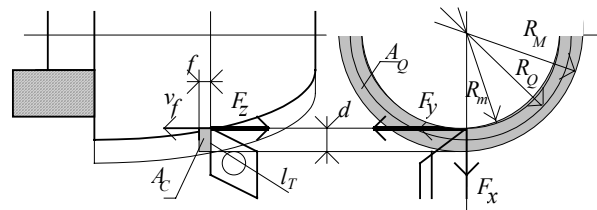


## 4.2 A forgácsolási művelet elem

Az esztergálás művelet elem szintű modelljét, amely alkalmas folyamat menedzselési döntések támogatására is, a következő alfejezetek foglalják össze.

### 4.2.1 Geometriai viszonyok

Az esztergálás geometriai viszonyait mutatja a 8. ábra.



8. ábra Az esztergálás geometriai modellje

Az esztergálási középátmérő:

$$D_Q(t) = \frac{1}{2} \cdot (D_M + D_m), \quad (3)$$

ahol  $D_m(t)$  a szerszám származtató felülete által súrolt pillanatnyi legkisebb átmérő.  $D_M(t)$  az aktuális anyaghatároknak megfelelő pillanatnyi legnagyobb átmérő, ami munkadarab-geometria függő.

A pillanatnyi fogásmélységet a szimulátor számítja:

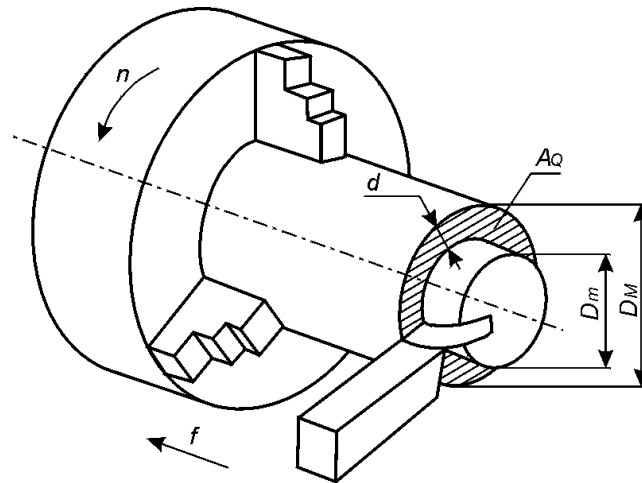
$$d(t) = \frac{1}{2} \cdot (D_M - D_m). \quad (4)$$

Az elemi anyagleválasztási térfogat számítása érdekében bevezetem a *forgácsolás hatáskeresztmetszetének* fogalmát. A forgácsolás hatáskeresztmetszete dinamikus, időben változó geometriai entitás. Definíciója a következő:

Forgácsolásnál a szerszám származtató felülete által meghatározott szerszámtest a szerszám pályán halad. A szerszámtestet a pillanatnyi előtolás irányára merőleges síkra vetítve, az fedésbe hozható a munkadarab aktuális anyagi kiterjedését jellemző ugyanezen síkbeli alakzattal. A két alakzat közös metszete a pillanatnyi forgácsolási hatáskeresztmetszet.

A forgácsolási hatáskeresztmetszet absztrakt állapotjelző. A szerszám származtató felülete és a szerszámtest fogalmát felhasználva kiküszöböli az anyagleválasztási folyamat egy főorsó fordulaton belüli változásait. Ez azért fontos,

mert így módon a hatáskeresztmetszet tetszőleges sokélű forgácsoló szerszám esetén is jól használható.



9. ábra A forgácsolás hatáskeresztmetszete

Esztergálásnál a pillanatnyi hatás-keresztmetszet:

$$A_Q(t) = D_Q \pi d = \frac{\pi}{4} \cdot (D_M^2 - D_m^2) \quad [\text{mm}^2]. \quad (5)$$

A pillanatnyi hatáskeresztmetszet jelentősége abban áll, hogy teljesen általánosan:

$$Q(t) = A_Q(t) \cdot v_f(t) \quad [\text{cm}^3/\text{min}]. \quad (6)$$

Meg kell jegyezni, hogy a fenti összefüggés szigorúan csak akkor igaz, ha a hatáskeresztmetszet minden pontja ugyanazzal a  $v_f$  előtoló sebességgel halad. Pályavezérlésnél ez általában nem teljesül, ha szerszám-pálya tér- vagy síkgörbe. A mai NC forgácsolási gyakorlatban a fősíkbeli körpálya (körinterpoláció) programozása gyakori. Ilyenkor a hatáskeresztmetszet különböző pontjai különböző előtoló sebességgel haladnak. Ebben az esetben:

$$Q(t) = A_Q(t) \cdot v_{sf}(t), \quad (7)$$

ahol  $v_{sf}$  a hatáskeresztmetszet statikai középpontjának előtoló sebessége.

