

ÚJ MÓDSZEREK DISZKRÉT TECHNOLÓGIAI FOLYAMATOK SZÁMÍTÓGÉPES TERVEZÉSÉBEN

NEW METHODS FOR COMPUTER AIDED PLANNING OF DISCRETE TECHNOLOGY PROCESSES

Tóth Tibor*

ABSTRACT

Computer Aided Process Planning (CAPP) is of growing importance, because it has central place and role between Computer Aided Design (CAD), Production Planning and Scheduling (PPS) and Computer Aided Manufacturing (CAM). The paper gives a brief summary about the historical background of CAPP developments and outlines the new trends too. Having summarized the traditional structure of CAPP systems, the paper proposes a new structure consisting of 3x3 subsystems for CAPP which gives a promising possibility for a well-established distribution of engineering knowledge and for solving optimization tasks at any hierarchy levels. The paper also emphasizes that the material removal rate (MRR) as a new variable is very advantageous from the point of view of optimization.

A diszkrét technológiai folyamatok számítógépes tervezése (CAPP) növekvő jelentőségű, mivel központi szerepe van a számítógépes konstrukciós tervezés (CAD), a termelés-tervezés- és ütemezés (PPS), valamint a számítógéppel segített gyártás (CAM) CIM rendszerbe való integrálásában. A cikk tömör összefoglalást ad a CAPP fejlesztések történelmi háttéréről és az új trendeket is körvonalazza. A CAPP rendszerek hagyományos struktúrájának ismertetését követően a cikk egy 3x3 alrendszerből felépülő új struktúrát javasol, amely lehetőséget nyújt a mérnöki tudásnak és az optimalizálási feladatoknak az egyes hierarchiai szintekhez való célszerű hozzárendeléséhez. A cikk hangsúlyozza az anyagleválasztási intenzitás (material removal rate, MRR) előnyeit a technológiai folyamatok optimalizálása szempontjából.

1. BEVEZETÉS

A gyártmánytervezés és a gyártás a termékfejlesztési folyamat kritikus fázisa. Az összekötő láncszem a gyártmánytervezés és a gyártás között a technológiai folyamat tervezése, röviden: a folyamattervezés.

*DSc, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszék

A folyamattervezés során választják meg a szükséges gyártási folyamatokat és határozzák meg azok sorrendjét oly módon, hogy a gyártmánytervező elképzeléseit (a megtervezett alkatrészt) gazdaságosan és versenyképesen fizikai alkatrészre transzformálják. A forgácsoló megmunkálások területén a főbb folyamattervezési tevékenységek a következők: a gyártmánytervezési adatok értelmezése, a megmunkálási műveletek, szerzőgépek, felfogó készülékek, forgácsoló szerszámok, technológiai adatok megválasztása, valamint a költség és gyártási idő számítása. Nem kétséges, hogy ez nagyon komplex feladat.

A gyártási tevékenységet folytató vállalatoknál a folyamattervezési problémák hagyományos megközelítése az, hogy megoldásukat rábizzák a gyártási szakemberekre. Ezek a szakemberek tapasztalataikat és tudásukat felhasználva adnak utasításokat a termékek gyártásához a gyártmánytervezési specifikációk és a hozzáférhető erőforrások alapján. A különböző folyamattervezők gyakran eltérő terveket javasolnak ugyanarra a problémára, ezáltal a már addig is bonyolult probléma megoldását tovább nehezítik.

A nemzetközi szakirodalom tanúsága szerint a diszkrét technológiai folyamatok tervezésének számítógépes támogatására alkalmas első átfogó rendszer tervét és a megvalósításához szükséges algoritmusok néhány lehetséges változatát a volt Szovjetunióban *V.D. Cvetkov* és munkatársai dolgozták ki az 1960-as években [1]. Az első, bár lényegesen szerényebb nyugati kezdeményezés *Niebel*-től származik [2]. Az elmúlt közel 50 évre visszatekintve megállapítható, hogy a számítógéppel segített gyártmánytervezés (CAD) és a számítógéppel segített gyártás (CAM) fejlődéséhez képest a számítógéppel segített folyamattervezés állandó lemaradásban van a gyártóipar számára nyújtott megoldások gyakorlati hasznossága, érettsége, szakmai megalapozottsága és kereskedelmi forgalmazhatósága tekintetében. Mindez azonban nem a kutatási erőfeszítések hiányából adódik. Ellenkezőleg, a kutatások és a kapcsolódó publikációk jelentős ráfordításokat és folyamatos érdeklődést tükröznek.

