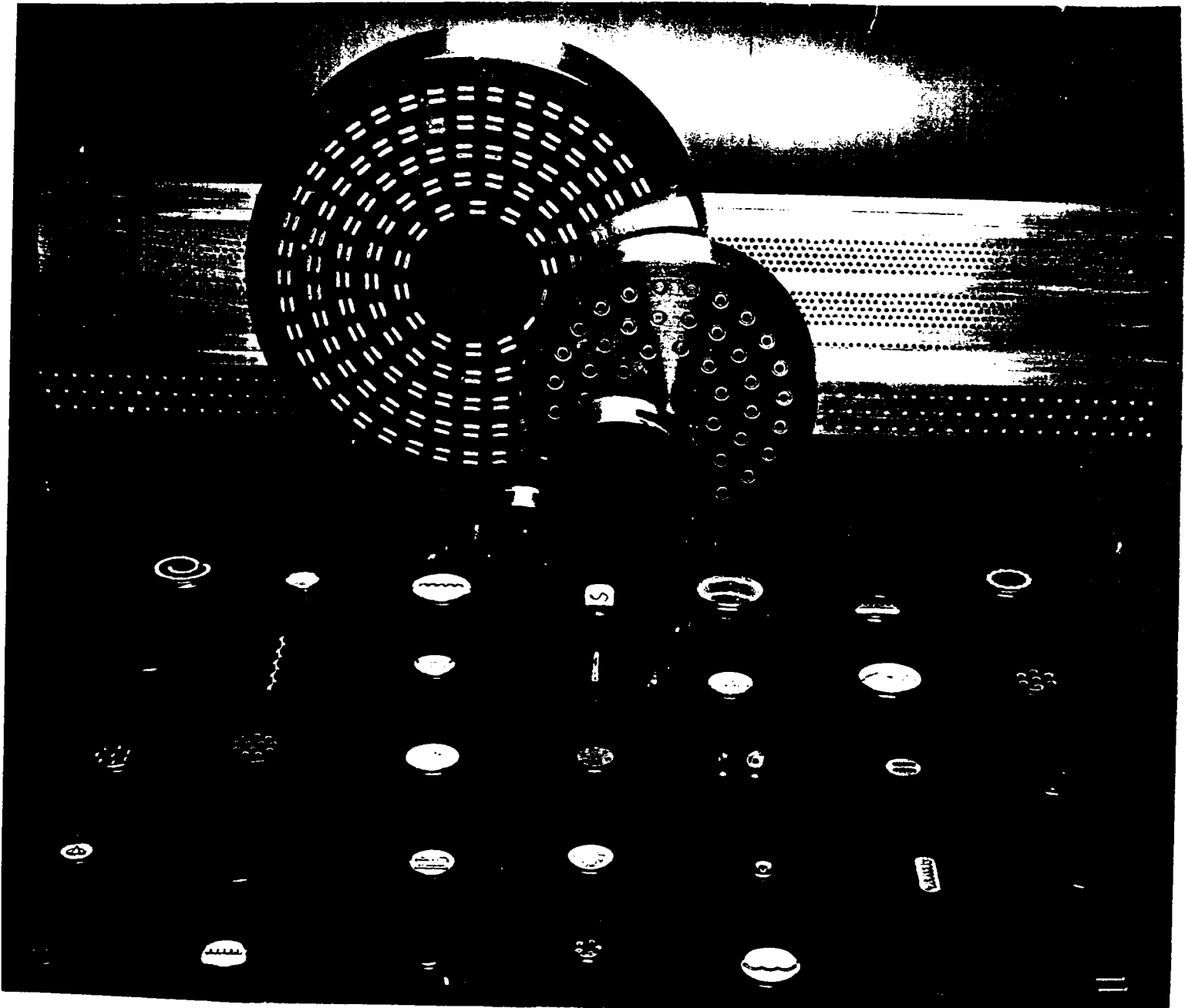


Figura 3.9 – Exemple de matrițe și miezuri

După modul în care curge aluatul prin orificiile matriței, se întâlnesc următoarele situații:

◆ curgere uniformă în toată secțiunea – aluatul este modelat în forma secțiunii libere a orificiului de modelare; este cazul fidelei, spaghetelor, macaroanelor;

◆ curgere neegală în secțiune; este cazul diferitelor forme de paste scurte (melcișiori, scoici).

Orificiile matriței se analizează în funcție de modul de curgere a aluatului prin ele.

Crearea suprafeței de modelare a orificiilor matriței se soluționează în două variante:

- prin montarea în blocul matriței a pastilei cu orificiul de modelare (*figura 3.10 a*), ceea ce permite refolosirea blocului și pentru alte sortimente;

- prin căptușirea alveolei din corpul matriței sau de la orificiu cu materiale plastice, care favorizează alunecarea (*figura 3.10 b*).

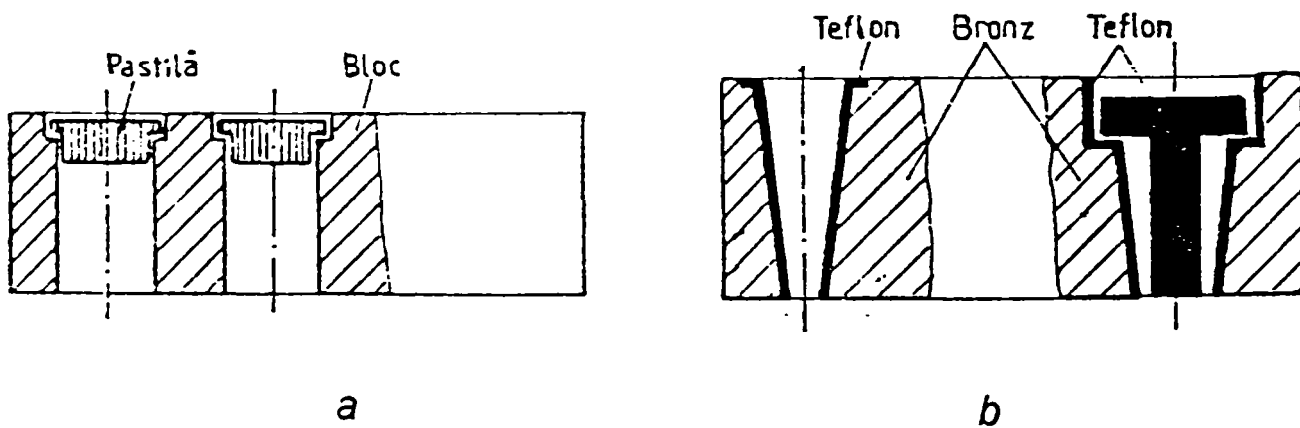


Figura 3.10 – Soluții privind crearea suprafeței de modelare a orificiilor matriței

Orificiile pentru modelarea aluatului sub formă de fire cu secțiune uniformă au un punct de ștrangulare maximă a curgerii, cu secțiunea de

forma dorită pentru firul de aluat. Aceasta este porțiunea, care face modelarea propriu-zisă.

La modelarea aluatului sub formă de fidea, matrițele sunt prevăzute cu orificii, care au diferite profile ale secțiunii longitudinale. *Formele orificiilor pentru modelarea formelor pline (fidelei) sunt următoarele (figura 3.11):*

- *dreaptă (a – cilindrică cu secțiune circulară; g – cilindrică cu secțiune ovală; h – triunghiulară; i – pătrată; j – dreptunghiulară) – prezintă o rezistență maximă la presare deoarece aderența aluatului la suprafața de alunecare este foarte ridicată;*

- *în trepte (b) – au avantajul că impun o turbionare a fluxului de curgere a aluatului prin matriță, ceea ce uniformizează deplasarea și reduce influența frecării acestuia de pereții matriței; viteza de curgere și deci productivitatea instalației de modelare cresc de 2 – 3 ori;*

- *tronconică (c – cu presare constantă și continuă; d – evazate; e – cu două trunchiuri de con; f – mixte cu porțiuni cilindrice tronconice) – provoacă o presare suplimentară a aluatului, îl compactizează.*

Orificiile tronconice evazate (d) reduc foarte mult efectul de frecare în matriță, fiind recomandate pentru aluaturile cu lipiciozitate ridicată și ca soluție pentru creșterea productivității instalațiilor de modelare cu 50 – 70%. Prin adoptarea acestui profil al orificiilor productivitatea crește de 0,5 – 3 ori față de rezultatele anterioare.

Orificiile cilindrice în trepte sau conice, care au deschiderea de la intrarea aluatului lărgită, reduc frecarea în matriță și realizează o creștere a vitezei de curgere a aluatului. Suprafața mai mare micșorează însă numărul de orificii ce se pot amplasa pe matriță.

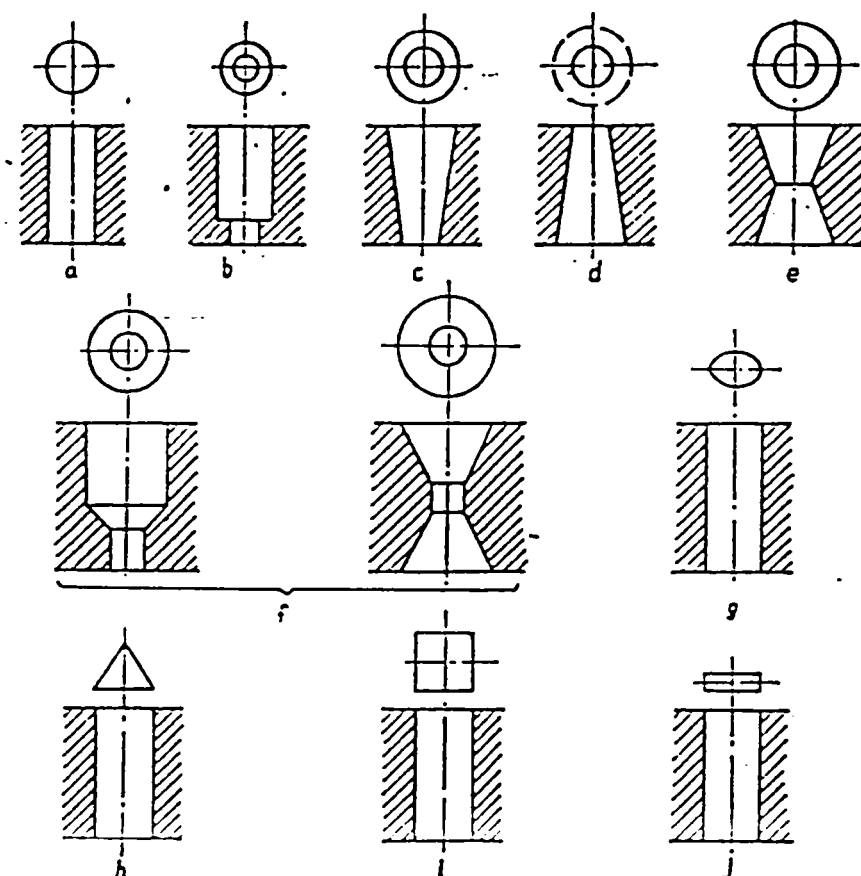


Figura 3.11 – Secțiuni pentru orificiile matrițelor folosite la modelarea aluatului sub formă de fire pline

Orificiile pentru modelarea aluatului sub formă de panglică (tăiței) (figura 3.12) au suprafețele de alunecare a aluatului line și fără unghiuri drepte sau ascuțite, care ar provoca frânări puternice și ar crea pe produse suprafețe zgrunțuroase.

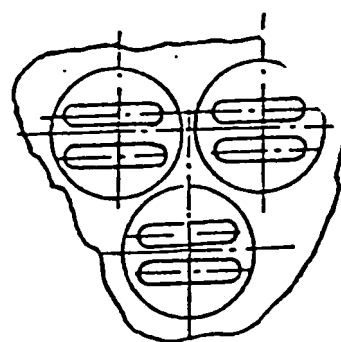


Figura 3.12 – Orificii de modelare a aluatului sub formă de panglică

Modelarea aluatului sub formă de tuburi sau alte profiluri cu gol interior se face prin orificii de construcție specială, prevăzute cu tel interior. Aceste orificii (*figura 3.13*) se compun din mai multe zone succesive:

- porțiunea de intrare (1), de formă cilindrică – reprezintă porțiunea cea mai largă a orificiului de modelare; servește pentru primirea unui flux cât mai mare de aluat și pentru sprijinirea telului (2);
- camera de presare (3), de formă tronconică – face legătura între camera de intrare (1) și deschiderea de modelare (4);
- deschiderea de modelare (4) – are forma și dimensiunile adaptate secțiunii transversale pe care urmează să o aibă produsul finit;
- telul – elementul prin care se formează canalul interior al tubului; se compune din piciorul (5), de secțiunea corespunzătoare golului ce urmează să îl aibă produsul modelat; este agățat printr-o tijă pe doi sau trei umeri de sprijin sau aripioare (6); acestea din urmă au secțiune cât mai subțire și sunt ascuțite în direcția de intrare a aluatului în matrită, pentru a forma o rezistență cât mai redusă la curgerea acestuia.

Modelarea aluatului, în acest caz, se face astfel: aluatul, datorită presiunii aplicate în instalație, este împins către matrită. Ajuns aici, pătrunde în orificiul de modelare, în care are loc o repartizare a fluxului respectiv în două sau trei fluxuri mai mici de aluat, în funcție de numărul de aripioare pe care le are telul. Aluatul ajunge apoi în camera de presare, unde tăierea aluatului de aripioarele telului încetează și cele două sau trei fluxuri de aluat sunt presate puternic în jurul piciorului telului. Aluatul curge prin spațiul liber dintre pereții de modelare ai orificiului matritei (deschiderea de modelare) și piciorul de modelare al telului. Rezultă astfel produsul modelat, a cărui secțiune este identică cu

spațiul liber de trecere a aluatului printre pereții orificiului și tel. Deschiderea de modelare, pe lângă rolul de a da secțiunii forma dorită, contribuie și la lipirea firelor de aluat între ele.

Pe acest principiu se realizează paste făinoase cu gol interior, a cărui suprafață interioară sau exterioară poate fi netedă sau denivelată sub formă de spirale continue. Pentru acest din urmă caz, când pastele făinoase sub formă de tuburi au rifluri spirale pe suprafața exterioară, în deschiderea de modelare sunt săpate șanțuri spirale.

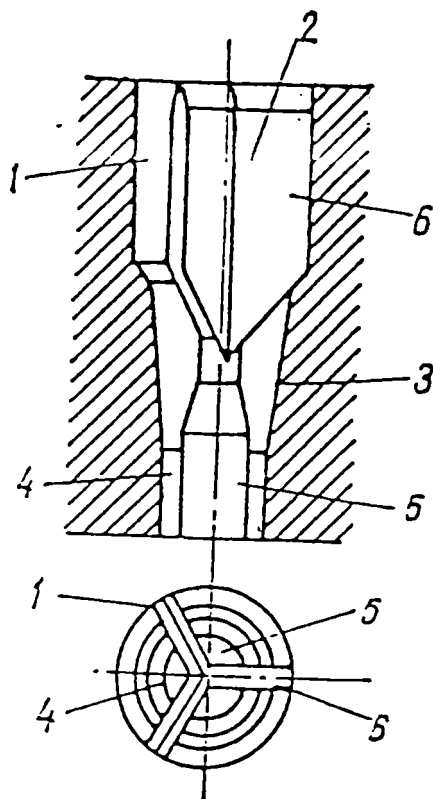


Figura 3.13 – Orificii de modelare a aluatului sub formă de tuburi

Modelarea aluatului prin curgere neegală în secțiune este destinată realizării pastelor făinoase cu forme spațiale complexe (melci, scoici, cornulețe, lazane).

Principiul constructiv al acestui tip de modelare se bazează pe realizarea unui profil al secțiunii, care să ducă la obținerea unei curgeri neuniforme a aluatului prin matriță.

Modificarea vitezei de curgere a aluatului de-a lungul secțiunii orificiului de modelare se obține prin:

- variația de-a lungul secțiunii a intensității frecării aluatului de pereții matriței;
- mărirea sau micșorarea suprafeței de frecare;
- secțiuni diferite de acces a aluatului în diferitele zone ale matriței.

Pentru modelarea tăițelilor cu margini gofrate (lazane) se folosesc matrițe cu orificii, care realizează o viteză mai mare de curgere a aluatului la marginile benzii, prin lărgirea orificiului de intrare a aluatului în matriță, sau prin reducerea suprafeței de frecare la capete (*figura 3.14*). Datorită unei curgeri neegale în secțiune, cu viteză mai mare la margine, banda se gofrează.

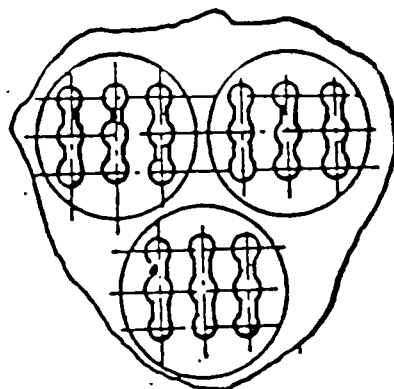


Figura 3.14 – Orificii de modelare a aluatului sub formă de bandă cu margini gofrate

Pentru modelarea tuburilor sub formă de semicerc și diferite modele de melci se utilizează matrițe cu orificii de construcție apropiată de cele utilizate pentru modelarea macaroanelor și a altor sortimente de paste făinoase cu gol interior, diferența fiind aceea că telul este montat

excentric. Astfel, aluatul are o curgere de 2 – 10 ori mai mare în zona de curgere maximă față de cea de curgere minimă (o jumătate a tubului față de cealaltă jumătate). Din această cauză tubul se încovoiaie ușor și capătă forma de melc (*figura 3.15 a*).

Modelarea aluatului sub formă de cornulețe se face cu orificii similare celor descrise anterior, la care însă raportul între viteza maximă și cea minimă este mult mai mic (aproximativ 2 : 1) (*figura 3.15 b*). De obicei tuburile modelate sub formă de cornulețe au suprafața exterioară riflata.

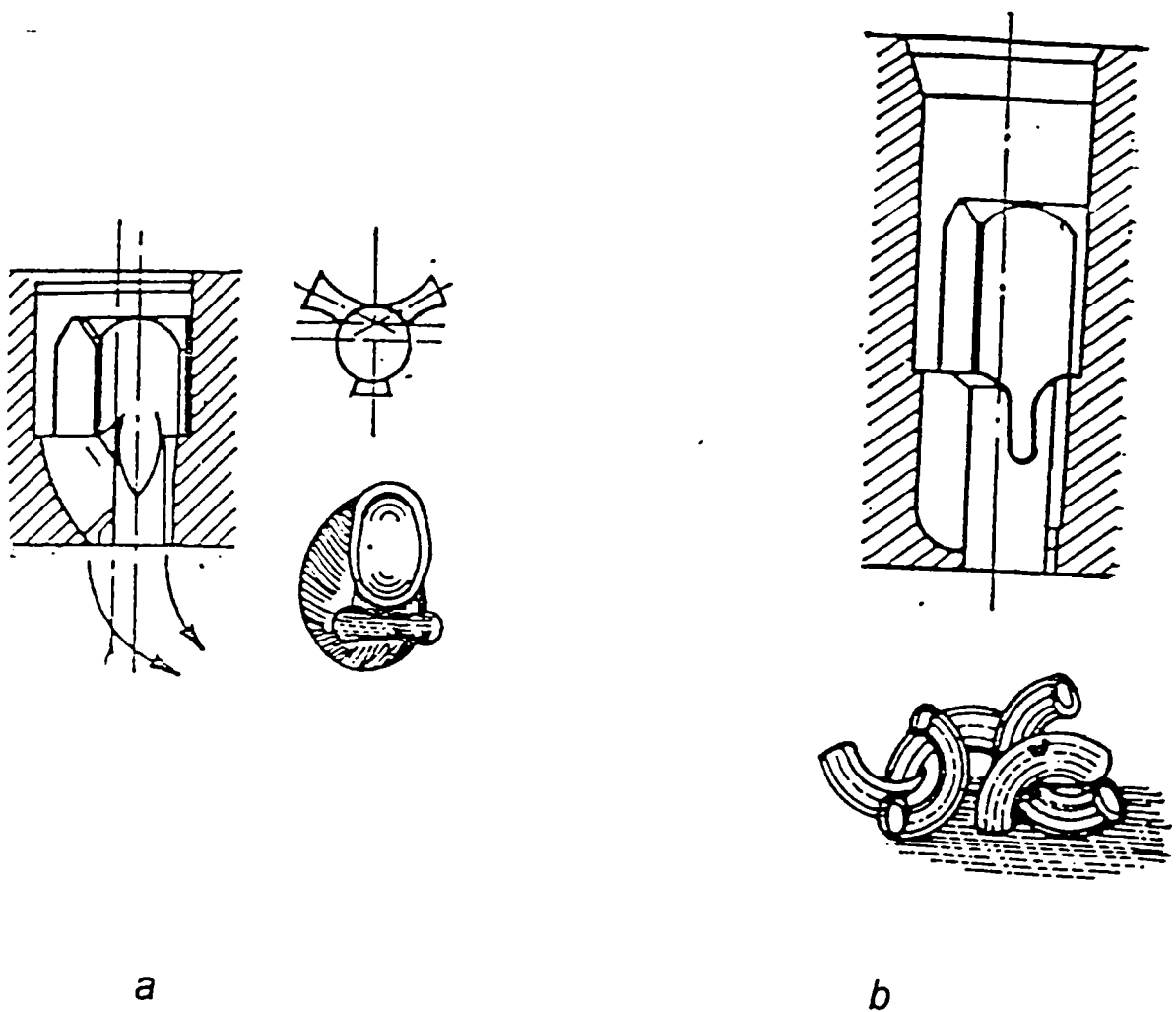


Figura 3.15 – Modelarea tuburilor sub formă de melci (a), respectiv cornulețe (b)

Din panglicile de aluat se pot obține scoici, dacă orificiul de modelare are o deschidere amplasată diametral. În acest caz, viteza de curgere diferită din secțiunea orificiului se transpune printr-o avansare în zona centrală comparativ cu cele laterale. Dacă se taie banda de aluat modelată la intervale bine determinate, rezultă un produs cu forma unei scoici (*figura 3.16*).

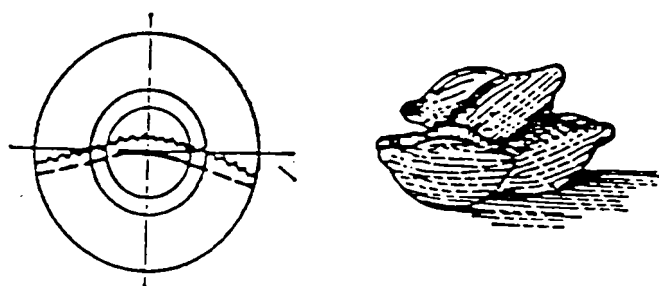


Figura 3.16 – Modelarea tuburilor sub formă de scoici

În *figura 3.17* sunt prezentate diverse forme de paste făinoase, obținute prin extrudare prin matriță.

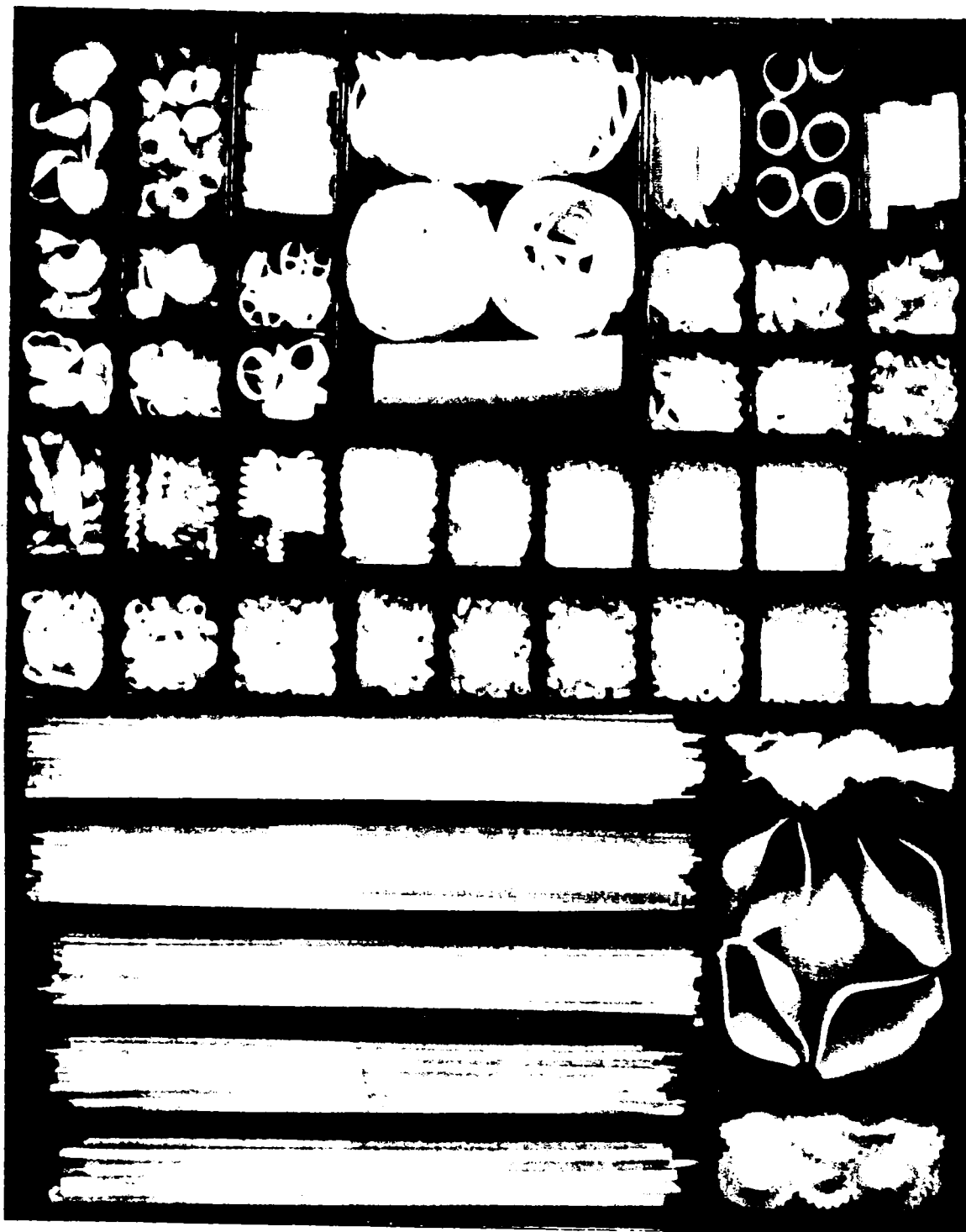


Figura 3.17 – Forme de paste făinoase

3.3.2. Materiale utilizate la confecționarea corpului matriței

În timpul modelării aluatului de paste făinoase, matrițele de extrudat sunt supuse la presiuni de peste 10 MPa, ceea ce necesită să fie confecționate din materiale robuste. Corpurile matrițelor se execută din materiale cu rezistență mecanică mare: oțeluri inoxidabil și bronzuri.

Oțelurile inoxidabile, aliaje Fe – C – Cr cu minim 12% Cr și maxim 0,1% C, datorită procentului de crom, se pot acoperi cu straturi pasive în cele mai multe medii, ceea ce le conferă rezistență la oxidare și coroziune.

Pentru tenacitate mai mare, se utilizează oțeluri inoxidabile martensitice (12 – 17% Cr; mai mult de 0,1% C), aliate cu Ni, în proporție de 2 – 4%. Oțelurile inoxidabile martensitice cu conținut mediu de C (0,2 – 0,4%) au duritate satisfăcătoare și tenacitate bună. De asemenea, duritate ridicată au oțelurile inoxidabile martensitice cu procent mare de C (0,6 – 1%; respectiv 14 – 16% Cr). Foarte bune proprietăți mecanice o au oțelurile inoxidabile martensitice cu procent mic de C și aliate cu Cr și Ni (0,1% C; 16 – 20% Cr; 2 – 4% Ni).

Comportare bună la turnare în vederea obținerii o au oțelurile inoxidabile austenito – feritice (0,05% C; 8% Ni; 20 – 22% Cr). Pentru îmbunătățirea în continuare a proprietăților mecanice, aceste oțeluri se mai pot alia cu Mo, B, Si, W.

Bronzurile, aliaje ce conțin ca elemente principale Cu și Sn, se pot alia secundar cu Zn, Al, Mn, Si.

Pentru obținerea corpului matriței, se poate bronz ca materie primă, supus operației de turnare sub presiune, putându-se obține astfel direct corpul matriței, sau se poate utiliza bară de bronz ca și

semifabricat, care ulterior va fi supus operațiilor de așchiere și/sau eroziune electrică.

Bronzurile cu Sn se caracterizează prin bună rezistență la uzare. Proprietățile mecanice variază în funcție de procentul de Sn. Astfel, aliajele monofazice cu 0 – 8% Sn imprimă bronzurilor o rezistență mecanică bună. De asemenea, un procent de 8 – 10% Sn cresc proprietățile de rezistență ale bronzurilor. În ceea ce privește duritatea, aceasta crește cu procentul de Sn.

În ceea ce privesc proprietățile de turnare, bronzurile cu Sn au fluiditate mică și tendință de creștere a porozității pieselor turnate datorită intervalului mare de solidificare. Pentru eliminarea acestor deficiențe se adaugă Zn, restrângând astfel intervalul de solidificare și diminuând tendința de porozitate.

Prezența impurităților sub formă de oxigen generează oxidul de Sn (SnO_2), care înrăutățește proprietățile pieselor turnate (la analiză metalografică se evidențiază incluziuni cenușii colțuroase, dure și fragile). Adăugând procent mic de fosfor, sub formă de aliaj Cu – F, prin dezoxidare se elimină oxidul de staniu.

Prezența impurităților de aluminiu este foarte dăunătoare pentru procesul de turnare a bronzurilor cu Sn, conducând la obținerea de piese cu granulație grosolană, poroase, cu slabă rezistență la compresiune.

Impuritățile de Fe, Si nu influențează proprietățile de turnătorie ale bronzurilor cu Sn.

Bronzurile cu Al fac parte din categoria bronzurilor speciale ce conțin Cu, Al, Fe, Mn, Ni. Datorită intervalului mic de solidificare, la turnarea acestor bronzuri se obține o structură mai compactă, o fluiditate mai bună. Piesele turnate sunt fragilizate de Al_2O_3 , datorită absorbției oxigenului în timpul turnării.

Fierul finisează structura, crește valoarea proprietăților mecanice.

Manganul crește rezistența la rupere, proprietățile de antifricțiune, scade accentuat fluiditatea și conduce la durificare structurală a aliajelor.

Nichelul are influență pozitivă asupra proprietăților mecanice, anticorozive, crește compactitatea pieselor turnate.

Bronzurile cu Si conduc la piese turnate compacte, fără sulfuri, cu caracteristici mecanice bune, datorită rolului dezoxidant și inhibitor al saturației în gaze, obținând piese turnate. Aceste bronzuri se caracterizează prin fluiditate bună, proprietăți de plasticitate și anticoroziune bune. Bronzurile cu Si tind să înlocuiască bronzurile cu Sn (mai scumpe). Impuritățile de Fe, Al, Sn, Sb, As, Bi sunt nocive, la concentrații de 0,1 – 0,3% Fe și mai puțin de 0,002% As, Sb, Bi.

Pentru îmbunătățirea caracteristicilor mecanice, se introduc elemente de aliere:

- nichel: cresc caracteristicile mecanice și rezistența la coroziune; permite durificarea structurală ca urmare a formării compusului Ni_2Si ;

- zinc: în proporție de maxim 1,2 – 2% mărește proprietățile mecanice; îmbunătățește proprietățile de turnătorie, micșorând intervalul de solidificare; creșterea peste limitele admise a procentului de zinc conduce la diminuarea proprietăților de antifricțiune;

- fosfor: se folosește ca dezoxidant; în proporție de 0,2 – 0,3% crește ușor proprietățile mecanice peste valoarea maximă, însă crește duritatea și fragilizarea (datorită formării compusului Cu_3P).

3.3.3. Materiale utilizate la confecționarea miezurilor din matriță

Orificiile de modelare a aluatului pentru paste făinoase pot fi practicate direct în matriță, astfel încât aluatul de paste făinoase este modelat prin contact direct cu materialul suprafeței canalului de extrudare practicat în matriță, sau se pot realiza miezuri interschimbabile, care sunt introduse în orificiile practicate în matrița de extrudare. Astfel de miezuri (pastile) se confecționează din materiale plastice, cel mai des folosit fiind politetrafluoretilena (Teflon-ul).

La alegerea unui material pentru miezurile din matrițele de extrudat paste făinoase trebuie luate în considerare cerințele pe care trebuie să le îndeplinească:

- rezistență mare la uzură, presiune, temperatură, șocuri;
- prelucrare ușoară pentru obținerea diferitelor forme de orificii;
- coeficienți de frecare foarte mici și aderență cât mai scăzută cu aluatul, pentru a ușura presarea, a evita lipirea și a nu deforma pastele;
- să nu oxideze în contact cu aerul, sau sub acțiunea componentelor aluatului;
- să nu intre în reacție cu aluatul, sau să îi transmită miros, gust, culoare străină.

Materialele plastice au următoarele *caracteristici tehnice*:

- greutate specifică în jur de 11 kN/m^3 , mult mai mică decât a oțelului (73 kN/m^3);
- rezistența la tracțiune se extinde pe un domeniu larg, funcție de masa moleculară a materialului plastic respectiv, luând valori mai mici ($10 - 10^2 \text{ N/mm}^2$) decât metalele, respectiv materialele metalice ($10^2 - 10^3 \text{ N/mm}^2$);

- rezistența la șoc a materialelor plastice este bună, datorită modulului de elasticitate mic, corespunzător unei comportări plastice propriu-zise.

Factorul de rigiditate (produsul dintre modulul de elasticitate și momentul de inerție) ia valori mai mari ca 2, deci mult mai mare decât la metale (< 1) sau la materiale rigide ($1 - 2$).

La materialele plastice nu apare limită de curgere.

Materialele plastice suferă deformări elastice, elastice întârziate și plastice. Aceste trei tipuri de deformări nu apar separat; ele se suprapun, rezultanta fiind componenta specifică a alungirii funcție de tracțiune și timp. Această comportare specială a compușilor macromoleculari la forțele exterioare este cunoscută ca deformare vâscoelastică.

Creșterea stabilității dimensionale a pieselor din materiale plastice aflate în exploatare se îmbunătățește prin tratament termic și radiație, micșorându-se astfel eforturile unitare remanente rezultate din procesul de prelucrare. De asemenea, prin aplicarea de radiații ionizante se obține creșterea rezistenței mecanice. Prin utilizarea unor surse de radiație de mare putere, crește rezistența la rupere de până la 10 ori și temperatura de stabilitate termică de până la 4 ori.

În ceea ce privește coeficientul de frecare, materialele plastice au uzual valorile între 0,3 – 0,6. Excepție face politetrafluoretilena (PTFE = Teflon), la care valoarea coeficientului de frecare scade la 0,05 – 0,1.

Comportarea vâscoelastică influențează comportarea la frecarea externă, deoarece deformarea polimerilor, și astfel și forța necesară deformării, depind de viteză. Coeficientul de frecare crește la valori mici ale forței normale pe suprafață, datorită faptului că energia disipată sub formă de căldură de frecare determină înmuierea materialului plastic;

crește astfel suprafața reală de contact și deci și valoarea forței de frecare cu care coeficientul de frecare este proporțional. La valoarea maximă a coeficientului de frecare are loc topirea materialului plastic la nivelul de lubrifiere a filmului de topitură.

Valorile coeficienților de frecare, f , sunt specifice materialelor, care vin în contact. Astfel, la PTFE / oțel, $f = 0,04$; la cuplul de materiale PTFE / PTFE, f rămâne constant până în jurul unei temperaturi de 200°C ; la cuplul de materiale oțel / PTFE, f crește cu temperatura.

Coeficientul de frecare al unei suprafețe cu o anumită rigiditate este de 1,5 – 2 ori mai mic decât la suprafețe netede.

În ceea ce privește *uzarea materialelor plastice*, aceasta poate fi de mai multe tipuri: uzare *abrazivă*, cauzată de asperitățile dure ale suprafeței cu care materialul plastic vine în contact; uzare *de oboseală*, cauzată de variația ciclică a eforturilor unitare locale, ea având loc prin detașarea locală a unor particule de material plastic; uzare *de adeziune*, cauzată de forțele de adeziune dintre suprafețele în contact, ea manifestându-se prin transfer de material de la o suprafață la alta.

Uzarea poate fi simplă, când se uzează straturile superficiale (tocarea treptată a particulelor dure) sau severă, când se îndepărtează bucăți de material (înmuierea polimerului datorită temperaturii și smulgerea particulelor dure).

Uzarea este determinată în general prin încercări de lungă durată. Ea este influențată de temperatură, și anume crește continuu de la o anumită valoare a temperaturii. De exemplu la materialul plastic polimetilmetacrilat (PMMA), uzarea crește ușor până la 115°C ($10^{-3} - 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), după care crește continuu. La politetrafluoretilenă (PTFE), suprafețele de duritate mare (900 HV; nitrurate; cromate) reduc gradul de uzură al materialului. Rugozități peste $0,8 \mu \text{ m}$ provoacă uzuri

rapide; de aceea suprafețele metalice, în contact cu PTFE, trebuie să fie rectificat.

Politetrafluoretilena (PTFE = Teflon) este cel mai utilizat material plastic pentru pastilele matrițelor de extrudat paste făinoase. PTFE este un polimer vinilic a cărui structură este similară cu cea a polietilenei. Politetrafluoretilena se obține prin polimerizare vinilică de radical liber din monomerul tetrafluoretilenă. *Reacția de polimerizare* este prezentată în figura 3.18.

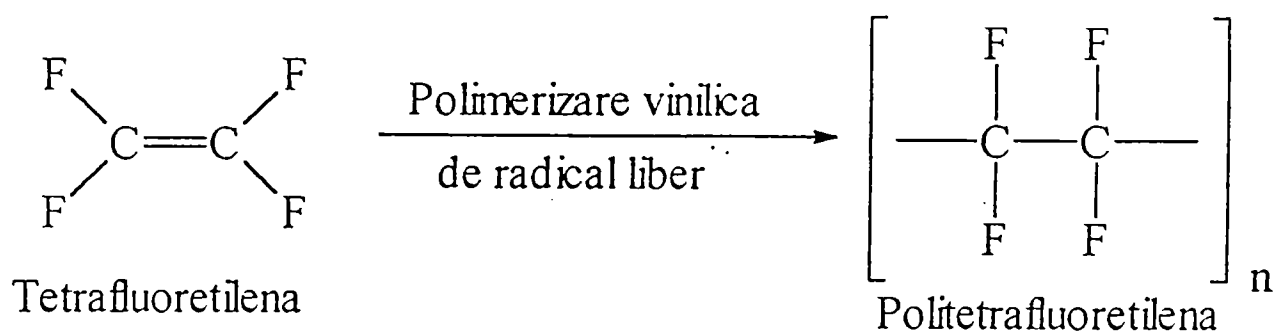


Figura 3.18 – Reacția de polimerizare a tetrafluoretilenei

Politetrafluoretilena este un polimer fluorurat termoplastic, inert. Atomii de fluor formează un înveliș protector în jurul scheletului format din atomii de carbon, înveliș care apără PTFE de atacul agenților chimici. PTFE are temperatura de topire de 342°C.

La confecționarea pastilelor pentru matrițele de extrudat paste făinoase, PTFE trebuie adus în stare de semifabricat. Formarea polimerului granular are loc prin presare, sinterizare, răcire și prin extrudare. Se obțin astfel semifabricate sub formă de plăci, tuburi, bare, cu grosimi între 5 și 25 mm sau mai mari de 25 mm (formare prin presare, sinterizare și răcire). Prelucrarea prin extrudare a polimerului granular

este un proces continuu, care se execută pe mașini de extrudare cu melc sau cu piston.

Indiferent de modul de fabricare, PTFE are coeficient de frecare mic, rezistență chimică și rezistență la temperaturi cuprinse între -265°C și $+260^{\circ}\text{C}$.

PTFE are greutatea specifică de $2,1 - 2,3 \text{ daN/dm}^3$, rezistența la îmbătrânire nelimitată și este neinflamabilă.

În ceea ce privește proprietățile chimice, PTFE este rezistentă la oxidare, între -190°C și $+200^{\circ}\text{C}$ este un material inert. PTFE are foarte mare inerție față de toate produsele chimice, excepție făcând metale alcaline în stare topită, fluor la temperaturi ridicate și compuși halogenați.

Nici o substanță nu dizolvă PTFE la temperaturi mai mici de 300°C . În privința comportării la uzare, PTFE are coeficientul de frecare cel mai scăzut dintre toate materialele solide. De exemplu, în domeniul de temperatură $20 - 100^{\circ}\text{C}$, coeficientul de frecare pentru cuplul de materiale PTFE / PTFE este 0,04; pentru PTFE / oțel: 0,04; pentru oțel / PTFE: 0,09 – 0,1.

Deoarece în timpul formării semifabricatelor din PTFE apar tensiuni în masa materialului plastic, datorită exercitării de presiune neuniformă și răcirii prea rapide, care nu permite îndepărtarea tensiunilor formate, înainte de prelucrare, semifabricatele din PTFE trebuie supuse unui proces de stabilizare termică, prin încălzirea materialului la o temperatură la care rezistența la alunecare să fie încă mare, urmată de răcire lentă.

După formare, semifabricatul de PTFE este supus operațiilor de prelucrare prin așchiere, pentru obținerea configurațiilor dorite ale pastilelor de extrudat paste făinoase.

Compoziția și proprietățile politetrafluoretilenei impun ca prelucrarea sa prin așchiere să se facă diferit de aceea a metalelor și a celorlalte materiale plastice. Datorită dilatației diferite la diverse temperaturi, măsurarea dimensiunilor se face numai când piesa are temperatura mediului ambiant. Conductivitatea termică scăzută împreună cu un regim de așchiere greu duce la încălzirea și uneori înmuierea sau degradarea materialului.

Datorită conductivității slabe și înaltei rezistențe termice a politetrafluoretilenei, apare uzura rapidă a sculelor așchietoare prin arderea muchiilor tăietoare.

Strunjirea pieselor din PTFE se realizează pe mașini normale sau automate. Așchia rezultată este continuă, existând astfel pericolul că se poate încurca ușor. Se utilizează viteze de așchiere mari (150 – 200 m/min), avansuri mici (0,05 – 0,25 mm/rot). Sunt folosite cuțite de strung din oțeluri rapide, plăcuțe din carburi metalice. Lichidele de răcire au 5 - 10% ulei. Pentru a obține suprafețe foarte fine, vârful cuțitului de strunjit se recomandă să fie rotunjit cu o rază de 1 mm.

În ceea ce privește găurirea, trebuie precizat că datorită forței de frecare și temperaturii, materialul are tendința să alunece. Alunecarea crește cu durata și temperatura. De aceea trebuie eliminate periodic așchiile rezultate. Încălzirea excesivă are influență asupra dimensiunilor găurii; de aceea se folosesc burghie cu diametre mai mari decât diametrul nominal al găurii care trebuie executată, diferența remediindu-se prin calibrare sau frecare cu piesa conjugată, până la obținerea ajustajului dorit.

Datorită coeficientului de frecare foarte mic, durității relativ mici, structurii compacte, suprafeței netede și ceroase și imposibilității altor

materiale de a adera pe suprafața PTFE, pilirea și rectificarea pieselor din PTFE ridică probleme.

Superfinisarea se realizează prin frecare cu pânze abrazive de granulație fină și prin frecarea pieselor conjugate între ele.

3.3.4. Tehnici de proiectare a matrițelor

Pe parcursul ultimilor ani, tehnicile de proiectare și de producție au suferit transformări radicale.

Pentru proiectare se folosesc în prezent tehnici de desenare computerizate. De exemplu la firma "Landucci" din Italia, sunt operaționale patru terminale de desenare tridimensionale CAD-CAM. Aceste tehnici de desenare au fost introduse la sfârșitul anilor '80 și ca urmare a unei foarte rapide evoluții în sector, au fost îmbunătățite constant în ultimii ani. Pe baza acestor tehnici este posibilă proiectarea rapidă de noi modele pentru matrițe. Sistemul mai conține programe pentru mașini cu control numeric, afișarea automată (simulare grafică) a traseului parcurs de scula, care efectuează procesul pe mașina cu control numeric, astfel realizându-se prevenirea și îndepărtarea erorilor. În cazul proiectării pe mașină, aceste tehnici permit afișarea simulării operației, minimizându-se astfel riscurile funcționale ale prototipului sau ale unei modificări.

Configurația matriței se realizează ținând cont de minimizarea intervențiilor manuale ale operatorilor în diferitele faze de producție. Conceptul este de a nu se baza pe abilitatea operatorului, ci a asigura beneficiarilor siguranța produsului.

Fiecare efort este de a accelera trecerea de la o activitate “meșteșugărească”, care a constituit întotdeauna problema producătorului de matrițe, la o activitate de tip “industrial”. Firma “Landucci” a operat de câteva ori în acest sens, atât în ceea ce privește compartimentul tehnic, dar și în ceea ce privește întreaga companie.