Esztergálásnál a pillanatnyi főorsó fordulatra eső előtolás:

$$f(t) = \frac{v_f}{n} \quad [\text{mm}/\text{fordulat}]. \quad (8)$$

A pillanatnyi forgácskeresztmetszet:

$$A_c(t) = d(t) \cdot f(t) \quad [\text{mm}^2]. \quad (9)$$

A pillanatnyi (az él mentén átlagos) forgácsvastagság:

$$h_c(t) = \frac{A_c}{l_T} \text{ [mm]}, \quad (10)$$

ahol  $l_T(t)$  a pillanatnyi, fogásban lévő szerszám élhossz, ami szerszámgeometria függő.

#### 4.2.2 Kinematikai viszonyok

A pillanatnyi közepes forgácsolási sebesség:

$$v(t) = D_Q(t) \cdot \pi \cdot n \text{ [mm/min]}, \quad (11)$$

ahol  $n$  [fordulat/min] a pillanatnyi főorsó fordulatszám.

A pillanatnyi előtoló sebesség:

$$v_f = n \cdot f \text{ [mm/min]}, \quad (12)$$

ahol  $f$  [mm/fordulat] a fordulatonkénti előtolás.

#### 4.2.3 Dinamikai viszonyok

A fő forgácsoló erő:

$$F_y(t) = k_q \cdot A_c(t) \text{ [N]}. \quad (13)$$

Itt  $k_q$  a fajlagos forgácsoló erő, ami a forgácsvastagságtól és a szerszámanyagtól függ.

Az ipari gyakorlatban az empirikus képletek igen gyakran használatosak:

$$F_y(t) = C_F \cdot f^{y_F} \cdot d^{y_d} \cdot \prod_i K_i \text{ [N]}. \quad (14)$$

Itt  $C_F$  a szerszámanyagtól és geometriától függő erőállandó,  $K_i$  korrekciós tényezők, a hűtés, a nyersdarab, a befogás minőségének leírására.

A pillanatnyi előtolás irányú erő szerszámanyag- és geometria függő:

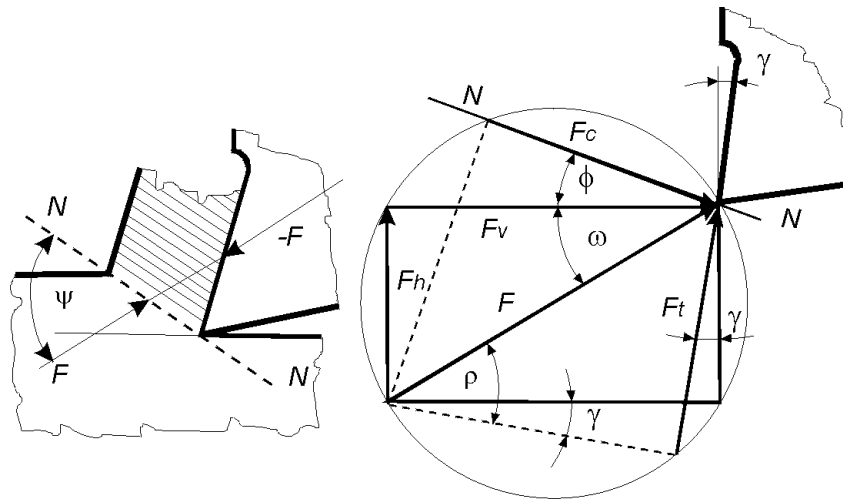
$$F_x = \lambda_x (\text{szerszám jellemzők}) \cdot F_y \text{ [N]}. \quad (15)$$

Hasonlóan a pillanatnyi fogásvétel irányú erő:

$$F_z = \lambda_z (\text{szerszám jellemzők}) \cdot F_y \text{ [N]}, \quad (16)$$

ahol  $\lambda_x$  és  $\lambda_z$  tapasztalati paraméterek és a szerszám illetve a forgácsolás geometriai viszonyától függenek.

A forgácsoló erő komponensek és a forgácsolás nyírási szögének klasszikus kapcsolatát a 10. ábra szemlélteti. A ma használatos nagy szilárdságú szerszámanyagok esetében általában a főforgácsoló erőkomponens szerepe döntő.