Általában két fő megközelítést különböztetnek meg a CAPP területén, amelyeket a variáns-módszer, illetve a generatív módszer elnevezéssel tárgyal a szakirodalom. A

variáns-módszer azt az elvet követi, hogy hasonló alkatrészek hasonló terveket igényelnek. A módszer alapváltozata szerint egy technológus szakember a megfelelő osztályba (csoportba, típusba) sorolja az alkatrészt, megadja az alkatrész bemenő adatait, visszakeres az adatbázisból egy hasonló folyamattervet és végrehajtja a szükséges módosításokat. Ez a megközelítési mód olyan vállalatok igényeihez illeszkedik, amelyek stabil gyártási folyamatokkal és kis változatosságú termékkálával rendelkeznek. Előnye a kényelmes kezelhetőség, hátrányai: a manuális input nagy mennyiségű adat megadását teszi szükségessé a gyártási folyamatról; a folyamatterv minősége nagymértékben a folyamattervező szakmai felkészültségétől függ; nincs lehetőség a gyártási folyamattal kapcsolatos menet közbeni számításokra. A **generatív módszer** esetében a folyamatterveket kis mértékű emberi beavatkozással hozzák létre. Az új folyamattervek generálása a döntési logika és a folyamatra vonatkozó tudás alapján megy végbe. A korábbi fejlesztések speciális leíró nyelveket és a programlogikába épített technológiai tudás elvét alkalmazták. A későbbi fejlesztések (az 1980-as évek közepe óta) a sajátosságok (features) alkalmazását helyezik a középpontba, termékmodell definiálásának igényével. A módszer szűk keresztmetszete a használható sajátosságok kinyerésének nehézségében, valamint az emberi szakértelem reprezentálásának, kezelésének és kihasználásának nehézségében van. Ez a fő oka annak, hogy mind a sajátosság-alapú technológia, mind a tudás-alapú technikák nehezen épülnek be a CAPP-kutatásokba.

Egy hatékony CAPP-rendszertől elvárható néhány fontos követelmény:

- Legyen kölcsönkapcsolatban a felette és alatta elhelyezkedő tevékenység-szintekkel, vagyis a gyártmánytervezéssel és a gyártással, oly módon, hogy a CAPP-rendszer tudja fogadni a gyártmánytervezési adatokat változatlan formában, és olyan kimenetet generáljon, amely bevihető a CAM-rendszerbe, majd később egy CNC rendszerbe;
- Legyen kiterjeszhető, adaptálható és igény szerint illeszthető egyedi vállalatokra és új folyamatokra;
- Rendelkezzen a tudás kinyerésének, ábrázolásának és kezelésének hatékony mechanizmusaival, valamint a tudás teljességének és következetességének ellenőrzésére szolgáló eszközökkel;
- Vonja be a felhasználókat a döntéshozatali folyamat bizonyos részeibe, szolgáltatson heurisztikákat, ha szükséges, és egészítse ki a rendszer képességeit;
- Rendelkezzen egy felhasználó-barát interfésszel, amely hatékony interaktív kapcsolatot tesz lehetővé a rendszer és a felhasználó között (bemeneti, kimeneti és riport funkciók, valamint az eredmények grafikus megjelenítése).

A CAPP kutatásokról és fejlesztésekről az elmúlt évtizedekben nagyszámú publikáció és néhány átfogó, elemző tanulmány jelent meg a szakirodalomban. A következőkben kiemelünk néhány, a legfontosabb eredményeket ismertető forrásmunkát, amelyek alapján képet alkothatunk a CAPP fejlődéstörténetéről.

2. A CAPP FEJLŐDÉSTÖRTÉNETE

Az első, nemzetközi visszhangot keltő CAPP rendszert 1976-ban fejlesztették ki a Computer Aided Manufacturing International (CAM-I) támogatásával [3]. Azóta, tekintettel a CAPP területén folyó intenzív kutatásokra, több, a mindenkori helyzetképet tükröző, átfogó publikáció is született.