Când se vorbește de sisteme de producție a matrițelor, în conformitate cu conceptul expus anterior, la nivelul mașinii-unelte, compania a renunțat la tehnologiile tradiționale, la care operatorul trebuia să fie prezent permanent, indicând etapele traseului tehnologic, și s-au introdus metodele moderne de lucru, la care piesele și sculele sunt schimbate automat și la care măsurătorile de probă garantează că piesele sunt conforme cu toleranțele impuse. Nu mai este necesar lucrul în două schimburi de când aceste mașini pot opera 24 de ore pe zi fără intervenție umană. Abilitatea operatorului este înlocuită de o componentă puternică tehnico-managerială.

3.3.5. Tehnici de realizare a matrițelor

Miezul este inima matriței, calitatea pastei depinzând direct de acesta.

S-au identificat următoarele obiectivele ale producătorului de matrițe:

- *corectarea muchiilor*: obținerea celei mai bune forme, care să nu genereze un câmp de tensiuni critice în timpul uscării pastei și să ducă la rezultate optime în timpul fierberii;

- *maximizarea duratei de viață a miezului* pentru garantarea unor costuri mici de mentenanță și o prelungire a perioadei de menținere a calității pastei;
- *miezuri cu diametre largi*: proiectarea miezurilor și matriței luând în considerare minimizarea pierderilor de presiune și încălzirii aluatului atunci când nu este necesară;
- *stabilitatea Teflon-ului*: producerea de miezuri, care să fie ușor de înlocuit și să aibă stabilitate mare.

3.3.5.1. Corectarea muchiilor

Corectarea muchiilor constă în proiectarea secțiunii de intrare și a părții interne a miezului, cu camere rezistente de „amestecare”. Acest aspect se referă la pastele făinoase cu muchii ondulate, la care muchiile sunt prima porțiune din pastă care se supraîncălzește în timpul procesului de fierbere, de unde rezultă importanța echilibrării porțiunilor formei pastei: grosimea de sub muchia ondulată (corelată cu timpul de fierbere a pastei), înălțimea și forma muchiei ondulate, numărul muchiilor ondulate. În *figura 3.19* se poate observa o comparație între un tip standard de muchie ondulată (A) și un nou tip de muchie (B), cel din urmă dând o comportare mai bună a pastei făinoase la fierbere.

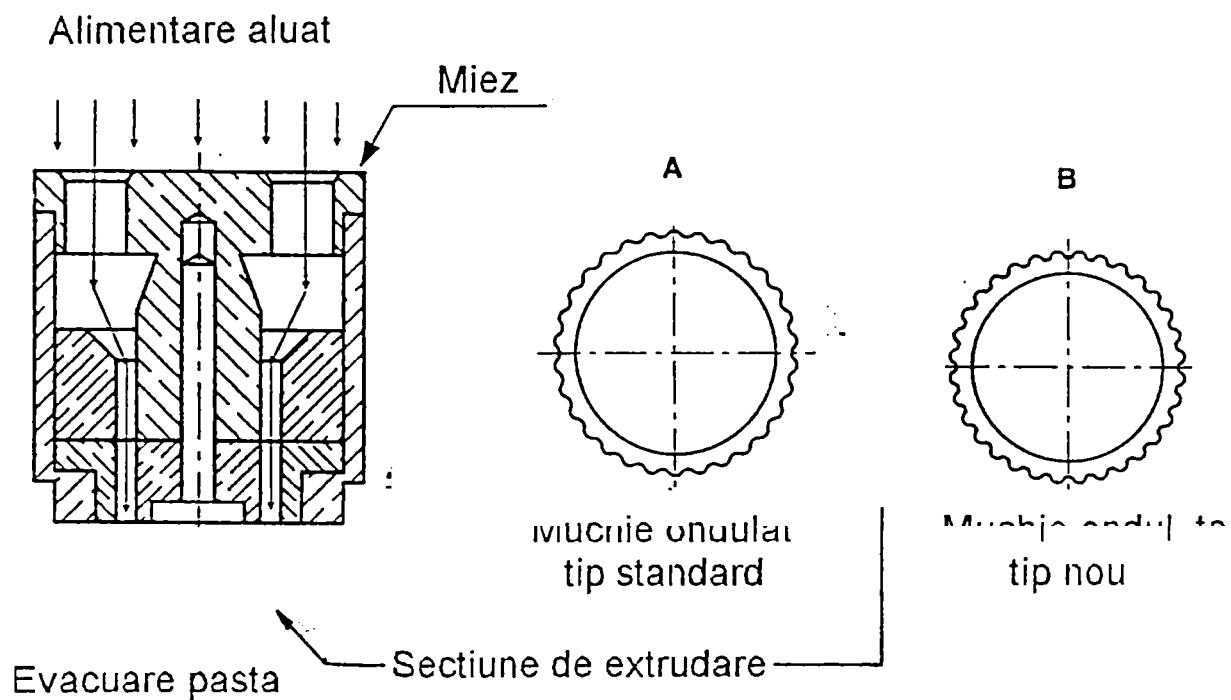


Figura 3.19 – Muchii ondulate pentru paste făinoase, după [3]

3.3.5.2. Maximizarea duratei de viață a miezului matriței [3]

În interiorul unui miez se disting trei zone de bază (figura 3.20), în care se produce modelarea pastei făinoase: zona de intrare (a), zona intermediară (b) și zona de ieșire (c).

Din considerente constructive, pentru majoritatea formelor, în zona (a) aluatul este divizat în multiple fluxuri. Aceasta are ca rezultat că zona mijlocie (b) joacă un rol fundamental în comprimarea (amestecarea) aluatului. Între zonele (a) și (b), pe baza geometriei acestora, ia naștere câmpul de tensiuni în aluat, care determină curgerea în zona de ieșire și astfel forma finală a produsului. Zona (c) configurează doar secțiunea produsului (grosime și muchii). Din zona (a) la zona (c), presiunea scade

de la 120 bar la 0 bar, cu o viteză de la practic zero la 3-4 m/min, aceasta la o grosime medie a miezului de 20 mm. Materialele utilizate pentru miezuri sunt bronz și Teflon: bronz pentru corp, teflon pentru secțiunea (c). Datorită coeficientului său mic de frecare, Teflon-ul este utilizat pentru a conferi pastei aspectul neted (lucios) caracteristic, dar din păcate este un material moale, care tinde rapid să se uzeze și să își schimbe poziția. Punctul critic pentru durata de viață a miezului este uzura Teflon-ului. De aceea, pentru creșterea duratei de viață a miezului, trebuie protejat Teflon-ul, realizând zonele (a) și (b) din bronz, astfel încât Teflon-ul (c) să aibă doar funcția de netezire a suprafeței în partea finală a extrudării aluatului. Cu alte cuvinte, trebuie să se evite formarea produsului în secțiunile de Teflon, ci doar utilizarea acestuia în zona care conferă pastei aspectul final.

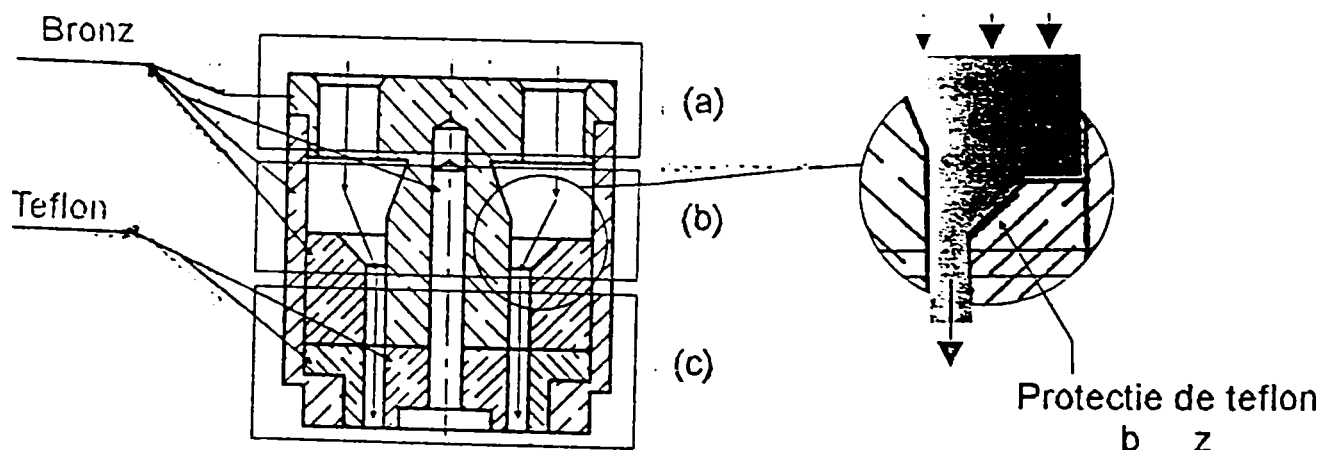


Figura 3.20 – Secțiune prin matrița de extrudare, după [3]

3.3.5.3. Miezuri cu diametre largi [3]

Matrița se compune dintr-un corp principal sau suport, rezistent, și un miez (*figura 3.21*). Acesta este dispus în partea finală a orificiilor realizate în corp. Suportul de bronz are funcția de “susținere” a miezului și rezistență la tensiunea mecanică datorată presiunii mari în camera de presare. De aceea are de obicei grosimi mari (100 mm) în raport cu miezul (20 mm). Pentru a ajunge la miez, aluatul trebuie să treacă prin orificiile din suportul matriței.

În timpul trecerii prin corpul matriței, datorită frecării care se dezvoltă între pereții orificiilor și aluat, are loc o cădere de presiune, care este cu atât mai mare cu cât orificiile sunt mai înguste. Frecarea, împreună cu căderea de presiune, contribuie la încălzirea produsului. Cu cât căderea de presiune este mai mare, cu atât zona intermediară (b) (*figura 3.20*) din interiorul miezului (zonă pentru reamestecarea aluatului) trebuie să fie mai mare și astfel miezul mai “înalt”. Miezuri înalte și orificii înguste în suport înseamnă prelungirea încălzirii aluatului, care este exact condiția de tensiune care trebuie minimizată în timpul extrudării. Pentru a rezolva această problemă s-au realizat miezuri cu “diametre largi” și grosimi “înguste”. Conceptul este acela de a realiza 5 – 7 forme de miez în același timp cu creșterea diametrului său și astfel matrița lucreze la o presiune P_3 mai mare decât presiunea P_2 anterioară. Utilizarea orificiilor “largi” sub condiția $P_3 > P_2$ corespunde unei utilizări a miezurilor cu reducerea înălțimii “h”, adică de miezuri „ușoare” și astfel limitarea tensionării produsului în timpul extrudării. Și în fine, dar nu în ultimul rând, aceasta oferă posibilitatea în general de a dispune pe matriță o cantitate mai mare de forme de extrudare și corespunzător reducerea vitezei de extrudare a produsului.

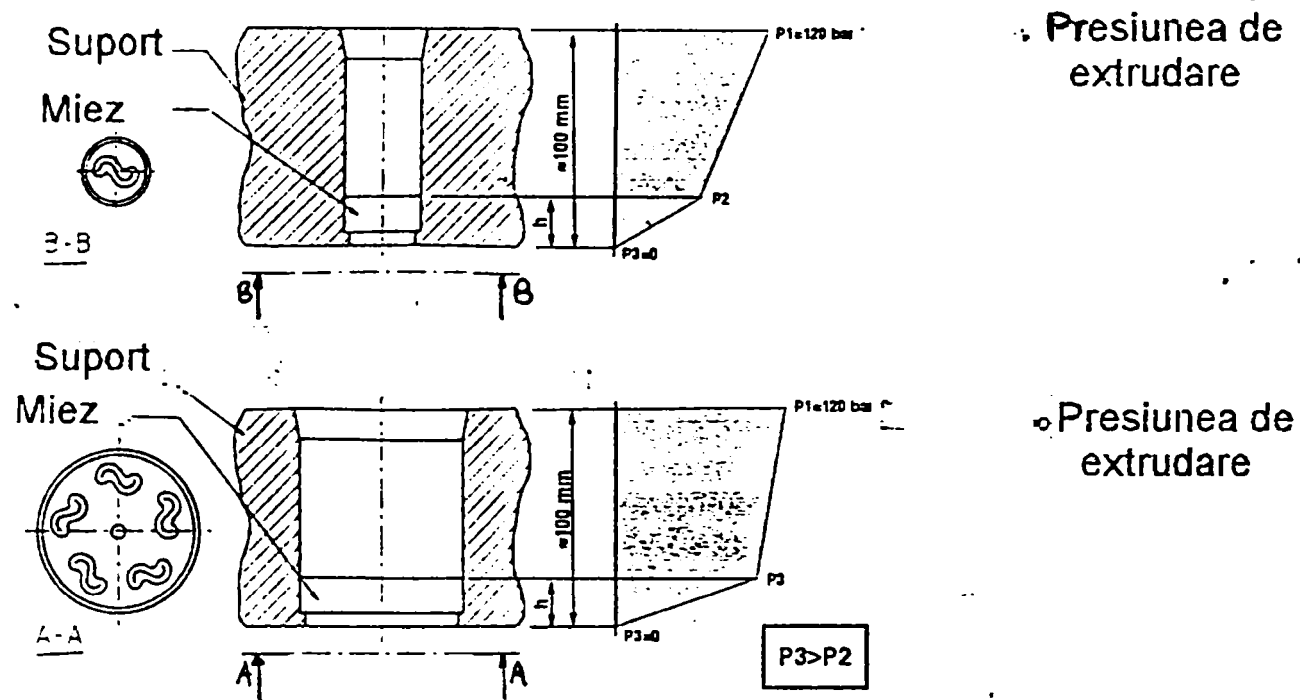


Figura 3.21 – Câmpul de presiune în timpul extrudării, după [3]

3.3.5.4. Stabilitatea Teflon-ului [3]

Pentru a facilita înlocuirea miezurilor matrițelor la producătorul de paste făinoase (și nu la producătorul de matrițe), aceste miezuri s-au fabricat "armate", adică ele sunt practic un corp (carcasă) din bronz, foarte rezistent la tensiunile mecanice care apar în timpul asamblării presei și pot fi astfel schimbate ușor.

În strânsă legătură cu presiunea înaltă pe care trebuie să o suporte miezul în timpul extrudării (120 bar), apare problema stabilității Teflon-ului, ceea ce înseamnă menținerea geometriei inițiale, chiar și în eventualitatea unei utilizări incorecte a matriței, cum ar fi cazurile unor utilizări de presiuni neobișnuite. Pentru rezolvarea acestei probleme au

fost concepute tehnologii de tăiere a Teflon-ului, cu rol de a amortiza orice șocuri de presiune care pot apare în timpul utilizării matriței.

În *figura 3.22* se poate observa comportarea unui miez standard și a unuia cu Teflon stabilizat în condiții normale de operare și condiții de suprapresiune. Cea din urmă (cazul suprapresiunii) este o condiție tipică care se generează atunci când se începe extrudarea unui aluat tare după o pauză prelungită în producție. Efectul nedorit, care apare în comportarea unui miez standard, este acela al unei permanente deplasări a Teflon-ului și astfel închiderea secțiunii finale de extrudare a miezului, cu rezultate dezastruoase pentru produsul extrudat. În schema din dreapta figurii 3.22 se poate observa cum în miezul cu Teflon stabilizat, secțiunile corect poziționate “amortizează” șocurile de presiune, garantându-se astfel o stabilitate mult mai mare a Teflon-ului.

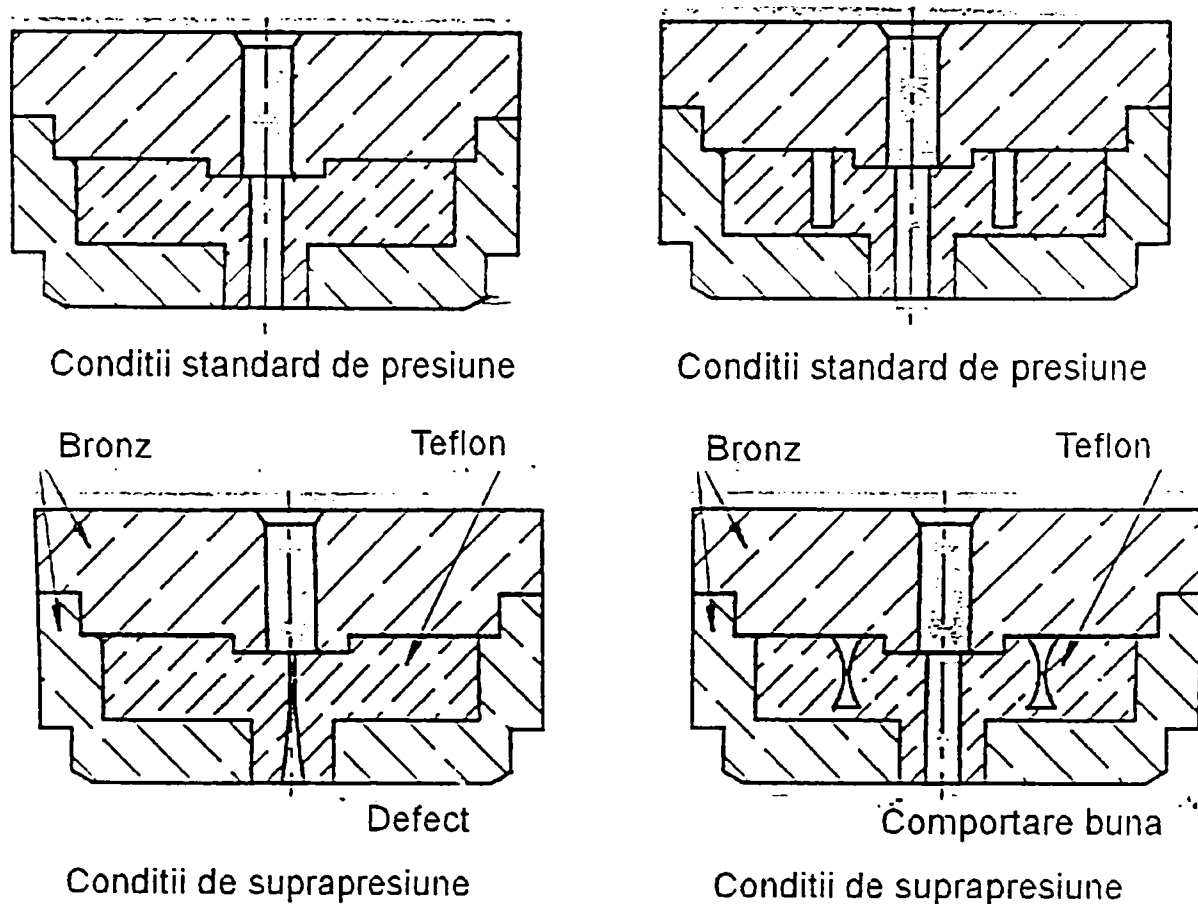


Figura 3.22 – Stabilitatea Teflon-ului: comportare cu miez standard și cu miez cu Teflon stabilizat, după [3]

3.4. Concluzii

Dintre tipurile de utilaje pentru producerea pastelor făinoase, presele cu melc de extrudare sunt cele mai des folosite.

În componența utilajului pentru producere pastelor făinoase, matrița de extrudare joacă un rol esențial, conferind pastei forma și dimensiunea cerute. Funcție de tipul de matriță rezultă și sortimentul de pastă.

În prezent, pentru confecționarea matrițelor, se utilizează materiale metalice (bronz, oțel inoxidabil) pentru corp, respectiv materiale metalice (bronz) și plastice (cu precădere politetrafluoretilena) pentru miez.

Datorită unor probleme care se ridică la realizarea matrițelor și având în vedere dezavantajele pe care le prezintă bronzul și politetrafluoretilena din punct de vedere al rezistenței la uzură, durabilității, stabilității, autorul propune și un alt material pentru miez, și anume monocristale de safir.

CAPITOLUL 4

CONTRIBUȚII PRIVIND DETERMINAREA UNUI MODEL SISTEMIC GENERALIZAT PENTRU PROCESUL TEHNOLOGIC DE FABRICAȚIE A MATRIȚELOR DE EXTRUDAT PASTE FĂINOASE

4.1. Sistemul generalizat de acțiune tehnologică la fabricarea matrițelor de extrudat paste făinoase

Pe baza considerentelor prezentate în capitolul precedent și bibliografiei, se poate întocmi o schemă logistică pentru sistemul generalizat de prelucrare a matrițelor de extrudat paste făinoase, prezentată în *figura 4.1*.

În vederea stabilirii sistemului de acțiune tehnologică generalizat, s-au studiat mai multe tipuri de procese tehnologice de fabricație, într-o diversitate de variabile și condiții, concluziile fiind grupate, ca rezultat, în schema din *figura 4.1*, care constituie așa-numita schemă logistică pentru sistemul generalizat de acțiune tehnologică la fabricarea pastelor făinoase.

Analiza schemei prezentate în *figura 4.1* conduce la necesitatea introducerii unui model intrări-ieșiri, complex, care să includă următoarea structură:

A. Intrările, reprezentate de următoarele componente:

A1. Intrarea substanțială, reprezentată de materiile prime (fie introduse direct în utilaj, fie aluatul rezultat în urma amestecării), care sunt introduse sub presiune la intrarea în matriță. Dacă se consideră strict matrița, pentru aluat, se recomandă considerarea, pentru o primă analiză, a următoarelor proprietăți: plasticitatea, rezistența la deformare, vâscozitatea, aderența la pereții matriței și rezistența la rupere. Desigur că se poate face o

interpretare diferită, care să considere și alte categorii de factori, aflați, deocamdată în forma implicită (de exemplu umiditatea aluatului și influențele ei asupra mărimilor anterioare etc.).

Cu statut dublu, intrarea substanțială include și ansamblul proprietăților care se vor regăsi și în ieșire (identice sau modificate într-o măsură mai mare sau mai mică), sub forma proprietăților de utilizare, cum ar fi: rezistența mecanică, indicele de uzare, umiditatea, stabilitatea termică, rigiditatea pastei, etc.

A2. Intrarea energetică, reprezentată prin energia primară – de regulă energie electrică – și energia secundară – în acest caz direct energie de efect tehnologic – de tip mecanic, conversia fiind realizată în interiorul extruderului de paste, și transmisă sub forma unei energii de deformare, intermediată de o stare de tensiuni și deformații indusă în masa de aluat, înaintea intrării în orificiile de deformare, calibrare sau alte prelucrări (îndoire, curbare, rotunjire etc.).

De reținut că, în transmiterea energiei de efect, este caracteristică mișcarea relativă între materia primă și scula deformantă (denumirea dată în sens generalizat pentru matrița utilizată), care (din punct de vedere teoretic, în baza unor ipoteze simplificatoare), poate fi liniară și/sau de rotație, desfășurată după unul sau mai multe grade de mobilitate.

A3. Intrarea informațională, definită, în ansamblu, prin sistemul deformant pentru aluat, unde informația este stocată sub forma unor parametri generali și/sau specifici ai utilajului (turația melcului, materialul și caracteristicile geometrice ale acestuia etc.) și prin tipurile de matrițe folosite, esențială fiind construcția (material și forma geometrică), pentru suprafețele active și mișcarea relativă (definită prin complexul de parametri cinematici și dinamici), între matriță și aluat.

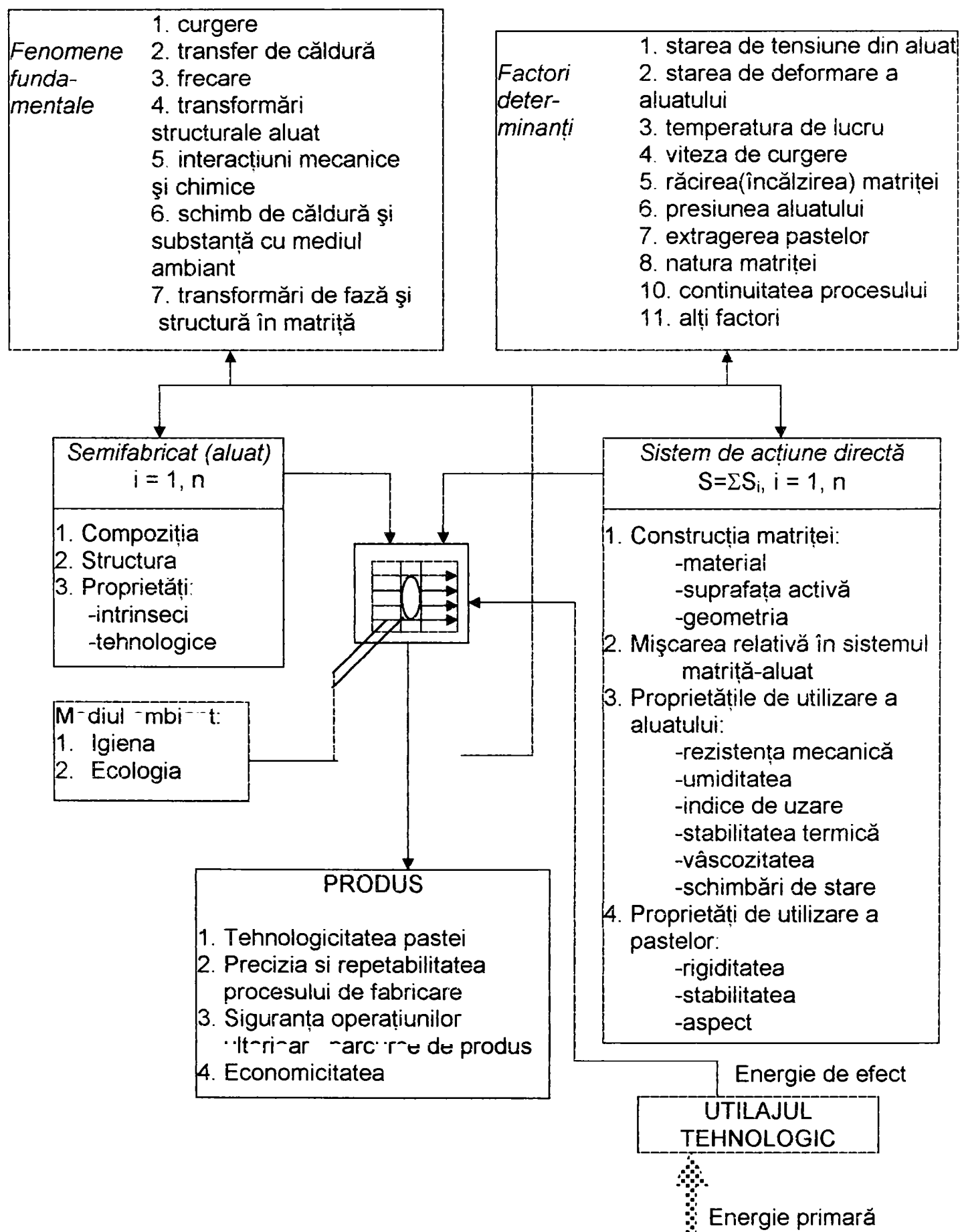


Figura 4.1 – Schema sistemului generalizat de acțiune tehnologică

B. Ieșirile, reprezentate de produsele rezultate (pastele făinoase), definite, la rândul lor, de un ansamblu de parametri, printre care se pot menționa:

B1. Tehnologicitatea fabricării pastei

B2. Precizia și repetabilitatea fabricației

B3. Siguranța în exploatare a utilajului

B4. Calități de prelucrare ulterioară

B5. Parametri de specificare, care permit corelarea între destinația produsului, tehnologia de fabricație și materiile prime folosite.

Prin această analiză s-au identificat unele grupe de parametri care servesc la stabilirea ulterioară a unui model generalizat intrări – ieșiri, ce urmează să fie așezat la baza unei acțiuni de stabilire a unei proceduri structurale, la rândul ei, generalizată, care să vizeze elaborarea unui sistem generalizat pentru optimizarea procesului tehnologic de fabricație a matrițelor de la extruderele pentru paste făinoase.

Din cele prezentate rezultă concluzia importanței decisive pentru optimizarea procesului, a sistemului de acțiune tehnologică directă.

4.2. Structura sistemului de acțiune tehnologică directă la fabricarea matrițelor de extrudat paste făinoase

Sistemul de acțiune tehnologică directă reprezintă ansamblul acțiunilor tehnologice care determină transformarea semifabricatului pregătit în produs finit, luând în considerare, concomitent, intrările, ieșirile și mecanismul de legătură interioară ca părți active, în permanentă interacțiune.

Sistemul de acțiune tehnologică directă se consideră, la rândul său, ca fiind o succesiune de elemente operatorii, cu caracteristici bine

individualizate, corelate și determinate într-o interdependență cu tipul de matriță fabricată, cu materialul semifabricat folosit și cu condițiile de utilizare.

Sintetic, sistemul de acțiune tehnologică directă pentru procesul tehnologic de fabricare a matritelor de extrudat paste făinoase se compune dintr-o primă grupă ce cuprinde pregătirea semifabricatului, apoi o grupă de prelucrare dimensională principală, după care urmează prelucrarea finală și preluarea. Între aceste patru grupe există trei blocuri de corelare.

Caracteristica principală a procesului funcțional în cadrul sistemului de acțiune tehnologică directă îl reprezintă continuitatea asigurată din punct de vedere tehnologic de blocurile de corelare existente între blocurile operatorii și între elementele operatorii din interiorul blocului. Astfel, în orice problemă de optimizare a parametrilor tehnologici, condiția de continuitate a procesului generează în principal și un pachet de restricții.

O analiză a sistemului în raport cu blocurile enumerate anterior conduce, într-o primă fază, la concluzia existenței următoarelor grupe de parametri principali generalizați:

- I. parametri constructivi, definiți de elementele dimensionale ale sculelor deformante;
- II. parametri cinematici, ce definesc vectorii de mișcare pentru elementele active în proces;
- III. parametri dinamici, ce reflectă starea dinamică a sistemului prin următoarele variabile: forțele de deformare, F_{di} , reacțiunile din sculele deformante, R_{di} , forțele de frecare, F_{fi} și stările de tensiune din materialul semifabricat, exprimate de tensorii tensiunilor, T_i (i reprezintă indicele sculei deformante, $i = 1 \dots n$);
- IV. parametri energetici, ce caracterizează din punct de vedere energetic starea procesului: energia de deformare, E_{di} , energia

disipată prin frecare, E_{fi} , energia cinetică, E_{ci} , alte forme de energie, E_{ai} ($i = 1 \dots n$);

- V. parametri de finalitate, ce realizează legătura între caracteristicile procesului și cele ale produsului: productivitatea prelucrării, Q ; costurile indirecte specifice pe produs, C_i ; costurile directe pe produs, C_d ; proprietățile de utilizare ale produsului, P_{ut} .

Parametrii generalizați enumerați sunt exprimați într-o formă implicită, ansamblul lor constituind în parte, în mod direct, criteriile de optimizare a procesului de fabricare a matrițelor. Trebuie însă avut în vedere caracterul complex al problematicii supuse optimizării, ceea ce necesită o exprimare mai completă dată de asocierea în comun, pe baza unor criterii sortate, a mai multor parametri în forme implicite specifice, ce pot constitui tot atâtea criterii (funcții) complexe de optimizare.

Pentru o stabilire cât mai riguroasă a funcțiilor implicite de optimizare se impune o analiză a dependențelor pentru fiecare bloc operator, apoi trecerea la o grupare fundamentată a acestor mărimi funcționale, pentru sistem. Simultan cu această analiză se identifică și problemele specifice ce pot constitui restricții pentru un program complex de optimizare a procesului de fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase.

4.3. Modelul intrări – ieșiri generalizat pentru procesul tehnologic de fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase

Procesul tehnologic de fabricație a matrițelor de la extruderele pentru paste făinoase include un ansamblu de procese și operații aferente metodelor tehnologice de deformare plastică, prelucrare cu îndepărtare de material

(așchiere), prelucrări cu energii concentrate (neconvenționale), tratamente termice, acoperiri etc.

Realizarea unei calități corespunzătoare a produselor de tip matriță, în condiții de performanță tehnică și economică ridicată, presupune coordonarea strictă a legăturilor existente între blocurile operatoare (care realizează fiecare operație tehnologică în parte), prin intermediul unor “blocuri de corelare”, care acționează asupra procesului prin variabile, denumite “mărimi de reglare”.

Se face precizarea că operațiile de prelucrare se pot efectua și în cazul blocurilor de corelare, operații care, de regulă, nu modifică numai cinematica materialului, ci intervin asupra acestuia prin modificări de formă, dimensiuni și proprietăți.

Pornind de la sistemul de acțiune tehnologică generalizat, elaborat și prezentat anterior, construcția sistemului de optimizare începe cu definirea unui model intrări-ieșiri generalizat pentru procesul tehnologic de fabricare a matrițelor de la extruderea de paste făinoase.

La realizarea unui astfel de model s-au adoptat o serie de simplificări, care să vizeze, în primul rând, neglijarea unor elemente considerate ne semnificative, fie datorită unei influențe scăzute, fie datorită unei prezențe mai slabe în totalitatea și integralitatea procedeeleor de fabricație a tipurilor mai frecvente de paste făinoase.

Întrucât un astfel de model generalizat este necesar elaborării unui model matematic pe care să se opereze cu metodele matematice cunoscute pentru optimizare, variabilele considerate semnificative pentru acest model au fost simbolizate cu câte o literă și o cifră, litera simbolizând mărimea, iar cifra categoria de mărimi fundamentale căreia îi aparține variabila.

Structura modelului intrări-ieșiri generalizat este cea din *figura 4.2*, pentru care se introduc următoarele grupe de variabile, considerate de natură vectorială:

A. Grupa variabilelor de intrare, (factori ai procesului), joacă rolul de cauză, constituie, din punct de vedere tehnic, mărimi controlate și comandate, structurate pe următoarele grupe:

1. *Variabile de intrare legate de caracteristicile materialului (materialelor) semifabricat folosite la fabricarea matriței:*

- 1.1. rezistența la rupere R1;
- 1.2. rezistența la oboseală O1;
- 1.3. rezistența la coroziune C1;
- 1.4. rezistența la uzare U1;
- 1.5. prelucrabilitatea P1;
- 1.6. disponibilitatea D1.

2. *Variabile de intrare legate de proprietățile materialului cu care va lucra matrița (aluatul):*

- 2.1. rezistența la rupere R2;
- 2.2. rezistența la deformare D2;
- 2.3. stabilitatea termică T2;
- 2.4. vâscozitatea V2;
- 2.5. aderența A2.

3. *Variabile de intrare legate de tipologia pastelor făinoase ce urmează a fi produse, grupate și prezentate sub forma informațională:*

- 3.1. tipul pastei P3;
- 3.2. diametrul pastei D3;
- 3.3. geometria G3;
- 3.4. ingrediente I3.

4. *Variabile de intrare legate de variantele constructive pentru matrițe:*

- 4.1. construcție monobloc M4;
- 4.2. construcție compozită C4.

B. Grupa variabilelor de ieșire (de stare), care caracterizează starea obiectului tehnologic (procesul de fabricație), în funcție de modificările variabilelor de intrare, din acest motiv numite și variabile de stare:

6. *Variabile de stare legate de parametri de utilizare ai matriței:*

- 6.1. presiunea maximă P6;
- 6.2. durata medie de utilizare D6;
- 6.3. rezistența la temperatură T6;
- 6.4. rezistența la uzare U6;
- 6.5. fiabilitatea F6;
- 6.6. schimbul de substanță S6;
- 6.7. flexibilitatea X6.

7. *Variabile de stare legate de performanțele tehnico-economice ale procesului de fabricație a matrițelor.*

- 7.1. capacitatea de lucru Q7;
- 7.2. costuri directe C7;
- 7.3. costuri indirecte I7;
- 7.4. fiabilitatea sculelor F7;
- 7.5. caracteristici ergonomice E7;
- 7.6. indicele rebuturilor R7.

C. Mărimi (variabile) de reglare, prin intermediul cărora se realizează controlul și comanda ansamblului de variabile intrare-ieșire, aceste mărimi putând fi caracterizate de o independență matematică relativă între ele. Acest tip de variabile sunt notate pe schema din figura 4.2 cu cifra 5, reprezentă de fapt componenta de feed-back a sistemului, nu doar un vector sau spațiu vectorial de reglare și cuprind:

- 5.1. procedeul tehnologic P5;
- 5.2. itinerariul tehnologic I5;
- 5.3. SDV-istica S5;
- 5.4. parametri tehnologici T5;
- 5.5. caracteristicile sculei de prelucrat C5;
- 5.6. condiții speciale D5;
- 5.7. adaosul de prelucrare A5.

Criteriul principal de grupare a variabilelor din figura 4.2 a fost dat atât de ordinea determinării și implicării în proces, cât și de existența unor relații implicite între variabile.

Pornind de la blocurile de variabile prezentate anterior și de la informațiile din literatură cu privire la procesul tehnologic de fabricație a matritelor de la extruderea de paste făinoase, tot în schema din figura 4.2 sunt prezentate și legăturile posibile între aceste grupe de variabile, atât prin proces, cât și, în mod indirect (notate cu linie punctată), fie ocolindu-se desfășurarea efectivă a procesului, fie prin ereditatea acestora.

Din analiza acestor legături se poate desprinde concluzia existenței unor largi posibilități de control a procesului de fabricare a matritelor, dar, în același timp și o complexitate deosebită, care poate genera tot atâtea situații de nedeterminare practică.

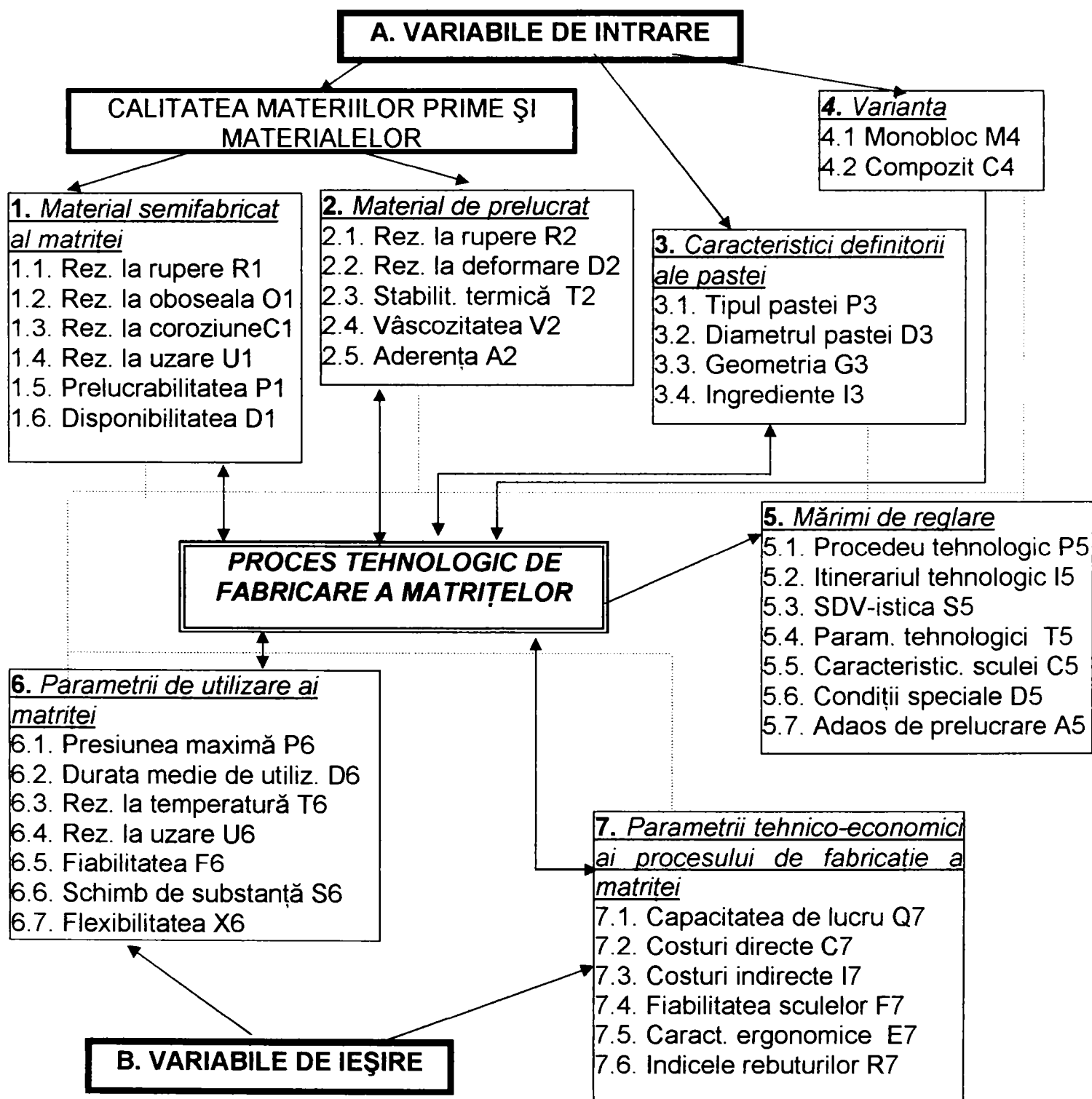


Figura 4.2 – Schema modelului intrări – ieșiri generalizat pentru procesul tehnologic de fabricare a matritelor de extrudat paste făinoase

4.4. Analiza globală a sistemului de fabricare a matritelor de extrudat paste făinoase

O analiză complexă a oricărui sistem începe cu încadrarea acestuia într-un sistem de clasificare. Din categoria sistemelor de clasificare cea mai utilizată este clasificarea propusă de S. Bir, conform căreia, sistemele se împart în raport cu două variabile:

- după gradul de nedeterminare: sisteme deterministe și sisteme probabiliste;
- după gradul de complexitate: sisteme simple și sisteme foarte complexe.

Sistemul determinat este acel sistem în cadrul căruia, părțile componente interacționează într-un mod perfect stabilit, iar sistemul probabilist este acela a cărui stare poate fi prognozată doar cu o anumită probabilitate.

În raport cu acest criteriu, sistemul poate fi atribuit în mod evident sistemelor probabiliste dar, cu anumite simplificări, în scopul ușurării analizei, modelării și în final optimizării, sistemul poate fi adus la o condiție de sistem determinist.

În ceea ce privește mărimea, sistemul poate fi încadrat în categoria sistemelor mari, complexe, caracterizate de dimensiuni mari, număr mare de funcții, comportare complexă, structură complexă a subsistemelor, existența unor variate legături directe și inverse, care acționează negativ, când se micșorează discordanța, sau pozitiv, când se mărește discordanța.

Pe baza schemei prezentate în figura 4.2 se trece la determinarea legăturilor și a relațiilor de determinare dintre variabile:

- numărul variabilelor de intrare propuse:

$$N_{intr} = 6 + 5 + 4 + 2 = 17 \quad (4.1)$$

- numărul variabilelor de ieșire (stare):

$$N_{ies} = 7 + 6 = 13 \quad (4.2)$$

- numărul variabilelor de reglare (corecție):

$$N_r = 7 \text{ (propuse)} \quad (4.3)$$

- numărul total de variabile propuse:

$$N_{tot} = 17 + 13 + 7 = 37 \quad (4.4)$$

Trebuie precizat că, în cazul variabilelor prezentate, este admisă natura vectorială sau tensorială a acestora, cu una (mai rar), sau mai multe dimensiuni. De asemenea, în cadrul sistemului, există legături între variabile prin sistem (determinate de evoluția procesului), dar și legături directe între variabile, determinate de ele, fără influența procesului propriu-zis, multe variabile încadrându-se însă între aceste două situații extreme.

Numărul practic de legături se stabilește prin cumulare.

Astfel, inițial, din punct de vedere teoretic, sunt posibile legături între toate variabilele, dar aplicând unele ipoteze simplificatoare, se pot considera pentru studiu, modelare și optimizare, legăturile prezentate în tabelul 4.1,

considerate ca legături directe între variabilele de ieșire și cele de intrare, considerând variabilele de intrare în sistem independente în sens matematic. S-au simbolizat cu „1” relațiile (legăturile) presupus existente, și cu „0” cele presupus inexistente, iar simbolurile pentru variabile sunt cele prezentate în figura 4.2.

Tabelul 4.1 – Legăturile dintre variabilele de intrare și cele de ieșire pentru sistemul de fabricare a matritelor de extrudat paste făinoase

Var ieș	P6	D6	T6	U6	F6	S6	X6	Q7	C7	I7	F7	E7	R7	Tot. oriz.
Var intr														
R1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	12
O1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	12
C1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	5
U1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	12
P1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
D1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	11
R2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	7
D2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	7
T2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	7
A2	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	11
P3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	12
D3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	12
G3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	12
I3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	11
M4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13
C4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13
Tot vert	13	14	15	14	14	10	14	11	12	13	7	13	13	163

Rezultă, pentru subsistemul analizat în tabelul de mai sus, următoarele concluzii:

- număr posibil de legături: 221;
- legături realizate: 163;
- ponderea legăturilor realizate: $\frac{163}{221} \cdot 100 = 74,09\%$.

Dacă se consideră și cele șapte mărimi de reglare, intervin suplimentar legăturile prezentate în tabelele 4.2 și 4.3, corespunzătoare legăturilor între mărimile de reglare și cele de intrare (tabelul 4.2), respectiv cele de ieșire (tabelul 4.3).