10. ábra a) Az erők egyensúlyi vázlat a) b) Az erőfelbontás vázlat a) [3]

A fogácsoló nyomaték:

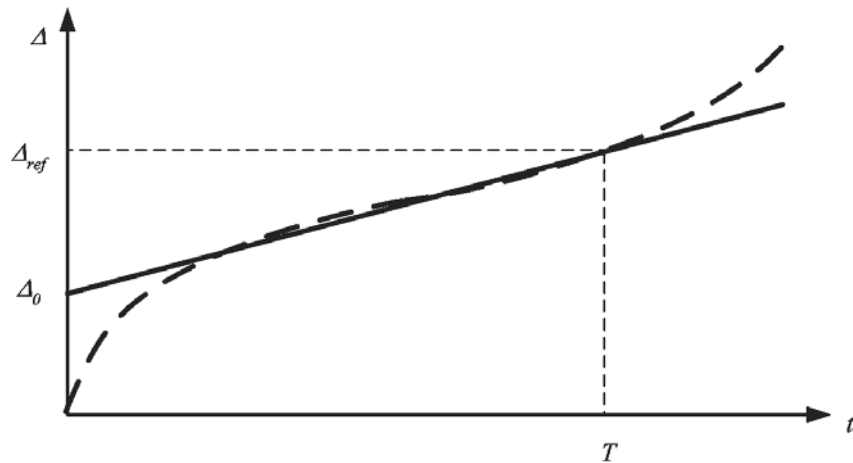
$$M(t) = \frac{1}{2} D_Q \cdot F_y \cdot 10^{-3} \text{ [Nm]}, \quad (17)$$

és a teljesítmény:

$$P(t) = M \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n \text{ [Nm/s]}. \quad (18)$$

#### 4.2.4 Technológiai viszonyok

A technológiai viszonyok modellezésére analitikai modellt készíteni nem érdemes. A mechanikai alakváltozások, a súrlódások részletei ésszerű méretű modellekkel általánosan nem követhetők. Erre a célra csak empiria áll rendelkezésre. A legfontosabb technológiai állapotjelző a szerszám éltartama. Stacionárius forgácsolás esetén modellezésre a Taylor egyenlet (26) a legalkalmasabb, ha a forgácsolási adatok bizonyos határok között vannak. Nem stacionárius forgácsolás esetén a kísérleti tapasztalatok szerint egy terhelésfüggő lineáris modell is használható. Ez a modell a szerszámnyagtól és a terheléstől függő kopási sebességet ( $v_\Delta$ ) használja állapotjelzőként. A szerszám terhelés jellemzésére a bevonatos lapkánál a (19) egyenlettel leírható absztrakt „terhelés” fogalom használható.



11. ábra A szerszámkopás-görbe linearizációja

Definiáljunk egy a szerszám terhelésére jellemző állapotváltozót a következő formulával:

$$L_T = (d^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot v)^q . \quad (19)$$

Az összefüggésben a kitevők a Taylor egyenlet ismert kitevői:

$$q = 1/m \approx 4, \quad x_v \approx 1, \quad y_v \approx 0,75 . \quad (20)$$

A szerszám hátlap kopásának sebessége széles tartományban:

$$v_\Delta = k_\Delta (\text{szerszám anyag}) \cdot L_T \quad [\text{mm/min}], \quad (21)$$

ahol:

$$k_\Delta = \frac{\Delta_{ref}}{C_v^q} . \quad (22)$$

Itt  $C_v$  a Taylor egyenlet munkadarab és szerszám anyagtól függő konstansa,  $\Delta_{ref}$  a megengedett hátlapkopás.

Ezek segítségével a halmozódó kopás változó  $v_\Delta(t)$  esetén is számható:

$$\Delta(t) = \Delta_0 + \int_0^t v_\Delta(t) dt . \quad (23)$$

Ha a megengedett hátlapkopást ( $\Delta_{ref}$ ) előírjuk, mint a szerszám éltartam kritériumát, akkor ezt relatív skálán is mérhetjük:

$$\delta(t) = \frac{\Delta(t)}{\Delta_{ref}}, \quad 0 \leq \delta \leq 1, \quad (24)$$

és a szerszám elhasználódott, ha  $\delta = 1$ .