Az egyik első áttekintő publikációt *Stuedel* jelentette meg 1984-ben [4]. A cikkben a szerző a gyártási módszerek strukturálásához alkalmas megközelítéseket és stratégiákat, valamint egy generatív típusú automatizált folyamattervező rendszerhez szükséges adatokat tárgyalja. Ez a cikk körvonalaz egy korábbi fejlesztést is egy közös geometriai leíró nyelvre vonatkozóan, amely kapcsolatot létesít az alkatrész és a folyamat között és beszámol olyan CAD/CAM rendszerekről, amelyek CAPP funkciót is magukban foglalnak. A következő évben *Eversheim* és *Schulz* publikált egy elemző áttekintést azoknak a kérdőíveknek a felhasználásával, amelyeket 1983-ban és 1984-ben a CAPP fejlesztők és végfelhasználók részére küldtek ki Európában, Észak-Amerikában és néhány ázsiai országban [5]. Az áttekintésből nyilvánvaló, hogy a CAPP fejlesztések és alkalmazások akkor viszonylag újak voltak. 1988-ban *Ham* és *Lu* publikált egy értékelést a CAPP akkori helyzetéről, és helyesen állapította meg, hogy a jövőbeni kutatás főiránya a CAPP integrálása a gyártmánytervezés és a gyártás közé, továbbá a mesterséges intelligencia-módszerek (Artificial Intelligence Technologies) használata [6]. Ezt követően alighanem *Alting* és *Zhang* adta a legjelentősebb áttekintést 1989-ben. Tanulmányukban több mint 200 publikált munkát elemeztek és 14 jól ismert CAPP rendszert értékelték [7]. 156 létező rendszert soroltak fel táblázatos formában, közöttük a magyar fejlesztésű TAUPROG-T is szerepel [8, 9, 10]. Az áttekintés rámutat a CAD és a CAPP integrálásában megmutatkozó nehézségekre, amelyek fő oka a geometriai entitások reprezentálására alkalmas közös módszerek hiánya. A szerzők javasolták az interfész kérdések erőteljesebb kutatását is, egyrészt a CAPP és CAM között, másrészt más számítógépes rendszerekkel, mint NC szerszámpálya generáló rendszer, MRP (Manufacturing Resources Planning), termelés-szimuláció. Felismerték, hogy az AI technológiákat egy hatékony folyamattervező rendszer létrehozásakor kulcsfontosságú modellezési, algoritmizálási és kommunikációs feladatokra lehet felhasználni. Ezen túlmenően kiemelték a tanulórendszer fontosságát és egy ideális megközelítésként azt jelölték meg, hogy integrálni kell az adott alkatrész előállításához szükséges összes információt egyetlen (single) adatbázisban. Ugyanabban az évben *Gouda* és *Taraman*(1989) publikált egy összefoglaló áttekintést 128 CAPP rendszerről [11]. Munkájukban 4 CAPP rendszer típust emeltek ki részletesebben, ezek: a variáns elvű, a szemi-generatív elvű, a generatív elvű és a szakértő folyamattervező rendszer.

A következő, nagy lélegzetű áttekintést a CIRP nemzetközi szervezet CAPP Working Group nevű szakcsoportja állította össze 1993-ban [12] (*ElMaraghy*, et al.). Ez az

összefoglaló cikk a CAPP fejlesztési főirányával, a CAPP ipari perspektíváival, a fejlődési trendekkel és kihívásokkal, valamint a konstrukciós tervezés, a CAPP és a termelés-tervezés integrációjával foglalkozik. Kitérnek a minőség kérdéseire és a kapcsolódó szabványosítás igényeire. Ugyanebben az évben *Eversheim* és *Schneewind* megjelentetett egy széles területet átfogó, de nagyon tömör ismertetést a CAPP valódi ipari környezetben való alkalmazhatóságáról [13]. A szélesebb körű alkalmazás elősegítése végett javasolták, hogy a jövőbeni CAPP fejlesztések terjedjenek ki a szerelés tervezésére, az NC programozással való funkcionális integrációra, az AI eszközöknek a döntéshozatalban való felhasználására és az adatbázis megosztás használatára a CAD-vel való integrációhoz. 1995-ben *Kamrani et al.* bemutattak egy áttekintést az alkalmazható CAPP technikákról és a folyamat-tervezés szerepéről [14]. A cikkben tárgyalják egy CAPP rendszer kiválasztásához és értékeléséhez kapcsolódó kritikus kérdéseket és jellemzőket is. Ezek a kérdések a következők: a termék támogatásának mértéke, osztályozás /kódolás/grafikus képességek, munkautasítás létrehozása, folyamat-tervezési megközelítési módok, időelemzési képességek, megmunkálási paraméterek, megmunkálendő anyagokra és a szerkesztésre vonatkozó adatbázis, rendszer-technikai követelmények, költségek, kereskedelmi hozzáférhetőség és felhasználóbarát képességek, a vásárló/felhasználó minősítése és támogatása.