Tabelul 4.2 – Legăturile dintre variabilele de intrare și cele de reglare pentru sistemul de fabricare a matritelor de extrudat paste făinoase

Var. regl.	P5	I5	S5	T5	C5	D5	A5	Tot. oriz.
Var. intr.								
R1	1	1	1	1	1	1	1	7
O1	1	0	0	1	0	1	0	3
C1	1	0	0	1	0	1	0	3
U1	1	1	1	1	1	1	1	7
P1	1	1	1	1	1	1	1	7
D1	1	1	0	1	0	1	1	5
R2	0	0	0	0	0	1	0	1
D2	0	0	0	0	0	1	1	1
T2	0	0	0	0	0	1	0	1
V2	0	0	0	0	0	1	0	1
A2	1	0	0	0	0	1	1	3
P3	1	0	0	1	0	1	1	3
D3	0	0	0	1	0	1	1	3
G3	0	0	0	1	0	1	1	3
I3	0	0	0	1	0	1	1	3
M4	1	1	1	1	1	1	1	7
C4	1	1	1	1	1	1	1	7
Tot. vert.	10	6	5	12	5	17	12	62

Pentru subsistemul analizat în tabelul 4.2 rezultă următoarele concluzii:

- număr posibil de legături: 119;
- legături realizate: 62;
- ponderea legăturilor realizate: $\frac{62}{119} \cdot 100 = 52,10\%$.

Tabelul 4.3 – Legăturile dintre variabilele de reglare și cele de ieșire pentru sistemul de fabricare a matritelor de extrudat paste făinoase

Var regl	P5	I5	S5	T5	C5	D5	A5	Tot. oriz.
Var reș								
P6	1	1	1	1	1	1	0	6
D6	1	0	0	0	0	1	0	2
T6	1	1	1	1	0	1	0	5
U6	1	1	0	0	0	0	0	2
F6	1	1	1	1	0	0	0	4
S6	1	1	0	1	0	1	0	4
X6	1	1	0	1	0	1	0	4
Q7	1	1	1	1	1	1	0	6
C7	1	1	1	0	0	0	0	3
I7	1	1	1	0	0	0	0	3
F7	1	1	1	1	1	0	0	5
E7	1	1	0	1	0	0	0	3
R7	1	1	1	1	1	1	1	7
Tot vert.	13	12	8	9	4	7	1	54

Pentru subsistemul analizat în tabelul 4.3 rezultă următoarele concluzii:

- număr posibil de legături: 91;
- legături realizate: 54;
- ponderea legăturilor realizate: $\frac{54}{91} \cdot 100 = 59,34\%$.

Rezultatele obținute, raportate la sistemul global, determină, într-o primă aproximare, formularea următoarelor concluzii:

- cea mai mare pondere o au legăturile realizate între variabilele de intrare și cele de ieșire prin intermediul procesului (74,09%);
- variabilele de reglare alese pentru proces sunt mai legate de ieșiri (59,34%) decât de intrări (52,10%), putându-se observa că ponderile sunt însă foarte apropiate, ceea ce indică o alegere relativ reprezentativă și echilibrată a acestora;
- tabelele 4.1, 4.2 și 4.3 constituie baza de pornire pentru ierarhizări ulterioare în vederea stabilirii priorităților și a optimizării globale a

modelului experimental și în final a modelului tehnologic elaborat în condiții și pe baza unor criterii de optimizare diferite (specific particularizate);

- analiza prezentată se poate constitui ca bază de pornire pentru o analiză ulterioară prin metode subiective mai precise, cum este de exemplu metoda corelației de rang.

Analiza efectuată până acum permite determinarea câtorva parametri care caracterizează global sistemul:

- numărul total de legături posibile: $221 + 119 + 92 = 432$;
- numărul total de legături realizate: $163 + 62 + 54 = 279$;
- ponderea legăturilor realizate: $\frac{279}{432} \cdot 100 = 64,58\%$.

Se introduce noțiunea de entropie a sistemului, H_S , ca o mărime care caracterizează nedeterminarea acestuia:

$$H_S = \sum_{i=1}^n p(S_i) \cdot \log_2 p(S_i) \quad (4.5)$$

unde: $n [-]$ = numărul de legături ale sistemului;

$p(S_i)$ = probabilitatea estimată de apariție a stării structurale S_i a sistemului.

Presupunând în sistemul considerat toate stările echiprobabile, rezultă entropia maximă a sistemului:

$$H_{S_{\max}} = -\frac{279}{279} \cdot \log_2 \frac{1}{279} = 8,1241 \quad (4.6)$$

Dacă se consideră toate legăturile posibile drept echiprobabile, rezultă entropia minimă a sistemului:

$$H_{S_{\min}} = - \frac{432}{432} \cdot \log_2 \frac{1}{432} = 8,7548 \quad (4.7)$$

Se introduce noțiunea de organizare absolută a sistemului, I , ca diferență între entropia maximă și cea minimă:

$$I = H_{S_{\max}} - H_{S_{\min}} \quad (4.8)$$

Pentru cazul sistemului considerat, rezultă:

$$I = 8,7548 - 8,1241 = 0,6307 \quad (4.9)$$

4.5. Concluzii

Analiza efectuată a avut ca scop stabilirea unui model generalizat intrări – ieșiri care să stea la baza elaborării sistemului generalizat pentru optimizarea procesului tehnologic de fabricație a matrițelor de la extruderele pentru paste făinoase.

Importanța pentru optimizarea procesului, a sistemului de acțiune tehnologică directă rezultă din faptul că ia în considerare concomitent intrările, ieșirile și mecanismul de legătură interioară în permanentă interacțiune. Astfel, în acest cadrul analizei din acest capitol s-au identificat mărimile (variabilele) de intrare și de ieșire din punct de vedere a funcției obiectiv analizate – procesul de fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase, precum și mărimile (variabilele) de reglare ale procesului.

CAPITOLUL 5

STUDIUL PRIVIND POSIBILITĂȚILE DE REALIZARE A MARIȚELOR DE EXTRUDAT PASTE FĂINOASE CU MIEZURI DIN SAFIRE ARTIFICIALE

5.1. Considerații generale

În literatura de specialitate se indică ca materiale pentru miezurile matrițelor de extrudat paste făinoase în special oțelurile inoxidabile, bronzurile și materialele plastice (în special politetrafluoretilena, PTFE). Aceste materiale se prelucrează ușor, au coeficienți de frecare cu aluatul pentru paste făinoase mici, stabilitate termică corespunzătoare la condițiile termice din procesul de extrudare a pastelor făinoase.

În literatura de specialitate și în cataloagele de firmă nu se face nici o referire la alte materiale utilizate pentru fabricarea miezurilor pentru matrițele de extrudat paste făinoase, decât cele prezentate anterior.

Plecând de la aceste considerente, autorul își propune în cadrul tezei să introducă un nou material pentru miezurile matrițelor de extrudat paste făinoase, și anume safirul artificial. Acest lucru este posibil și rațional având în vedere caracteristicile termo-mecanice ale safirelor artificiale, caracterizate printr-o bună stabilitate termică, duritate mare și implicit o bună rezistență la uzură, precum și posibilitatea realizării unor miezuri cu forme și dimensiuni adecvate prin noile tehnologii de creștere a acestor cristale.

5.2. Safirul artificial

Monocristalele de safir sunt cristale incolore, foarte dure. Amestecurile izomorfe $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ se formează pentru concentrații

arbitrare de crom, sub forma unor complecși.

Safirul artificial este un material cristalin ce are aceleași proprietăți fizice și chimice ca și safirul natural, dar este mai pur decât acesta. Safirul artificial alb este alumina fără alte impurități. Materia primă este alaunul alumino – amoniacal, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$.

Principial, procesul de fabricare a safirului artificial este următorul: materia primă se deshidratează în capsule de porțelan apoi se spune calcinării în cuptoare speciale. După cernere, alumina obținută se introduce în buncărele utilajului de creștere. Materialul se topește la temperatura de cca 2000°C dată de o flacără oxihidrică și cristalizează pe suport sub forma unei bule. Pe toată durata creșterii, suportul coboară cu o astfel de viteză încât volumul de topitură să se găsească permanent în aceeași parte a flăcării.

Proprietățile safirului artificial (termice, mecanice, electrice, optice, chimice) sunt prezentate în *tabelul 5.1*.

Monocristalele de safir se pot despica, respectiv fisura de-a lungul unor plane cristalografice, dând naștere la așchii cu suprafețe lucioase. Dacă formarea suprafețelor lucioase este legată de structura atomică particulară a cristalului, adică de prezența în cristal a direcțiilor de-a lungul cărora legăturile chimice sunt slabe, această despicare este considerată clivajul cristalului. Dacă așchiile lucioase sunt imperfecte și apar în cristal ca rezultat al deformațiilor plastice (alunecare sau maclare) sau în urma concentrării selective de impurități, este vorba despre un fenomen de spargere.

Monocristalele de safir clivează în urma unei loviri ușoare, spărtura prezentând uneori suprafețe mari lucioase. Suprafața lucioasă a așchiilor atinge uneori valori de 1500 mm², fiind perfect netedă.

Tabelul 5.1 – Proprietățile safirului artificial

Nr. crt.	Proprietate	Unitate măsură	Condiții	Valoare
A. Considerații generale				
A1.	Masa molară	-	-	101,94
A2.	Densitate	kg/m ³	293°C	3,98·10 ³
B. Proprietăți termice				
B1.	Temperatura de topire	K	-	2310 (2040°C)
B2.	Capacitate calorică (termică) masică	J / (kg·K)	91K	59,76
			291K	435,12
B3.	Conductivitatea termică	W / (m·K)	30 K	10 ⁴
			300 K	40
			1500 K	4
B4.	Dilatația termică	10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	293 ... 323	6,66
			323	5
			323 ... 1273	9,03
C. Proprietăți mecanice				
C1.	Duritate (diamant 10)			
	- scara Mohs	-	-	9
	- scara Knopp	daN/mm ²	-	1800 ... 2020
C2.	Rezistența la compresiune	N/m ²	300 K	3·10 ⁷ ... 20·10 ⁷
C3.	Rezistența la încovoiere	N/m ²	-	3,8·10 ⁷ ... 5,8·10 ⁷
C4.	Modul de elasticitate	N/m ²	300 K	3,5·10 ¹⁰ ... 3,9·10 ¹⁰
C5.	Constanta lui Poisson	-	-	0,30
C6.	Coeficient de frecare	-	pe oțel	0,15
D. Proprietăți electrice				
D1.	Rezistivitate	Ω·m	300 K	> 10 ¹³
			775 K	10 ⁹
			1275 K	10 ⁴
D2.	Lărgimea benzii interzise	eV	300 K	10
D3.	Rezistența dielectrică	V/m	60 Hz	48·10 ⁶
D4.	Constanta dielectrică	-	10 ⁶ Hz 300 K	8,6 ... 10,6
E. Proprietăți optice – safirul artificial – un material transparent				
E1.	Indicele de refracție	-	5893 Å	1,768 cristal uniax negativ
			radiația D a sodiului	1,760
E2.	Transmisia de la 1650 Å la 6 μm	%	grosime 1 mm	> 50
	Transmisia de la 2800 Å la 5 μm			> 80
E3.	Emisie	μm	1150 K	2,6 ... 3,7
F. Proprietăți chimice – safirul artificial – un material incorodabil				
Safirul artificial – total inert față de acizi și baze până la 300°C				
Safirul artificial – rezistă la ansamblul agenților atmosferici				

5.3. Metode de creștere a monocristalelor de safir artificial din topitură

5.3.1. Regimul termic al creșterii monocristalelor de safir trase din topitură

În figura 5.1 este sunt reprezentate suprafețele prin care este transportată căldura, din apropierea frontului de cristalizare.

Proprietățile cristalului depind de modul în care se transferă în exterior căldura care se degajă la frontul de cristalizare (4) datorită, pe de o parte, solidificării, pe de altă parte, transportului dinspre topitura (3).

Monocristalul (2) cedează exteriorului căldură prin conducție, cu ajutorul barei de susținere (1) și a stratului limită ce se formează în contact cu mediul gazos ce-l înconjoară, precum și prin radiație termică. Transmiterea căldurii cu ajutorul barei de susținere poate fi în general neglijată, deoarece la scurt timp de la începerea tragerii, secțiunea transversală a barei rămâne cu mult mai mică decât a cristalului.

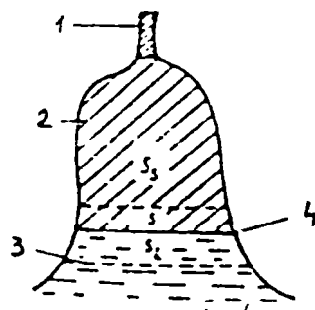


Figura 5.1 – Suprafețele prin care este transportată căldura, din apropierea frontului de cristalizare

Se consideră cristalul de formă cilindrică de lungime l , rază r și secțiune transversală, S_s , egală cu secțiunea lichidului, S_L , din fața

frontului de cristalizare, și ambele egale cu secțiunea (aria) frontului de cristalizare, S.

Ținând cont de procesele ce au loc la frontul de cristalizare, se poate scrie ecuația:

$$L \frac{dm}{dt} + \lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_L S = \lambda_s \left(\frac{dT}{dx} \right)_s S \quad (5.1)$$

unde: $L \frac{dm}{dt}$ – căldura degajată la solidificare;

L – căldura latentă de solidificare;

$\frac{dm}{dt}$ – cantitatea de substanță solidificată în unitatea

de timp;

$\lambda_L \left(\frac{dT}{dx} \right)_L S$ – căldura ce se propagă în lichid spre frontul de

cristalizare în unitatea de timp;

$\lambda_s \left(\frac{dT}{dx} \right)_s S$ – căldura ce se propagă în solid dinspre frontul

de cristalizare în unitatea de timp;

λ_L, λ_s – conductivitatea termică în cele două faze;

$\left(\frac{dT}{dx} \right)_L, \left(\frac{dT}{dx} \right)_s$ – gradientele de temperatură în cele două

faze.

Rezultă:

$$\frac{dm}{dt} = R \cdot S \cdot \rho \quad (5.2)$$

unde: R – viteza de înaintare a frontului de cristalizare, egală cu viteza de tragere a monocristalului, v ;

S – aria frontului de cristalizare:

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (5.3)$$

r – raza monocristalului;

ρ – densitatea masică a monocristalului.

Primul termen din relația (5.1) se mai poate scrie:

$$LR\rho\pi r^2 \quad (5.4)$$

sau

$$Lv\rho\pi r^2 \quad (5.5)$$

Termenul al doilea din membrul stâng din relația (5.1) se mai poate scrie sub forma:

$$\lambda_L \left(\frac{dT}{dx} \right)_L \pi r^2 \quad (5.6)$$

Căldura transmisă în solid, exprimată de membrul drept al relației (5.1), este cedată către exterior.

Neglijând cantitatea de căldură cedată cu ajutorul barei de susținere, căldura transmisă prin stratul limită va fi:

$$\alpha S' \Delta T \quad (5.7)$$

unde: α – coeficientul de schimb de căldură între sold și gaz;
 S' = suprafața laterală a monocristalului:

$$S' = 2\pi r l \quad (5.8)$$

ΔT – variația de temperatură în stratul limită.

Pentru căldura cedată pe calea radiației termice, legea Stefan – Boltzmann are expresia:

$$\varepsilon \sigma T^4 S' \quad (5.9)$$

unde: ε – factorul de înnegrire a monocristalului;
 σ – constanta Stefan – Boltzmann;
 T – temperatura monocristalului.

Deoarece în expresia (5.9) intră temperatura absolută la puterea a patra, ceea ce monocristalul primește de la pereții instalației prin intermediul radiației termice se poate neglija. Astfel, membrul drept al relației (5.1) se poate exprima:

$$\lambda_s \left(\frac{dT}{dx} \right)_s S = \alpha S' \Delta T + \varepsilon \sigma T^4 S' \quad (5.10)$$

În concluzie, ținând cont de expresiile (5.3) ... (5.10), relația (5.1) devine:

$$Lv\rho\pi r^2 + \lambda_L \left(\frac{dT}{dx} \right)_L \pi r^2 = \alpha 2\pi r l \Delta T + \epsilon \sigma T^4 2\pi r l \quad (5.11)$$

În regim staționar, ceea ce interesează în primul rând este viteza de tragere. Dacă se consideră că pe un interval de timp suficient de lung, câmpul de temperatură păstrează în instalație aceeași distribuție, relația (5.11) devine:

$$Lv\rho\pi r^2 + \lambda_L \left(\frac{dT}{dx} \right)_L \pi r^2 = k_0 r \quad (5.12)$$

sau

$$v = \frac{k}{r} + k' \quad (5.13)$$

Relația (5.13) stabilește că viteza de tragere depinde invers proporțional de raza monocristalului.

5.3.2. Tehnica de creștere Verneuil

Tehnica de creștere Verneuil, a cărei schemă este prezentată în figura 5.2, este o tehnică de fuziune în flacără și reprezintă un tip aparte de creștere din topitură, în care materialul se adaugă în mod continuu vârfului topit al cristalului și nu se utilizează creuzete pentru topitură.

Principial, tragerea cristalului se realizează astfel: pudra din care se crește cristalul este depozitată într-un buncăr (3), de unde, prin

intermediul unui sistem de alimentare cu vibrator (16), cantități mici din aceasta sunt introduse prin axul unui arzător în flacăra de hidrogen ce arde în prezența oxigenului. În drumul ei prin centrul arzătorului pulberea este încălzită, iar când trece prin flacăra se topește și în această stare cade pe un germene care este așezat în partea superioară a sistemului de tragere al cristalului. În urma contactului cu germenele, o parte din bolul de topitură se solidifică și astfel are loc creșterea. Menținerea frontului de cristalizare în aceeași regiune a izotermei de răcire se face prin coborârea controlată a cristalului.

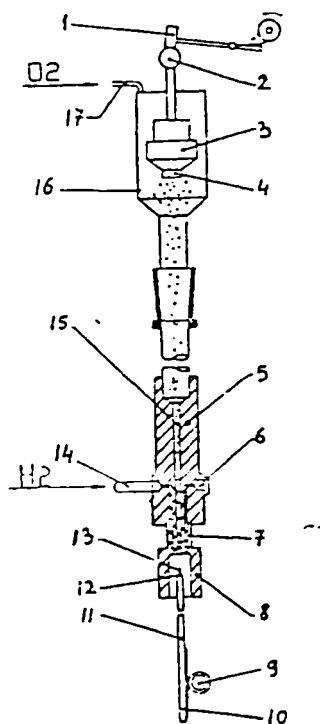


Figura 5.2 – Schema tehnicii de tragere Verneuil [8]

Alimentarea cu oxigen a instalației Verneuil se face prin conducta (17), iar alimentarea cu hidrogen prin conducta (14). Pudra este conținută în buncărul (3), prevăzut cu sita (4), de unde este sitată ritmic, datorită loviturilor intermitente ale ciocanului (1), e acționat cu o camă.

Oxigenul conduce materia primă prin pasajul central (15) al arzătorului vertical (5). Pasajul central (15) are formă conică, astfel încât limitează numărul de particule de pulbere care ajung în flacăra oxihidrică. Hidrogenul este introdus într-o cameră circulară de distribuție (6), de unde este condus spre partea inferioară a arzătorului vertical (7), prin mai multe canale care înconjoară canalul central prin care circulă oxigenul.

Flacăra oxihidrică se dezvoltă în partea inferioară a arzătorului în cuptorul (8). Particulele de pudră din buncăr trecând prin această flacăra se topesc și cad pe germenele de cristalizare (13), care are aspectul unui ac subțire încastrat pe un suport ceramic (12), montat pe tija verticală (11). Bara de monocristal care crește trebuie coborâtă controlat, astfel încât porțiunea care crește să se afle în permanență în miezul flăcării oxihidrice. Pentru aceasta tija (11) este prevăzută cu o cremalieră (10), care angrenează cu pinionul (9), acționat mecanic prin intermediul unui motor electric.

Germenele de cristalizare după ce a fost montat pe tija verticală este adus la punctul de topire, fiind introdus în nucleul flăcării oxihidrice. Creșterea bulei de cristal prin metoda Verneuil începe prin depunerea de pudră topită pe germenele de cristalizare topit. Când se atinge diametrul maxim realizabil pentru condițiile date, momentul sesizabil prin manifestări de instabilitate a zonei topite (clocotire, tendințe de scurgere) începe faza de creștere a cristalului prin reglarea corespunzătoare a debitului de pudră și a temperaturii flăcării. Temperatura flăcării va trebui să crească continuu din cauza pierderilor de căldură, care progresează pe măsura creșterii cristalului. Când se atinge lungimea maximă realizabilă, moment sesizabil tot prin manifestări de instabilitate a zonei, se oprește alimentarea cu pudră, iar după câteva minute se închid brusc

administrările hidrogenului și oxigenului, pentru a asigura o solidificare rapidă a zonei topite.

Ultima fază constă în menținerea cristalului în cuptorul de cristalizare (8) un timp convenabil, pentru a evita răcirea bruscă și deci tensionarea.

Instalațiile Verneuil moderne sunt cu sisteme de automatizare a tehnicii de tragere, astfel încât poziția frontului de cristalizare să poată fi controlată cu doi senzori fotoelectrici, unul pentru mecanismul de alimentare cu pulbere și celălalt pentru mecanismul de coborâre, iar imaginea bulei incandescente să poată fi studiată pe o cameră video. Pentru menținerea presiunii constante a celor două gaze, oxigen și hidrogen, instalațiile moderne sunt dotate cu regulatoare automate.

5.3.3. Tehnica de tragere Czochralski

Tehnica de tragere Czochralski, a cărei schemă este prezentată în *figura 5.3*, constă în: topirea oxidului de aluminiu sub formă de pulbere, în creuzetul (5), cu ajutorul unui generator de înaltă frecvență (6), într-o atmosferă inertă, la presiune normală. Amorsa (2) se scufundă în topitură și se trage suficient de încet, asigurându-se înaintarea și rotirea simultană pentru a obține simetria termică a sistemului și agitarea topiturii.

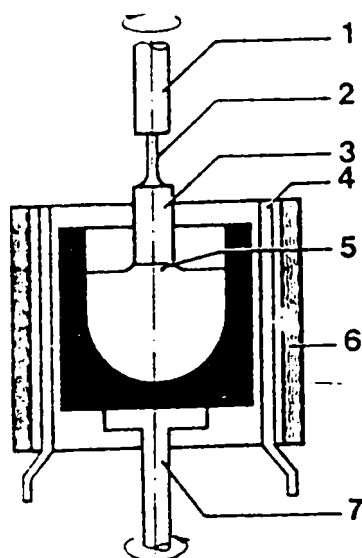


Figura 5.3 – Schema tehnicii de tragere Czoehralski

Pornirea tragerii presupune mai întâi umplerea creuzetului (5) cu pulbere de oxid de aluminiu în amestec cu un procent foarte mic de oxid de crom, apoi fixarea germenului de cristalizare (2) pe tija suport (1), și anume în centrul acesteia, ceea ce se poate controla prin pornirea mecanismului de rotire a tije, care apoi este oprit. Urmează alimentarea generatorului de înaltă frecvență la curent și începerea alimentării cu gaz protector. După un anumit interval de timp pulberea din creuzetul (5) se topește. În acest interval de timp, germenul de cristalizare (2) trebuie ținut la câțiva centimetri deasupra creuzetului (5), pentru a nu se topi. Temperatura produsă de generatorul de înaltă frecvență este puțin peste temperatura de topire. În momentul în care pulberea din creuzetul (5) s-a topit, începe rotirea tije suport (1) a germenului de cristalizare. Tija se rotește cu 30 până la 150 rotații pe minut și este coborâtă până ce germenul de cristalizare se află la o distanță de 3 – 5 mm față de suprafața topiturii (6). Dacă temperatura la care are loc procesul a fost stabilită corect, atunci topitura (6) udă germenul (2). Dacă temperatura este mai mică decât valoarea corectă, atunci apar mici cristale parazit pe suprafața topiturii, care pornesc de la germenul de cristalizare. Dacă

temperatura este prea mare, la scufundarea germenului în topitură, acesta este topit parțial. În cazul temperaturii corecte, după 1 – 2 minute de la coborârea germenului în topitură începe tragerea propriu-zisă a cristalului, cu o viteză de tragere optimă de 1 – 5 cm/h.

Tragerea poate fi continuă sau periodică, de exemplu 1 mm la fiecare 5 minute. Odată cu scăderea cantității de topitură din creuzet se modifică continuu și distribuția temperaturii din sistem, de aceea în cazul creșterii unei bare de secțiune constantă, temperatura topiturii este modificată gradat.

La o corelare bună a ratei de tragere și temperaturii la care are loc topirea pulberii, se pot crește cristale de formă cilindrică cu lungimi până la 1000 mm și diametre de 8 – 15 mm. Prin coborârea mai rapidă a temperaturii topiturii sau printr-o rată de tragere a topiturii mai scăzută se obțin cristale de diametru mai mare, iar prin ridicarea temperaturii topiturii sau prin mărirea ratei de tragere se obțin bare de diametru mai mic.

Când întreaga topitură a fost trasă din creuzet, se oprește tragerea și încălzirea creuzetului, dar se continuă însă curgerea gazului protector până ce întreg sistemul s-a răcit până la temperatura camerei. În final, monocristalul crescut (3) se taie cu grijă de pe tija suport (1). Monocristalul obținut are aceeași orientare cristalografică cu cea impusă de germenele de cristalizare.

5.3.4. Prelucrarea cristalelor sintetice obținute prin tehnicile Verneuil și Czochralski

Din cristalele obținute prin tehnica Verneuil și Czochralski, miezurile matriței se pot obține prin tăierea corespunzătoare a cristalelor

la forma și dimensiunea cerută, urmată de realizarea orificiilor miezului cu ajutorul laser-ilor sau prin prelucrare cu ultrasunete. În schema din figura 5.4 este prezentată succesiunea principalelor operații de prelucrare aplicate monocristalelor de safir pentru obținerea miezurilor pentru matrițele de extrudat paste făinoase.

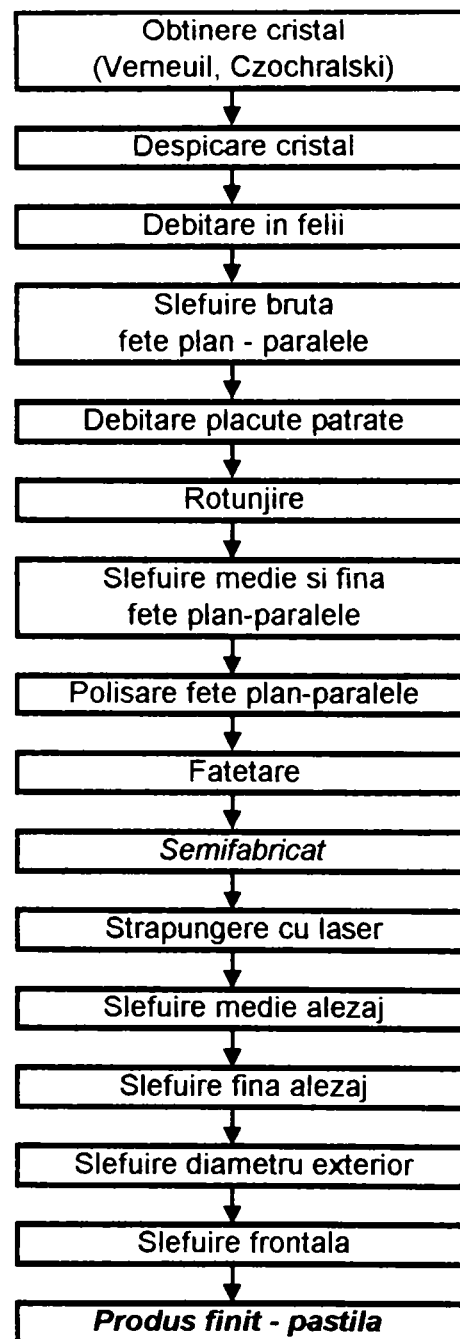


Figura 5.4 – Succesiunea principalelor operații de prelucrare aplicate monocristalelor de safir pentru obținerea miezurilor pentru matrițele de extrudat paste făinoase

Se observă că monocristalul obținut prin tehnica Verneuil sau Czochralski este mai întâi supus operației de despicare, după care se debitează feliile de grosime cerută la care se șlefuiesc brut fețe plan – paralele.

Din feliile șlefuite se debitează plăcuțe pătrate, care apoi sunt rotunjite (*figura 5.5*). În scopul operației de rotunjire, plăcuțele pătrate (3) sunt mai întâi aliniat pe un cuțit (2) din carburi metalice, într-o coloană cu ceva mai scurtă decât lățimea discului abraziv (1), din oțel cu o manta de cupru impregnată cu granule abrazive. Piesele sunt antrenate în mișcare de rotație de discul de cauciuc (4).

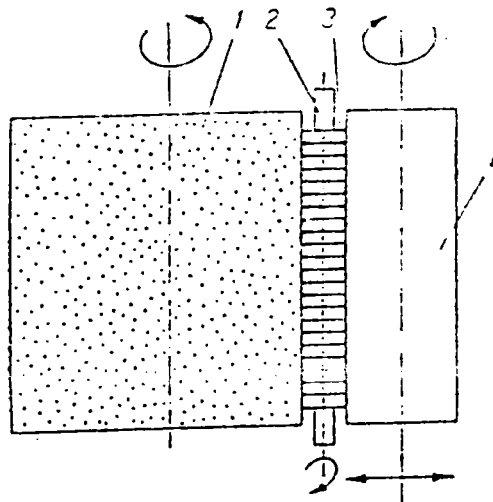


Figura 5.5 – Schema rotunjirii plăcuțelor de safir artificial

După operația de rotunjire urmează cea de șlefuire medie și fină, urmată de polizarea fețelor plan – paralele (*figura 5.6*). Șlefuirea se realizează cu o sârmă conică de cupru și cu micropulbere de diamant în suspensie de ulei. Pastilele (2) se înșiră pe sârma conică (5) și se introduc în amestecul de rigidizare (4), turnat în jgheabul (1). Prin solidificare, amestecul de rigidizare format din plumb, staniu și bismut imobilizează pastilele supuse șlefuirii.

Operația de șlefuire are loc ca urmare a mișcării rectilinii alternative pe care pastilele, o dată cu jgheabul (1), o execută față de sârma (5) cu o cursă de cca ± 15 mm, în prezența abrazivului introdus periodic prin orificiul de alimentare al bucșei (3). După un număr de 10 – 20 mișcări, sârma are o mișcare de avans de 30 mm, pe direcția S. Astfel, funcție de conicitatea sârmei și de mărimea avansului S se îndepărtează de pe pastilele adaosurile de prelucrare.

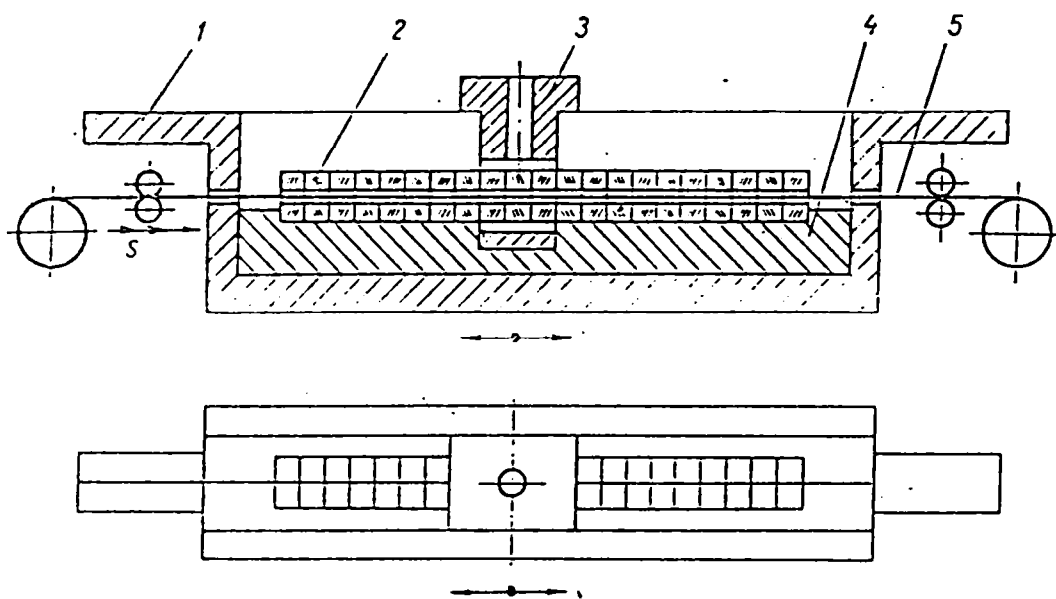


Figura 5.6 – Schema șlefuirii și polizării plăcuțelor de safir artificial

Urmează operația de fațetare, după care se obține semifabricatul. Acesta este apoi supus operațiilor de străpungere cu laser, șlefuire medie a alezajului, șlefuire fină, șlefuirea diametrului exterior și șlefuirea frontală. Se obține astfel produsul finit – pastila pentru matriță.

Obținerea pastilelor din monocristale de safir prin prelucrare ulterioară a acestora, după o schemă ca cea din figura 5.4, duce la creșterea numărului de operații de prelucrare aplicate monocristalelor de safir crescute și astfel a prețului miezului respectiv, motiv pentru care se preferă din punct de vedere tehnico – economic metodele de creștere în care se pot obține direct forma exterioară și interioară a miezului, precum

și dimensiunile acestuia. Metodele respective (Stepanov și EFG) se prezintă în continuare.

5.3.5. Tehnica de tragere Stepanov

Tehnica de tragere Stepanov este o tehnică de tragere a cristalelor prin profilare capilară, care constă în existența formatorului de profil a coloanei de topitură. De aceea, în cazul acestei tehnici, se poate lucra în două condiții la limită distincte:

- condiția la limită de captare, când topitura nu udă pereții formatorului de profil;
- condiția la limită de udare, când topitura udă pereții formatorului de profil.

Instalația de tragere de monocristale în tehnica Stepanov cuprinde următoarele sisteme principale: sistemul de topire; sistemul de profilare; sistemul de tragere, conducere și transport al cristalului; sistemul de depozitare al cristalului, de exemplu în cazul tragerii fibrelor în proces continuu și sistemului de depunere de filme subțiri pe cristalul profilat în cazul creșterilor stratificate.

Sistemul de topire, a cărei schemă este prezentată în *figura 5.7*, trebuie să asigure topirea substanței printr-un intermediu unui sistem de încălzire (6) al creuzetului (8), temperatura pentru starea de topitură supraîncălzită sau suprarăcită în raport cu starea topiturii (2) în frontul de cristalizare (3), menținerea nivelului constant al coloanei de topitură (4) în raport cu formatorul de profil (5).

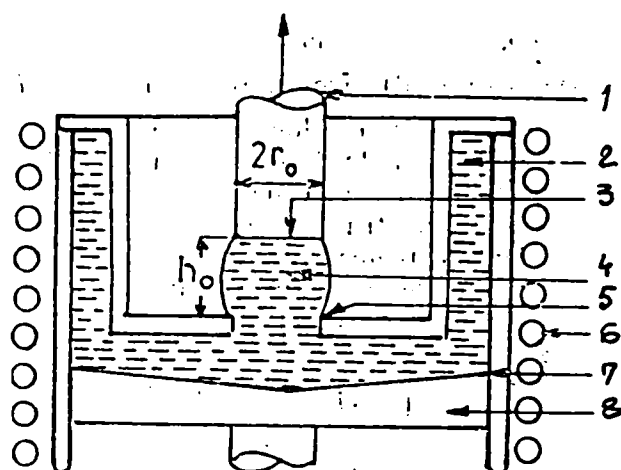


Figura 5.7 – Schema sistemului de topire la tehnica de tragere Stepanov

Sistemul de profilare trebuie să asigure profilul coloanei de topitură prin intermediul formatorului de profil (5), germenetele cu ajutorul cărora se amorsează tragerea și răcirea cristalului tras prin intermediul sistemelor de răcire. Modificarea vitezei de tragere și de răcire influențează dimensiunea profilului și uneori însăși profilul.

Aceste două sisteme – sistemul de topire și cel de profilare – trebuie să îndeplinească funcțiile enumerate indiferent de profilul care se trage sau de lungimea cristalului tras (1).

Tehnica de tragere Stepanov permite o înaltă automatizare a procesului, ceea ce asigură obținerea unor cristale cu calități foarte bune. Parametrii care variază independent sunt dimensiunea transversală a cristalului și poziția frontului de cristalizare, la fel ca și la tehnica Czochralski.

5.3.5. Tehnica de tragere EFG

Tehnica EFG (Edge – defined Film – fed Growth) este un procedeu de obținere a monocristalelor din topitură cu profilul dorit, într-un mod asemănător tehnicii Czochralski. În traducere liberă, această metodă este metoda de creștere (**G**rowth) a cristalelor dintr-o peliculă (**F**ilm) de topitură care este alimentată continuu (**fed**) printr-un procedeu special; cristalizarea are loc astfel încât forma exterioară a cristalului va avea profilul dat de către un generator de formă (**die**), profilul fiind determinat de marginile acestuia (**E**dge-defined).

Ca și la tehnica Czochralski, procesele fizice fundamentale care determină forma exterioară a unui cristal obținut din topitură prin tehnica EFG apar la joncțiunea dintre cele trei suprafețe de separare: cristal – topitură și cristal – gaz. În cazul tehnicii EFG forma exterioară a cristalului este determinată de interfața topitură – gaz (de forma meniscului) și de model de atașare a acestei interfețe la suprafața generatorului de formă.

Schema tehnicii de tragere EFG este prezentată în figura 5.8.

Pentru a obține un cristal (2) cu o formă exterioară și interioară dată, în cazul acestei metode se folosește un generator de formă (3) confecționat dintr-un material care este udat de topitura (7) ce urmează a fi cristalizată. Prin alegerea convenabilă a secțiunii părții superioare a generatorului de formă, în principiu se poate obține orice profil exterior sau interior pentru cristal. Un alt element important al generatorului de formă este capilarul (5), deoarece prin acesta urcă topitura (7) până la partea superioară a generatorului de formă (3) și alimentează cu substanță procesul de cristalizare. Generatorul de formă (3) ce conține capilarul (5), se fixează la baza creuzetului (6) astfel încât topitura (7)

pătrunde în capilar și urcă pe înălțimea h , deasupra nivelului topiturii din creuzet, dată de relația:

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g} \quad (5.14)$$

unde: γ – coeficientul de tensiune superficială a topiturii;
 θ – unghiul de contact dintre menisc și suprafața generatorului de formă (constantă de material);
 ρ – densitatea topiturii;
 r – raza capilarului;
 g – accelerația gravitațională.

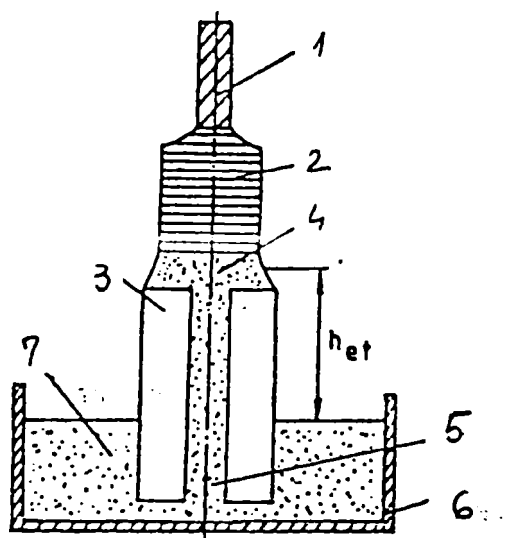


Figura 5.8 – Schema tragerii EFG

Pelicula de topitură (4) de la partea superioară a generatorului de formă (3), datorită tensiunii superficiale nu va depăși muchiile acestuia, adică nu va curge de pe acesta. Dacă se apropie o sămânță (cristal) de acest strat de topitură până când o parte din ea se va topi, iar apoi se va

trage în sus sămânța, forma cristalului va fi determinată de profilul părții superioare a generatorului de formă.

Parametrii fundamentali de cristalizare în cazul tragerii monocristalului din topitură, cum este tehnica de tragere EFG, sunt următorii: puritatea chimică a materialului din care are loc creșterea și forma creuzetului; viteza de creștere a cristalului; gradul de stabilitate a creșterii; gradientii de temperatură; forma frontului de cristalizare; direcția cristalografică după care crește cristalul.

5.3.7. Studiul condițiilor de cristalizare a safirului sintetic

Toate tehnicile de tragere din topitură (Czochralski, Stepanov, EFG), elimină orice contact a suprafeței laterale a cristalului cu pereții creuzetului. Caracteristica fundamentală a tehnicilor de tragere din topitură este cristalizarea cu orientare determinată în condițiile în care se utilizează un germene de cristalizare. Forma și mărimea cristalului care se trage sunt determinate de existența forțelor capilare care produc un menisc în regiunea limită a interferenței.

Studiul condițiilor de cristalizare a safirului prin tehnicile de tragere din topitură trebuie să ia în considerare forțele capilare la interferența cristal – topitură și transferul de masă în sistemul cristal – topitură.

Problema tragerii cristalului din topitură se poate reduce la următoarele: trebuie cuplată o față a solidului cu suprafața liberă a fazei lichide din care acesta provine. Deoarece suprafața solidului care ajunge în contact cu faza lichidă (topitura) este întotdeauna mai mică decât aceasta, cuplarea se face printr-o coloană de lichid (*figura 5.9*), la

formarea căreia participă forțele de inerție legate de curgerea topiturii, forțele de capilaritate și forțele de greutate.

Suprafața de contact între solid și lichid reprezintă interfața, iar coloana de lichid are forma unui menisc.

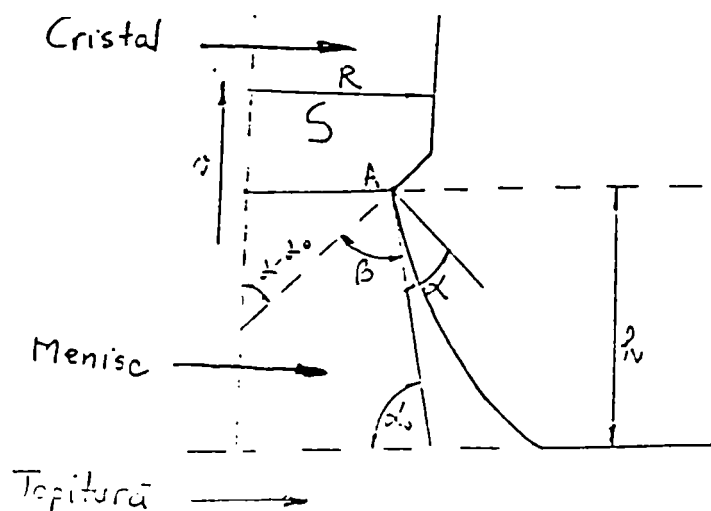


Figura 5.9 – Mărimile caracteristice meniscului

Forma meniscului se determină din rezolvarea ecuației capilarității a lui Laplace, cu condițiile la limită corespunzătoare.

Ecuația capilarității a lui Laplace reprezintă legătura între dimensiunea secțiunii transversale a cristalului și poziția frontului de cristalizare.

Ecuația lui Laplace are forma:

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (5.15)$$

unde: γ - coeficientul de tensiune superficială;

r_1, r_2 - razele principale de curbură ale suprafeței meniscului într-un anumit loc;

$$\frac{1}{r_1} = \frac{\frac{d^2x}{dz^2}}{\left[1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (5.16)$$

$$\frac{1}{r_2} = \frac{1}{x \left[1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5.17)$$

Raza de curbură se consideră pozitivă când centrul de curbură se află în regiunea cu presiunea mai mare. Diferența de presiune hidrostatică în menisc este dată de expresia:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h_{ef} + p_v \quad (5.18)$$

unde:

- ρ - densitatea topiturii;
- g - accelerația gravitațională;
- h_{ef} - distanța dintre nivelul topiturii din creuzet și interfața de creștere;
- p_v - presiunea asociată curgerii vâscoase în capilar și în pelicula de menisc.

Procesul creșterii este caracterizat de viteza de tragere, v , și unghiurile α_0 și β (figura 5.9).

Unghiul α_0 este format între tangenta la suprafața interioară a meniscului în punctul A în care se întâlnesc cele trei faze solidă, lichidă și gazoasă și suprafața liberă a topiturii.

Unghiul de creștere, β , este unghiul format între tangentele la suprafața laterală a cristalului și respectiv fața interioară a meniscului duse în punctul A unde se întâlnesc cele trei faze.

Unghiul de creștere, β , este o constantă anizotropică pentru fiecare material în parte și în situația creșterii staționare.

Din figura 5.9 se poate constata că pentru un unghi constant de creștere, β , dimensiunea transversală a cristalului, R , variază în timp conform relației:

$$\frac{dR}{dt} = -v \cdot \operatorname{tg}(\alpha_0 - \alpha) \quad (5.19)$$

unde: v - viteza de tragere;

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta; \beta - \text{unghiul de creștere.}$$

Creșterea este staționară pentru $\alpha = \alpha_0$.