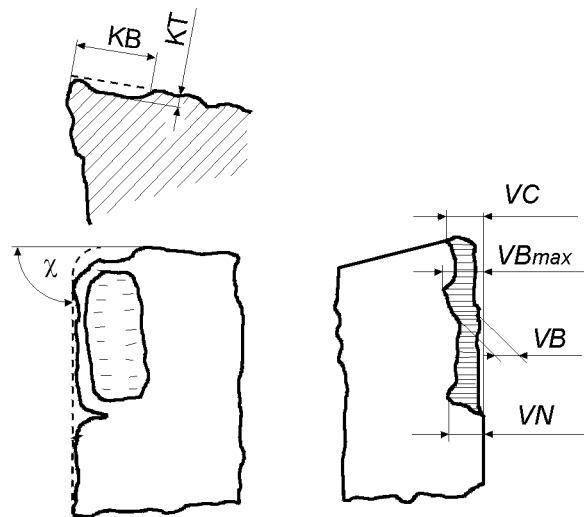
Stacionárius forgácsolás esetén  $v_\Delta = \text{constans}$ , és ha  $\Delta_o \approx 0$ , akkor

$$\Delta_{ref} = \int_0^T v_\Delta(t) dt = v_\Delta \cdot T = k_\Delta \cdot L_T \cdot T = \Delta_{ref} \cdot \frac{(d^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot v)^q}{C_v^q} \cdot T \quad (25)$$

Innen tehát stacionárius esetben az ismert Taylor összefüggést kapjuk:

$$T^m = \frac{C_v}{d^{x_v} f^{y_v} v} \quad (26)$$

Ez a modell statisztikus modellezésre is alkalmas, ha  $k_\Delta$ -t valószínűségi változóként modellezzük exponenciális (vagy más) eloszlással.



12. ábra Esztergakés kopásformák [2]

A technológiai viszonyok modellezésére szolgál az öngerjesztett rezgési hajlam becslése. Az öngerjesztéses állapot a munkadarab és a szerszámgeometria mellett a gép-befogó-munkadarab-szerszám rugalmas mechanikai rendszer tulajdonságaitól is függ. Itt a modellezés számára három út járható:

- Mérési adatok alapján szimulációs időben működő dinamikai modell felépítése.
- Stabilitási kártya leképzése a modellbe.
- Neurális háló használata a hajlam becslésére.

A szimulációs feladatra ez utóbbi tűnik a legalkalmasabbnak.

A felhasznált forgácsolási energia a forgácsoló erő modellje segítségével:

$$E_c(s) = \int_0^{t_c} P(t) dt . \quad (27)$$

A forgácsolással eltöltött idő:

$$t_c = \int_0^s \frac{ds}{v_f(ds)} , \quad (28)$$

ahol  $d_s$  a szerszám pálya elemi ívhossza.

A várható közepes felületi érdesség ( $\bar{R}_a$ ), a várható átlagos méretpontosság ( $\bar{\delta}_m$ ), várható átlagos alakhúság ( $\bar{\delta}_a$ ) illetve a várható selejtarány ( $p_s$ ) modellezése nagyon nehéz. A kiterjesztett szimulátor koncepciójánál mesterséges intelligencia módszerek alkalmazását választottuk a modellezéshez. Így létező gépek esetén, mérések mintái alapján, neurális háló betanításával van esély ezeknek a változóknak a becslésére.

Ha korrekt adatfelvétellel a fenti változók mért értékeit a hozzátartozó NC program geometriai és technológiai adataival összevetjük, olyan mintához jutunk, amely alkalmas neurális háló betanítására. Erre a kérdésre a későbbiekben még visszatérünk.

### 4.3 Az esztergálási művelet műszaki-gazdasági modellje

#### 4.3.1 A folyamat minősítési lehetőségei

Az esztergálási folyamat értékeléséhez nélkülözhetetlenek a műszaki-gazdasági állapotjelzők, és ezek integrált, vagy átlagos értékei.

Az integrált, vagy más néven aggregált állapotjelzők:

$$K_i = \int_0^T F_i(x_1, \dots, x_n) dt \quad (29)$$

alakúak, ahol az  $x_1, \dots, x_n$  állapotjelzőket a szimulátor folyamatosan számítja. Az átlagos állapotjelzők:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) dt \quad (30)$$

alakúak. Fontosak lehetnek az állapotjelzőknek a művelet ideje alatt felvett maximális (esetleg minimális) értékei is:

$$x_{i \max} = \text{Max}_{t=0 \rightarrow T}(x_i(t)) . \quad (31)$$

A technológiai alternatívák összehasonlítása és kiértékelése bizonyos *menedzsment indexek* ismeretét követeli meg. Ilyenek például:

- műveleti költség és idő,
- felhasznált szerszámok listája, mennyisége, költsége,
- gép típusa (a posztprocesszor nevének megadásával), leterheltsége,
- forgácsolási nyomaték, teljesítmény,
- felhasznált energia,
- elért felületi érdesség, méretpontosság, selejtarány.

Ezeket az indexeket, amelyek vagy integrált vagy átlagos állapotjelzők, a szimulátor viszonylag pontosan számítani tudja numerikus integrálással.