A következő átfogó ismertetés 1996-ban készült és szerzője *Leung* [15]. A szerző referáló ismertetést adott a CAPP területén 1989 és 1996 között megjelent 200 publikációról. *Leung* megfigyelte, hogy a testmodellelés (solid modelling) nem bizonyult olyan megfelelőnek, mint azt előre jelezték, ezért kapott új erőre a variáns elvű folyamat-tervező rendszerek fejlesztése és alkalmazása. *Leung* szerint logikailag teljesen indokolt, hogy a jövőbeni folyamat-tervező rendszerek intelligens rendszer architektúrára épüljenek AI technika felhasználásával. *Leung*-ot követően jelent meg *Cay* és *Chassapis* áttekintő cikke (1997), amely az 1990 és 1997 között folytatott kutatásokról számol be [16]. Összefoglaló értékelést ad a gyártási sajátosságokról és a sajátosság-felismerő technikákról a CAPP kutatások területén. *Cay* véleménye az, hogy egy teljesen automatizált környezet nem lenne messze a realitástól, ha elérhető lenne egy hatékony integráció a konstrukciós tervezés és a gyártás között. Az utolsó általános ismertetést a CAPP-ról az 1990-es években *Marri et al.* készítették [17] (1998). Ez az áttekintés az 1989 és 1996 között megjelent fontosabb publikációkat dolgozza fel. A CAPP rendszerek előnyeit és hátrányait az összefoglaló cikk elsősorban a generatív megközelítési mód szemszögéből tárgyalja.

Az általános célú CAPP áttekintések mellett egyéb, specifikus területen is készültek ilyen jellegű munkák, például a CAD-re és a gyártási sajátosság bázisú folyamat-tervezésre (*Shah*, 1991 [18]; *Shah et al.*, 1991 [19]), a neurális háló alapú folyamat-tervezésre (*Yue et al.*, 2002 [20]), szakértőrendszer-bázisú folyamat-tervezésre (*Gupta and Ghosh* 1989 [21], *Kiritsis* 1995 [22], *Metaxiotis et al.* 2002 [23], *Liao* 2005 [24]) és a virtuá-

lis valóság bázisú folyamat-tervezésre (*Peng et al.* 2000 [25]) vonatkozóan. Még újabban, *Shen et al.* (2006 [26, 27]) publikált egy átfogó (state-of-the-art típusú) cikket az ágens-alapú, megosztott folyamat-tervezésről és ütemezésről. *Shen* és szerzőtársai a gyártási folyamat-tervezési és ütemezési problémák komplexitását vizsgálták és áttekintették a folyamat-tervezés, az ütemezés és integrációjuk szakirodalmát az ágens-alapú megközelítésekre helyezve az elemzés súlypontját. *Zhang* és *Xie* 2007-ben publikált egy elemző-értékelő cikket az ún. együttműködő (collaborative) folyamat-tervezéshez kifejlesztett ágens-alapú technológiáról. Céljuk az volt, hogy megvizsgálják az ágens-alapú folyamat-tervező rendszerek fejlesztésének kulcs-kérdéseit, beleértve az ágens- és rendszer architektúrát, a kommunikációs szabványokat és protokollokat, valamint az alkalmazásokat.