De-a lungul axei de tragere a cristalului, de o parte și alta a interfeței solid – topitură, vor exista doi gradienti de temperatură distincți, $\frac{\partial T_l}{\partial z}$ și $\frac{\partial T_s}{\partial z}$, corespunzători topiturii și respectiv cristalului, unde T_l și T_s sunt temperaturile în faza lichidă, respectiv solidă în vecinătatea interfeței.

Bilanțul termic în regiunea frontului de cristalizare are forma:

$$\chi_l \frac{\partial T_l}{\partial z} - \chi_s \frac{\partial T_{sl}}{\partial z} = \lambda \rho v_h \quad (5.20)$$

unde: χ_l, χ_s - coeficienții de conductivitate termică ai lichidului, respectiv solidului;

λ - căldura latentă de solidificare a topiturii pentru unitatea de masă;

ρ - densitatea;

v_h - viteza de cristalizare:

$$v_h = v - \frac{dh}{dt} \quad (5.21)$$

h - înălțimea frontului de cristalizare (figura 5.9).

Pentru a putea calcula efectiv raportul $\frac{dh}{dt}$, trebuie cunoscuți cei doi gradienti: din topitură, respectiv cristal. Aceștia se pot calcula din ecuația propagării căldurii, în care se ține seama și de schimbul de căldură cu mediul ambiant, prin suprafața laterală a cristalului.

Ecuația propagării căldurii în regim staționar, pentru cazul unidimensional, are forma:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - \frac{v}{k_i} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial z} - \frac{\mu_i}{\chi_i} \Lambda(T_i - T_a) = 0 \quad (5.22)$$

unde: $i = 1, s$ (1 pentru topitură, s pentru cristal);

v - viteza de tragere;

k_i - coeficientul de difuzare a temperaturii;

μ_i - coeficientul de radiație a căldurii;

χ_i - coeficientul de conductivitate termică;

T_a - temperatura mediului ambiant în care se trage

cristalul;

Λ - raportul între perimetrul secțiunii cristalului și aria acestuia.

Tot din figura 5.9 se poate observa că raza cristalului, R , și înălțimea frontului de cristalizare, h , variază independent, ceea ce înseamnă că sistemul tragerii cristalului din topitură este cu două grade de libertate.

Dacă se notează cu R_0 raza cristalului și cu h_0 înălțimea frontului de cristalizare pentru cazul echilibrului, atunci abaterile acestor mărimi de la starea de echilibru se pot nota cu:

$$\delta R = R - R_0 \quad (5.23)$$

respectiv

$$\delta h = h - h_0 \quad (5.24)$$

Se notează cu $\dot{\delta R}$ și $\dot{\delta h}$ variațiile abaterilor δR , respectiv δh în raport cu timpul.

Din ecuația (5.19) se observă că variația lui R este produsă de modificarea lui α_0 pentru unghiul de creștere β constant.

Se concepe următoarea ecuație diferențială cu derivate parțiale:

$$\dot{\delta R} = -v \cdot \dot{\delta \alpha}_0 = -v \left[\left(\frac{\partial \alpha_0}{\partial R} \right)_{R=R_0} \delta R + \left(\frac{\partial \alpha_0}{\partial h} \right)_{h=h_0} \delta h \right] \quad (5.25)$$

unde

$$\delta\alpha_0 = \alpha - \alpha_0 \quad (5.26)$$

Conform ecuației (5.21), viteza de variație în timp a înălțimii frontului de cristalizare are forma:

$$\frac{dh}{dt} = v - \frac{1}{\lambda\rho} \left(\chi_l \frac{\partial T_l}{\partial z} - \chi_s \frac{\partial T_{sl}}{\partial z} \right) \quad (5.27)$$

Dacă se notează cu q densitatea totală a fluxului de căldură:

$$q = \chi_l \frac{\partial T_l}{\partial z} - \chi_s \frac{\partial T_{sl}}{\partial z} \quad (5.28)$$

atunci relația (5.27) devine:

$$\frac{dh}{dt} = v - \frac{1}{\lambda\rho} \cdot q \quad (5.29)$$

q variază după raza R și înălțimea frontului h , iar relația (5.29) devine:

$$\delta\dot{h} = -\frac{1}{\lambda\rho} \left[\left(\frac{\partial q}{\partial R} \right)_{R=R_0} \delta R + \left(\frac{\partial q}{\partial h} \right)_{h=h_0} \delta h \right] \quad (5.30)$$

Cele două ecuații cu derivate parțiale (5.25) și (5.30) se pot rescrie într-o formă simplificată:

$$\delta\dot{R} = b_{RR} \delta R + b_{Rh} \delta h \quad (5.31)$$

$$\delta \dot{h} = b_{hR} \delta R + b_{hh} \delta h \quad (5.32)$$

unde:

$$b_{RR} = -v \left(\frac{\partial \alpha_0}{\partial R} \right)_{R=R_0} \quad (5.33)$$

$$b_{Rh} = -v \left(\frac{\partial \alpha_0}{\partial h} \right)_{h=h_0} \quad (5.34)$$

$$b_{hR} = -\frac{1}{\lambda \rho} \left(\frac{\partial q}{\partial R} \right)_{R=R_0} \quad (5.35)$$

$$b_{hh} = -\frac{1}{\lambda \rho} \left(\frac{\partial q}{\partial h} \right)_{h=h_0} \quad (5.36)$$

Pentru sistemul de ecuații format din ecuațiile (5.31) și (5.32), se propune o soluție de forma:

$$R = a_1 \exp(\gamma_1 t) + a_2 \exp(\gamma_2 t) \quad (5.37)$$

$$h = a_3 \exp(\gamma_1 t) + a_4 \exp(\gamma_2 t) \quad (5.38)$$

unde: a_i ($i = 1, 2, 3, 4$) - constantele de integrare;
 γ_1, γ_2 - rădăcinile ecuației:

$$\gamma^2 - (b_{RR} + b_{hh})\gamma + (b_{RR}b_{hh} - b_{Rh}b_{hR}) = 0 \quad (5.39)$$

Condiția necesară și suficientă ca sistemul de ecuații (5.31), (5.32) să fie stabil este dată de criteriul lui Hurvitz:

$$b_{RR} + b_{hh} < 0 \quad (5.40)$$

și

$$b_{RR}b_{hh} - b_{Rh}b_{hR} > 0 \quad (5.41)$$

Coeficienții b_{RR} și b_{hh} care dau legătura lui δR cu δR și a lui δh cu δh , reprezintă sistemul de parametri de autostabilizare, iar coeficienții b_{Rh} și b_{hR} reprezintă parametri de stabilizare reciprocă. Dacă $b_{RR}b_{hh} < 0$, deci se pierde condiția de autostabilitate, stabilitatea este încă posibilă cu ajutorul parametrilor de stabilizare reciprocă.

Pentru a găsi condițiile în care forma și dimensiunea exterioară a cristalului pot fi controlate, trebuie analizat felul în care meniscul (forma și mărimea lui) influențează dimensiunile cristalului în timpul creșterii. În schemele din *figura 5.10* sunt evidențiate *mărimile caracteristice meniscului*. Astfel, în *figura 5.10a* este reprezentat cazul în care un cristal de forma unei bare cilindrice crește cu raza a capilarului, r , constantă. În *figura 5.10b* este reprezentat cazul în care raza cristalului se schimbă (de exemplu crește). O caracteristică a procesului este modul în care se orientează suprafața cristalului față de suprafața liberă a topiturii (interfața topitură – gaz). Orientarea celor două suprafețe se caracterizează prin unghiul Φ_0 , format între suprafața cristalului și tangenta la suprafața meniscului în punctul de joncțiune A (*figura 5.10a*). Influența unghiului Φ dintre direcția de creștere și suprafața liberă a cristalului (*figura 5.10b*) asupra procesului de creștere arată că

orientarea relativă suprafețelor cristalului și a meniscului, adică Φ_0 , este o mărime caracteristică materialului, valoarea Φ_0 depinzând de orientarea cristalografică a interfeței cristal – gaz. Pentru safirul artificial, acest unghi are valoarea de 17° pentru orientarea $\{0001\}$, respectiv 35° pentru $\{1010\}$. Această anizotropie a unghiului Φ_0 este asociată cu anizotropia energiei libere a interfeței cristal – gaz și cristal – topitură la joncțiunea triplă a acestor interfețe. Având în vedere aceste considerente, rezultă criteriul de stabilitate a formei cristalului: cristalul crește cu o secțiune transversală constantă doar dacă unghiul Φ dintre tangenta la menisc și direcția de creștere este egal cu Φ_0 . Dacă un proces de creștere staționar este perturbat (modificare termic stabilă a înălțimii meniscului) astfel încât $\Phi \neq \Phi_0$, dimensiunea cristalului se modifică. Dacă modificarea în dimensiunea cristalului este astfel încât unghiul Φ se apropie din nou de valoarea Φ_0 , se ajunge la o nouă stare staționară, astfel încât forma cristalului este stabilă. Dacă modificarea în dimensiunea cristalului va fi astfel încât Φ va devia în continuare de la valoarea lui Φ_0 , forma cristalului va fi instabilă. Rezultă că stabilitatea se realizează atunci când o schimbare în forma cristalului va fi astfel încât, unghiul Φ să se apropie de valoarea lui Φ_0 ca urmare a noii schimbări a formei.

Un cristal va crește cu secțiune transversală constantă dacă unghiul meniscului Φ este egal cu Φ_0 . Mărimea transversală a cristalului (de exemplu raza unei bare cilindrice) va crește dacă $\Phi > \Phi_0$ și scade dacă $\Phi < \Phi_0$ (figura 5.11a, b).

Procesele fizice care determină forma cristalului sunt aceleași în toate tehnicile de creștere, controlate de menisc, adică creșterea Czochralski, Stepanov sau EFG.

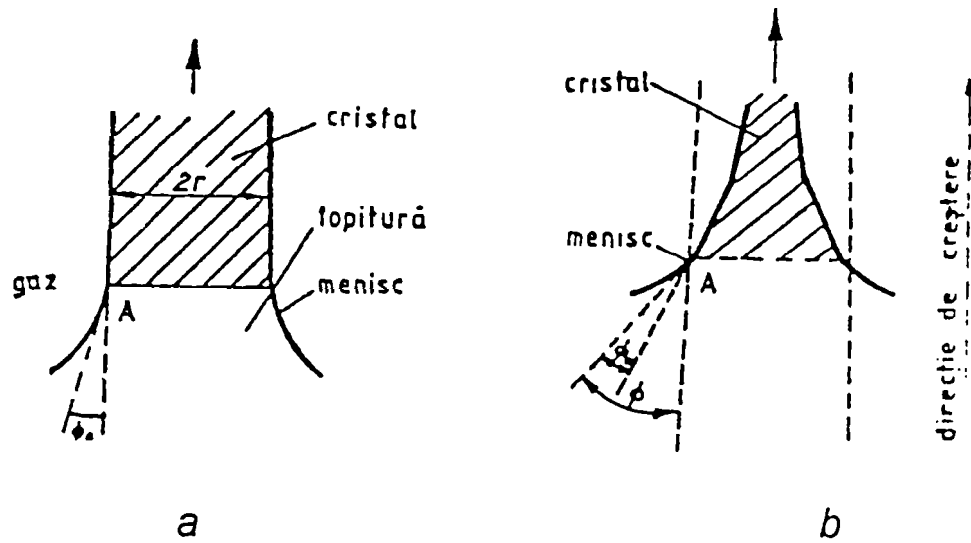


Figura 5.10 – Mărimile caracteristice meniscului în cazul creșterii cu secțiuni constantă (a) și secțiuni variabilă (b)

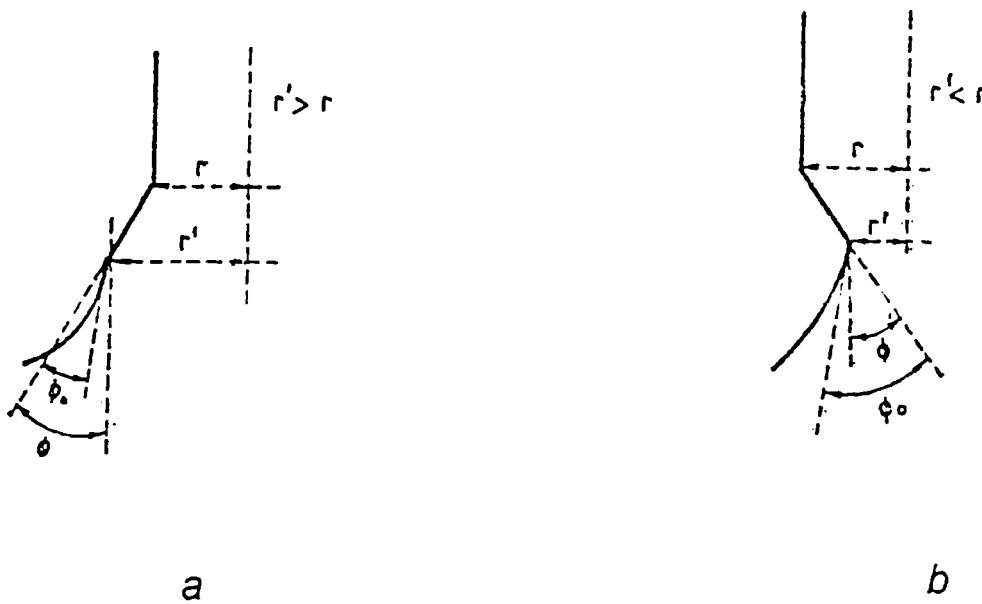


Figura 5.11 – Abaterea unghiului Φ de la valoarea lui caracteristică (Φ_0)

Mărimile care controlează forma cristalului sunt diferite pentru diverse metode. Aceste mărimi sunt funcții complicate, care depind de forma meniscului și de caracteristicile fluxului de căldură în sistemul de creștere. Pentru o creștere staționară, pe lângă condiția ca $\Phi = \Phi_0$, este

important și felul în care se racordează meniscul la suprafața superioară a generatorului de formă, în special la muchiile lui. Această ultimă condiție deosebește tehnica Czochralski de tehnicile Stepanov și EFG. Folosirea în ultimele două tehnici a unor generatoare de formă care pot fi udate sau nu de către topitură, este un efect suplimentar în abilitatea cu care se controlează forma cristalului.

5.3.8. Obținerea cristalelor sintetice direct în profilul dorit, în instalația „Safirom”

În *figura 5.12* este prezentată *instalația „Safirom”* pentru obținerea cristalelor direct în profilul cerut, instalație de cercetare concepută și realizată la Universitatea de Vest din Timișoara [45], iar în *figura 5.13* *schema de principiu a instalației*. Instalația constă dintr-o incintă vidată în care se găsește încălzitorul, creuzetul și generatorul de formă. Incinta este formată din două părți – o cameră superioară și una inferioară, ambele având pereții exteriori răciți cu apă. Pentru a putea introduce creuzetul cu substanță și generatorul de formă în încălzitor, camera superioară se poate ridica cu ajutorul unui mecanism vertical de deplasare. Procesul de creștere se poate observa direct printr-o fereastră, sau cu ajutorul unui microscop, sau pe ecranul unui monitor. Stabilitatea termică a sistemului se realizează prin intermediul unui sistem electronic. Pentru a ajunge la temperatura de 2050°C necesară topirii aluminei, se întrebuintează un încălzitor de grafit de construcție specială, puterea utilizată de fiind de aproximativ 8 kW. Creuzetul și generatorul de formă sunt realizați din molibden și se montează în interiorul încălzitorului în poziția corespunzătoare gradientului de temperatură necesar pentru o creștere staționară. Pentru a micșora

pierderile de căldură, încălzitorul este înconjurat cu un sistem de ecrane confecționate din molibden și grafit. Un alt sistem de ecrane este așezat deasupra creuzetului și a generatorului de formă, asigurând formarea gradientului de temperatură optim la interfața de creștere. Amorsa folosită are dimensiunile 1,5 x 1,5 x 30 mm, având axa orizontală cât mai aproape de direcția [0001] și se taie dintr-un cristal obținut prin tehnica de creștere Verneuil. Creuzetul are o înălțime de 55 – 65 mm și diametrul între 52 – 60 mm. Un mecanism de tragere pe verticală asigură coborârea mandrinei de prindere a amorsei, astfel încât aceasta să atingă partea superioară a generatorului de formă, iar apoi permite tragerea cristalului cu o viteză ce se stabilește în funcție de condițiile de creștere.

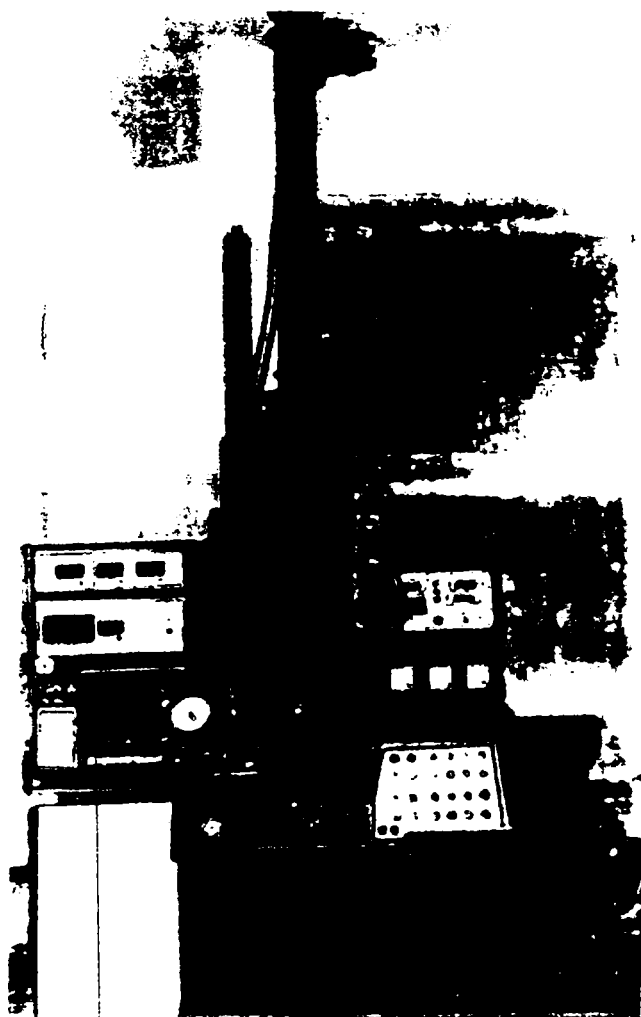


Figura 5.12 – Instalația „Safirom” [45]

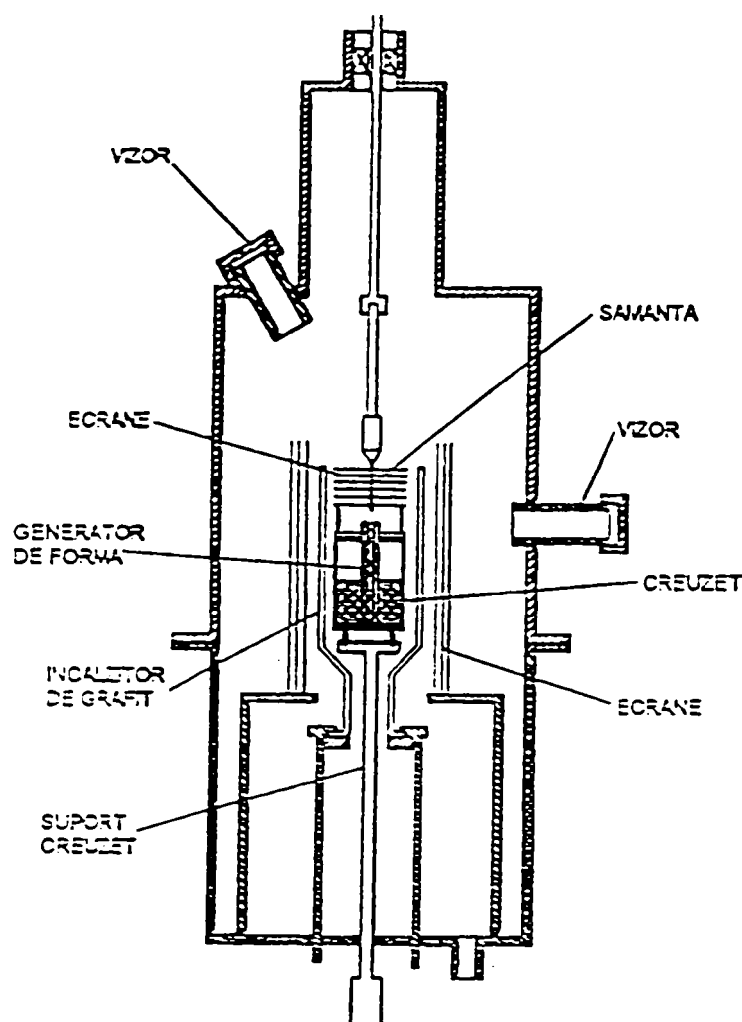


Figura 5.13 – Schema de principiu a instalației „Safirom” [45]

Cu o astfel de instalație se pot obține aproape toate formele de profile exterioare și interioare (figura 5.14), cu lungimi până la 1,5 m. În figura 5.15a sunt prezentate două variante de generatoare de formă utilizate, iar în figura 5.15b se poate vedea partea superioară a generatorului de formă a cărui profil determină forma exterioară și interioară a cristalului.



Figura 5.14 – Cristale profilate de safir

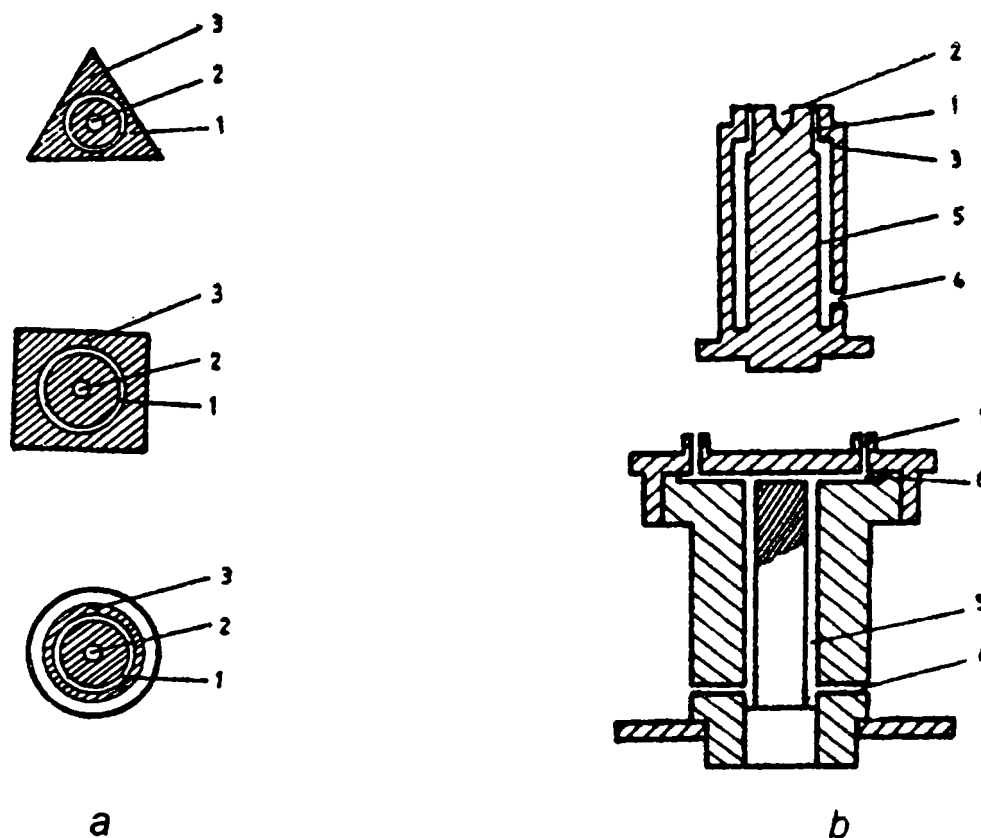


Figura 5.15 – Moduri de realizare a capilarelor de alimentare și profile ale părții superioare a generatorului de formă [45]:

1 – canal capilar; 2 – degajare circulară; 3 – generator de formă;
4 – orificiu intrare topitură; 5 – coloană topitură; 6 – rezervor capilar

Morfologia suprafeței exterioare a cristalelor este diferită, în funcție de forma secțiunii lor transversale, de ariile acestora și de condițiile de creștere. De exemplu, pentru cristale sub formă de bare cu secțiunea transversală circulară, neregularitățile de pe suprafață sunt mai

pronunțate decât pentru cele cu diametru mai mare, chiar dacă cristalele au fost crescute în aceleași condiții. Deoarece creșterea are loc în vid, deseori cristalele sunt acoperite cu un strat subțire de molibden, în general, în prima parte a cristalului, fenomen ce apare de obicei în cazul în care creșterea are loc la o temperatură mai mare decât cea necesară.

Secțiunea transversală a cristalului diferă puțin față de profilul părții superioare a generatorului de formă, în cazul unei secțiuni triunghiulare, de exemplu, vârfurile fiind puțin rotunjite. În procesul de creștere există o interdependență între simetria cristalului și cea a mediului în care el crește (adică a distribuției temperaturii în incintă). Forma exterioară a cristalului va corespunde cu elementele de simetrie a structurii cristalografice. De aceea cristalele obținute sunt uneori fațetate. Fenomenul de fațetare poate să apară și din cauza devierii orientării cristalografice a amorsei de la direcția [0001]. Caracteristic pentru modul de creștere fațetat este apariția unei forme exterioare neregulate.

5.4. Concluzii

Pornind de la cerințele impuse procesului de modelare prin extrudare a pastelor făinoase cu implicații directe asupra matrițelor – organul principal modelare – s-a găsit soluția înlocuirii materialelor tradiționale (materiale metalice – bronz, oțel inoxidabil; materiale plastice – Teflon) cu materiale noi, și anume din monocristale de safir artificial, care în comparație cu cele realizate din materiale, prezintă următorul avantaj primordial: forma și configurația pastei făinoase modelată prin extrudare prin matrițe din safire artificiale sunt conforme cu cerințele

impuse, datorate suprafeței oglindă pe care o oferă suprafața activă de extrudare din safir, a coeficientului de frecare mic.

Pornind de la una dintre cerințele de bază ale procesului de producere a pastelor făinoase, în ceea ce privește produsul finit, și anume forma și dimensiunea pastei cât mai exacte, soluția pe care o propune autorul – cea a executării pastilelor din cadrul matrițelor de extrudat paste făinoase, din monocristale artificiale, și anume safire, răspunde celor două probleme actuale cu care se confruntă marile concerne producătoare de paste făinoase (Niccolai Trafile, Landucci – Italia): productivitatea și rezistența matrițelor.

În ceea ce privesc tehnicile de creștere a monocristalelor de safir, din cele prezentate rezultă că metoda EFG (Saphirom) permite obținerea directă a miezului la forma și dimensiunea impusă. Față de prelucrarea mecanică a cristalelor, necesară în cazul creșterii monocristalelor de safir prin celelalte metode, tehnicile Stepanov și EFG sunt mult mai economice, permit automatizarea, au precizia și productivitatea corespunzătoare și se recomandă prioritar. Se elimină astfel prelucrările mecanice necesare pentru obținerea formei și configurației orificiilor din matrițele realizate din materiale convenționale, datorită faptului că safirul poate fi crescut în forma și profilul dorit, fără necesitatea unor prelucrări ulterioare (doar de debitare și eventual calibrare).

Se realizează astfel matrițe cu proprietăți multiple: creșterea rezistenței matriței precum și creșterea productivității producerii matrițelor, prin obținerea de miezuri localizate, profilate simultan în instalația de producere a safirelor.

CAPITOLUL 6

ALUATUL PENTRU PASTE FĂINOASE

6.1. Caracteristicile aluatului

Schema de principiu a fabricării pastelor făinoase, de la materia primă – făină și apă – prin operațiile de amestecare (malaxare), presare și extrudare prin matriță (trefilare), este prezentată în figura 6.1.

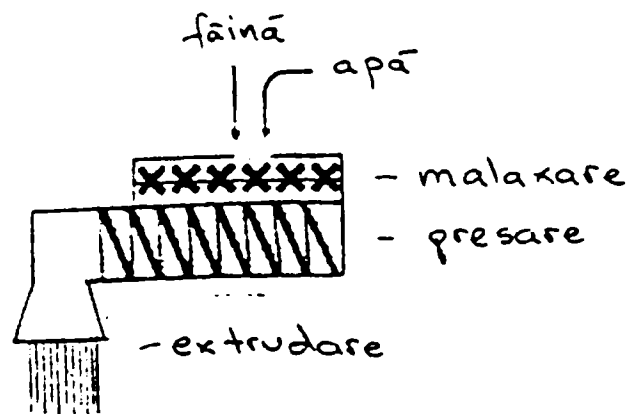


Figura 6.1 – Schema de principiu a fabricării pastelor făinoase

Aluatul pentru paste făinoase se caracterizează prin următoarele însușiri: calitatea făinii, umiditatea, consistența și temperatura aluatului preparat.

6.1.1. Calitatea făinii

Însușirile elasto-plastice ale aluatului supus presării și deci calitatea pastelor este influențată direct de granulația făinii. Cele mai bune rezultate se obțin atunci când făina are conținut de gluten umed de 30 – 40 %. În cazul

făinurilor cu gluten peste 40%, procesul de presare se desfășoară mai greu, cu viteză redusă.

În cazul fabricării pastelor lungi, făina trebuie să aibă o cantitate mai ridicată de gluten pentru a asigura rezistența lor.

Granulația făinii pentru paste trebuie să fie corespunzătoare fiecărui grup de sortimente. Datorită structurii sale fizice, făina cu granulație mai mare, mai ales atunci când provine din grâu dur, contribuie la obținerea unui aluat având *curgere plastică* (a); făina cu granulație mai redusă, provenind din măcinarea grâului moale, formează un aluat având *curgere vâscoasă* (b). Aceste două cazuri se pot observa în *figura 6.2*.

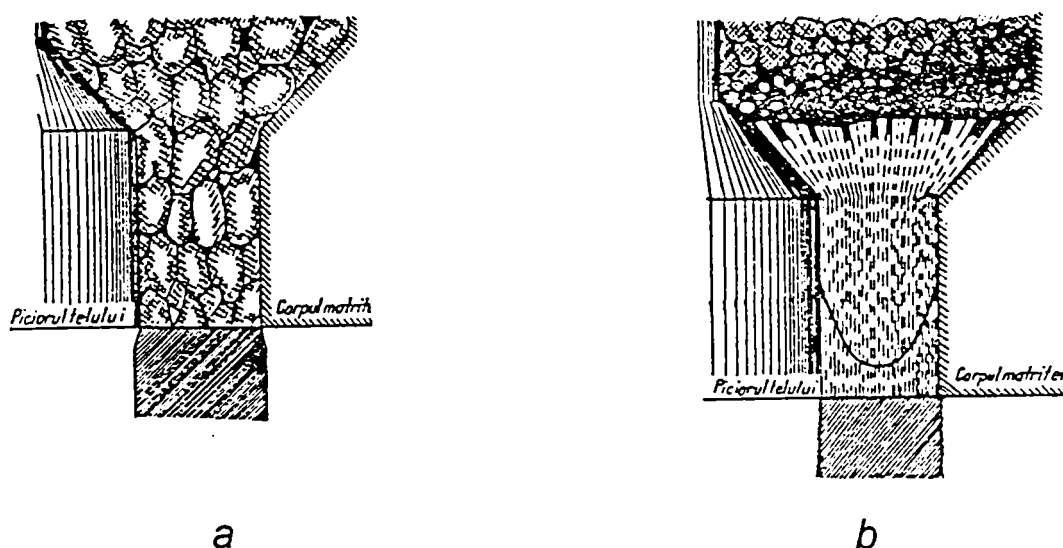


Figura 6.2 – Mecanismul de curgere prin matrița de extrudare a aluatului de paste făinoase din făinuri cu granulație diferită

6.1.2. Umiditatea aluatului

Umiditatea aluatului de paste este scăzută, între 30 și 32 %, pentru a obține un aluat cu plasticitate mare, care să treacă ușor prin orificiile matriței de extrudare. Cantitatea de apă ce se adaugă la prepararea aluatului reprezintă mai puțin de 50% din capacitatea de hidratare a făinii. Datorită

consistenței mari, aluatul de paste nu se poate obține în decursul frământării în malaxor, sub formă de masă compactă, necesitând prelucrarea ulterioară. Această operație se realizează cu ajutorul melcului de presare, astfel încât în momentul trecerii la modelare aluatul devine compact și bine legat.

În diagramele din figura 6.3 sunt prezentate variația forței de presare (a) și a vitezei de curgere (b), în funcție de umiditatea aluatului, pentru două tipuri de matrite: cu orificii cu con dublu (1), respectiv cu orificiu cu con întors (2)

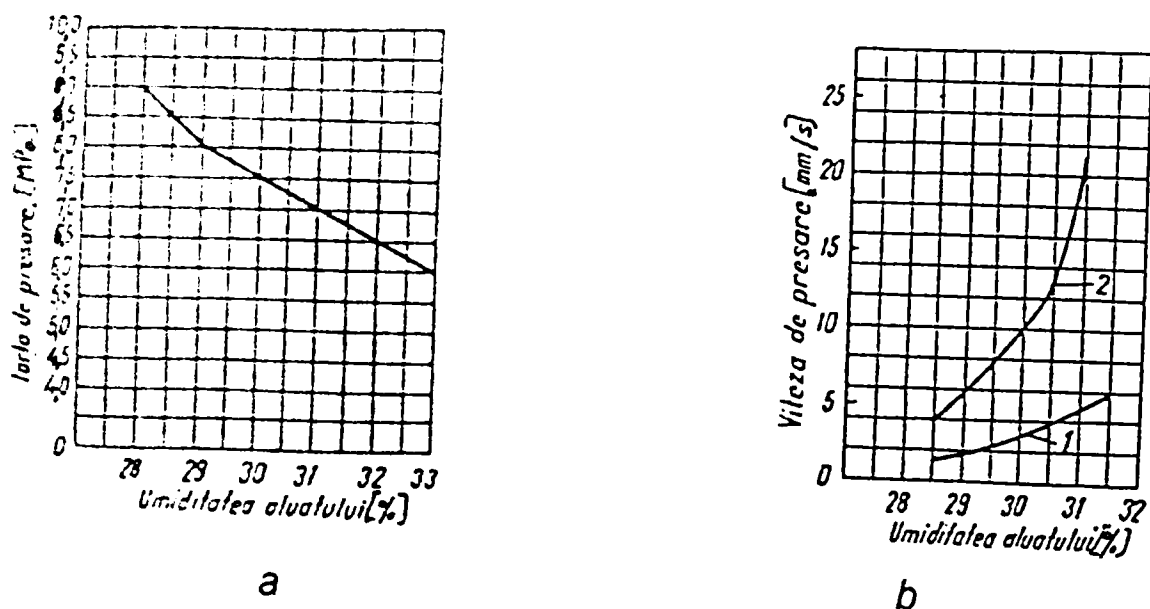


Figura 6.4 – Variația forței de presare și a vitezei de curgere a aluatului prin orificiile matritei de extrudare, în funcție de umiditatea aluatului

Se observă că la o umiditate de 31%, forța de presare este de 7 MPa; la scăderea umidității la 29%, forța crește la 8 MPa. În mod asemănător, pentru aceleași valori ale umidității, viteza de modelare se reduce de la 22 la 6 mm/s.

Dacă se adaugă prea puțină apă la prepararea aluatului, se îngreunează legarea și formarea filamentelor de gluten, astfel încât, chiar după o frământare îndelungată și prelucrare ulterioară, nu se formează o masă compactă.

Dacă umiditatea aluatului este peste 35%, acesta devine prea plastic, pierde elasticitatea necesară pentru ca produsele modelate să-și păstreze forma.

La fabricarea pastelor făinoase, care trebuie să aibă suprafețe netede (macaroane, spaghete, fidea), umiditatea aluatului trebuie să fie în jur de 32%, cu mici abateri, în funcție de proprietățile tehnologice ale făinii. Aluatul preparat cu umiditate mai mică îngreunează procesul de frământare și modelare, reduce viteza de trecere prin orificiile matriței și micșorează productivitatea presei. Un astfel de aluat nu permite obținerea corespunzătoare a unor produse cu suprafață lucioasă, culoare gălbuie uniformă și sticlozitate normală.

6.1.3. Consistența aluatului

Consistența aluatului de paste se modifică în funcție de umiditate.

După umiditatea pe care o are aluatul, în practică se deosebesc:

- aluat de consistență mare – umiditate 28 – 29 %;
- aluat de consistență medie – umiditate 30 – 32 %;
- aluat de consistență mai redusă – umiditate 33 – 34 %.

Aluatul de consistență mare, rezultat din frământarea tare, este sfărâmicios și necesită pentru compactizare o prelucrare intensă prin refrământare și vâlțuire. Matrițarea produselor dintr-un astfel de aluat este anevoioasă, solicitând forțe mari de presare, de 15 – 20 MPa, iar viteza de trecere prin matriță este redusă (3 – 7 mm/s). Din aluat tare se fabrică paste scurte, cu formă complicată (de exemplu alfabetul, spirale), care în cazul unui aluat mai puțin consistent se deformează ușor în timpul procesului de uscare.

Aluatul de consistență medie este cel mai utilizat. În cazul macaroanelor, spaghetelor, fidelei, umiditatea aluatului trebuie să fie în jurul limitei superioare, adică 32%.

Aluatul de consistență redusă se prepară în cazuri mai rare, din modelarea lui obținându-se produse ce se lipesc ușor și se întind, uscarea acestor produse fiind dificilă.

Chiar numai o abatere de 0,5% a umidității, dacă celelalte condiții rămân neschimbate (calitatea făinii, temperatura apei, durata frământării), influențează vizibil viteza de presare, aspectul exterior și starea suprafeței produselor, precum și gradul lor de deformare.

Cantitatea de apă, care trebuie adăugată la frământare, Q_{a_1} se calculează cu relația:

$$Q_a = \frac{F(U - u)}{100 - u} \quad (6.1)$$

în care: F – cantitatea de făină ce se prelucrează;
 U – umiditatea pe care trebuie să o aibă aluatul;
 u – umiditatea făinii.

6.1.4. Temperatura aluatului

În mod obișnuit, temperatura aluatului este de 35 – 40°C. Temperatura optimă a aluatului se consideră 40 – 50°C, temperatură la care aluatul capătă plasticitate maximă, consistența și sticlozitatea produselor crește, iar culoarea este galbenă – deschis.

Aluaturile mai calde, obținute prin adăugarea apei cu temperatura de 70 – 80°C, au însușiri inferioare datorită faptului că substanțele proteice din făină, care vin în contact cu temperatura ridicată coagulează, iar granulele de amidon gelifică parțial. Aluatul este lipicios și se modelează mai greu, astfel încât forța de presare crește mult, sau în cazul menținerii aceleiași presiuni scade viteza de curgere.

Aluaturile reci, frământate cu apă de circa 20°C, au consistență prea mare și plasticitate redusă, ceea ce duce la prelucrabilitate și modelare mai grea.

Temperatura aluatului, t [°C], se calculează cu relația:

$$t = \frac{F \cdot t_f \cdot c_f + A \cdot t_a + Q_1 \cdot F + Q_2 \cdot B}{B \cdot c} \quad (6.2)$$

în care: F, A, B , [kg] – cantitatea de făină, de apă și de aluat;
 t_f, t_a , [°C] – temperatura făinii, respectiv a apei pentru frământare;
 c_f, c [J/kg·K] – capacitatea termică masică a făinii, respectiv a aluatului;
 Q_1 [J/kg] – sporul de căldură pe seama hidratării făinii;
 Q_2 [J/kg] – sporul de căldură pe seama transformării energiei mecanice după scăderea pierderilor de căldură prin evaporare și cedare.

Din această relație, cunoscând temperatura finală, pe care trebuie să o aibă aluatul, se poate calcula temperatura apei t_a [°C], respectiv a făinii t_f [°C]:

$$t_a = \frac{B \cdot t \cdot c - F \cdot t_f \cdot c_f - Q_1 \cdot F - Q_2 \cdot B}{A} \quad (6.3)$$

În tabelele 6.1, 6.2 și 6.3 sunt date capacitatea termică masică a făinii c_1 și a aluatului c la umidități diferite, căldura de hidratare a făinii la umidități diferite, respectiv valoarea sporului de căldură Q_2 în funcție de diferența dintre temperatura lui și aceea a mediului ambiant. Capacitatea termică masică a făinii și cea a aluatului, precum și căldura de hidratare a făinii variază cu umiditatea, pe care acestea o au.

Tabelul 6.1 – Capacitatea termică masică a făinii și a aluatului la umidități diferite

Făină		Aluat	
Umiditate U [%]	Capacitatea termică masică c_1 [J/kg·K]	Umiditate U [%]	Capacitatea termică masică c [J/kg·K]
11,0	1,938	28,0	2,365
11,5	1,951	28,5	2,378
12,0	1,963	29,0	2,390
12,5	1,976	29,5	2,403
13,0	1,988	30,0	2,415
13,5	2,001	30,5	2,428
14,0	2,013	31,0	2,440
14,5	2,026	31,5	2,453
15,0	2,038	32,0	2,466
15,5	2,051	32,5	2,478
16,0	2,064	33,0	2,491

Tabelul 6.2 – Căldura de hidratare a făinii la umidități diferite

Umiditatea făinii u [%]	Căldura de hidratare Q_1 [J/kg]	Umiditatea făinii u [%]	Căldura de hidratare Q_1 [J/kg]
11,0	12,9	14,0	5,4
11,5	11,7	14,5	4,6
12,0	10,0	15,0	3,7
12,5	8,7	15,5	2,9
13,0	7,5	16,0	2,0
13,5	6,2		

Tabelul 6.3 – Sporul de căldură în funcție de diferența dintre temperatura lui și aceea a mediului ambiant

Diferența de temperatură dintre aluat și mediul ambiant [°C]	Sporul de căldură, Q_2 [J/kg]
0 – 5	5,5 – 5,2
5 – 10	5,2 – 4,5
10 – 15	4,5 – 3,5
15 – 20	3,5 – 2,1
20 – 25	2,1 – 0,7

6.2. Modelarea aluatului

Modelarea aluatului pentru paste se efectuează în anumite condiții tehnologice, care trebuie să asigure, printre altele, următoarele însușiri semifabricatelor (pastelor crude):

- ◆ suprafață netedă, ușor mată, fără a fi aspră, omogenă – aceste cerințe se satisfac dacă modelarea este efectuată în ritmul preparării aluatului și dacă calitatea acestuia, mai ales curgerea prin matriță, s-a desfășurat în bune condiții;

- ◆ culoare plăcută (galbenă – albicioasă, galbenă sau crem – în funcție de compoziția aluatului), uniformă pe întreaga suprafață, iar în fazele următoare de prelucrare să nu se modifice, respectiv să nu se închidă;

- ◆ dimensiunile, forma și grosimile pereților pastelor făinoase să corespundă sortimentului și să nu prezinte neuniformități datorate modificării bruște a condițiilor de modelare și mai ales a presiunii aplicate;

- ◆ caracteristicile elasto – vâscoase ale aluatului să fie în concordanță cu cerințele sortimentului, pentru a face față eforturilor de întindere, deformare, presare cu care se confruntă aluatul modelat, permițând astfel păstrarea formei și înlăturând înmuierea vizibilă la începutul uscării, sau lipirea între semifabricatele modelate;

- ◆ lipsa efectelor provocate de neuniformitatea vitezei de modelare (inele, solzi, dungi, rupturi, etc.);

- ◆ lipsa crăpăturilor inelare provocate de zvântarea excesivă prin suflarea suprafeței.

În mod deosebit, firele de aluat obținute prin presare trebuie să suporte, fără a se rupe sau întinde vizibil, greutatea proprie a firului cu lungimea de 1,5 – 2 m. La macaroane, prin strângerea tubului între degete până la atingerea suprafeței interioare, nu trebuie să se formeze crăpături

longitudinale, suprafețele interioare nu trebuie să se lipească, iar după încetarea strângerii pereții trebuie să se îndepărteze elastic, deschizând orificiul tubului.

Aluatul, în stadiul premergător trecerii lui prin orificiile matriței spre a fi modelat, constituie o masă fără incluziuni de aer și intercalații între particulele de făină. Această stare se obține ca rezultat al multiplelor etape, prin care trece aluatul la preparare – prelucrare, până la formarea lui și trecerea la presare. În *figura 6.5* este prezentată schema tipică, după care se desfășoară aceste faze într-o presă modernă cu vid: prima fază este alimentarea cu făină (a), apoi amestecarea făinii cu apă (b), urmată de frământarea aluatului sub vid (c). Aluatul este apoi comprimat (d – prima comprimare), transformat în bucăți sau fire (e), mărunțit (f), după care se elimină incluziunile de aer cu ajutorul vidului (g). Urmează comprimarea la presiune înaltă – circa 10 – 12 MPa (h) și prelucrarea intimă (i - granularea). Din acest moment aluatul este distribuit pe suprafața matriței (j), apoi strâns în masă compactă (k) și extrudat prin orificiile matriței (l). În final produsul este zvântat (m).