#### 4.3.2 Az intenzitás jelentősége

A technológia intenzitás fogalmát az irodalom egyre szélesebb körben használja. Az erre alapozott éltartam számítások *Raviani* és *Tipnis* munkáiból ismertek. Költség és/vagy műveleti idő optimalásra Tóth Tibor dolgozott ki új módszert [59]. Vizsgálataiból kiderült, hogy egy célszerűen megválasztott új változó, nevezetesen az *egységnyi idő alatt leválasztott anyagterfogat* az optimalási feladatot áttekinthetőbbé és könnyebben kezelhetővé teszi. A bevezetett módszer egyúttal a robusztus technológiai tervezést is támogatja, hiszen az előidejű tervezés során az egyes forgácsolási paramétereket nem rögzíti le, azok bizonyos korlátok között rugalmasan származtathatók az optimális intenzitásból.

További előnye a módszernek, hogy csoporttechnológia alkalmazásakor az optimális intenzitást elegendő a vezérdarabra meghatározni, a számított intenzitás az egész csoportra érvényes.

#### 4.3.3 Az intenzitás kiterjesztett értelmezése esztergálásnál

*Definíció:* Nagyoló forgácsolási műveletek esetén a technológiai folyamatot a forgácsolás intenzitásával jellemezhetjük, amely a pillanatnyi forgácsolási hatáskeresztmetszet és a hozzátartozó statikai középpont előtolási sebességének szorzata.

Ezt a definíciót a forgácsolási intenzitás kiterjesztésének tekinthetjük, amely nem csupán esztergálásra érvényes. A Tóth Tibor és munkatársai által kidolgozott módszer [59] a fogásmélység kvázi-optimális értéket heurisztikusan rögzíti. A hatáskeresztmetszetre alapozott definíció bonyolult ráhagyás alakzat esetén is érvényes.

Ezek alapján:

$$Q = A_Q \cdot v_f \text{ [cm}^3\text{/min]}. \quad (32)$$

Esztergálás esetén az összefüggés a következőképpen alakul:

$$Q = A_Q \cdot v_f = D_Q \cdot \pi \cdot d \cdot v_f = D_Q \cdot \pi \cdot d \cdot n \cdot f = v \cdot f \cdot d = A_c \cdot v. \quad (33)$$

Az intenzitás tehát mind a hatáskeresztmetszet, mind a forgácskeresztmetszet, mind a három klasszikus forgácsolási paraméter pillanatnyi értékei alapján számítható.

Az intenzitás hatáskeresztmetszet alapú értelmezése többélű szerszámmal végzett forgácsleválasztásnál (például marás) nagy jelentőségű. Ebben az esetben forgácskeresztmetszet alapú megközelítésnél a pillanatnyi leválasztott anyagterefogat a foganként leválasztott térfogatok összegeként adódik. Figyelembe véve azt a tényt, hogy ezekben az esetekben a forgácskeresztmetszet is bonyolult alakú, így szimulációs számításokhoz a bevezetett formula előnyösebben alkalmazható.

#### 4.3.4 Optimális forgácsolás

Az optimális forgácsolási paraméterek meghatározása klasszikus probléma. A feladat matematikai modelljét [57] a következőképpen fogalmazza meg:

$$U = \{u_i\}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (34)$$

$$S = \{s_j(\mathbf{u})\}, \quad j = 1, \dots, J; \quad \mathbf{u} \subset U, \quad (35)$$

$$C = \{c_k(\mathbf{u}, \mathbf{s})\}, \quad k = 1, \dots, K; \quad \mathbf{s} \subset S, \quad (36)$$

$$E = \{e_j(\mathbf{u})\}, \quad (37)$$

$$\Phi = \{\phi_m(\mathbf{u}, \mathbf{s})\}, \quad m = 1, \dots, M, \quad (38)$$

ahol:

$U$  – a technológiai paraméterek halmaza,

$S$  – az állapotváltozók halmaza,

$C$  – a termelési célfüggvények halmaza,

$E$  – az állapotegyenletek halmaza,

$\Phi$  – a korlátozó relációk halmaza.

A probléma megoldására számos módszert javasoltak. Különösen figyelemre méltó a Tóth Tibor, Detzky Iván és Erdélyi Ferenc által javasolt megoldás [59], ami technológiai intenzitás optimalására vezeti vissza a feladatot. A módszer a hatáskeresztmetszet alapú intenzitás megközelítéssel kiegészítve szimulációs feladatokra alkalmas, ugyanakkor támogatja a robusztus gyártást.