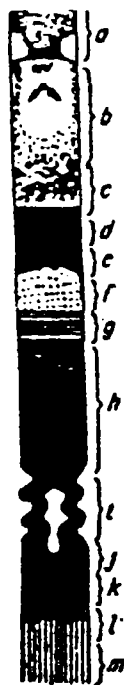


Figura 6.5 – Schema etapelor de formare, la care este supus aluatul de paste

Pentru a asigura o calitate corespunzătoare a produselor finite, cantitățile de materii prime (făină și apă), care sunt dozate automat în amestecătorul instalației de extrudare, trebuie menținute la nivele constante, pentru eliminarea riscurilor ce ar decurge din perturbații sau iregularități în alimentare. De asemenea, pentru a produce paste cu conținut adecvat de umiditate și o temperatură optimă a aluatului, este important de a regla temperatura apei.

Ca urmare a vitezei și puterii forței centrifugale, apa și făina vin în contact și se omogenizează. Este faza de inițiere a hidratării amidonului și proteinelor din acesta și începerea formării rețelei de gluten.

Funcție de temperatura apei (apa rece 27 – 45°C; apa caldă 72 – 180°C), timpul necesar amestecării variază între 5 și 20 minute. Operația de amestecare influențează calitatea și aspectul pastei, aluatul care se obține trebuind să fie compact și omogen, tenace, rezistent și cu o culoare uniformă.

În cele descrise mai sus au loc fenomene plastice, care determină calitatea și eficiența economică a presării.

Condițiile în care se execută presarea, respectiv presiunea și viteza de presare, trebuie să se mențină între anumite limite.

Presiunea variază între 6,5 și 7,5 MPa, în condițiile unui aluat cu plasticitate maximă și matrițe cu suprafața activă de extrudare din materiale cu coeficient de frecare minim.

Dacă la construcția matrițelor de extrudare, suprafața liberă a orificiilor este prea mică în raport cu suprafața lor totală, deci în cazul obținerii produselor subțiri, presiunea necesară modelării aluatului este mult mai mare, ajungând chiar la 12 – 15 MPa.

Matrița de extrudare are în ea configurate orificiile de extrudare, care determină forma și aspectul final al produsului. Astfel, în cazul suprafeței active de extrudare din material metalic (bronz), aspectul pastei va fi rugos,

de culoare galben pal, iar în cazul materialelor plastice (politetrafluoretilena), aspectul va fi neted, de culoare galben lucios.

Modelarea aluatului trebuie făcută la presiune constantă, deoarece variațiile bruște de presiune provoacă modificări în grosimea firelor modelate și apariția zonelor cu asperități pe suprafața produselor (macaroanele rezultă cu mici umflături la distanțe mici).

Viteza de trecere a aluatului prin matriță (viteza de presare) depinde de instalația de presare și de sortimentul fabricat. Astfel:

- ◆ la instalațiile vechi de presare, viteza de trecere a aluatului variază între 15 și 25 mm/s pentru macaroane și spaghetti, respectiv între 15 și 35 mm/s pentru celelalte sortimente de paste făinoase;

- ◆ la instalațiile moderne de modelare a aluatului pentru paste făinoase, care funcționează sub vid, viteza de trecere a aluatului prin matrițe este de 25 – 35 mm/s și poate ajunge pentru unele sortimente simple și cu o încărcare mare de orificii pe suprafața matriței (cum este cazul fidelei), la 50 - 100 mm/s.

Produsele pe a căror suprafață aspectul de aspru este mai puțin vizibil (fidea, tăitei, etc.) se pot presa la viteze mai mari. Pastele tubulare se presează cu viteze minime admise de productivitatea pastelor, deoarece starea suprafeței lor se reflectă în mod deosebit asupra culorii și aspectului exterior.

Modificarea vitezei de trecere a aluatului prin matriță se face prin următoarele mijloace:

- mărinđ sau micșorând presiunea aplicată asupra aluatului se schimbă în aceeași măsură viteza de curgere;

- temperatura aluatului influențează direct proporțional viteza de curgere.

Aluatul, prin presare, trebuie să curgă prin orificiile matriței de extrudare. Curgerea aluatului se face similar lichidelor foarte vâscoase și are loc atunci când forța de coeziune dintre particulele de aluat și forța de adeziune de deasupra și din canalele matriței sunt mai mici decât forța de presare. În timpul curgerii, primul strat de aluat, care vine în contact cu suprafața canalului, se lipește strâns de aceasta și rămâne nemișcat, în timp ce stratul elementar de deasupra se deplasează pe primul strat de aluat lipit de suprafața canalelor, învingând astfel forțele de coeziune ale particulelor. Al treilea strat elementar de aluat se deplasează în mod analog pe al doilea strat și așa mai departe.

În figura 6.6 este prezentată dependența forței de presare (a) și a vitezei de curgere (b) a aluatului față de temperatură, la presarea prin matrițe cu orificii cu con dublu (1), respectiv cu con întors (2).

La curgerea vâscoasă a aluatului viteza deplasării straturilor crește de la periferie, deci de la pereții canalului unde s-a produs aderența, spre centru. În figura 6.7 este reprezentată deplasarea unui strat de aluat în cazul lipirii aluatului de pereții canalului (a) și în cazul alunecării (b).

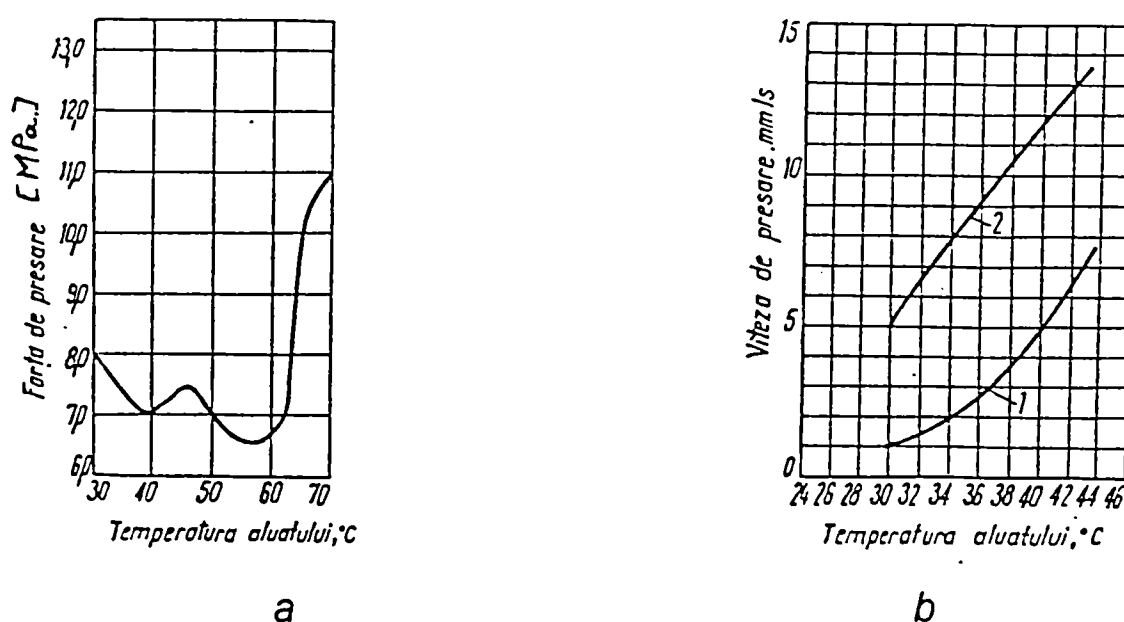


Figura 6.6 – Variația forței de presare și a vitezei de curgere în funcție de temperatura aluatului

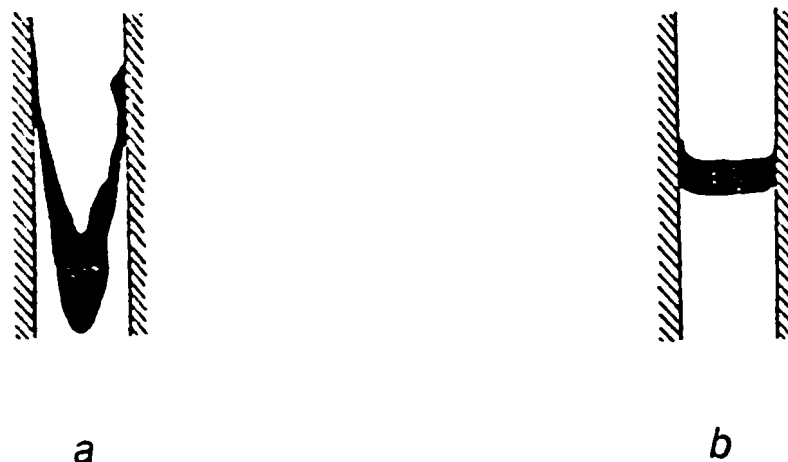


Figura 6.7 – Formele deplasării aluatului la presarea prin orificiile matriței de extrudare

Aderarea aluatului de suprafețele canalelor de modelare (*figura 6.7a*) are loc în cazul curgerii vâscoase, atunci când aluatul are consistență prea mică și însușiri elasto – plastice necorespunzătoare. Forța de coeziune dintre particulele de aluat este mai mică decât forța de adeziune la suprafața orificiilor matriței, iar viteza absolută de deplasare a straturilor elementare de aluat crește de la periferie (dinspre pereții orificiilor) spre centrul masei ce se află în curgere. Presiunea, la care trebuie supus aluatul pentru a parcurge orificiile matriței, crește, ceea ce determină un consum suplimentar de energie, reduce viteza de modelare și contribuie la formarea de asperități pe suprafața produselor.

În cazul în care există alunecare pe pereții orificiilor (*figura 6.7b*), forța de coeziune dintre particulele de aluat este superioară forței de adeziune la suprafața orificiilor matriței, masa de aluat deplasându-se uniform.

6.3. Curgerea aluatului prin matrița de extrudare. Elemente de reologie

6.3.1. Elemente de reologie generală

Reologia studiază comportarea corpurilor la solicitarea forțelor exterioare și stabilește relațiile de dependență dintre răspunsurile corpurilor la aceste tensiuni și mărimea tensiunilor aplicate (forțe care acționează pe unitatea de suprafață).

Răspunsul la acțiunea tensiunilor externe depinde de o serie de factori: natura, structura și starea de agregare a corpurilor, modul de acțiune a tensiunilor, durata solicitărilor etc.

Deformarea este studiată de reologie și reprezintă modificarea poziției relative a elementelor ce formează corpul. Această deformare încetează în momentul atingerii unui echilibru între forțele exterioare și forțele interioare de reacțiune.

Dacă după îndepărtarea forțelor exterioare deformarea se recuperează imediat, este vorba despre un corp elastic, iar proprietatea caracteristică a acestuia este elasticitatea. Corpul perfect elastic, la care recuperarea este totală și instantanee, este corpul lui Hooke, descris de relația:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6.4)$$

unde: σ – tensiunea normală;
 E – modulul de elasticitate;
 ε – deformația liniară.

Prin ecuația (6.4) se admite că deformația care apare direct după aplicarea sarcinii și viteza de difuzare a deformației sunt practic instantanee,

drept urmare căruia modelul reologic în cazul dat poate fi numit și model de deformare instantanee.

Dacă forțele exterioare acționează asupra unui fluid acesta se deformează continuu în timp. La încetarea acțiunii forțelor exterioare deformarea produsă nu se mai recuperează. Este vorba despre curgere. În acest caz, forțelor exterioare li se opun forțe interioare de frecare mici – forțele de vâscozitate – care nu limitează deformarea ci viteza de deformare (deformarea produsă în unitatea de timp). Acestor corpuri le este caracteristică vâscozitatea. Corpul perfect vâscos se mai numește lichidul lui Newton. Modelul reologic al lichidului perfect vâscos este sub forma unui piston perforat, care se deplasează într-un cilindru cu lichid. Modelul se caracterizează prin aceea că în el tensiunea este proporțională cu viteza de deformare, de aceea ecuația de stare pentru acest lichid va avea expresia:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dy}{dt} \quad (6.5)$$

unde: η – coeficientul de vâscozitate;

$\frac{dy}{dt}$ – viteza de deformare.

Deformarea elastică și curgerea reprezintă răspunsurile extreme ale corpurilor la solicitări externe. Între aceste extreme există un spectru larg de comportări.

Corpul plastic, sub acțiunea unor forțe exterioare, va curge ca un fluid dacă forța aplicată depășește o anumită valoare. Sub această valoare limită a forței, corpul se comportă ca un solid rigid. Proprietatea caracteristică a corpurilor plastice este plasticitatea. Corpul perfect plastic se mai numește corpul St. Venant.

Modelul reologic al corpului perfect plastic poate fi reprezentat sub forma elementului care stă pe o suprafață cu o frecare constantă ca valoare, care nu depinde de forța normală. Coeficienții statici și dinamici de frecare sunt constanți, corpul nu începe să se miște atâta timp cât, tensiunea de deformație, τ , nu depășește tensiunea limită de deformație, τ_T . După aceasta, elementul poate să se miște cu o viteză oarecare. Ecuația reologică va fi:

$$\tau = \tau_T \quad (6.6)$$

În mecanica și dinamica fluidelor se mai studiază corpul perfect rigid (corpul lui Euclid), care este lipsit de elasticitate, plasticitate sau vâscozitate și fluidul Pascal, fluid incompresibil, care nu posedă vâscozitate sau elasticitate. Ele servesc la deducerea unor relații teoretice care, în anumite condiții, se pot folosi și pentru corpurile reale.

Corpurile elastice, plastice și vâscoase sunt corpuri cu proprietăți unitare.

Există corpuri ce posedă una din cele trei proprietăți (elasticitate, plasticitate, vâscozitate), două sau toate trei în diverse proporții, ceea ce duce la o diversitate de comportări, care pot fi vâscoelastice, vâscoplastice sau vâscoelastoplastice. Această diversificare de comportări se poate vizualiza cu ajutorul *triunghiului comportărilor reologice* (figura 6.8).

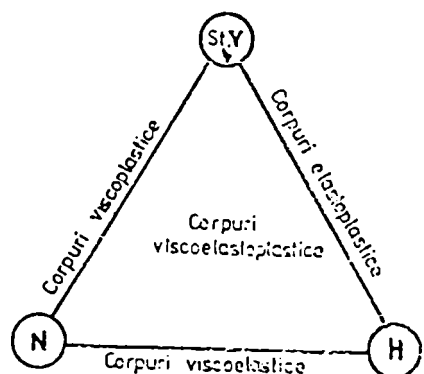


Figura 6.8 – Triunghiul comportărilor reologice

În vârfurile triunghiului echilateral se prezintă corpurile cu proprietăți unitare și comportare ideală: solidul Hooke, plasticul St. Venant și lichidul Newton. Pe laturile triunghiului sunt reprezentate corpurile care posedă câte două proprietăți: elasticitate și plasticitate, elasticitate și vâscozitate, plasticitate și vâscozitate. În interiorul triunghiului sunt reprezentate corpurile vâscoelastoplastice.

Studiul curgerii aluatului pentru paste făinoase servește la găsirea condițiilor optime de extrudare și la dimensionarea matrițelor de extrudare, respectiv a presei de extrudare.

6.3.2. Bazele procesului de extrudare a aluatului de paste făinoase

La baza extrudării aluatului de paste făinoase stă procesul de curgere printr-un ajutoraj (matriță), care-i imprimă o secțiune de un anumit profil, după care produsul obținut – pasta făinoasă – este răcit. Starea de curgere a aluatului se obține prin încălzire la o anumită temperatură.

În extruder se execută o succesiune de operații ca: transportul aluatului, încălzirea și plastifierea lui, omogenizarea topiturii și comprimarea ei pentru realizarea presiunii necesare trecerii prin ajutoraj (matriță), după care aluatul modelat și extrudat (pasta făinoasă în stare de semifabricat, aflată înaintea operației de uscare) este răcit.

Schema unui astfel de extruder este prezentată în *figura 6.9*. Elementul activ al extruderului este format dintr-un melc (1) și din cilindrul (2) care preia aluatul (amestecul de făină și apă) din pâlnia de alimentare (3) și îl transportă de-a lungul cilindrului gelificându-l și obligându-l să treacă prin matrița (4) de la partea finală de evacuare. Acest transport implică zone și faze distinct

determinate de trecerea materialului din faza solidă în starea de topitură, pe seama căldurii rezultate prin fricțiune.

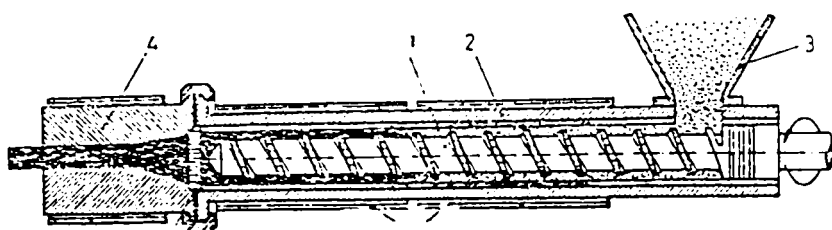


Figura 6.9 – Schema extruderului

De-a lungul melcului se disting trei zone funcționale: zona de alimentare, zona de tranziție sau compresie și zona de dozare sau pompare. În aceste zone, debitul de aluat este determinat de fenomene de curgere și transport ale materialului, distingându-se curgerea prin antrenare, curgerea datorată gradientului de presiune și curgerea datorată scăpărilor de material peste vârful filetelui.

Curgerea prin antrenare este urmarea aderenței topiturii la peretele cilindrului. Pentru a face posibilă această curgere, coeficientul de frecare dintre cilindru și aluat trebuie să fie mai mare decât coeficientul de frecare dintre melc și material. Practic, aceasta se realizează printr-o polizare deosebită a suprafeței melcului, spre deosebire de suprafața internă a cilindrului, mai puțin polizată sau rugoasă.

Curgerea datorată gradientului de presiune are loc atunci când la capul extruderului există o rezistență hidraulică însemnată (filieră, site, placă de distribuție), ceea ce determină o deplasare inversă față de curgerea prin antrenare.

Curgerea datorată scăpărilor peste vârful filetelui (în sens invers față de curgerea prin antrenare) este favorizată de jocul (toleranța) dimensiunilor

dintre diametrul melcului și diametrul cilindrului. La toleranțe normale de 0,1-0,2 mm, aluatul ce curge invers are valori de debit foarte mici.

Curgerea în zona de alimentare se face pe seama forțelor de frecare între suprafața melcului și a cilindrului; aluatul poate fi imaginat ca un piston elastic ce se deplasează din zona de alimentare a extruderului către zona de compresie.

Curgerea în zona de tranziție sau compresie presupune aluatul încălzit, până la temperatura de gelatinizare a amidonului, încălzirea făcându-se prin transformarea energiei mecanice în energie termică (extrudare adiabată).

Turația melcului nu este limitată numai pe considerente de ordin mecanic, ci aceasta reprezintă un optim între mai mulți parametri ai procesului de extrudare și anume:

- debitul de aluat extrudat. Creșterea acestuia înseamnă mărirea productivității mașinii, reducerea timpului de staționare a aluatului în cilindrul de extrudare, dar are și efect negativ prin imprimarea unui regim turbulent curgerii aluatului în matriță. Curgerea turbulentă influențează nefavorabil calitatea suprafeței produsului extrudat și stabilitatea dimensională a produsului finit;

- turația melcului. Creșterea acesteia mărește debitul de aluat, dar necesită un consum mai mare de energie pentru antrenarea materialului. Evident că există o limită a consumului de energie (specific fiecărui subansamblu al mașinii) peste care nu se poate trece.

O dată cu aluatul, în extruder pătrunde aer și umiditate, iar pe măsură ce materialul se încălzește, cea mai mare parte a aerului și a vaporilor de apă se înapoiază pe traseul de alimentare. Volumul acestor componente este însemnat, iar influența lor asupra calității produsului este negativă.

Îndepărtarea gazului se face printr-o zona de degazare (menținută sub vacuum de cele mai multe ori), intercalată pe melcul mașinii ca un segment

de transport fără presiune, situată între zona de gelifiere a glutenului și cea de compresie a aluatului. În dreptul acestei zone, pe cilindru, se prevede un orificiu legat la o pompă de vacuum.

Curgerea în zona de dozare sau pompare urmează după zona de compresie și are rolul de a amesteca și omogeniza aluatul. La extruderele moderne, lungimea zonei de dozare ajunge la jumătate din lungimea totală a melcului. La extremitatea zonei de tranziție a melcului aluatul are un grad de omogenitate de 10-80%, restul de 20-90% se realizează în zona de dozare. În această ultimă zonă, materialul este împins (pompat) pe seama presiunii realizate în zona de compresie, transportul făcându-se pe o traiectorie elicoidală, într-un regim de amestecare intensă. Omogenizarea este cu atât mai eficace, cu cât fluiditatea materialului este mai bună. De aceea, în zona de dozare-pompare are loc o degajare însemnată de căldură; fluiditatea este favorabilă și creșterii debitului extruderului.

Curgerea prin matriță conferă materialului forma și dimensiunile finale.

După extrudarea prin matriță, pasta făinoasă rezultată mai are înglobată o cantitate de energie, ce se regăsește sub formă de energie internă și care se consumă prin mărirea grosimii produsului la ieșirea din matriță, provocând umflarea produsului extrudat. Concomitent cu fenomenul de umflare are loc și o contracție a pastei formate și răcite. Cele două fenomene, de umflare și contracție, determină dimensionarea capetelor de extruder, luând drept parametru impus geometria produsului finit. Ca ordin de mărime, umflarea poate ajunge la ~10% din grosimea extrudatului, iar contracția până la 20%.

6.3.3. Elemente de reologie a aluatului de paste făinoase

Consistența și stabilitatea aluatului de paste făinoase depind de tixotropia (comportarea pseudoplastică) a materialelor folosite, de durata deformațiilor. După unii autori [41], aluatul este un corp de tip tixotropic, în cursul procesului de modelare în vederea extrudării pastelor făinoase, având loc o distrugere a structurii sale. În timpul procesului de formare a aluatului, se manifestă o structură plastic – elastică, care apoi trece într-o structură vâscoasă.

Vâscozitatea și tensiunea limită a aluatului de paste făinoase depind de viteza de deformație, de temperatură, presiune, umiditate și calitatea făinii. Astfel se pot explica datele contradictorii care sunt prezentate de diverși autori în legătură cu caracteristicile reologice ale aluatului. Datele conduc însă la o variație a valorilor vâscozității între 10^6 și 10^8 Pa·s [10^7 – 10^9 poise) pentru aluaturi din făină de grâne moi, respectiv între 10^6 și 10^9 Pa·s [10^7 – 10^{10} poise) pentru aluaturi din făină de grâne tari.

În *figura 6.10* sunt prezentate curbele care exprimă dependența vâscozității plastice de viteza de deformație a aluatului de paste făinoase, cercetată la diferite presiuni (după [41]). Se poate observa că la toate presiunile încercate, apare o modificare a vâscozității în domeniul vitezelor mici de deformație – aproximativ până la $0,4 \text{ s}^{-1}$.

Fiecare curbă poate fi împărțită în două zone: o prima zonă în care vâscozitatea scade brusc; a doua zonă, în care vâscozitatea se modifică considerabil mai puțin. Procesul de prelucrare a aluatului se desfășoară în această a doua zonă.

În ceea ce privește presiunea, aceasta influențează vâscozitatea aluatului în sens crescător (*figura 6.11*, după [41]), adică cu creșterea presiunii crește și vâscozitatea, ceea ce se explică prin micșorarea volumului

liber (volumul neocupat de molecule) și mărirea forței de acțiune intermoleculare.

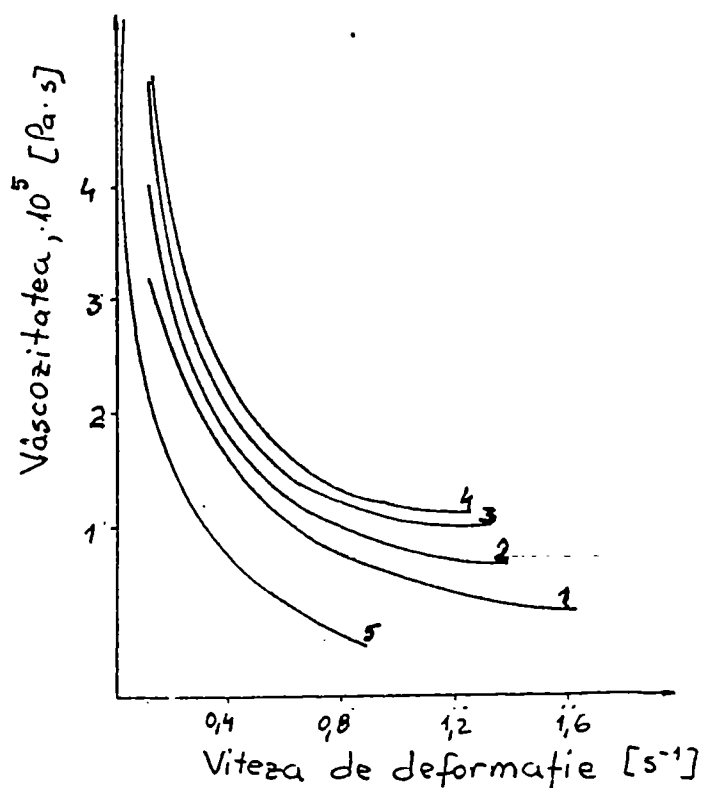


Figura 6.10 – Dependența vâscozității plastice a aluatului de paste făinoase de viteza de deformare, la diferite presiuni [MPa]:

(1 – 3,5; 2 – 5; 3 – 7; 4 – 9; 5 – 1,01)

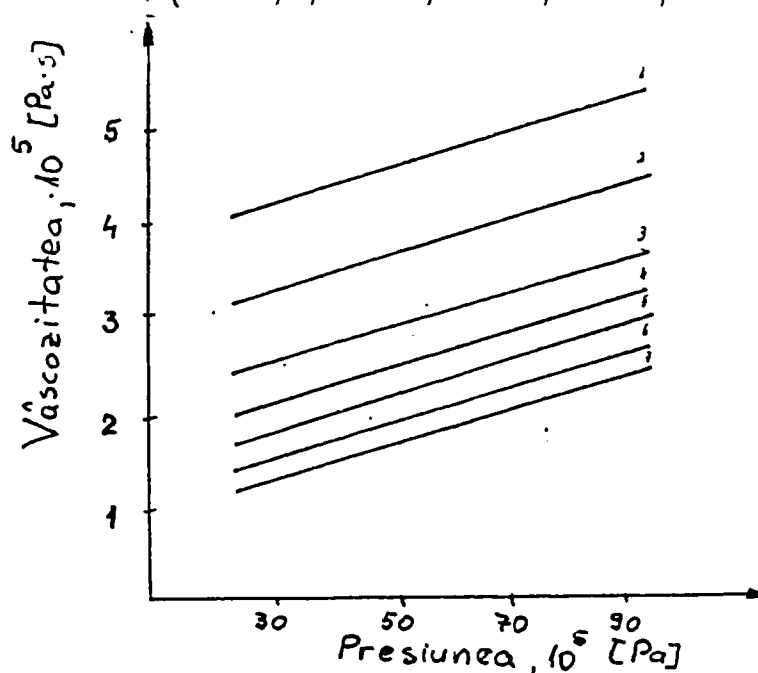


Figura 6.11 – Dependența vâscozității plastice a aluatului de paste făinoase de presiune, la diferite viteze de deformare [s^{-1}]:

(1 – 0,13; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,4; 5 – 0,6; 6 – 0,9; 7 – 1,16)

Determinarea dependenței vâscozității plastice de presiune se poate face cu ajutorul curbelor din figura 6.11. Ridicând o verticală, corespunzătoare unei anumite viteze de deformare, se obține pentru diverse presiuni, valoarea corespunzătoare a vâscozității. Se poate observa că toate punctele aflate pe o dreaptă de viteză constantă, caracterizează influența presiunii asupra vâscozității.

Cea mai mică presiune de 34,1 Pa s-a determinat [41] în legătură cu faptul că la comprimarea aluatului de paste într-un cilindru închis, formează o structură compactă, uniformă. Sub această valoare, proprietățile aluatului nu se manifestă diferențiat.

Rezultă astfel relația empirică pentru determinarea vâscozității plastice a aluatului η_{pl} [Pa·s], funcție de presiune:

$$\eta_{pl} = (a + b \cdot p) \quad (6.7)$$

unde: a, b – coeficienți ce depind de viteza de deformare;
 p – presiunea.

În tabelul 6.4 sunt indicate diferite valori ale coeficienților a și b , funcție de viteza de deformare. Valorile au fost determinate [41] pentru un domeniu de viteze de deformare de la 0,13 la 1,16 s⁻¹ și pentru un domeniu de presiuni între 3,41 și 8,81 MPa, pentru aluaturi cu umiditate de 30% și la temperatura de 40°C. Pentru determinarea vâscozității pentru viteze de deformare intermediare se utilizează interpolarea liniară.

Tabelul 6.4 – Valorile coeficienților a și b din expresia vâscozității plastice a aluatului de paste făinoase funcție de presiune

Coeficienți	Viteza de deformare [s ⁻¹]				
	0,13	0,20	0,30	0,60	0,90
$a \cdot 10^{-5}$	2,64	2,11	1,65	1,08	0,90
b	0,021	0,017	0,014	0,008	0,009

În ceea ce privește influența temperaturii asupra vâscozității aluatului de paste făinoase, aceasta scade odată cu creșterea temperaturii, din care cauză influența temperaturii la viteze mici (până la $0,3 \text{ s}^{-1}$) se manifestă considerabil mai puternic, decât la viteze de deformare mari.

Temperatura aluatului de paste făinoase nu trebuie să fie mai mică de $40 - 45^\circ\text{C}$. Odată cu creșterea temperaturii crește plasticitatea aluatului, ceea ce are ca rezultat produse finite (paste făinoase) cu suprafață mai netedă, lucioasă. Peste temperatura de 55°C încep să se gelatinizeze granulele de amidon, să se denatureze și să coaguleze proteinele. Peste 60°C , aluatul se albește, începe să-și piardă plasticitatea, iar calitatea produselor finite de înrăutățește.

În *tabelul 6.5* (după [41]) este dată dependența vâscozității plastice de temperatura și viteza de deformare, la umiditatea aluatului de 30% și presiunea de 5 MPa.

Tabelul 6.5 – Vâscozitatea plastică a aluatului de paste făinoase, η_{pl} , funcție de temperatură, la diferite valori ale vitezei de deformare

$t = 18^\circ\text{C}$		$t = 40^\circ\text{C}$		$t = 56^\circ\text{C}$	
Viteza de deformare [s^{-1}]	$\eta_{pl} \cdot 10^5$ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	Viteza de deformare [s^{-1}]	$\eta_{pl} \cdot 10^5$ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	Viteza de deformare [s^{-1}]	$\eta_{pl} \cdot 10^5$ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
0,04	23,90	0,02	11,40	0,035	3,48
0,069	17,80	0,098	4,20	0,208	1,02
0,107	13,60	0,28	2,32	0,552	0,55
0,189	8,93	0,53	1,65	0,86	0,47
0,365	5,28	0,89	1,25	1,23	0,36
0,607	3,55	1,44	0,936	1,72	0,29

Cu privire la umiditatea aluatului, trebuie menționat că odată cu creșterea acesteia, scad însușirile reologice ale aluatului: crește valoarea tensiunii limită de deformare și a vâscozității la aceeași viteză de deformare. În *tabelul 6.6* sunt prezentate câteva valori care caracterizează dependența

vâscozității plastice de viteza de deformare la diferite umidități ale aluatului, la temperatura de 40°C și presiunea de 5 MPa.

Tabelul 6.6 – Vâscozitatea plastică a aluatului de paste făinoase, η_{pl} , funcție de viteza de deformare, la diferite valori ale umidității, u

$u = 28.5\%$		$u = 30\%$		$u = 31\%$		$u = 32\%$		$u = 33\%$	
Vit. de deform. [s ⁻¹]	$\eta_{pl} \cdot 10^5$ [Pa·s]	Vit. de deform. [s ⁻¹]	$\eta_{pl} \cdot 10^5$ [Pa·s]	Vit. de deform. [s ⁻¹]	$\eta_{pl} \cdot 10^5$ [Pa·s]	Vit. de deform. [s ⁻¹]	$\eta_{pl} \cdot 10^5$ [Pa·s]	Vit. de deform. [s ⁻¹]	$\eta_{pl} \cdot 10^5$ [Pa·s]
0.033	12.1	0.02	11.4	0.018	8.7	0.014	7.5	0.005	9.3
0.204	4.23	0.098	4.2	0.09	3.02	0.094	2.16	0.02	3.94
0.57	2.33	0.28	2.32	0.33	1.44	0.28	1.21	0.088	1.9
0.85	1.85	0.53	1.65	0.61	1.08	0.77	0.63	0.36	0.7
1.18	1.53	0.89	1.25	1.06	0.75	1.32	0.47	0.89	0.4
1.51	1.34	1.44	0.94	1.68	0.59	1.89	0.38	1.67	0.27
1.94	1.17	2.25	0.70	2.33	0.48	2.43	0.31	2.39	0.21

Prelucrarea matematică a datelor experimentale prezentate în tabelul 6.6 arată [41] că toate punctele se găsesc pe o dreaptă, trasată în coordonate semilogaritmice.

În condiții de temperatură și presiune date, rezultă următoarea relație empirică pentru determinarea vâscozității în funcție de umiditatea aluatului:

$$\ln \eta_{pl} = (a - b \cdot u) + 6 \quad (6.8)$$

unde: a, b - coeficienți ce depind de viteza de deformare;

u - umiditatea aluatului

În tabelul 6.7 sunt indicate diferite valori ale coeficienților a și b , funcție de viteza de deformare, pentru presiunea de 5 MPa și temperatura de 40°C. Se poate observa că valoarea coeficientului a este practic constantă pentru domeniul vitezelor de deformare luat în considerare.

Tabelul 6.7 – Valorile coeficienților a și b din expresia vâscozității plastice a aluatului de paste făinoase funcție de umiditate

Coeficienți	Viteza de deformare [s^{-1}]				
	0,2	0,4	0,8	1,4	2,0
a	4,52	4,54	4,50	4,52	4,51
b	0,136	0,142	0,146	0,152	0,155

6.3.4. Studiu reologic pentru curgerea aluatului de paste din punct de vedere al condițiilor de extrudare

Proprietățile reologice ale celor mai multe materii alimentare sunt caracterizate de curgeri cu forfecare simplă. Proprietatea materialului, căreia i se acordă cea mai mare atenție în timpul proceselor de tip extrudare, este componenta tangențială (de forfecare) a vâscozității momentane. Operațiile de prelucrare a alimentelor, cum este extrudarea aluatului de paste făinoase, dezvoltă dominant curgeri fără forfecare (sau irotacionale), în care devine importantă componenta longitudinală (extensională) a vâscozității. Limitarea studiilor [17] se datorează faptului că în procese cum este extrudarea, materialul se modifică din stadiul de granule (pulbere) de făină cu apă, în aluat topit, extrem de sensibil la desfășurarea procesului de extrudare la care este supus.

La trecerea unui fluid vâscos de la un diametru mai mare la unul mai mic, are loc o cădere de presiune. Această cădere de presiune revine elasticității fluidului. Turbionarea generată în urma contracției unei topituri de polimer se datorează elasticității topituri.

Există câteva metode pentru estimarea componentei longitudinale a vâscozității [16, 17, 27]. Dintre acestea, analiza curgerii convergente oferă cea mai bună oportunitate pentru estimarea componentei longitudinale a vâscozității și în cele din urmă pentru procesul de extrudare. Tehnici ca filarea fibrelor sau injecție în contracurent sunt aplicabile la soluții puțin

vâscoase, dau nu la aluaturi alimentare înalt vâscoase, cum este cazul aluaturilor pentru extrudarea pastelor făinoase. Fluidele în contracurent conțin componente puternice supuse alungirii, datorită laminării convergente. Analiza curgerii convergente se poate aplica în cazul extrudării aluatului de paste făinoase, când acesta, la intrarea în matrița de extrudare, este supus la contractie. Astfel, din căderea presiunii de intrare și rata de curgere, se pot extrage informații relevante [13, 14, 23, 24, 25].

Studiile bibliografice [8, 13, 14] indică analize comparative privind aspectul longitudinal al curgerii plane pentru materiale plastice (polietilenă, topituri de polimeri) și aluat utilizate în industria de panificație, produse făinoase și paste făinoase (din făină de grâu, făină de porumb). Analizele indică practic pante identice pentru căderile presiunii de intrare în raport cu graficul ratei de curgere. Obiectivul analizelor efectuate a fost acela de a estima componenta longitudinală, respectiv tangențială a vâscozității aluatului utilizând metoda căderii presiunii de intrare. Pentru aceasta s-au analizat conținutul de umiditate, temperatura aluatului și tipul analizei vâscozității (Cogswell sau Gibson).

Pentru efectuarea analizelor s-a utilizat un extruder de tipul celui prezentat în *figura 6.12*, în care, pentru măsurarea presiunii, au fost introduși traductori de presiune.

Aluatul, asimilat unui fluid înalt vâscos, urmează o comportare tangențială după o lege

$$\tau = B \cdot \dot{\gamma}^m \quad (6.9)$$

respectiv o comportare longitudinală după o lege

$$\sigma = A \cdot \dot{\epsilon}^n \quad (6.10)$$

unde: A, B – constante asociate cu legea de putere a fluidului;
 $\dot{\gamma}$ – rata aparentă tangențială;
 $\dot{\epsilon}$ – rata aparentă longitudinală, dată de expresia:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\gamma} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2} \text{ (relația lui Cogswell),} \quad (6.11)$$

respectiv

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\gamma} \cdot \sin \alpha \cdot (1 + \cos \alpha)}{4} \text{ (relația lui Gibson)} \quad (6.12)$$

m, n – coeficienți ai comportării curgerii în curgerea transversală, respectiv longitudinală.

Căderea presiunii de intrare reprezintă suma căderilor de presiune al curgerii tangențiale și longitudinale:

$$\Delta P_{\text{int}} = P_{\text{t,int}} + P_{\text{l,int}} \quad (6.13)$$

Componenta tangențială a căderii presiunii de intrare are expresia lui Cogswell:

$$P_{\text{t,int}} = \frac{2B}{3m \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left(\frac{3m + 1}{4m} \right)^m \cdot \dot{\gamma}^m \cdot \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^{3m} \right] \quad (6.14)$$

respectiv expresia lui Gibson

$$P_{int} = \frac{2B \cdot \sin^{3m} \alpha \left(\frac{3m+1}{4m} \right)^m \cdot \dot{\gamma}^m \cdot \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^{3m} \right]}{3m \cdot \alpha^{3m+1}} \quad (6.15)$$

unde: α – semiunghiul de intrare în orificiul canalului de extrudare din matriță;

R_1 – raza matriței;

R_0 – raza orificiului de ieșire din matriță.

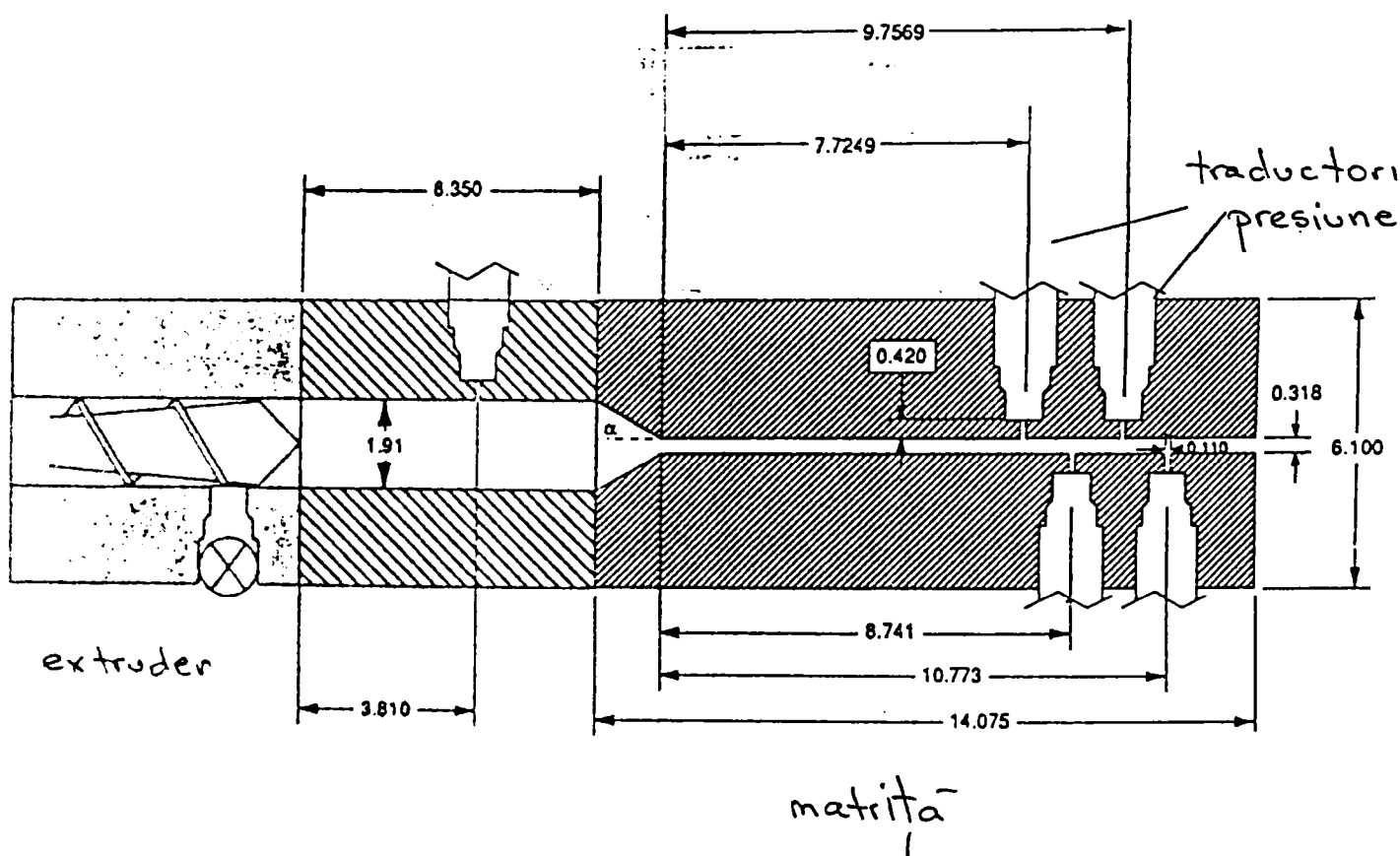


Figura 6.12 – Schema extruderului pentru studiul reologic al curgerii aluatului (mărimi exprimate în cm)

Componenta longitudinală a căderii presiunii de intrare are expresia lui Cogswell

$$P_{l,int} = \frac{2A}{3n} \left(\frac{\operatorname{tg}\alpha}{2} \right)^n \cdot \dot{\gamma}^n \cdot \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^{3n} \right] \quad (6.16)$$

respectiv expresia lui Gibson

$$P_{l,int} = A \cdot \dot{\gamma}^n \cdot \left\{ \frac{2}{3n} \cdot \left[\frac{\sin\alpha \cdot (1 + \cos\alpha)}{4} \right]^n \cdot \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^{3n} \right] + \frac{\phi(n,\alpha)}{4^n} \right\} \quad (6.17)$$

unde:

$$\phi(n,\alpha) = \int_0^\alpha \sin^{n+1}\beta (1 + \cos\beta)^{n-1} d\beta \quad (6.18)$$

Tensiunea de forfecare la perete se determină din gradientul de presiune $\frac{\partial P}{\partial Z}$ în matrită:

$$\tau_p = -\frac{\partial P}{\partial Z} \cdot \frac{R_1}{2} \quad (6.19)$$

Rata de forfecare aparentă se calculează din debitul Q (rata de curgere volumică):

$$\dot{\gamma}_{ap} = \frac{4Q}{\pi \cdot R_1^3} \quad (6.20)$$

Rezultă astfel vâscozitatea tangențială aparentă:

$$\eta_{ap} = \frac{p}{\dot{\gamma}_{ap}} \quad (6.21)$$

Deoarece vâscozitatea materiilor alimentare este o componentă importantă la determinarea curgerii acestora în timpul procesării, metoda căderii presiunii de intrare poate fi o metodă indicată pentru analiza curgerii.

În timpul extrudării aluatului, glutenul din făină este supus unor tensiuni ridicate, ceea ce cauzează gelatinizarea amidonului. În unele cazuri însă datorită conținutului de umiditate și temperaturii cilindrului de extrudare, fracțiunea amilazică se poate degrada [15]. Pe de altă parte, materialele polimerice, cum este de exemplu polietilena de joasă densitate, nu se degradează când este supusă proceselor ce dezvoltă tensiuni înalte, cum este extrudarea. Degradarea poate avea efect semnificativ asupra curbelor curgerii tangențiale pentru aluat în timpul procesului de extrudare [6]. Astfel, există o valoare critică pentru tensiunea de forfecare (tensiunea tangențială), de 10^5 Pa, peste care apare degradarea moleculară.

Analizând componentele tangențiale și longitudinale ale căderii presiunii de intrare pentru semiunghiul de intrare în canalul de extrudare prin matrită de $37,5^\circ$, pentru două conținuturi de umiditate a aluatului, de 30, respectiv 35, temperatura de extrudare de 180°C și viteza melcului de 160 rot/min (*figura 6.13*) [7], se poate observa că:

- valorile calculate prin relațiile lui Cogswell sunt ușor mai mici decât cele calculate cu relațiile lui Gibson;
- componenta tangențială a căderii de presiune are valori semnificativ mai mici decât cea longitudinală. Componenta tangențială fiind cea care acționează în sens distructiv asupra pereților canalului de

extrudare, rezultă că mărind componenta longitudinală a căderii presiunii de intrare, scade componenta transversală;

- de asemenea, creșterea unghiului de intrare în a aluatului în canalul de extrudare, are influență favorabilă, în sensul descreșterii componentei transversale a căderii presiunii de intrare.

Referitor la notațiile din figura 6.13, se fac următoarele precizări asupra semnificațiilor: simbolul P_s , respectiv P_e se referă la componenta tangențială, respectiv longitudinală a căderii presiunii de intrare, litera C, respectiv G se referă la valori rezultate prin relațiile lui Cogswell, respectiv Gibson, următoarele două cifre reprezintă conținutul de umiditate (30, respectiv 35), următoarele trei temperatura de extrudare (180°C) și ultimele trei viteza melcului de extrudare (160 rot/min). Ultima literă, C, din simbolizare, corespunde semiunghiului de intrare a aluatului în canalul de extrudare ($37,5^{\circ}$).

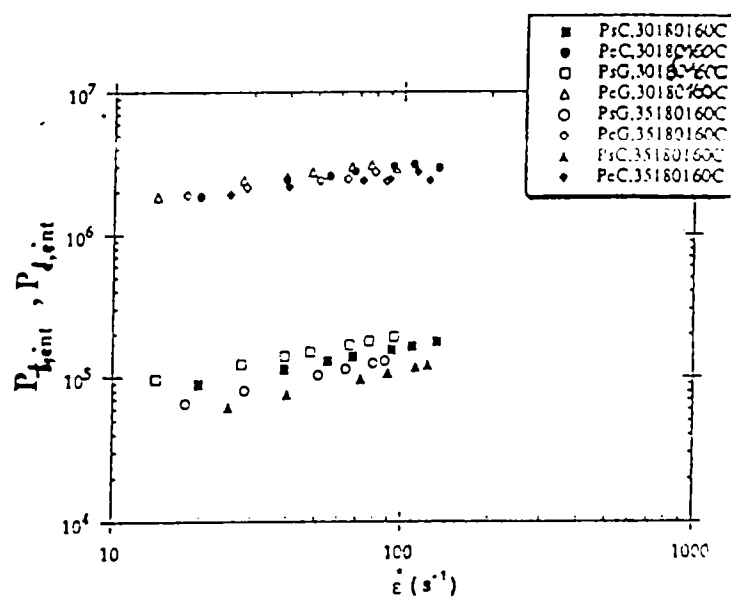


Figura 6.13 – Componentele tangențiale și longitudinale ale căderii presiunii de intrare funcție de rata de forfecare

6.4. Concluzii

Obținerea unui aluat pentru paste făinoase corespunzător din punct de vedere al proprietăților, pentru a putea fi extrudat prin matriță, depinde de calitatea făinii, conținutul de apă, temperatură.

Din punctul de vedere al curgerii, aluatul pentru paste făinoase, în timpul extrudării prin presa cu melc, suferă o comportare foarte diferită, trecând de la faza de pulbere (amestec granular de făină cu apă) la cea de fluid înalt vâscos. La intrarea în matrița de extrudare, fluxul de curgere a aluatului suferă o micșorare a diametrului de curgere și astfel o cădere a presiunii la intrarea în matriță.

Analizând influența căderii presiunii de intrare asupra vâscozității aluatului și mai departe influența curgerii aluatului asupra pereților interiori ai canalului din matrița de extrudare, se ridică problema componentei tangențiale a presiunii de intrare.

CAPITOLUL 7

CERCETĂRI EXPERIMENTALE

7.1. Generalități

În aproape toate domeniile de activitate sunt realizate experimente de către cercetători în vederea evidențierii anumitor aspecte referitoare la un proces sau sistem. Un experiment poate fi definit ca un test sau o serie de teste în care s-au operat mai multe modificări ale parametrilor de intrare astfel încât să poată fi observate și identificate motivele pentru care aceste schimbări ar putea fi observate la parametrii ce rezultă din acest proces.

În domeniul ingineriei experimentale joacă un rol important în proiectarea noilor produse, dezvoltarea proceselor de prelucrare, precum și în optimizarea diferitelor procese tehnologice. În orice experiment rezultatele și concluziile care pot fi trase depind în mare măsură de modul în care au fost colectate datele. Un sistem poate fi reprezentat conform schemei din *figura 7.1*.

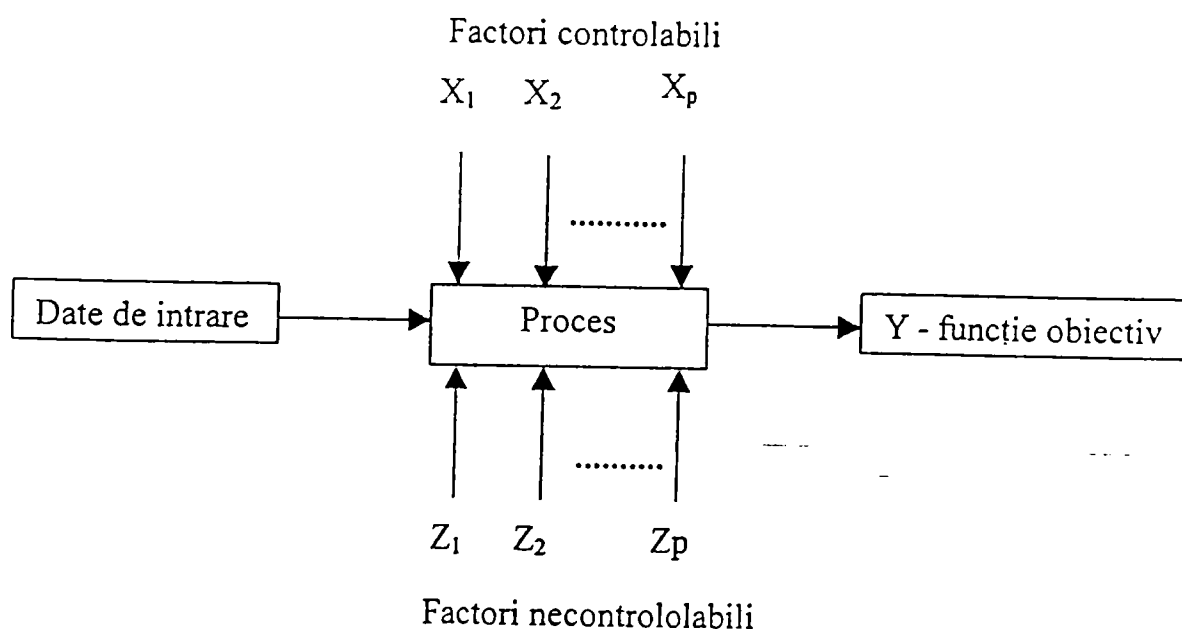


Figura 7.1 – Modelul general al unui sistem

Un astfel de sistem poate fi văzut ca o combinație de mașini, procedee, oameni și alte resurse care transformă anumite date de intrare într-o ieșire care are unul sau mai multe răspunsuri vizibile. Unele dintre variabilele procesului sunt controlabili (X_1, X_2, \dots, X_p), iar altele nu sunt controlabile (Z_1, Z_2, \dots, Z_p).

Obiectivele unui experiment includ următoarele aspecte:

- determinarea acelor variabile care au cea mai mare influență asupra funcției răspuns (obiectiv);
- determinarea nivelelor de variație a variabilelor X astfel încât funcția obiectiv Y să fie aproape de valoarea dorită;
- determinarea nivelelor de variație pentru variabilele cunoscute X astfel încât variația funcției obiectiv Y, să fie cât mai mică;
- determinarea nivelelor de variație a variabilelor cunoscute X astfel încât efectul variabilelor necontrolabile Z, să fie minim.

7.2. Strategii de experimentare

Scopul activității de cercetare îl constituie stabilirea dependenței funcționale care există între factorii de influență X_1, X_2, \dots, X_p și funcția obiectiv Y:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_p) \quad (7.1)$$

Cu alte cuvinte se realizează modelarea matematică a acțiunii factorilor X_1, X_2, \dots, X_p asupra funcției obiectiv Y. Dintre obiectivele urmărite în urma modelării unui proces se remarcă:

- analiza sistemului sau procesului cu ajutorul modelului creat;

- modul cum acționează factorii de influență asupra procesului sau sistemului studiat;
- optimizarea procesului în raport cu factorii de influență luați în considerare.

Principalele cerințe pe care trebuie să le îndeplinească un model matematic se referă la concordanța ce trebuie să existe între valorile estimate cu ajutorul modelului matematic, respectiv ale funcției obiectiv și valorile reale ale funcției obiectiv, precum și acuratețea informațiilor obținute în vederea optimizării procesului respectiv. Pentru realizarea unui model matematic se poate folosi o schemă ca cea din *figura 7.2* [11].

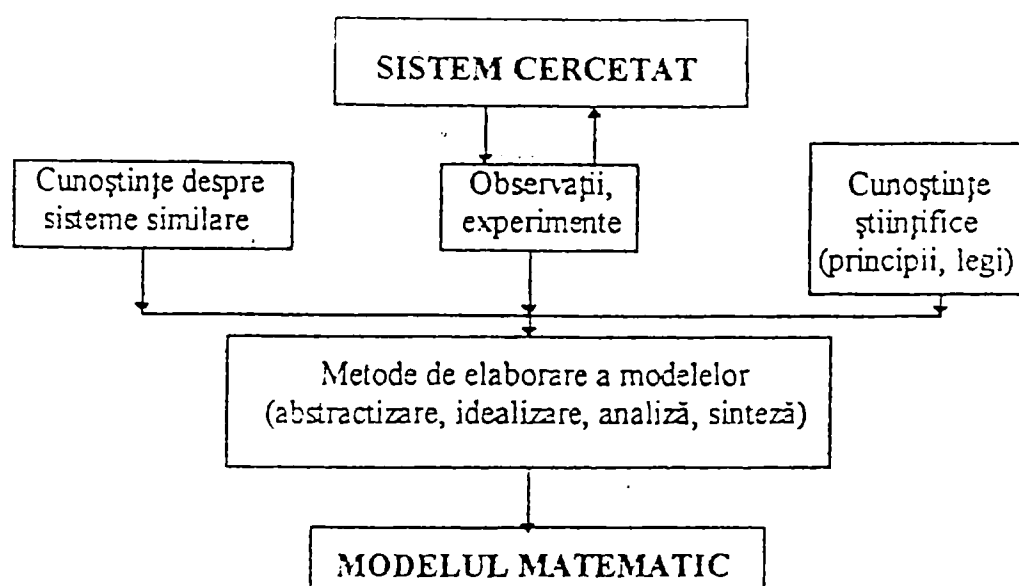


Figura 7.2 – Modul de concepere al unui model matematic

Din figura 7.2 se poate observa că în vederea realizării modelului matematic trebuie să se țină cont de datele existente despre sisteme asemănătoare sau similare, cunoștințe științifice cu caracter general, experimente proprii. În urma unei analize de sinteză a acestor date se poate trece la realizarea modelului matematic. Mai mulți autori [11, 44] consideră că în vederea atingerii modelului matematic final trebuie parcurse o serie de

cicluri complete de investigație, organizate iterativ și plasate pe o spirală convergentă către obiectivele cercetării, conform schemei din *figura 7.3*.

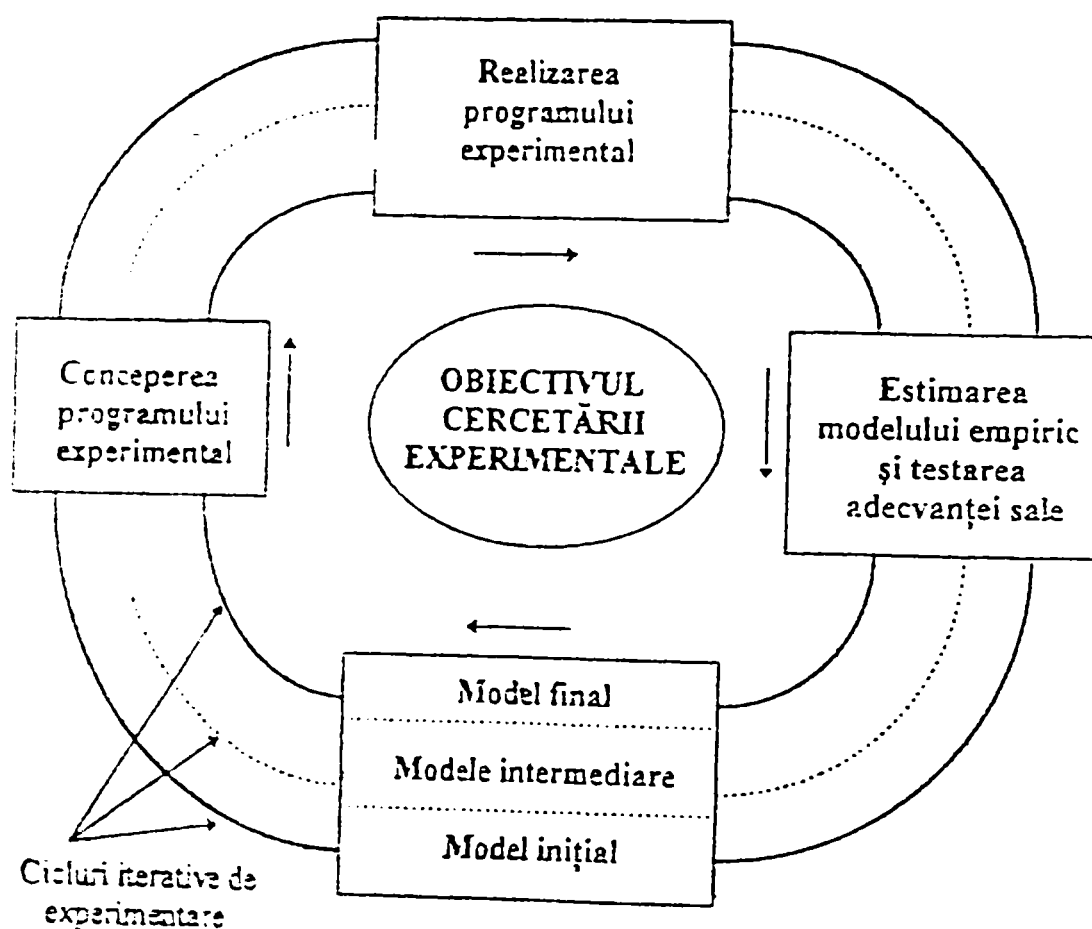


Figura 7.3 – Reprezentarea modului de realizare a unui model matematic

Se poate observa că pentru realizarea modelului matematic final se parcurg o serie de cicluri iterative, fiecare dintre ele compuse la rândul lor din câteva etape:

- conceperea programului experimental;
- realizarea programului experimental;
- estimarea modelului empiric și testarea adecvantei sale;
- realizarea modelului matematic.

Pentru realizarea modelului matematic trebuie adoptată o strategie de experimentare sau de concepere a programului experimental. Există o

multitudine de strategii de experimentare și trebuie găsită acea strategie optimă care să permită obținerea de cât mai multe informații sau sistemul studiat realizând un număr cât mai mic de teste, fără a afecta însă precizia de estimare a modelului matematic.

Una din strategiile de experimentare bazată pe principiul „un singur factor de studiat la un moment dat” (strategia Gauss – Seidel) presupune stabilirea unui punct de plecare și variația unuia dintre factorii de influență pe mai multe nivele de variație, ceilalți factori de influență fiind păstrați constanți la nivelul punctului de plecare. Astfel se urmărește numai influența variației aceluia factor asupra funcției obiectiv. Acest tip de strategie este strategia unifactorială. Principalul dezavantaj al acestei strategii de experimentare îl constituie faptul că exclude orice fel de interacțiune între factorul de influență care variază și ceilalți factori de influență. Un alt dezavantaj este legat de faptul că pentru a vedea efectul variației tuturor factorilor de influență asupra funcției obiectiv trebuie să se varieze fiecare factor de influență pe același număr de nivele de variație, ceea ce conduce la un volum mare de experimente care implică la rândul lor un volum mare de timp și cheltuieli ridicate.

O altă strategie de experimentare a fost pusă la punct de Box și Wilson [44] și care este caracterizată de variația tuturor factorilor de influență în fiecare moment. Această strategie de experimentare este strategia multifactorială deoarece implică un experiment factorial care presupune variația tuturor factorilor de influență pe fiecare nivel de variație a factorilor de influență în fiecare moment. Această strategie de experimentare este strategia multifactorială deoarece implică un experiment factorial care presupune variația tuturor factorilor de influență pe fiecare nivel de variație. Astfel influența fiecărui factor asupra valorilor funcției obiectiv este

determinată de toate încercările efectuate, micșorându-se astfel volumul de experimente.

O strategie de experimentare importantă și care este utilizată în special când se urmărește optimizarea unui proces este strategia care implică conceptul de suprafață de răspuns. Metodologia bazată pe utilizarea conceptului de suprafață de răspuns conține o serie de tehnici matematice și statistice care sunt folosite atunci când se urmărește analiza statistică și modelarea matematică a unei funcții obiectiv care este influențată de mai multe variabile independente și optimizarea procesului respectiv. În majoritatea problemelor ce privesc conceptul de suprafață de răspuns, forma relației dintre funcția obiectiv și variabilele independente nu este cunoscută. Prin urmare, primul pas îl constituie găsirea unui model matematic regresional care să aproximeze cât mai bine legătura dintre funcția obiectiv și variabilele independente. De cele mai multe ori un polinom de grad mic este folosit în acest scop. Dacă răspunsul este bine modelat de o funcție liniară atunci modelul utilizat va fi un polinom de ordinul I. Dacă există o zonă de curbură în sistem atunci trebuie utilizat ca model matematic un polinom de ordin superior, cum ar fi de exemplu un polinom de ordinul II. Aproape toate problemele ce implică conceptul de suprafață de răspuns utilizează unul sau ambele tipuri de polinoame (gradul I sau II) ca modele matematice. Este puțin probabil ca un model matematic polinomial să reprezinte o aproximare rezonabilă a relației funcționale dintre variabilele independente și funcția obiectiv, pe întreg domeniul variabilelor independente, dar într-o regiune relativ restrânsă aceste modele sunt adecvate. Metoda suprafeței de răspuns este o metodă secvențială. De multe ori analiza se efectuează într-un punct al suprafeței care este departe de optim utilizând condițiile curente de experimentare (*figura 7.4*) [5].

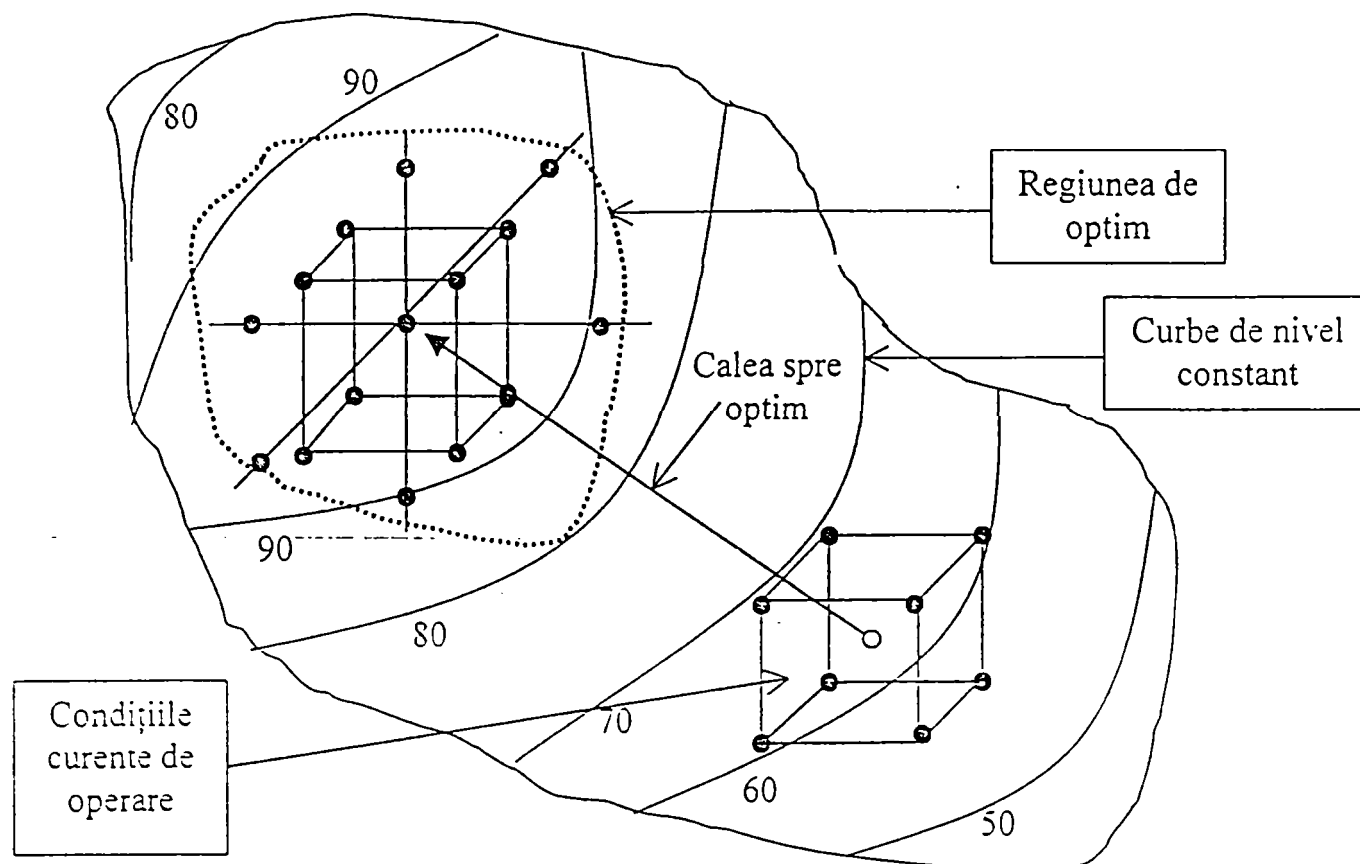


Figura 7.4 – Natura secvențială a metodei suprafeței de răspuns

Scopul utilizării acestei metode este acela de a îl conduce pe experimentator de-a lungul căii spre optim până la regiunea în care se găsește optimul. Odată găsită regiunea de optim poate fi utilizat un model matematic mai elaborat cum ar fi de exemplu un polinom de gradul al doilea. În zona în care curbura suprafeței de răspuns este prea accentuată pentru ca un model matematic de forma unui polinom de gradul I să dea rezultate din punct de vedere al preciziei estimării, se utilizează ca modele matematice polinoame de gradul II până la identificarea cu precizie a optimului. Aceste modele de ordin superior pot fi explicitate fie prin dirijarea factorilor de influență pe trei nivele (ceea ce înșă mărește volumul experimentului), fie prin utilizarea unui experiment central compus.

În mod obișnuit, studiul suprafeței de răspuns se face prin secționarea acesteia cu plane paralele cu planul factorilor de influență. Curbele rezultate

din intersecția suprafeței de răspuns cu aceste plane paralele sunt curbe de nivel constant

7.3. Metode de analiză statistică

Cele mai utilizate metode de analiză statistică clasică a datelor experimentale sunt analiza dispersională și analiza regresională.

Analiza dispersională (analiza variației) este o metodă statistică de analizare a datelor de măsurare care sunt de fapt valori obținute experimental ale unor funcții obiectiv ce depind de unul sau mai mulți factori de influență cu acțiune simultană. Scopul analizei dispersionale este de a stabili semnificația factorilor de influență asupra funcției obiectiv ce face obiectul analizei. În sistemele fizice legătura dintre funcția obiectiv Y și factorii de influență se poate scrie:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k, z_1, z_2, \dots, z_m, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_d) \quad (7.2)$$

unde: x_1, x_2, \dots, x_k – factori de influență controlabili;

z_1, z_2, \dots, z_k – factori de influență necontrolabili, aleatori, care generează erorile aleatoare;

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_d$ – parametri statistici, de regulă necunoscuți, numiți coeficienți de influență.

Dacă numărul factorilor de influență este $k > 1$, analiza este multiplă, iar dacă numărul de funcții obiectiv analizate Y_q este $q > 1$, analiza este multidimensională.

Dacă toți factorii de influență x_1, x_2, \dots, x_k prezintă nivele discrete numerice sau nu, analiza devine calitativă - analiza dispersională.

Dacă toți factorii de influență x_1, x_2, \dots, x_k sunt variabile continue, atunci analiza devine cantitativă – analiza regresională. Obiectivul principal al analizei regresionale este elaborarea modelului matematic, regresional al obiectului cercetării, care să descrie comportarea sistemului respectiv în domeniul dat al experimentării, studiul mecanismelor de inițiere și acțiune a funcționalității sistemului cercetat, analiza caracterului și gradului de influență a diferiților factori cu ajutorul modelului obținut, definirea valorilor optime ale factorilor de influență în raport cu funcția obiectiv Y sau alte funcții de optimizare ale obiectului cercetării și conducerea optimală a acestuia.

Dacă unii factori de influență prezintă nivele discrete, iar alții sunt mărimi continue, analiza este a covarianței.

Există deci trei categorii de modele în funcție de tipul de analiză realizat: modele dispersionale, regresionale sau de covarianță.

În cazul cercetării unui fenomen sau proces una din problemele cele mai frecvent întâlnite este aceea de a explicita pe baza rezultatelor experimentale, dependența funcțională (regresională) dintre funcția obiectiv și factorii de influență. Una din metodele aplicate în mod curent în prelucrarea rezultatelor măsurătorilor prin analiză regresională este metoda celor mai mici pătrate. Această metodă permite stabilirea coeficienților de regresie pentru o formă impusă a relației funcționale dintre variabilele independente și funcția obiectiv.

În cazul în care suprafața de răspuns prezintă o zonă de curbura se recurge la modelarea cu polinoame de ordin superior, de preferință de ordin II. Modelarea cu ajutorul experimentelor factoriale are ca o primă etapă precizarea funcției obiectiv și identificarea factorilor de influență. Etapa imediat următoare alegerii funcției obiectiv și identificării factorilor de influență

o constituie stabilirea domeniului experimentării. Practic stabilirea domeniului de expernentare presupune două faze:

- stabilirea punctului central al experimentului;
- stabilirea intervalelor de variație ale factorilor de influență.

Din considerente practice nivelul superior al unui factor de influență faze:

- stabilirea punctului central al experimentului;
- stabilirea intervalelor de variație ale factorilor de influență.

Din considerente practice nivelul superior al unui factor de influență se codifică „+1”, iar nivelul inferior cu „-1”. Coordonatele punctului central al experimentării vor avea valoarea „0”. În continuare se trece planificarea experimentelor prin precizarea formei matricei program.

Matricea program a unui experiment factorial la care nivelele factorilor de influență sunt notate cu valori codificate „+1” și „-1”, iar valorile funcției obiectiv sunt determinate experimental se prezintă în *tabelul 7.1*.

Tabelul 7.1 – Matricea program a unui experiment factorial

Număr încercări	Valori codificate ale factorilor de influență						Valorile funcției obiectiv y
	x ₁	x ₂	...	x _i	...	x _k	
1	-1	-1	...	-1	...	-1	y ₁
2	+1	-1	...	-1	...	-1	y ₂
...
i	-1	+1	...	-1	...	-1	y _i
...
N	+1	+1	...	+1	...	+1	y _N

Volumul programelor factoriale central – compuse se calculează cu relația:

$$N = N_L + N_a + N_0 \quad (7.3)$$

unde: N_L – numărul de măsurători provenit de la modelarea liniară;
 N_α – numărul de măsurări suplimentare, efectuate „în stea”, la distanța α față de centrul programului experimental;
 N_0 – numărul de măsurări suplimentare, efectuate în centrul programului experimental.

Dacă ecuația modelului experimental este o ecuație polinomială de gradul II care este cea mai des utilizată, are forma:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 \quad (7.4)$$

în care: y – funcția obiectiv;
 x_j – factorii de influență;
 b_0, b_j, b_{ij}, b_{jj} – coeficienții de regresie.

Matricile program ale experimentelor rotabile nu îndeplinesc în general condiția de ortogonalitate, motiv pentru care calculul coeficienților de regresie și al dispersiilor corespunzătoare acestora, se face cu relații mai complexe:

- pentru termenul liber b_0 :

$$b_0 = \frac{A}{N} \left[2\lambda^2 (k + 2) \sum_{i=1}^N y_i - 2\lambda C \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_i \right] \quad (7.5)$$

- pentru coeficienții b_j :

$$b_j = \frac{C}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} y_i \quad (7.6)$$

- pentru coeficienții b_{ij} :

$$b_{ij} = \frac{C^2}{N\lambda} \sum_{i=1}^N x_{ij} x_{ii} y_i \quad (7.7)$$

- pentru coeficienții b_{jj} :

$$b_{jj} = \frac{A}{N} \left\{ C^2 [(k+2)\lambda - k] \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_i + C^2 (1-\lambda) \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_i - 2\lambda C \sum_{i=1}^N y_i \right\} \quad (7.8)$$

unde:

$$\lambda = \frac{kN}{(k+2)(N-N_0)} \quad (7.9)$$

k – numărul factorilor de influență;

N – dat de relația (7.3);

N_0 – numărul de măsurători suplimentare efectuate în centrul experimentului;

$$A = \frac{1}{2\lambda[(k+2)\lambda - k]} \quad (7.10)$$

$$C = \frac{N}{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2} \quad (7.11)$$

Coeficienții modelului regresional exprimă influența factorilor de influență x_j asupra funcției obiectiv y . Valoarea fiecărui coeficient arată amplitudinea influenței factorului pe care acesta îl înmulțește. Semnul coeficientului de regresie indică sensul influenței factorului asupra funcției obiectiv.

Conceptul care stă la baza aplicării majorității testelor statistice constă în compararea dispersiei rezultatelor datorată erorilor aleatoare (dispersie de reproductibilitate) cu dispersia rezultatelor datorate unor cauze sistemice. Estimarea dispersiei reproductibilității este o etapă obligatorie în analiza modelului regresional. De obicei, estimarea dispersiei reproductibilității s_0^2 , se face cu ajutorul mai multor măsurări replicate în centrul domeniului experimental:

$$s_0^2 = \frac{\sum_{v=1}^c (y_{ov} - \bar{y}_0)^2}{c - 1} \quad (7.12)$$

unde: c – numărul de replici $y = 1, \dots, c$, executate în punctul central pentru calculul dispersiei reproductibilității;

y_{ov} – valorile măsurate y_{01}, \dots, y_{0c} ale funcției obiectiv în centrul domeniului experimental;

\bar{y}_0 – media valorilor y_{ov} măsurate ale funcției obiectiv în centrul domeniului experimental.

Cu ajutorul dispersiei reproductibilității se pot calcula dispersiile de estimare pentru coeficienții de regresie.

Relațiile următoare (7.13, 7.14, 7.15, 7.16) reprezintă dispersiile corespunzătoare coeficienților de regresie:

$$s_{b_0}^2 = \frac{2A\lambda^2(k+2)}{N} s_0^2 \quad (7.13)$$

$$s_{b_1}^2 = \frac{C}{N} s_0^2 \quad (7.14)$$

$$s_{b_2}^2 = \frac{C^2}{\lambda N} s_0^2 \quad (7.15)$$

$$s_{b_3}^2 = \frac{AC^2[(k+1)\lambda - (k-1)]}{N} s_0^2 \quad (7.16)$$

unde A și C sunt date de relațiile (7.10) și (7.11).

Următoarele etape ce contribuie la analiza modelului matematic sunt:

- verificarea semnificației statistice a coeficienților polinomului de regresie cu ajutorul criteriului Student;
- estimarea valorilor funcției obiectiv și verificarea adecvantei modelului cu ajutorul testului Fisher a dispersiei de concordanță cu dispersia reproductibilității.

Dacă unul din coeficienții pătratici, b_{ij} , este nesemnificativ, după excluderea acestuia din model este necesară recalcularea coeficienților ecuației de regresie, datorită interdependenței existente între termenii pătratici, apărute ca urmare a neortogonalității coloanelor corespunzătoare factorilor x^2 , din matricea program.

Dat fiind modul de structurare al matricii program a experimentului, calculul dispersiilor care se compară cu ajutorul criteriului Fisher prezintă unele particularități:

- dispersia reproductibilității, s_0^2 , se poate estima cu ajutorul determinărilor N_0 efectuate în punctul central al programului experimental (număr de grade de libertate $v_2 = N_0 - 1$);

- calculul dispersiei de concordanță s_{conc}^2 presupune:

a) calculul sumei pătratelor diferențelor dintre valorile estimate și cele măsurate, SS_N pentru toate cele N punct ale experimentului;

b) determinarea sumei de pătrate corespunzătoare dispersiei de concordanță, SS_{conc} :

$$SS_{\text{conc}} = SS_N - SS_0 \quad (7.17)$$

unde SS_0 reprezintă suma pătratelor diferențelor între valorile măsurate în cele N_0 determinări efectuate în punctul central și media aritmetică \bar{y}_0 a acestor valori;

c) numărul gradelor de libertate corespunzător dispersiei de concordanță:

$$v_1 = N - k - (N_0 - 1) \quad (7.18)$$

unde k reprezintă numărul termenilor rezultați, semnificativi ai polinomului de regresie;

d) stabilirea valorii dispersiei de concordanță:

$$S_{\text{conc}}^2 = \frac{SS_{\text{conc}}}{v_1} \quad (7.19)$$

Verificarea adecvantei modelului se face prin compararea cu ajutorul testului Fisher, F , a dispersiei de concordanță cu dispersia de reproductibilitate:

$$F_{\text{calc}} = \frac{S_{\text{conc}}^2}{S_0^2} \quad (7.20)$$

Dacă $F_{\text{calc}} < F_{\text{tab}}$, în care $F_{\text{tab}} = F_{\alpha, v_1, v_2}$ atunci cu siguranța dată de probabilitatea $P = 1 - \alpha$ concordanța dintre valorile estimate și cele măsurate este mulțumitoare și se consideră că modelul găsit descrie în mod adecvat procesul sau fenomenul studiat.

α reprezintă pragul de semnificație, iar $P = 1 - \alpha$ nivelul de încredere.

În expresia lui F_{tab} , v_1 și v_2 reprezintă:

- v_1 – numărul de grade de libertate cu care se calculează S_{conc}^2 :

$$v_1 = N - k \quad (7.21)$$

- v_2 – numărul de grade de libertate cu care se calculează s_0^2 :

$$v_2 = C - 1 \quad (7.22)$$

7.4. Rezultatele cercetărilor experimentale

7.4.1. Standul experimental

Standul experimental al instalației de producere a pastelor făinoase prin extrudare (*figura 7.5*) are schema de principiu prezentată în *figura 7.6*. Se deosebesc următoarele componente principale:

- cuva de alimentare cu materii prime (făină și apă) (1), în care cu ajutorul unui ax cu palete se permite și amestecarea (malaxarea) materiilor prime cu scopul obținerii aluatului pentru paste făinoase;
- incinta de extrudare a aluatului (2) în care aluatul pentru paste făinoase este supus presiunii exercitate de melcul de presare și astfel împins către capătul melcului, unde este obligat, datorită presiunii, să treacă prin orificiile matriței de extrudare;
- matrița de extrudare (3), care conferă forma finală pastelor făinoase și care este prevăzută cu un circuit exterior de răcire pentru menținerea valorilor temperaturii în limitele prevăzute de parametrii tehnologici ai utilajului.

În *figura 7.5*, vederea (a) reprezintă vederea principală a instalației experimentale, iar (b) – vedere de sus, cu cuva pentru aluat deschisă.

Elementul esențial în construcția acestui stand îl reprezintă matrița de extrudare (*figura 7.7*), a cărei construcție va fi prezentată în continuare.

Schema matriței este prezentată în *figura 7.8*. Scopul modelării propuse a fost de a identifica, pe baza studiilor bibliografice și a unor experimente preliminare, funcțiile obiectiv (de răspuns) și factorii de influență asupra acestora, care să caracterizeze comportarea la extrudare a matriței din punct de vedere al gradului de uzură și al abaterilor de la dimensiune, precum și de a identifica optimul din punct de vedere al materialelor și tehnologiilor utilizate

pentru fabricarea matrițelor de extrudat paste făinoase. Pentru aceasta s-a realizat o matriță experimentală, de dimensiuni de gabarit corespunzătoare locașului din dispozitivul de prindere din utilajul de extrudat, care are configurate în ea trei grupuri de orificii, dispuse conform desenului din figura 7.8. Matrița a fost strunjită dintr-un semifabricat bară de bronz, la dimensiunile impuse, în laboratoarele SPM ale catedrei de Tehnologie Mecanică de la Facultatea de Mecanică, Universitatea „Politehnica” din Timișoara.

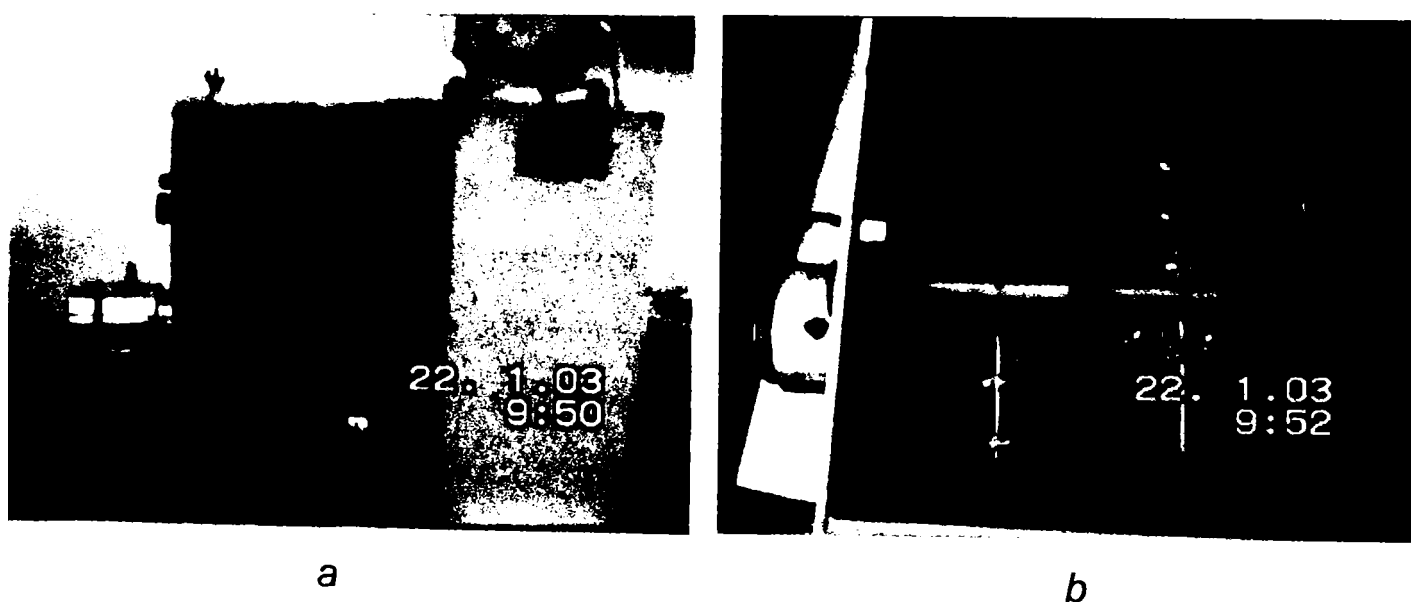


Figura 7.5 – Instalația experimentală de extrudare a pastelor făinoase

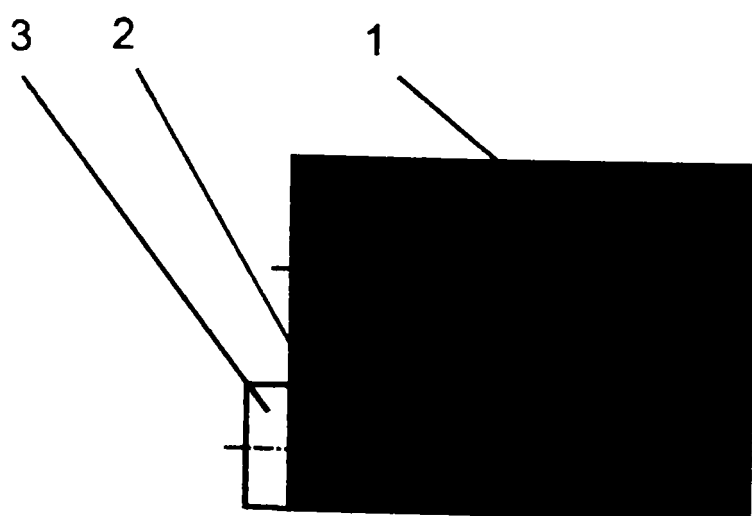


Figura 7.6 – Schema de principiu a instalației de extrudare a pastelor făinoase

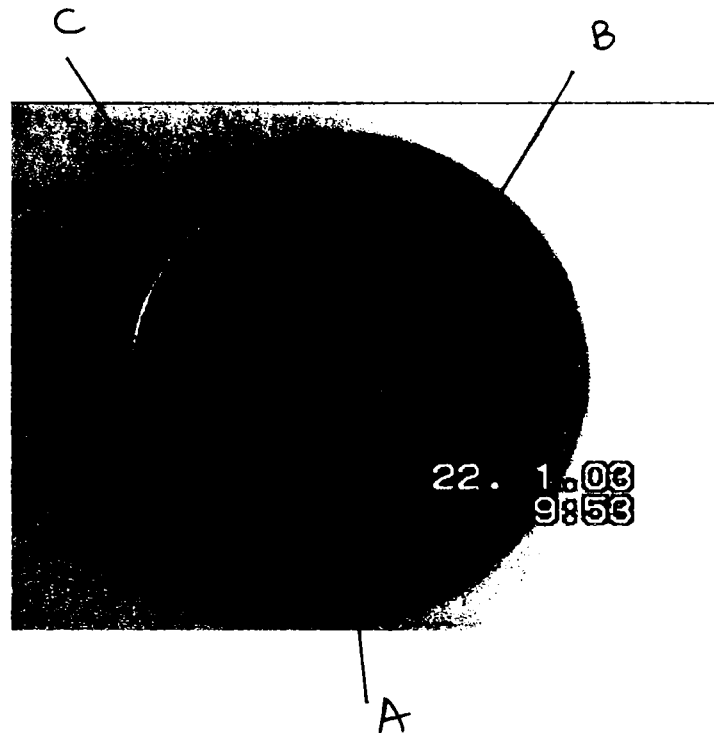


Figura 7.7 – Matrița pentru extrudarea pastelor făinoase

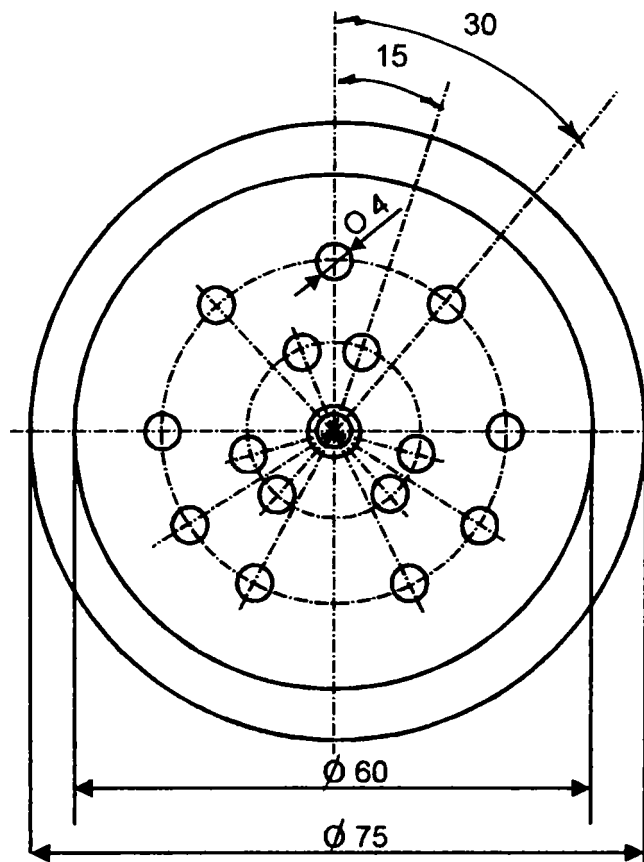


Figura 7.8 – Schema matriței de extrudat paste făinoase

Cele trei grupe de orificii au următoarele destinații:

- orificii practicate direct în bronz (A);
orificii în care au fost introduse pastile din politetrafluoretilenă (B);
orificii în care au fost introduse pastile din safir artificial (C).

Pentru matrița prezentată în figura 7.7, respectiv schema din figura 7.8, introdusă în instalația de extrudare a pastelor făinoase, se fac următoarele precizări:

Pastilele din politetrafluoretilenă au fost obținute prin strunjire exterioară din bară de politetrafluoretilenă, urmată de găurire, pentru configurarea orificiilor interioare.

Pastilele din safir artificial au fost obținute direct prin creștere la dimensiunile dorite (diametru exterior și interior) pe o instalație Saphirom, prezentată la capitolul 5.3.5., instalație aflată în dotarea Universității de Vest din Timișoara,

Într-o primă categorie de experimentări, prin instalația de extrudare s-a extrudat în total o jumătate de tonă de materie primă făină (conform rețetei de fabricație, în raport 4 : 1, făină : apă, efectuându-se măsurători ale diametrelor orificiilor interioare, după două direcții perpendiculare, pe microscopul optic din dotarea laboratoarelor catedrei de Tehnologie mecanică. Microscopul utilizat a avut domeniul de măsurare al sănii longitudinale și respectiv transversale de 25 mm și valoarea diviziunii pe tamburul mobil de 0,01 mm. Masa rotitoare s-a putut roti cu 360° în plan orizontal. Citirea la rotirea mesei s-a efectuat cu vernierul circular cu o precizie de 3'. Prin privirea în ocular s-a putut observa imaginea reală și mărită a conturului canalului de extrudare care s-a măsurat. Elementul de măsurat (conturul canalului de extrudare) a fost încadrat în două cercuri de referință fictive, la care s-au raportat două citiri, diferența dintre aceste două citiri reprezentând valoarea diametrului măsurat: s-a dus un fir reticular

tangent în stânga (pentru D_1), apoi în dreapta (pentru D_2) și s-a acționat tamburul micrometric lateral (pentru citirea diametrului pe direcția D_x); analog s-a efectuat citirea diametrului pe o direcție perpendiculară, D_y , acționând tamburul micrometric transversal după trasarea firelor reticulare tangente la partea inferioară (pentru D_1'), respectiv superioară (pentru D_2') (figura 7.9).

Cele două diametre perpendiculare, D_x și D_y , rezultă prin diferențele mărimilor citite, D_2 și D_1 ($D_x = D_2 - D_1$), respectiv D_1' și D_2' ($D_y = D_1' - D_2'$).

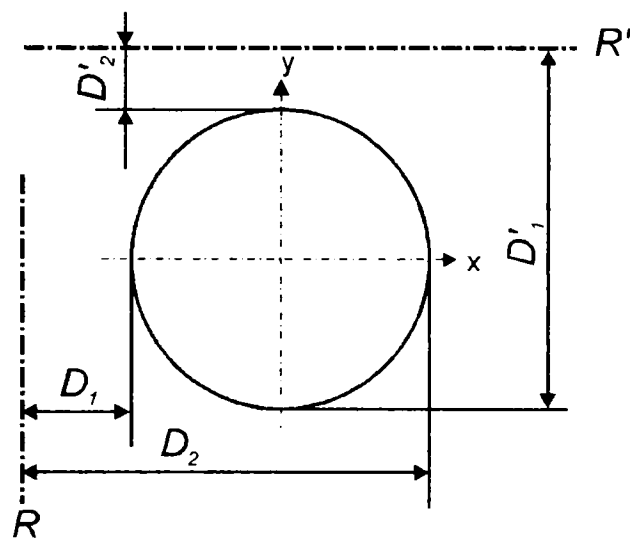


Figura 7.9 – Schema de măsurare la microscopul optic

Măsurătorile diametrelor interioare au fost realizate cu scopul evidențierii abaterilor de dimensiune, după două direcții perpendiculare, x și y, și anume în trei momente distincte ale experimentului: înaintea efectuării experimentului (tabelul 7.2), după extrudarea unei jumătăți din cantitatea de materie primă (tabelul 7.3), și la sfârșitul experimentului (tabelul 7.4). Numerotarea orificiilor în fiecare grup este cea indicată în figura 7.10. De asemenea, în figura 7.11 sunt prezentate fotografiile orificiilor efectuate la și sfârșitul experimentului, cu scopul evidențierii abaterilor de formă (a – orificii în bronz; b – orificii în teflon; c – orificii în safir artificial, d – scara de măsurare de 1 mm).

Tabelul 7.2 – Citirile diametrelor interioare (C_1 , C_2), la microscopul optic, înaintea experimentului (toate măsurile date în [mm])

Ordine orificii		Orificiul 1		Orificiul 2		Orificiul 3		Orificiul 4		Orificiul 5	
Dir măsur		D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y
Tip material											
Bronz	C_1	10,58	12,90	10,53	14,04	10,54	13,91	12,54	11,83	10,45	10,65
	C_2	8,58	10,90	8,53	12,04	8,54	11,91	8,54	9,83	8,45	9,65
	D	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Teflon	C_1	10,66	9,60	10,68	8,53	10,50	8,11	10,44	6,23	10,57	5,46
	C_2	8,66	7,60	8,68	6,53	8,50	6,11	8,44	4,23	8,57	3,46
	D	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Safir	C_1	10,79	4,59	10,71	6,05	10,67	6,45	9,60	6,40	9,40	10,61
	C_2	8,79	2,59	8,71	4,05	8,67	4,45	7,60	4,40	7,40	8,61
	D	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

 Tabelul 7.3 – Citirile diametrelor interioare (C_1 , C_2), la microscopul optic, la jumătatea experimentului (toate măsurile date în [mm])

Ordine orificii		Orificiul 1		Orificiul 2		Orificiul 3		Orificiul 4		Orificiul 5	
Dir măsur		D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y
Tip material											
Bronz	C_1	3,53	5,05	4,59	4,15	5,54	5,28	6,18	7,36	4,15	7,41
	C_2	1,48	2,98	2,54	2,11	3,47	3,23	4,19	5,26	2,05	5,30
	D	2,05	2,07	2,05	2,04	2,07	2,05	2,09	2,10	2,10	2,11
Teflon	C_1	5,14	7,36	3,89	7,33	5,30	6,45	2,89	8,97	4,35	6,56
	C_2	3,11	5,31	1,85	5,37	3,27	4,43	0,84	6,92	2,29	4,51
	D	2,03	2,05	2,04	2,03	2,03	2,02	2,05	2,05	2,06	2,05
Safir	C_1	10,69	9,88	9,78	10,48	9,53	10,51	8,60	10,45	7,71	10,61
	C_2	8,69	7,88	7,78	8,48	7,53	8,51	6,60	8,45	5,71	8,61
	D	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

 Tabelul 7.4 – Citirile diametrelor interioare (C_1 , C_2), la microscopul optic, la sfârșitul experimentului (toate măsurile date în [mm])

Ordine orificii		Orificiul 1		Orificiul 2		Orificiul 3		Orificiul 4		Orificiul 5	
Dir măsur		D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y	D_x	D_y
Tip material											
Bronz	C_1	6,79	10,58	7,27	9,56	7,50	9,41	7,71	8,40	7,81	8,78
	C_2	4,65	8,44	5,12	7,42	5,33	7,26	5,50	6,21	5,63	6,60
	D	2,14	2,14	2,15	2,14	2,17	2,15	2,21	2,19	2,18	2,18
Teflon	C_1	8,48	8,51	8,22	8,07	8,28	7,23	8,38	5,98	8,74	6,29
	C_2	6,40	6,43	6,12	5,41	6,20	5,15	6,25	3,86	6,64	4,18
	D	2,08	2,08	2,10	2,10	2,08	2,08	2,13	2,12	2,10	2,11
Safir	C_1	8,90	9,20	8,12	7,41	8,62	9,38	8,67	9,40	8,64	9,60
	C_2	6,90	7,20	6,12	5,41	6,62	7,38	6,67	7,40	6,64	7,60
	D	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

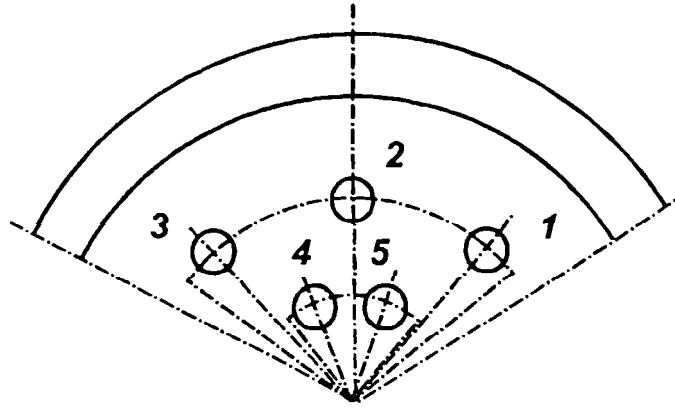
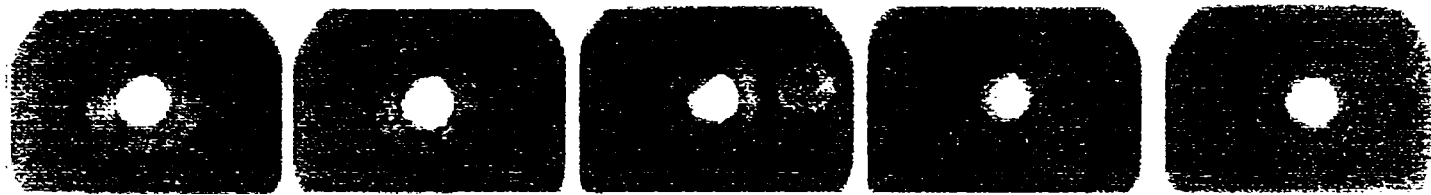
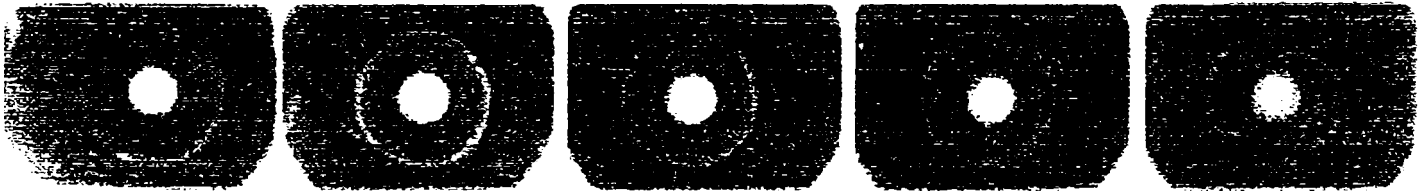


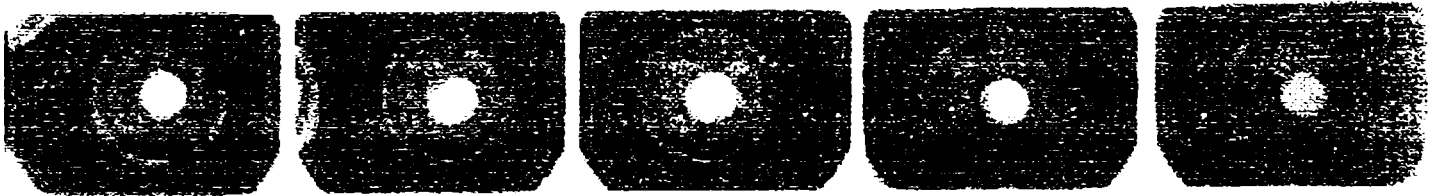
Figura 7.11



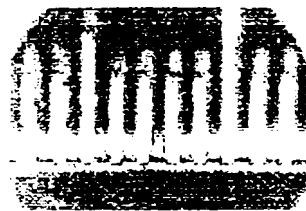
a: 1 2 3 4 5



b: 1 2 3 4 5



c: 1 2 3 4 5



d

Figura 7.12

7.4.2. Analiza statistică a datelor experimentale

Utilizarea experimentului factorial la modelarea proceselor tehnologice constituie una dintre cele mai eficiente metode de modelare experimentală. Această metodă necesită parcurgerea următoarelor etape principale [11], [44], [83].

- stabilirea domeniului de experimentare, care presupune stabilirea nivelului de bază (punctul central al experimentării) și stabilirea intervalului de variație a fiecărui factor de influență;

- construcția matricii – program a experimentării și realizarea experimentărilor;

- determinarea modelului matematic al funcției obiectiv investigate, care presupune alegerea formei modelului matematic (de regulă polinomial), calculul coeficienților de regresie și explicitarea cantitativă a modelului matematic adoptat, iar în final analiza statistică a modelului obținut, care constă în estimarea erorii experimentale, verificarea semnificației statistice a coeficienților de regresie și verificarea adecvantei valorilor funcției (funcțiilor) obiectiv calculate cu modelul empiric, cu valorile reale (măsurate) ale funcției (funcțiilor) obiectiv.

Calcululele sunt mult facilitate de existența unor programe de calculator performante, în cazul de față, pentru prelucrarea datelor experimentale fiind utilizat programul STATGRAPHICS [11], [83].

7.4.2.1. Modelarea experimentală a gradului de uzură

Pentru modelarea experimentală a gradului de uzură al peretelui interior al canalului de extrudare din bronz s-a ales ca mărime reprezentativă modificarea diametrului interior al canalului.

Experimentele preliminare și informațiile deținute pe cale bibliografică au dus la identificarea următorilor factori de influență semnificativi asupra funcției obiectiv analizate:

- temperatura aluatului, A [°C];
- umiditatea aluatului, B [%];
- viteza cu care melcul împinge aluatul prin matrița de extrudare C [mm/s].

Ca funcție obiectiv pentru aprecierea gradului de uzură s-a ales modificarea diametrului, y [mm].

S-a optat astfel pentru un experiment factorial central compus 2^3 -stea ce presupune 16 încercări. Analiza dispersională aplicată experimentului a fost obținută cu ajutorul programului STATGRAPHICS.

Pe baza informațiilor apriorice (din modelarea analitică anterioară și sursele bibliografice studiate) s-au ales coordonatele punctului central al experimentării, valorile nivelului superior și inferior, precum și intervalele de variație ale factorilor de influență, fiind sintetizate în *tabelul 7.5*.

În *tabelul 7.6* este prezentată matricea – program specifică experimentelor factoriale compuse și centrate Box – Wilson de ordin 2 cu 3 factori de influență.

Tabelul 7.5 – Domeniile de experimentale pentru experimentul factorial 2^3 analizat

Parametru	Cod	Valori fizice		
		A [°C]	B [%]	C [mm/s]
Nivel superior	+1	50	32	100
Nivel inferior	-1	40	30	50
Punct central	0	45	31	75
Braț pozitiv	+ α	55	33	125
Braț negativ	- α	35	29,5	37,5

Tabelul 7.6 – Matricea – program a experimentului factorial 2^3 analizat

Nr. crt	Valorile factorilor de influență codificate (fizice)			Valorile funcției obiectiv, y [mm]
	A [°C]	B [%]	C [mm/s]	
1	-1 (40)	-1 (30)	-1 (50)	2,04
2	+1 (50)	-1 (30)	-1 (50)	2,19
3	-1 (40)	+1 (32)	-1 (50)	2,42
4	+1 (50)	+1 (32)	-1 (50)	2,49
5	-1 (40)	-1 (30)	+1 (100)	2,43
6	+1 (50)	-1 (30)	+1 (100)	2,63
7	-1 (40)	+1 (32)	+1 (100)	2,53
8	+1 (50)	+1 (32)	+1 (100)	2,55
9	-2 (35)	0 (31)	0 (75)	2,35
10	+2 (55)	0 (31)	0 (75)	2,37
11	0 (45)	-1,5 (29,5)	0 (75)	2,34
12	0 (45)	+ 2 (33)	0 (75)	2,71
13	0 (45)	0 (31)	-1,5 (37,5)	2,24
14	0 (45)	0 (31)	+2 (125)	2,67
15	0 (45)	0 (31)	0 (75)	2,38
16	0 (45)	0 (31)	0 (75)	2,40

Rezultatele au fost prelucrate cu ajutorul programului STATGRAPHICS, pe baza metodologiei din literatura de specialitate [11], [44], [83]. S-au determinat:

- influența factorilor de influență și interacțiunile de ordinul II semnificative;
- coeficienții modelului experimental căutat, determinați pentru valorile codificate ale factorilor de influență pentru funcția obiectiv căutată (tabelul 7.7); modelul experimental este un polinom de ordin II cu forma generală:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^4 b_j x_j + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^4 b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^4 b_{jj} x_j^2 \quad (7.23)$$

- histograma efectelor, care pune în evidență amplitudinea variației funcției obiectiv când factorii de influență parcurg domeniul dintre nivelul inferior și cel superior (*figura 7.13*);
- compararea valorilor măsurate cu cele estimate cu ajutorul modelului polinomial găsit (*figura 7.14*), la o precizie de estimatie de 93,06%;
- suprafețele de răspuns (*figurile 7.15, 7.17, 7.19*) pentru toate combinațiile posibile ale factorilor de influență.

Tabelul 7.7 – Valorile coeficienților de regresie pentru polinomul experimentului factorial 2³ analizat

<i>Coeficient</i>	<i>Valoare</i>	<i>Coeficient</i>	<i>Valoare</i>
b ₀	13,5231	b ₁₃	0
b ₁	0,240529	b ₂₃	-3,3·10 ⁻³
b ₂	-1,43187	b ₁₁	-3,6699·10 ⁻⁴
b ₃	0,105439	b ₂₂	0,0332333
b ₁₂	-6,5·10 ⁻³	b ₃₃	1,18604·10 ⁻⁵

Cu valorile coeficienților de regresie din tabelul 7.7, forma modelului experimental (7.23) pentru funcția „Gradul de uzură” devine:

$$y = 13,52 + 0,24A - 0,431B + 0,105C - 0,006AB - 0,003BC - 0,0003A^2 + 0,033B^2 + 0,00001C^2 \quad (7.24)$$

Semnul „-”, aflat în fața coeficienților de regresie aferenți variabilelor independente umiditatea aluatului (B), în fața interacțiunilor de ordin doi dintre temperatura aluatului (A) și umiditatea aluatului (B), respectiv umiditatea aluatului (B) și viteza de înaintare a aluatului (C), precum și în fața termenului pătratic al temperaturii aluatului (A²) din tabelul 7.7, respectiv expresia

polinomului de regresie (7.24) arată că influența acestora tinde să diminueze valoarea funcției obiectiv y analizate.

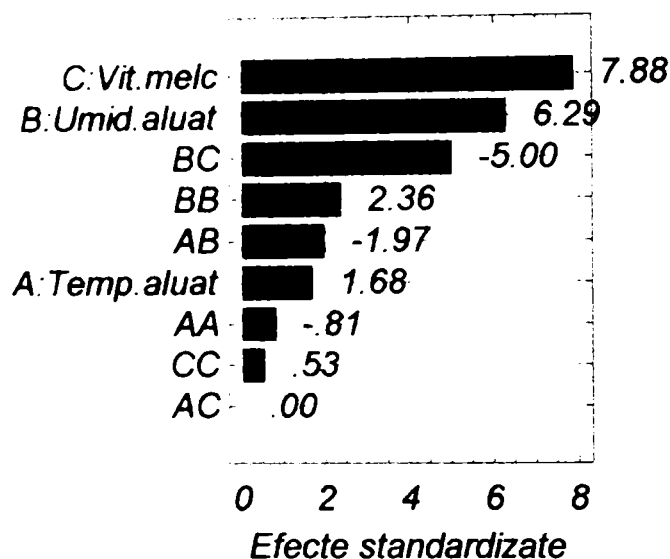


Figura 7.13 – Histograma efectelor variabilelor independente asupra funcției obiectiv „Grad de uzură”

După cum se poate observa din figura 7.13, factorul care afectează în cea mai mare măsură gradul de uzură al pereților interiori ai canalului de extrudare îl constituie viteza cu care melcul împinge aluatul prin orificiile matriței de extrudare (C), urmat imediat de umiditatea aluatului (B). De asemenea influență semnificativă asupra funcției de răspuns analizate o are interacțiunea de gradul 2 între viteza de împingere a aluatului (C) și umiditatea aluatului (B). Eliminând influențele ne semnificative, expresia polinomului de regresie (7.24) devine:

$$y = 13,52 - 01,431B + 0,105C - 0,003BC \quad (7.25)$$

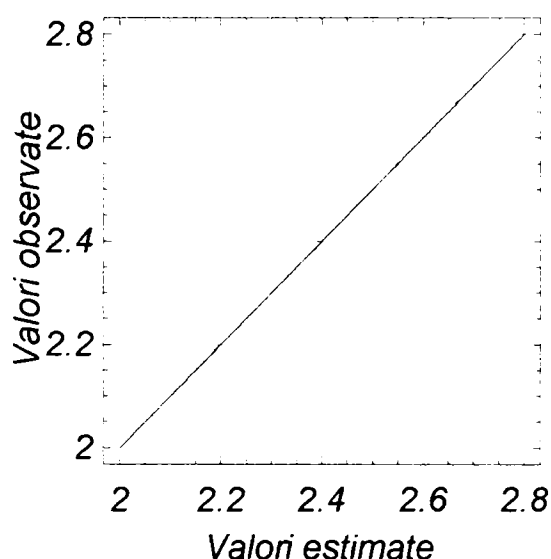


Figura 7.14 – Precizia de estimare a modelului matematic pentru funcția obiectiv „Grad de uzură”

Faptul că precizia de estimare a modelului matematic adoptat este de 93,06%, este confirmat și în figura 7.14, unde se observă buna concordanță între valorile estimate cu ajutorul modelului matematic adoptat și valorile observate în urma experimentului efectuat.

Pentru a analiza mai bine alura curbelor de răspuns din figurile 7.15, 7.17, 7.19, se fac niște secțiuni plan paralele cu planul factorilor de influență, obținându-se astfel curbele de nivel constant (figurile 7.16, 7.18, 7.20).

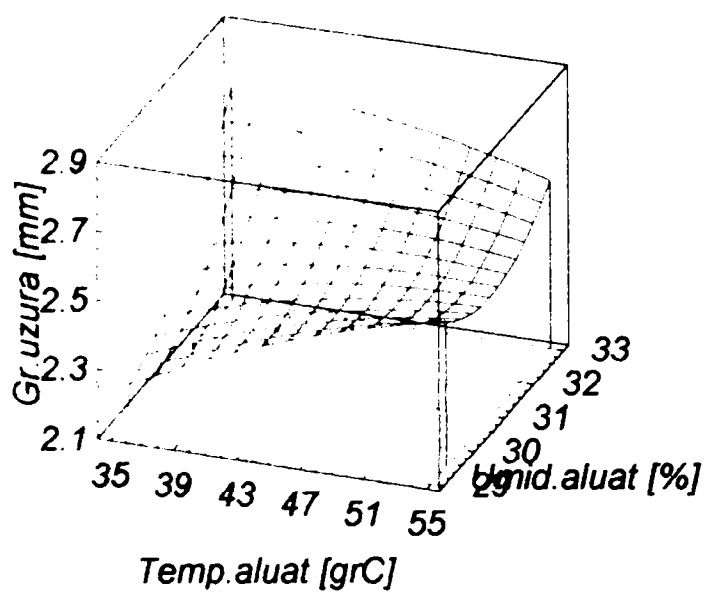


Figura 7.15 – Influența temperaturii aluatului și umidității aluatului asupra funcției obiectiv „Grad de uzură”

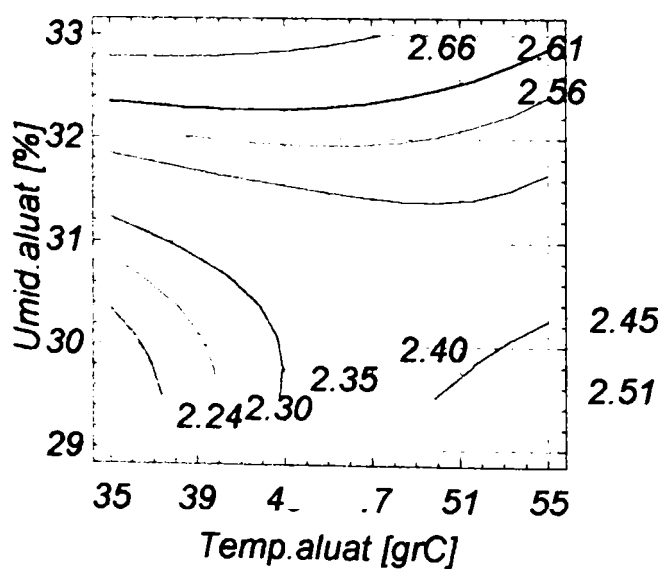


Figura 7.16 – Curbele de nivel constant pentru funcția obiectiv „Grad de uzură” în funcție de temperatura aluatului și umiditatea aluatului

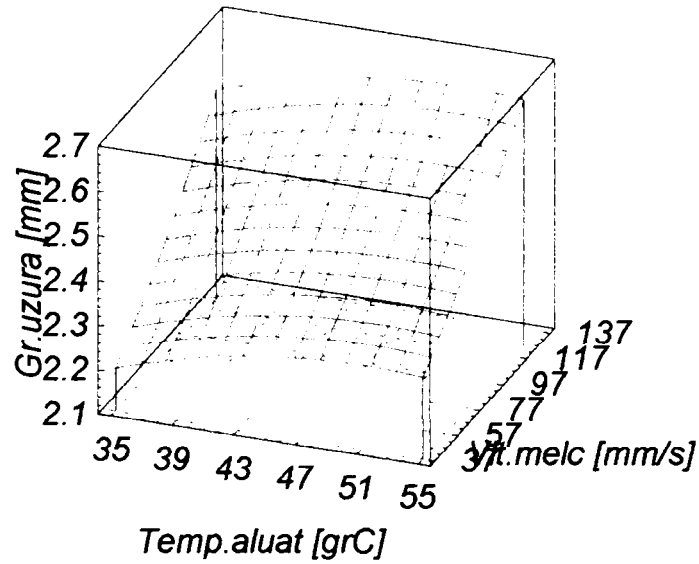


Figura 7.17 – Influența temperaturii aluatului și vitezei cu care melcul împinge aluatul prin orificiile matriței, asupra funcției obiectiv „Grad de uzură”

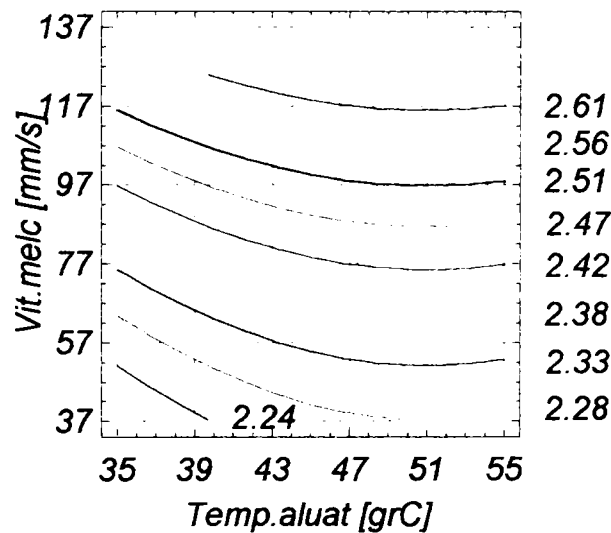


Figura 7.18 – Curbele de nivel constant pentru funcția obiectiv „Grad de uzură” în funcție de temperatura aluatului și viteza cu care melcul împinge aluatul prin orificiile matriței

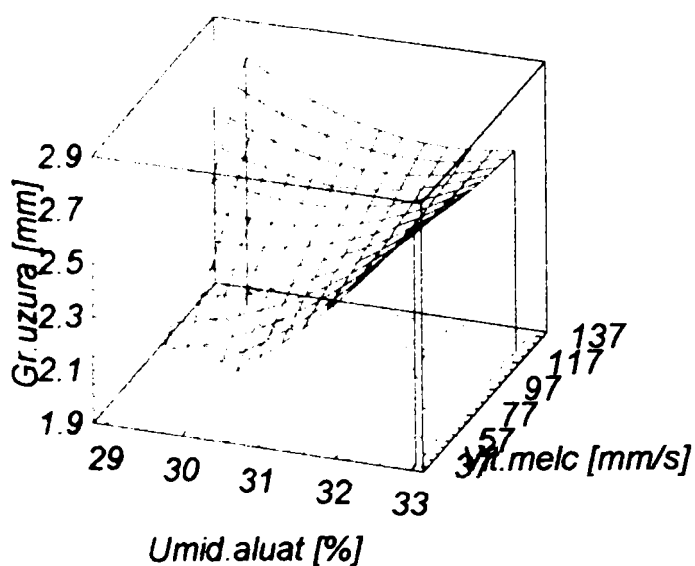


Figura 7.19 – Influența umidității aluatului și vitezei cu care melcul împinge aluatul prin orificiile matriței. asupra funcției obiectiv „Grad de uzură”

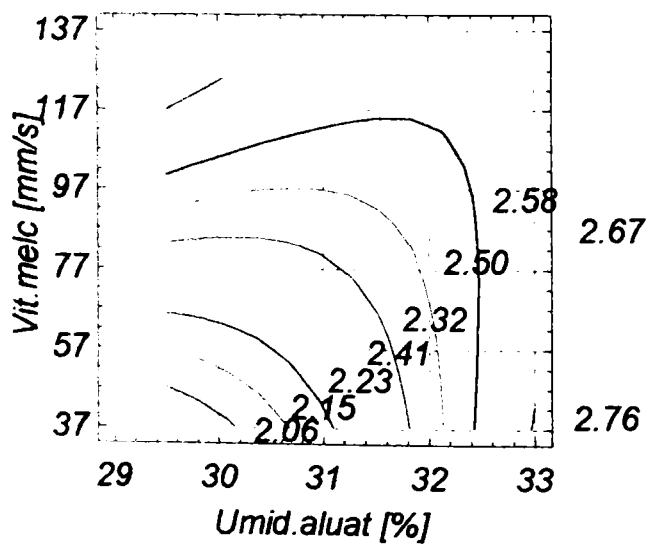


Figura 7.20 – Curbele de nivel constant pentru funcția obiectiv „Grad de uzură” în funcție de umiditatea aluatului și viteza cu care melcul împinge aluatul prin orificiile matriței

Analizând influența temperaturii aluatului și umidității aluatului asupra gradului de uzură a peretelui interior al canalului de extrudare (figurile 7.15 și 7.16), se poate observa că un grad de uzură minim corespunde valorilor minime ale temperaturii aluatului și umidității aluatului. Creșterea accentuată a umidității aluatului, în condițiile menținerii temperaturii la valori minime, are efectele cele mai nedorite asupra gradului de uzură.

În ceea ce privește influența temperaturii aluatului și a vitezei cu care melcul împinge aluatul prin orificiile matriței de extrudare, asupra funcției obiectiv analizate (figurile 7.17 și 7.18), se observă că un grad minim de uzură corespunde valorilor minime ale celor doi factori luați în considerare. Creșterea temperaturii aluatului în condițiile menținerii la valori joase a vitezei de împingere a aluatului nu are influență atât de în sens distructiv asupra gradului de uzură, cum o are creșterea semnificativă a vitezei de împingere a aluatului, în condițiile menținerii temperaturii aluatului la valori joase.

Figurile 7.19 și 7.20 arată modul de influență al umidității aluatului și vitezei de împingere a aluatului asupra gradului de uzură. Valoarea cea mai mică a gradului de uzură se înregistrează la valorile minime ale umidității aluatului și vitezei de împingere. Creșterea valorilor celor doi factori de influență are efecte nedorite asupra gradului de uzură.

Modelul matematic asociat experimentelor factoriale concentrează sintetic rezultatele măsurătorilor transferând informația conținută în valorile măsurate în relația polinomială de regresie. Apare totuși posibilitatea ca modelul matematic să nu cuprindă toate datele cu privire la rezultatele încercărilor, iar restul de date să fie conținute în reziduurile funcției obiectiv. Reziduurile reprezintă diferența dintre valoarea funcției obiectiv estimată cu ajutorul modelului matematic și valoarea măsurată în același punct a funcției obiectiv. În *figura 7.21* este prezentată probabilitatea normală a reziduurilor care de asemenea vine să confirme justetea modelului matematic ales.

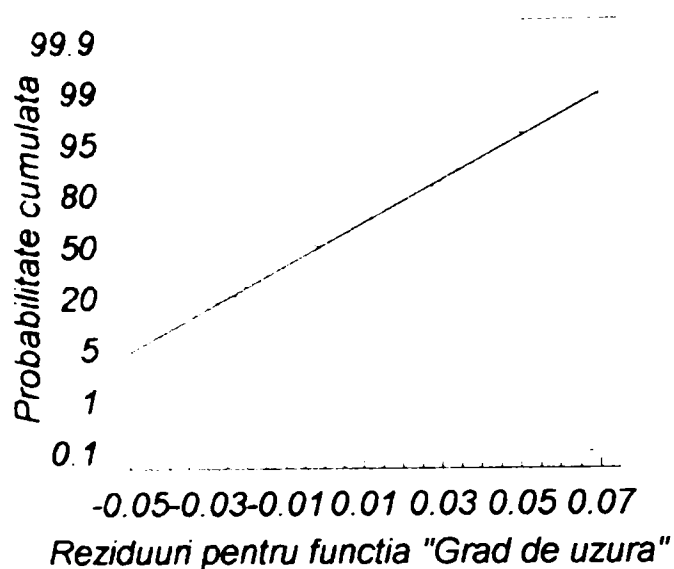


Figura 7.21 – Probabilitatea normală a reziduurilor pentru funcția obiectiv „Grad de uzură”

În figura 7.22 este prezentată variația reziduurilor funcției obiectiv „Grad de uzură” în funcție de ordinea efectuării încercărilor și se poate observa distribuția aleatoare a acestora, fiind astfel evitată o eventuală eroare sistematică.

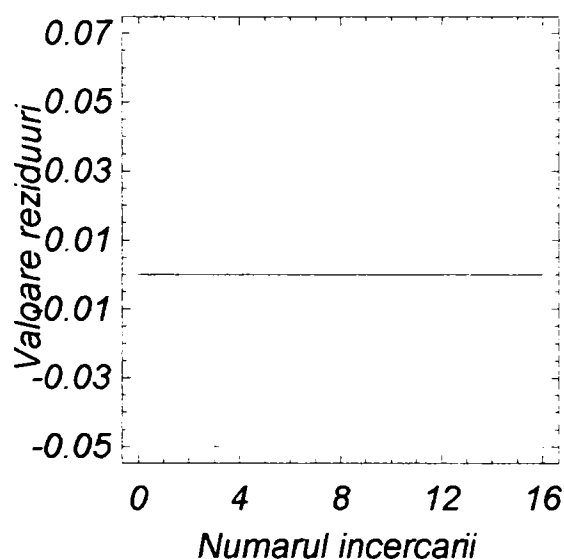


Figura 7.22 – Distribuția reziduurilor pentru funcția obiectiv „Grad de uzură” în funcție de numărul experimentului

7.4.2.2. Modelarea experimentală a presiunii în interiorul canalului de extrudare

În urma experimentelor preliminare au fost stabiliți următorii factori de influență semnificativi pentru presiunea în interiorul canalului de extrudare [7], [14], [25]:

- rata aparentă longitudinală a curgerii aluatului, A [s^{-1}];
- turația melcului de extrudare, B [rot/min];
- temperatura aluatului în interiorul canalului de extrudare, C [$^{\circ}C$];
- coeficientul comportării curgerii transversale, D [-].

Funcția obiectiv pentru presiunea în interiorul canalului de extrudare a fost aleasă componenta tangențială a căderii presiunii de intrare în canalul de extrudare. y [MPa].

Presiunea pe care o exercită aluatul asupra peretelui canalului de extrudare, cuantificată prin componenta tangențială, a fost posibil de măsurat prin montarea direct în canalul de extrudare a unui traductor de presiune, care să permită, pentru diferite valori ale factorilor de influență, determinarea presiunii exercitată asupra peretelui canalului de extrudare.

Pe baza informațiilor apriorice (din modelarea analitică anterioară și sursele bibliografice studiate) s-au ales coordonatele punctului central al experimentării, valorile nivelului superior și inferior, precum și intervalele de variație ale factorilor de influență, fiind sintetizate în *tabelul 7.8*.

În *tabelul 7.9* este prezentată matricea – program specifică experimentelor factoriale compuse și centrate Box – Wilson de ordin 2 cu 4 factori de influență.

Tabelul 7.8 – Domeniile de experimentale pentru experimentul factorial 2^4 analizat

Parametru	Cod	Valori fizice			
		A [s^{-1}]	B [rot/min]	C [$^{\circ}C$]	D [-]
Nivel superior	+1	80	200	180	0,38
Nivel inferior	-1	40	160	160	0,26
Punct central	0	60	180	170	0,32
Brat pozitiv	$+\alpha$	100	220	190	0,44
Brat negativ	$-\alpha$	20	150	155	0,23

Tabelul 7.9 – Matricea – program a experimentului factorial 2^4 analizat

Nr. crt.	Valorile factorilor de influență codificate (fizice)				Valorile funcției obiectiv, y [MPa]
	A [s^{-1}]	B [rot/min]	C [$^{\circ}C$]	D [-]	
1.	-1 (40)	-1 (160)	-1 (160)	-1 (0,26)	1,50
2.	+1 (80)	-1 (160)	-1 (160)	-1 (0,26)	1,35
3.	-1 (40)	+1 (200)	-1 (160)	-1 (0,26)	1,40
4.	+1 (80)	+1 (200)	-1 (160)	-1 (0,26)	1,20
5.	-1 (40)	-1 (160)	+1 (180)	-1 (0,26)	8,25
6.	+1 (80)	-1 (160)	+1 (180)	-1 (0,26)	7,25
7.	-1 (40)	+1 (200)	+1 (180)	-1 (0,26)	5,15
8.	+1 (80)	+1 (200)	+1 (180)	-1 (0,26)	4,45
9.	-1 (40)	-1 (160)	-1 (160)	+1 (0,38)	1,55
10.	+1 (80)	-1 (160)	-1 (160)	+1 (0,38)	1,45
11.	-1 (40)	+1 (200)	-1 (160)	+1 (0,38)	1,45
12.	+1 (80)	+1 (200)	-1 (160)	+1 (0,38)	1,35
13.	-1 (40)	-1 (160)	+1 (180)	+1 (0,38)	8,40
14.	+1 (80)	-1 (160)	+1 (180)	+1 (0,38)	6,30
15.	-1 (40)	+1 (200)	+1 (180)	+1 (0,38)	7,45
16.	+1 (80)	+1 (200)	+1 (180)	+1 (0,38)	5,85
17.	-2 (20)	0 (180)	0 (170)	0 (0,32)	4,55
18.	+2 (100)	0 (180)	0 (170)	0 (0,32)	3,25
19.	0 (60)	-1,5 (150)	0 (170)	0 (0,32)	2,10
20.	0 (60)	+2 (220)	0 (170)	0 (0,32)	2,00
21.	0 (60)	0 (180)	-1,5 (155)	0 (0,32)	0,40
22.	0 (60)	0 (180)	+2 (190)	0 (0,32)	8,35
23.	0 (60)	0 (180)	0 (170)	-1,5 (0,23)	2,90
24.	0 (60)	0 (180)	0 (170)	+2 (0,44)	4,40
25.	0 (60)	0 (180)	0 (170)	0 (0,32)	0,50
26.	0 (60)	0 (180)	0 (170)	0 (0,32)	0,60

Rezultatele au fost prelucrate cu ajutorul programului STATGRAPHICS, pe baza metodologiei din literatura de specialitate [11], [44], [83], în mod analog ca în cazul paragrafului anterior.

În tabelul 7.10 sunt prezentate valorile coeficienților de regresie pentru modelul matematic al experimentului.

Tabelul 7.10 – Valorile coeficienților de regresie pentru polinomul experimentului factorial 2^4 analizat

Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare
b_0	0,748844	b_{12}	0,046875	b_{34}	0,159375
b_1	-0,35625	b_{13}	-0,303125	b_{11}	0,818662
b_2	-0,435983	b_{14}	-0,115625	b_{22}	0,524586
b_3	2,39491	b_{23}	-0,428125	b_{33}	0,927297
b_4	0,133692	b_{24}	0,284375	b_{44}	0,94074

Cu valorile coeficienților de regresie din tabelul 7.10, forma modelului experimental pentru funcția „Componenta tangențială a căderii presiunii de intrare în canalul de extrudare” devine:

$$y = 0,748 - 0,35A - 0,435B + 2,394C + 0,133D + 0,046AB - 0,303AC - 0,115AD - 0,428BC + 0,284BD + 0,159CD + 0,818A^2 + 0,524B^2 + 0,927C^2 + 0,940D^2$$

(7.26)

În figura 7.23 este dată histograma efectelor factorilor de influență asupra funcției obiectiv analizate. Se poate observa că factorul cu cea mai mare influență asupra funcției obiectiv analizate este temperatura aluatului în interiorul canalului de extrudare (C), urmat de rata curgerii transversale (D) și rata de curgere (A). De asemenea influență semnificativă o au factorii pătratici ai acestor trei factori de influență (A^2 , B^2 , C^2), precum și interacțiunea de ordin doi dintre turația melcului (B) și temperatura aluatului (C). Eliminând efectele ne semnificative, expresia modelului matematic devine:

$$y = 0,748 - 0,35A + 2,394C + 0,133D - 0,428BC + 0,818A^2 + 0,524B^2 + 0,927C^2 + 0,940D^2$$

(7.27)

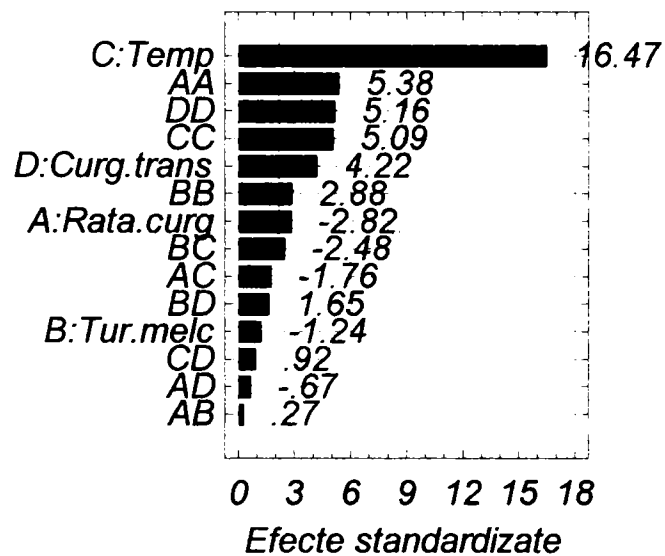


Figura 7.23 – Histograma efectelor variabilelor independente asupra funcției obiectiv „Căderea presiunii de intrare”

Faptul că precizia de estimare a modelului matematic adoptat este de 93,78%, este confirmat și în figura 7.24, unde se observă buna concordanță între valorile estimate cu ajutorul modelului matematic adoptat și valorile observate în urma experimentului efectuat.

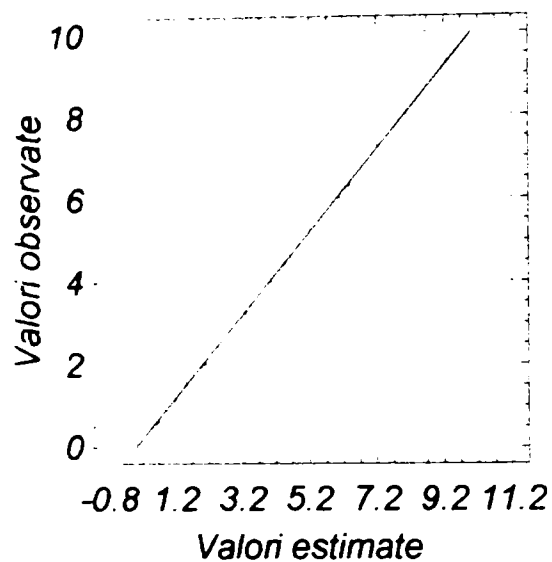


Figura 7.24 – Probabilitatea normală a reziduurilor pentru funcția obiectiv „Căderea presiunii de intrare”

În figurile 7.25, 7.27, 7.29, 7.31, 7.33, 7.35 sunt indicate suprafețele de răspuns pentru toate combinațiile posibile ale factorilor de influență.

Pentru a analiza mai bine alura curbelor de răspuns din figurile 7.25, 7.27, 7.29, 7.31, 7.33, se fac niște secțiuni plan paralele cu planul factorilor de influență, obținându-se astfel curbele de nivel constant (figurile 7.26, 7.28, 7.30, 7.32, 7.34, 7.36).

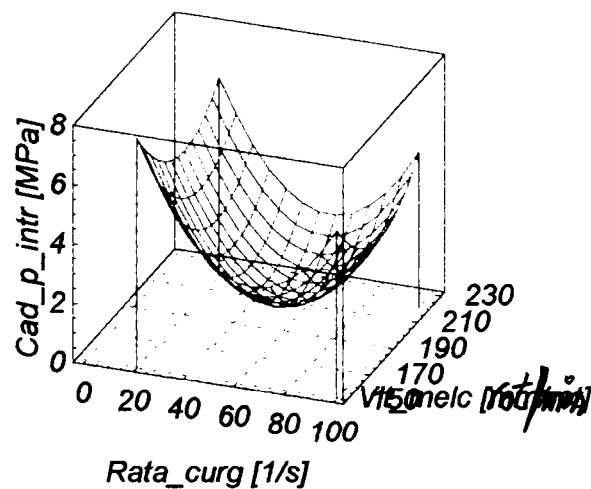


Figura 7.25 – Influența ratei de curgere și a turației melcului asupra funcției obiectiv „Căderea presiunii de intrare”

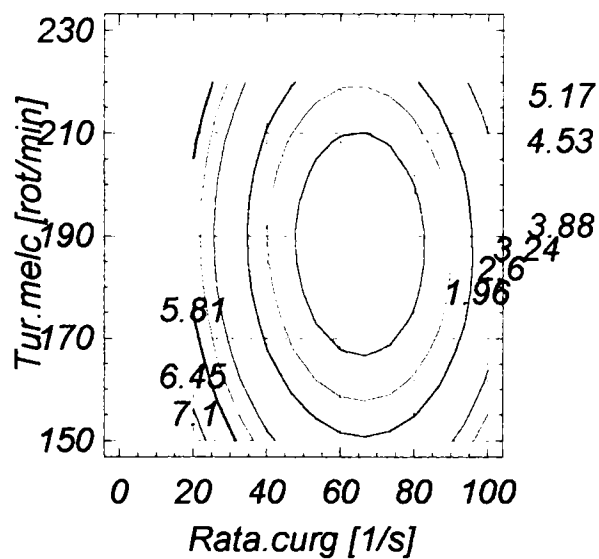


Figura 7.26 – Curbele de nivel constant pentru funcția obiectiv „Căderea presiunii de intrare” în funcție de rata de curgere și turația melcului

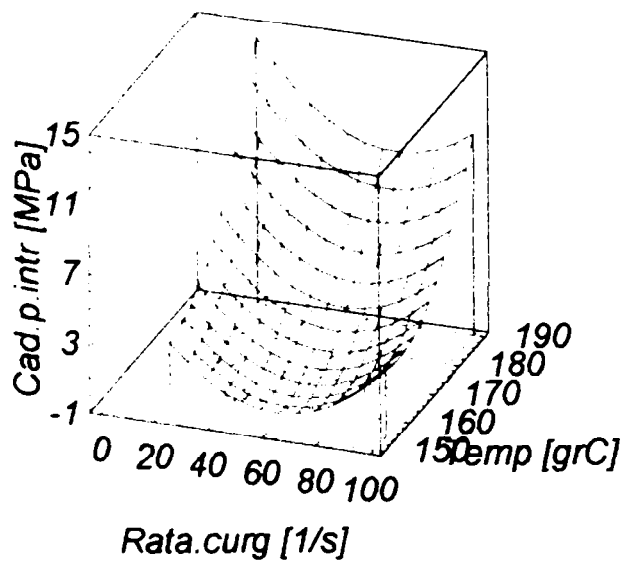


Figura 7.27 – Influența ratei de curgere și a temperaturii asupra funcției obiectiv „Căderea presiunii de intrare

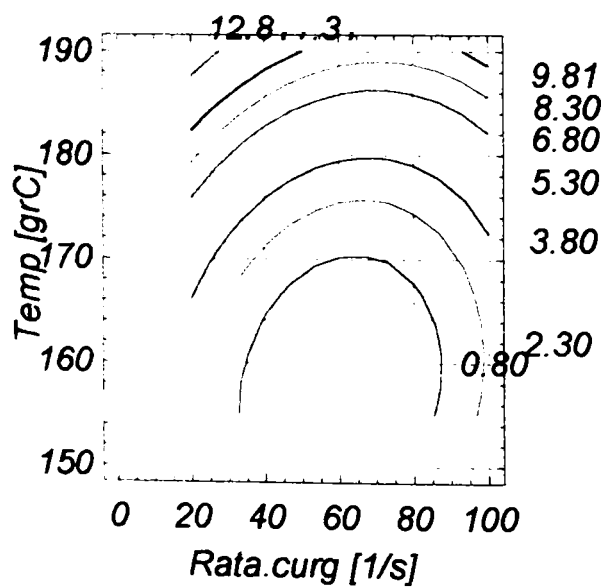


Figura 7.28 – Curbele de nivel constant pentru funcția obiectiv „Căderea presiunii de intrare” în funcție de rata de curgere și temperatură

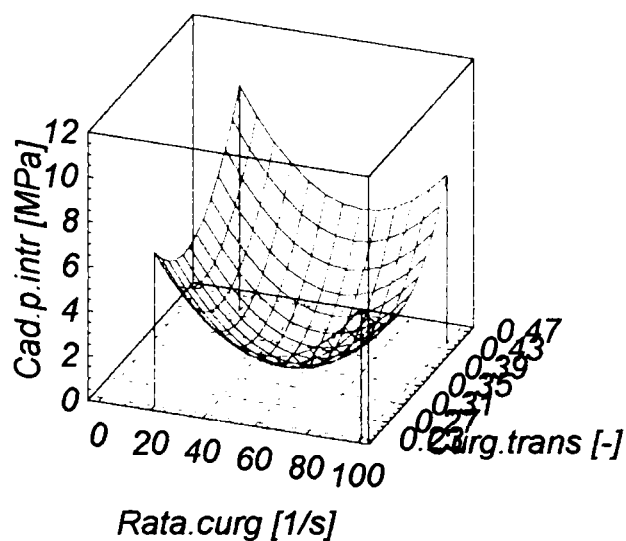


Figura 7.29 – Influența ratei de curgere și a coeficientului curgerii transversale asupra funcției obiectiv „Căderea presiunii de intrare”

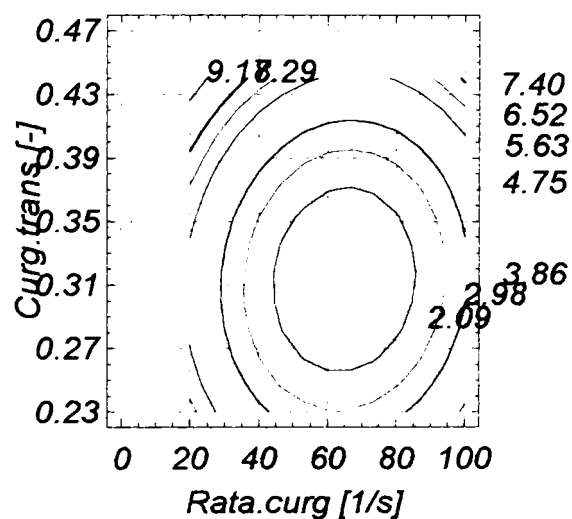


Figura 7.30 – Curbele de nivel constant pentru funcția obiectiv „Căderea presiunii de intrare” în funcție de rata de curgere și coeficientul curgerii transversale

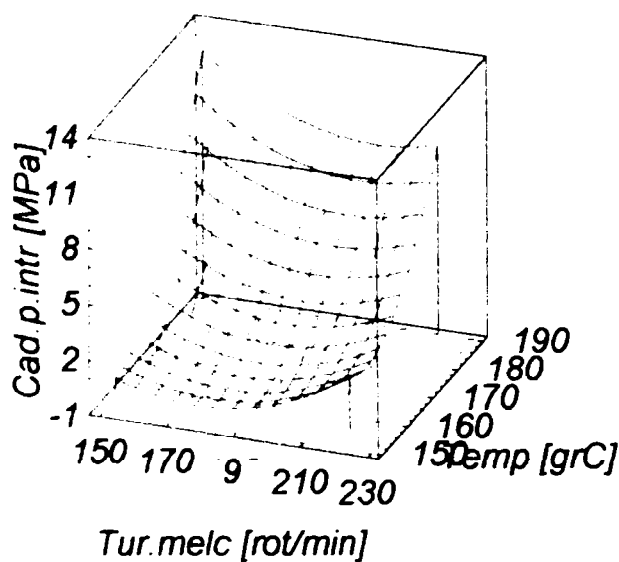


Figura 7.31 – Influența turației melcului și a temperaturii asupra funcției obiectiv „Căderea presiunii de intrare”

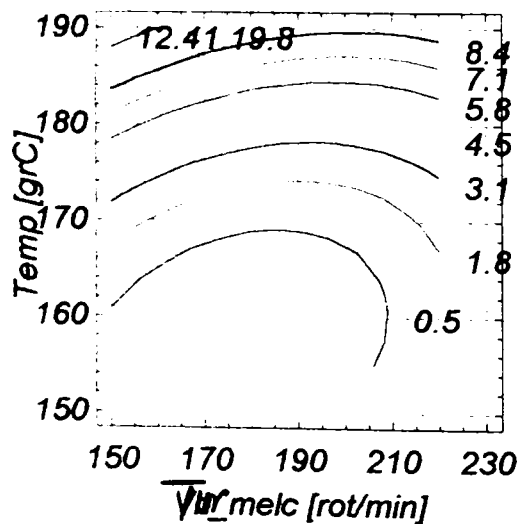


Figura 7.32 – Curbele de nivel constant pentru funcția obiectiv „Căderea presiunii de intrare” în funcție de temperatură și turația melcului

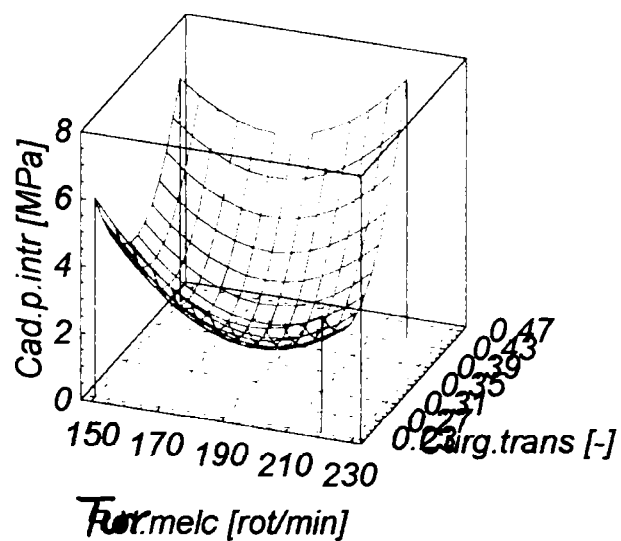


Figura 7.33 – Influența turației melcului și a coeficientului curgerii transversale asupra funcției obiectiv „Căderea presiunii de intrare”

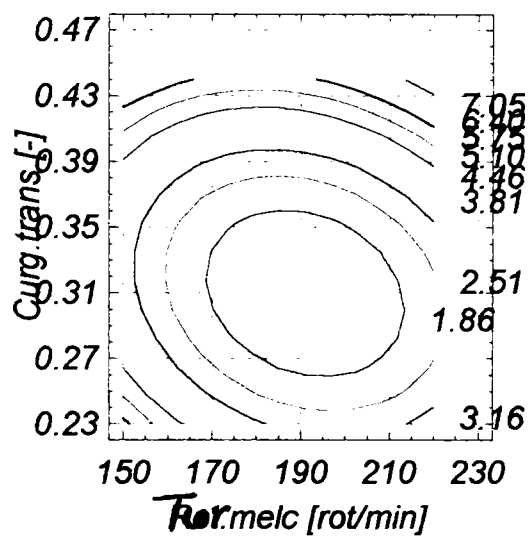


Figura 7.34 – Curbele de nivel constant pentru funcția obiectiv „Căderea presiunii de intrare” în funcție de coeficientul curgerii transversale și turația melcului

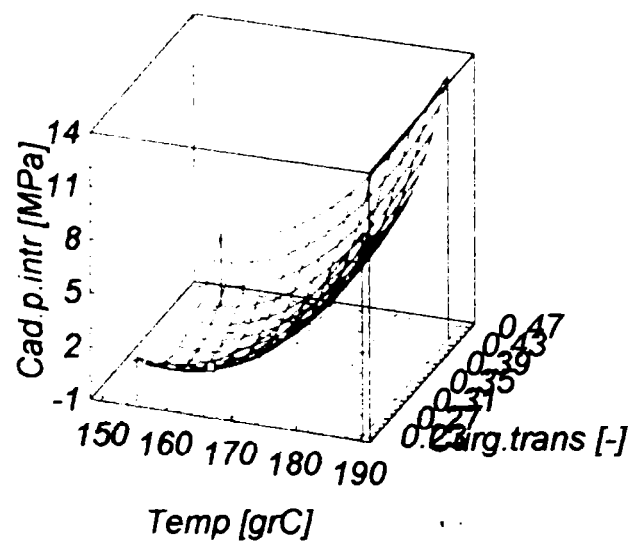


Figura 7.35 – Influența temperaturii și a coeficientului curgerii transversale asupra funcției obiectiv „Căderea presiunii de intrare”

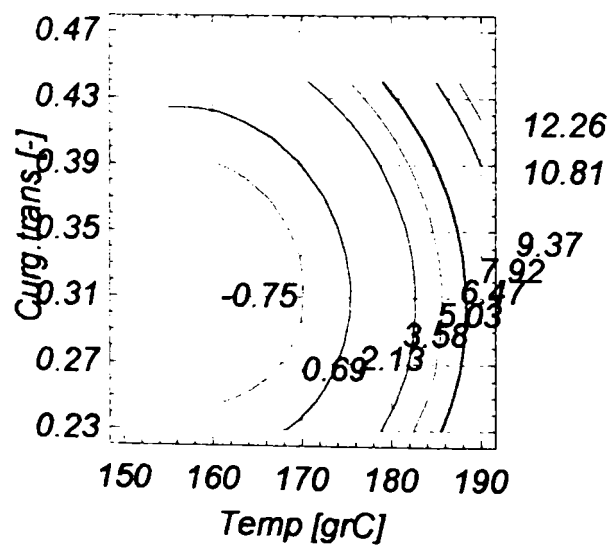


Figura 7.36 – Curbele de nivel constant pentru funcția obiectiv „Căderea presiunii de intrare” în funcție de coeficientul curgerii transversale și temperatură

Analizând influența ratei de curgere și turației melcului asupra căderii presiunii de intrare (figurile 7.25 și 7.26), se poate observa că atingerea optimului (cădere de presiune minimă) se realizează pentru valori medii ale celor doi factori de influență luați în considerare pe domeniul de variație analizat. O comportare asemănătoare o au și rata de curgere și coeficientul curgerii transversale (figurile 7.29 și 7.30), respectiv turația melcului și coeficientul curgerii transversale (figurile 7.33 și 7.34) asupra funcției obiectiv analizate.

În ceea ce privește influența ratei de curgere și a temperaturii aluatului asupra căderii presiunii de intrare (figurile 7.27 și 7.28), aceasta este minimă pentru valori medii ale ratei de curgere și valori mici ale temperaturii, pe domeniile de variație luate în considerare pentru factorii de influență. Alte valori ale ratei de curgere nu au influență semnificativ nefavorabilă asupra funcției obiectiv analizate, în schimb o creștere bruscă a temperaturii cauzează o creștere semnificativă, deci nedorită, a căderii de presiune.

Referitor la influența turației melcului și temperaturii aluatului asupra căderii presiunii de intrare (figurile 7.31 și 7.32), aceasta are valori minime pentru valori mici ale celor doi factori de influență. Ca și în cazul anterior, alte valori ale turației melcului nu au influență nedorită asupra funcției obiectiv analizate, în schimb valori crescânde ale temperaturii influențează nedorit căderea presiunii de intrare.

În ceea ce privește influența temperaturii aluatului și coeficientului curgerii transversale asupra căderii presiunii de intrare (figurile 7.35 și 7.36), se poate observa că atingerea optimului (valori minime ale căderii presiunii de intrare) se realizează pentru temperaturi mici. Creșterea temperaturii are influență nedorită asupra funcției obiectiv analizate.

În figura 7.37 este prezentată probabilitatea normală a reziduurilor care de asemenea vine să confirme justetea modelului matematic ales.

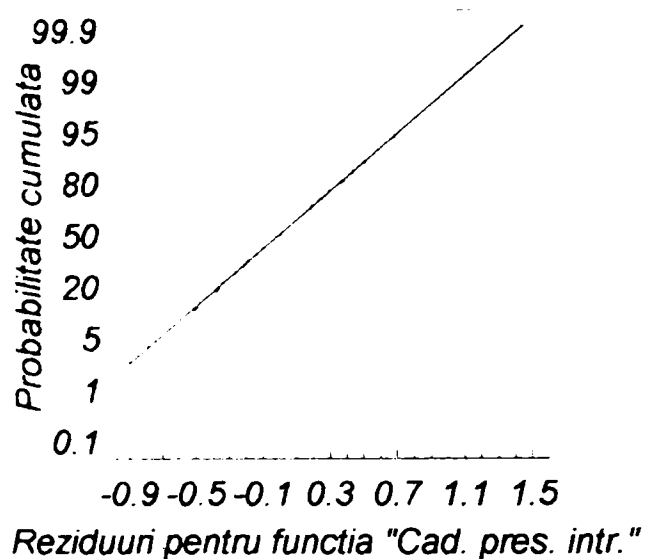


Figura 7.37 – Probabilitatea normală a reziduurilor pentru funcția obiectiv „Căderea presiunii de intrare”

În figura 7.38 este prezentată variația reziduurilor funcției obiectiv „Grad de uzură” în funcție de ordinea efectuării încercărilor și se poate observa distribuția aleatoare a acestora, fiind astfel evitată o eventuală eroare sistematică.

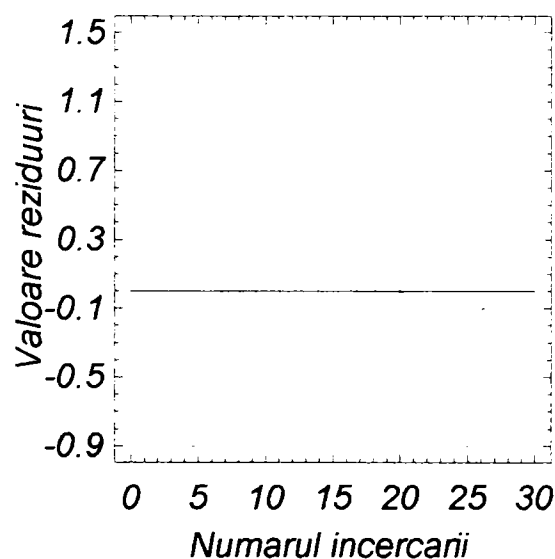


Figura 7.38 – Distribuția reziduurilor pentru funcția obiectiv „Căderea presiunii de intrare” în funcție de numărul experimentului

7.5. Concluzii

Pentru cele două experimente realizate, în vederea analizei statistico – matematice a gradului de uzură al peretelui interior al canalului de extrudare, respectiv a căderii presiunii de intrare în matrița de extrudare, se desprind următoarele concluzii:

- modelul polinomial de gradul al II-lea obținut în urma realizării experimentului factorial de ordin doi este adecvat pentru estimarea suprafețelor de răspuns corespunzătoare domeniului experimental investigat, deci cu ajutorul lor se poate obține o bună estimare a funcțiilor obiectiv analizate;

- factorul de influență cel mai important asupra funcției obiectiv „Căderea presiunii de intrare” este temperatura aluatului; respectiv viteza cu care melcul împinge aluatul prin orificiile matriței de extrudare, asupra funcției obiectiv „Gradul de uzură”;
- importanță semnificativă asupra funcției obiectiv „Căderea presiunii de intrare” mai au coeficientul curgerii transversale și rata de curgere, termenii pătratici ai ratei de curgere, coeficientului curgerii transversale și temperaturii, precum și interacțiunile de ordinul doi dintre turația melcului de presare și temperatura aluatului;
- importanță semnificativă asupra funcției obiectiv „Gradul de uzură” au umiditatea aluatului, interacțiunile de ordin doi între umiditatea aluatului și viteza cu care melcul împinge aluatul prin orificiile matriței de extrudare;
- fără semnificație statistică semnificativă, în domeniul investigat, pentru funcția obiectiv „Căderea presiunii de intrare” sunt turația melcului de presare, precum și interacțiunile de ordin doi între rata de curgere și temperatura aluatului, turația melcului și coeficientul curgerii transversale, temperatura și coeficientul curgerii transversale și rata de curgere și turația melcului;
- fără semnificație statistică semnificativă, în domeniul investigat, pentru funcția obiectiv „Gradul de uzură” sunt temperatura aluatului, interacțiunile de ordin doi între umiditatea aluatului și viteza cu care melcul împinge aluatul prin orificiile matriței de extrudare, temperatura și umiditatea aluatului, temperatura aluatului și viteza de împingere a aluatului, precum și termenii pătratici ai tuturor factorilor de influență analizați.

CAPITOLUL 8

CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

8.1. Concluzii generale

Analiza de ansamblu a tezei de doctorat elaborată, arată că principalele obiective ale acesteia, propuse inițial, au fost îndeplinite și anume:

- ◆ studiu sintetic al tipologiei fabricației matrițelor de extrudat paste făinoase, pe plan mondial;

- ◆ determinarea unui model sistemic generalizat pentru procesul tehnologic de fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase, model capabil să integreze multitudinea de variante individuale întâlnite în literatura de specialitate;

- ◆ elaborarea unor modele matematice analitice pentru componenta transversală a căderii presiunii de intrare a aluatului în canalele de extrudare și pentru gradul de uzură al pereților interiori ai canalelor de extrudare;

- ◆ modelarea experimentală a căderii presiunii de intrare a aluatului în canalele de extrudare și a gradului de uzură al pereților interiori ai canalelor de extrudare, în scopul evidențierii valorilor factorilor de influență pentru care acțiunea tehnologică prezintă interes.

Optimizarea procesului de fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase nu este o operație simplă ci un proces complex, cu o asociere distinctă de elemente particulare și generale, corelate cu tipologia proceselor și produselor.

Aspectele tratate în prezenta teză de doctorat încearcă să rezolve, în parte, problemele de optimizare ale procesului tehnologic de fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase, pornind de la cercetarea teoretică

fundamentală, până la rezolvarea unor probleme practice, aducându-se mai multe contribuții originale.

Încercarea de optimizare globală a procesului tehnologic de fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase s-a materializat în stabilirea unui model sistemic generalizat pentru acest proces, care să fie cât mai puțin afectat de tipologia de producție, dar, în același timp, să permită particularizarea, prin asignarea unor variabile, pentru orice tip de produs (în speță tip de matriță funcție de tipul pastei făinoase).

Tratarea procesului de fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase ca pe un model cibernetic este îngreunată de numărul mare de variabile aferente, de aceea, elaborarea modelului sistemic trebuie început cu selecția variabilelor, bazată, la început, pe metode subiective, iar ulterior, pe metode obiective, prin experimente practice și calcule matematice;

Pornind de la cerințele de bază ale procesului de producere a pastelor făinoase, în ceea ce privește produsul finit, și anume forma și dimensiunile pastei, s-a propus, proiectat, realizat și introdus în experimentare o nouă soluție – pastilele din safir artificial din componența matrițelor de extrudat paste făinoase – care răspunde celor două probleme principale ridicate de marii producători de matrițe din lume (Niccolai Trafile, Landucci – Italia): productivitate și durabilitate a matriței.

Pe baza modelului intrări – ieșiri se poate organiza un sistem propriu de asigurare a calității.

8.2. Contribuții originale

8.2.1. Contribuții în domeniul cercetării teoretice

◆ Identificarea principalelor probleme cu care se confruntă producătorul de paste făinoase, probleme legate preponderent de organul activ de extrudare, și anume matrița de extrudare;

◆ analizarea principalelor aspecte legate de tehnologia de fabricație a matrițelor de extrudat paste făinoase, din materiale metalice, plastice și compozite, în vederea elaborării unor tehnologii optime pentru fabricarea și în țară a matrițelor din materiale compozite;

◆ elaborarea unui model generalizat pentru sistemul de acțiune tehnologică la fabricarea matrițelor de extrudat paste făinoase;

◆ elaborarea unui model intrări – ieșiri pentru procesul tehnologic de fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase;

◆ identificarea tuturor factorilor de influență, inclusiv gruparea lor în mai multe submulțimi;

◆ determinarea legăturilor existente între grupele de variabile (variabile – mărimi de intrare, de ieșire și de reglare);

◆ pe baza legăturilor determinate între grupele de variabile ale procesului s-a determinat funcția globală de transfer; în cazul de față însă, funcția globală nu poate avea o formă generalizată, ci doar forme particulare, cu un anumit grad de generalitate.

În urma analizei efectuate, numărul variabilelor de intrare este destul de mare, ceea ce face ca obiectivele procesului de optimizare globală să fie numeroase și, coroborat cu faptul că nu toate variabilele au aceleași exprimări, nu se poate aborda deocamdată o optimizare globală prin metode multicriteriale. Dacă pe domeniul de definiție al procesului tehnologic de

fabricare a matrițelor de extrudat paste făinoase se introduc restricții determinate de grupa materialelor de bază intrate în proces (metale, materiale plastice, materiale compozite), iar pe aceste subdomenii se introduc restricții de caractere speciale ale tipologiei constructive a matriței, apar intervale de definiție pentru posibile funcții obiectiv ale optimizării.

8.2.2. Contribuții în domeniul cercetării experimentale

- ◆ realizarea unui stand experimental în care s-au efectuat încercările experimentale;

- ◆ proiectarea constructivă și tehnologică a unui nou tip de matriță, care utilizează miezuri din safire artificiale;

- ◆ pentru a utiliza pastile din safir artificial în componența matrițelor de extrudat paste făinoase, s-a realizat un experiment prin care s-a obținut configurația exactă a acestora, în cadrul laboratorului de safire artificiale de la Universitatea de Vest din Timișoara;

- ◆ proiectarea constructivă și tehnologică și realizarea unei matrițe cu miezuri multiple, din bronz, politetrafluoretilenă și safir artificial;

- ◆ analizarea din punct de vedere dimensional a profilelor canalelor de extrudare, în trei etape distincte ale procesului tehnologic de extrudare a pastelor făinoase;

- ◆ elaborarea unor modele matematice analitice pentru componenta transversală a căderii presiunii de intrare a aluatului în canalele de extrudare și pentru gradul de uzură al pereților interiori ai canalelor de extrudare;

- ◆ realizarea modelării experimentale a căderii presiunii de intrare a aluatului în canalele de extrudare și a gradului de uzură al pereților interiori ai

canalelor de extrudare, în scopul evidențierii valorilor factorilor de influență pentru care acțiunea tehnologică prezintă interes;

- ◆ proiectarea și realizarea unui experiment factorial compus și centrat Box – Wilson de ordinul doi cu trei factori de influență care a furnizat modelul regresional pentru funcția obiectiv „Gradul de uzură al peretelui interior al canalului de extrudare”;

- ◆ proiectarea și realizarea unui experiment factorial compus și centrat Box – Wilson de ordinul doi cu patru factori de influență care a furnizat modelul regresional pentru funcția obiectiv „Căderea presiunii de intrare”;

- ◆ s-au adus astfel contribuții la introducerea în fabricație a unui nou tip de matriță, din safire artificiale;

- ◆ s-a realizat astfel o matriță cu proprietăți multiple: creșterea durabilității matriței și productivității în ceea ce privește procesul tehnologic de fabricare a matrițelor, prin obținerea directă a profilelor dorite, de miezuri localizate, în același timp, în instalația de obținere a safirelor artificiale.

BIBLIOGRAFIE

1. BAIRD, D.G., LABROPOULUS, A.E., Food dough rheology, Chem. Eng. Commun, 15, 1982
2. BARILLA, G., Pasta. History, technologies and secrets of italian tradition, Arti Grafice Amilcare Pizzi, Italia, 2000
3. BAROZZI, A., Pasta dies: design techniques. Production systems, în Un Mondo di Pasta, Chiriotti Editori, Italia, 1996
4. BECKETT, S.T., Ş.A., The cold extrusion of chocolate, Trans IchemE, Vol. 72, Part C, March 1994
5. BENGA, G.C., Contribuții la optimizarea procesului tehnologic privind prelucrarea în stare dură a oțelurilor aliate, Teză de doctorat, conducător științific prof.dr.ing. Vasile Popovici, Universitate „Politehnica” din Timișoara, 2002
6. BHATTACHARYA, M., Slit rheometer studies of wheat and flour dough, J. Texture Studies, 1993
7. BHATTACHARYA, M., PADMANABHAN, M., SEETHAMRAJU, K., Uniaxial extensional viscosity during extrusion cooking from entrance pressure drop method, Journal of Food Science, Volume 59, Nr. 1, 1994
8. BINDING, D.M., An approximate analysis for contraction and converging flows, J. Non-Newtonian Fluid Mech., 27, 1988
9. BIRĂU, O., Ş.A., Safirul și rubinul, Editura Facla, Timișoara, 1986
10. CAI, W., DIOSADY, L.L., Model for gelatinization of wheat starch in a twin – screw extruder, Journal of Food Science, Vol. 58, Nr. 4, 1993
11. CICALĂ, E., Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale, Editura Politehnica, Timișoara, 1999

12. CINCU, C., MANEA, G., Cartea operatorului din industria de prelucrare a materialelor plastice, Editura Tehnică, București, 1984
13. COGSWELL, F.N., Converging flow of polymer melts in extrusion, Journal Poly. Eng. Sci., 12, 1972
14. COGSWELL, F.N., Converging flow and stretch flow: a compilation, Journal of Non – Newtonian Fluid Mech., 4, 1978
15. COLONA, P., ș.a., Extrusion cooking of a starch and starchy products, In Extrusion Cooking, C. Mercier ș.a., Am. Assoc. Cereal Chem., St. Paul, 1989
16. DEALY, J., Extensional rheometers for molten polymers – a review, J. Non – Newtonian Fluid Mech., 4, 1978
17. DEALY, J.M., WISSBURN, K.F., Melt Rheology and its Role in Plastics Processing, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990
18. DIACONESCU, G., ș.a., Tehnologia mecanicii fine și microtehnicii, Editura Tehnică, București, 1985
19. DIMA, I., MUNTEANU, I., Materiale și dispozitive semiconductoare, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980
20. FEILLET, P., Industrie des pates alimentaires: technologies de fabrication, qualite des produits finits et des matieres premieres, În rev. Industries alimentaires et agricoles, nr. 10, 1986
21. FEILLET, P., LAIGNELET, THERESE, Situation passee, presente et future de la recherche accademique mondiale sur le ble dur et les pates alimentaires – The current state of international academic research in pasta quality, În Un Mondo di Pasta, Chiriotti Editori, Pinerolo – Italia, 1996
22. GAVRILAȘ, I., Ș.A., Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini, vol. I, Editura tehnică, București, 1991

23. GIBSON, A., Converging dies. In Rheological Measurements, A.A. Collyer and D.W. Clegg (Editors), Elsevier Applied Science, London, 1988
24. GIBSON, A., WILLIAMSON, G., Shear and extensional flow of reinforced plastics in injection molding. I. Effects of temperature and shear rate with bulk molding compound, Poly. Eng. Sci, 25, 1985
25. GIBSON, A., WILLIAMSON, G., Shear and extensional flow of reinforced plastics in injection molding. II. Effects of die angle and bore diameter on entry pressure with bulk molding compound, Poly. Eng. Sci, 25, 1985
26. GROZA, I.V., Cercetări teoretice și experimentale privind optimizarea prelucrării cu medii abrazive magneto – reologice, Teză de doctorat, Conducător științific prof.dr.ing. Nichici Alexandru, Universitatea „Politehnica” Timișoara, 2000
27. GUPTA, R.K., SRIDHAR, T., Elongational rheometers, In Rheological Measurements, Elsevier Applied Science, London, 1988
28. HÜTTE, Manualul inginerului. Fundamente, Editura Tehnică, București, 1995
29. ICLĂZAN, T., Plasturgie. Tehnologia prelucrării materialelor plastice, vol. I., Litografia Universității „Politehnica” Timișoara, 1995
30. JACOBS, G., Ș.A., Spannungsoptimierung, Veb Verlag Technik, Berlin, 1981
31. KAMINSKI, ZB., Laser Crystals, Their Physics and Properties, Springer Verlag, Berlin, 1981
32. KASTANOV, A., O nouă instalație pentru fabricarea macaroanelor, În rev. Hleboprodukty, nr. 3, 1982
33. KOTLER, P., Marketing – Management, Prentice Hall, New Jersey, USA, 1983

34. LUNGU, I., Capacitatea și costul sculelor așchietoare, Analele Universității „Eftimie Murgu” Reșița, 1994
35. MARINESCU, I.D., Diamantul și aplicațiile lui, Editura Tehnică, București, 1985
36. MARINESCU, N.I., Ș.A., Tehnologii de prelucrare a sculelor din materiale dure și extradure, Editura Tehnică, București, 1985
37. MARINESCU, N.I., Ș.A., Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini, vol. II, Editura Tehnică, București, 1993
38. MEDVEDEV, G., Aspetti non convenzionali della pastificazione – non conventional aspects of pasta making, În rev. Tecnica molitoria, noi. 1997
39. MICȘA, I., Tehnologia construcției de mașini, vol. I, Curs, Litografia Universității Tehnice Timișoara, 1981
40. MICȘA, I., Tehnologia construcției de mașini, vol. I, Curs, Litografia Universității Tehnice Timișoara, 1985
41. MORARU, C., Ș.A., Metode de analiză la cereale, făinuri și produse derivate. Principii de reologie și reometria aluatului, vol. III, Universitatea din Galați, 1983
42. NANU, A., Tehnologia materialelor, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
43. NICHICI, AL., ACHIMESCU, N., POPOVICI, V., POPA, H., NICA, M., PAULESCU, GH., Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini, Editura Facla, Timișoara, 1983
44. NICHICI, AL., CICALĂ, E., MEE, R., Prelucrarea datelor experimentale, Curs și aplicații, Centrul de multiplicare a Universității „Politehnica” Timișoara, 1996
45. NICOARĂ, IRINA, NICOARĂ, D., Criistale artificiale, Editura Mirton, Timișoara, 1999

46. NICULESCU, N., Producerea modernă a alimentelor făinoase, Editura Ceres, București, 1980
47. NOBILE, SIMON, Venezuela segundo consumidor mundial de pastas, în Un Mondo di Pasta, Chiriotti Editori, Italia, 1996
48. PAVAN, G., Tendenze del mercato della pasta e possibili risposte tecnologiche – Pasta: processing trends and possible technological answers. În Un Mondo di Pasta, Chiriotti Editori, Pinerolo – Italia, 1996
49. POPESCU, I., Optimizarea procesului de așchiere, Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1987
50. POPESCU – PETRIȘ, V., SOCOLIUC, S., Materiale sintetice fluorurate, copolimeri ai tetrafluoretilenei, Editura Tehnică, București, 1994
51. POPOVICI, GH., Optimizarea tehnologiei de așchiere criogenică, Referat nr. 3, Catedra TCM, Facultatea de Mecanică, Universitatea Tehnică Timișoara, 1994
52. POPOVICI, GH., Optimizarea prelucrării prin strunjire a oțelurilor inoxidabile austenitice în condiții de răcire criogenică, Teză de doctorat, Conducător științific: prof.dr.ing. Micșa Ioan, Universitatea Tehnică Timișoara, 1995
53. POPOVICI, V., TRAȘCĂ, T.I., Unkonventionelle Matrizen fuer die Extrusion der Teigwaren (II), Tehnologii neconvenționale. Prezent și perspective, Editura Augusta, Timișoara, 2001
54. RONCA, FRANCESCA, L'attivitã promozionale a favore della pasta alimentare in Italia, în Un Mondo di Pasta, Chiriotti Editori, Italia, 1996

55. SEILER, W., New dough preparation process technology for pasta production: Polymatik, În Un Mondo di Pasta, Chiriotti Editori, Pinerolo – Italia, 1996
56. SKINNER, C., MICKEY, C., Promotion della pasta. Introduction, în Un Mondo di Pasta, Chiriotti Editori, Italia, 1996
57. TACHE, V., Ș.A., Dispozitive pentru mașini – unelte. Proiectarea schemelor de orientare și fixare a semifabricatelor, Editura tehnică, București, 1989
58. TALOI, D., Optimizarea proceselor tehnologice. Aplicații în metalurgie, Editura Academiei, București, 1987
59. TAN, J., GAO, X., HSIEH, F., Extrudate characterization by image processing, Journal of Food science, Vol. 59, Nr. 6, 1994
60. TRAȘCĂ, T.I., Logistica pregătirii proceselor de fabricație a matrițelor de extrudat paste făinoase din industria alimentară, Cercetări științifice. Procese și tehnologii agroalimentare III, Editura Agroprint, Timișoara, 1997
61. TRAȘCĂ, T.I., CLENCIU, MIOARA OLIVIA, Considerații privind elaborarea unui model generalizat pentru procesul tehnologic de fabricare prin extrudare a pastelor făinoase, Sisteme integrate pentru producția agroalimentară SIPA ,98, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1998
62. TRAȘCĂ, T.I., BOTEA, T., Considerații asupra unor noi posibilități de realizare a matrițelor de extrudat paste făinoase prin tehnologii neconvenționale, Lucrările simpozionului „Științe, procese și tehnologii agroalimentare”, Zilele Academice Timișene, VI, Editura Mirton, Timișoara, 1999

63. **TRAȘCĂ, T.I., BOTEA, T.,** Considerații asupra posibilităților de realizare a diametrelor largi pentru miezurile din cadrul matrițelor de extrudat paste făinoase, *Lucrările simpozionului „Științe, procese și tehnologii agroalimentare”, Zilele Academice Timișene, VI, Editura Mirton, Timișoara, 1999*
64. **TRAȘCĂ, T.I.,** Stadiul actual și perspective ale proceselor tehnologice de fabricație a matrițelor de extrudat paste făinoase, *Referat 1, Facultatea de Mecanică, Universitatea „Politehnica” Timișoara, 1999*
65. **TRAȘCĂ, T.I.,** Considerații asupra proceselor de fabricație a pastelor făinoase. I. Istoric și stadiu actual internațional, *Lucrările simpozionului „Științe, procese și tehnologii agroalimentare”, VI, Editura Mirton, Timișoara, 2000*
66. **TRAȘCĂ, T.I.,** Considerații asupra proceselor de fabricație a pastelor făinoase. II. Materiale și tehnologii utilizate la fabricarea matrițelor, *Lucrările simpozionului „Științe, procese și tehnologii agroalimentare”, VI, Editura Mirton, Timișoara, 2000*
67. **TRAȘCĂ, T.I.,** Noi posibilități de extrudare a pastelor făinoase prin matrițe neconvenționale, *Lucrările simpozionului „Științe, procese și tehnologii agroalimentare”, Zilele Academice Timișene, VII, Editura Eurostampa, Timișoara, 2001*
68. **TRAȘCĂ, T.I., POPOVICI, V.,** Unkonventionelle Matrizen fuer die Extrusion der Teigwaren (I), *Tehnologii neconvenționale. Prezent și perspective, Editura Augusta, Timișoara, 2001*
69. **TRUȘCULESCU, M., IEREMIA, A.,** Oțeluri inoxidabile și refractare. *Editura facla, Timișoara, 1983*
70. **TUDOR, A.,** Contactul real al suprafețelor de frecare, *Editura Academiei Române, București, 1990*

71. ȚUCU, D., Contribuții la optimizarea tehnologiei de fabricație a tuburilor flexibile, Teză de doctorat, Conducător științific prof.dr.doc.șt.ing. Nanu Aurel, Universitatea Tehnică Timișoara, 1995
72. ȚUCU, D., TRAȘCĂ, T.I., Asupra unui sistem generalizat de acțiune tehnologică în procesul de lucru al matrițelor de la extruderea pentru paste făinoase, Buletin științific vol. IV. Tehnologii alimentare. Utilaj tehnologic alimentar, Lucrările sesiunii Altexim – I, Editura Universității „Lucian Blaga” Sibiu, 1998
73. ȚUCU, D., TRAȘCĂ, T.I., Contribuții privind elaborarea unui model intrări – ieșiri generalizat pentru procesul tehnologic de fabricație a matrițelor de la extruderea pentru paste făinoase, Buletin științific vol. IV. Tehnologii alimentare. Utilaj tehnologic alimentar, Lucrările sesiunii Altexim – I, Editura Universității „Lucian Blaga” Sibiu, 1998
74. VELA, I., Construcția și exploatarea dispozitivelor, Îndrumător de proiect, Litografia Universității „Eftimie Murgu” Reșița, 1991
75. VOICULESCU, IOANA, Considerații asupra discurilor diamantate utilizate la debitarea safirelor și rubinelor sintetice, Lucrările Conferinței Naționale de Mecanică Fină, 1994
76. VOICULESCU, IOANA, Contribuții privind optimizarea tehnologiei de prelucrare cu fascicul laser a monocristalelor din safire și rubine sintetice, Teză de doctorat, Conducător științific: prof.dr.ing. Popovici Vasile, Universitatea „Politehnica” Timișoara, 1997
77. WHORLOW, R.W., Rheological Techniques, second edition, Ellis Horwood Series in Physics and its Applications, London, 1992
78. * * * , La storia della pasta sulle figurine Liebig – Pasta history of Liebig picture – card, În rev. Tecnica molitoria, oct. 1997

79. * * * , Manual de strunjire și frezare, firma SANFVIK – Coromant, 1994
80. * * * , Prospectul tehnic al firmei Braibanti, 1998
81. * * * , Prospectul tehnic al firmei Capitanio, 1998
82. * * * , Prospectul tehnic al firmei Landucci, 1998
83. * * * , STATGRAPHICS, Reference Manual, Manustinc, 1992

DICȚIONAR DE ACRONIME ȘI NOTAȚII

U.N.I.P.I.	– Unione Industriali Pastai Italiani
CONI	– Comitetului Olimpic Național Italian
AVEPASTAS	– Asociación Venezolana de Pastas
NPA	– National Pasta Association
PTFE	– politetrafluoretilenă (Teflon)
PMMA	– polimetilmetacrilat
CAD-CAM	– Computer Analysis Design – Computer Analysis Manufacturer
EFG	– Edge – defined Film – fed Growth
f	– coeficient de frecare
HV	– duritate Vickers
F_d	– forța de deformare
R_d	– reacțiunea din scula deformantă
F_f	– forța de frecare
T_i	– tensorii tensiunilor
E_d	– energia de deformare
E_f	– energia disipată prin frecare
E_c	– energia cinetică
E_a	– alte forme de energie
Q	– productivitatea prelucrării
C_i	– costurile indirecte specifice pe produs
C_d	– costurile directe pe produs
P_{ut}	– proprietățile de utilizare ale produsului
N_{intr}	– numărul variabilelor de intrare
N_{ies}	– numărul variabilelor de ieșire (stare)

- N_r – numărul variabilelor de reglare (corecție)
- N_{tot} – numărul total de variabile
- H_s – entropia unui sistem
- $p(S_i)$ – probabilitatea estimată de apariție a stării structurale S_i a unui sistemului
- I – organizare absolută a unui sistem
- L – căldura latentă de solidificare
- R – viteza de înaintare a frontului de cristalizare
- v – viteza de tragere a monocristalului
- S – aria frontului de cristalizare
- r – raza monocristalului; raza capilarului
- ρ – densitatea masică a monocristalului; densitatea topiturii
- α – coeficientul de schimb de căldură între sold și gaz
- S' – suprafața laterală a monocristalului
- ΔT – variația de temperatură în stratul limită
- ε – factorul de înnegrire a monocristalului; deformația liniară
- σ – constanta Stefan – Boltzmann; tensiunea normală
- T – temperatura monocristalului
- γ – coeficientul de tensiune superficială a topiturii;
- θ – unghiul de contact dintre menisc și suprafața generatorului de formă
- g – accelerația gravitațională
- Q_a – cantitatea de apă care se adaugă la frământare
- F – cantitatea de făină prelucrată
- U – umiditatea aluatului
- u – umiditatea făinii
- t – temperatura aluatului

- A – cantitatea apă; constantă asociată cu legea de putere a fluidului
- B – cantitatea de aluat; constantă asociată cu legea de putere a fluidului
- t_f – temperatura făinii
- t_a – temperatura apei
- c_f – căldura specifică a făinii
- c – căldura specifică a aluatului
- Q_1 – sporul de căldură pe seama hidratării făinii
- Q_2 – sporul de căldură pe seama transformării energiei mecanice după scăderea pierderilor de căldură prin evaporare și cedare
- E – modulul de elasticitate
- η – coeficient de vâscozitate
- η_{pl} – vâscozitatea plastică a aluatului
- τ – tensiunea de deformație
- τ_T – tensiunea limită de deformație
- a, b – coeficienți ce depind de viteza de deformație
- p – presiunea
- $\dot{\gamma}$ – rata aparentă tangențială
- $\dot{\epsilon}$ – rata aparentă longitudinală
- m – coeficientul comportării curgerii în curgerea transversală
- n – coeficientul comportării curgerii în curgerea longitudinală
- ΔP_{int} – căderea presiunii de intrare
- $P_{t,int}$ – componenta tangențială a căderii presiunii de intrare
- $P_{l,int}$ – componenta longitudinală a căderii presiunii de intrare
- α – semiunghiul de intrare în orificiul canalului de extrudare din matriță

- R_1 – raza matriței
 R_0 – raza orificiului de ieșire din matriță
 X – variabila controlabilă
 Z – variabila necontrolabilă
 Y – funcția obiectiv
 x – factor de influență controlabil
 z – factor de influență necontrolabil, aleator
 β – coeficient de influență
 k – numărul factorilor de influență
 q – numărul funcțiilor obiectiv
 N – volumul programului factorial central – compus
 N_L – numărul de măsurători provenit de la modelarea liniară
 N_α – numărul de măsurări suplimentare, efectuate „în stea”, la distanța α față de centrul programului experimental
 N_0 – numărul de măsurări suplimentare, efectuate în centrul programului experimental
 b – coeficient de regresie
 s_{conc}^2 – dispersia de concordanță
 F – testul Fisher