3. JELENLEGI HELYZETKÉP A CAPP-RÓL

A legújabb és talán az eddigi legátfogóbb elemzést *Xun Xu*, *Likui Wang* és *Stephen T. Newman* munkája adja, amely az újabb fejlesztéseket kritikailag vizsgálja és megkísérli a jövőbeni trendek meghatározását [29]. A szokatlanul terjedelmes, (31 oldalas) folyóiratcikk a CAPP területén publikált többszáz publikáció áttekintésével és az „Elsevier Scopus absztrakt – és idézettségi adatbázisának felhasználásával meggyőző hitelességű képet ad a legnagyobb érdeklődésre számot tartó területekről és von le következtetéseket a várható fejlesztési trendekre vonatkozóan.

A *Xu*, *Wang* és *Newman* a jelenlegi CAPP fejlesztéseket az elméleti megközelítési módszerek alapján az alábbi kategóriákba sorolja [29]:

- sajátosság-alapú technológiák (feature-based technologies);
- tudásbázisú rendszerek (knowledge-based systems);
- mesterséges neurális hálók (artificial neural networks);
- genetikus algoritmusok (genetic algorithms);
- fuzzy halmazok elmélete és fuzzy logika (fuzzy set theory and fuzzy logic);
- Petri-hálók (Petri-nets);
- ágens-alapú technológia (agent-based technology);
- Internet-alapú technológia (Internet-based technology);
- STEP-támogatású CAPP (STEP-compliant CAPP);
- speciális (egyedi) technológiák.

A cikk a felsorolt kategóriákat követve tárgyalja az alkalmazott – számos tekintetben nagyon eltérő – módszereket. Aki ma bármilyen CAPP fejlesztést elindít, aligha nélkülözheti a kiváló szerző-hármas cikkének alapos tanulmányozását.

4. ÚJ HAZAI MÓDSZEREK A CAPP TERÜLETÉN

A következőkben röviden szólnunk a CAPP szakterületén elért néhány újabb hazai eredményről. Megjegyezzük, hogy a CAPP területén Magyarországon több mint

negyven éve folynak nemzetközi szintű K+F munkák, amelyekben a jogutód nélkül megszűnt Gépipari Technológiai Intézet (GTI), a Miskolci Egyetem (ME), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) és az MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (MTA SZTAKI) jelentős eredményeket ért el. Ez a négy intézmény több évtizeden keresztül számos közös projektben dolgozott együtt és a jelenleg is működő három kutatóhely a termelésinformatika tudomány-területének részeként ma is intenzíven foglalkozik ezzel a szakterülettel. Terjedelmi okokból a [30] és [31] munkákra hivatkozunk, amelyek nagyon részletesen összefoglalják a CAPP hazai kutatásának és fejlesztésének legfontosabb eredményeit nagyszámú forrás elemző-értékelő felhasználásával.

Ebben a cikkben csak arra van mód, hogy a CAPP rendszerek más CAX rendszerekkel való integrálásáról és az ún. „intenzitás-bázisú” optimalizálásról röviden szóljunk. Mindkét részterületen, nemzetközi szinten elismert, több évtizedes kutatási-fejlesztési tapasztalattal és nagyszámú publikációval alátámasztott, sajátosan magyar megközelítésről van szó.

4.1. Egy új CAPP-struktúra CIM környezetben

Mint ismert, a számítógéppel integrált gyártás (*Computer Integrated Manufacturing*, CIM) egyike a legfontosabb termelési paradigmáknak és a múlt század hetvenes éveiben tűnt fel a szakirodalomban [31]. A CIM fókuszában az anyag- és adatfeldolgozás integrációja áll, amelyet számítógépes hálózati infra-struktúra támogat. Ez a paradigma radikális szakítást eredményezett a Taylor és Ford által lefektetett korábbi elvekkel és módszerekkel, valamint az izolált mérnöki funkciókkal. Összhangban a modern információ-elmélettel, az integrált rendszerben a mérnöki funkciók műszaki és szervezési szinten is összekapcsolódva megvalósítják az integráció *szemantikai* és *szintaktikus* szintjeit. Az integráció *szemantikai* szintje lehetővé teszi, hogy a rendszerek ugyanazokat az absztrakt információ-osztályokat használják. Az integráció megteremti a közös cél elérése érdekében az üzleti és termelési folyamatok irányításának összhangját, amely megfelel az információ *pragmatikai* szintjének.

A technológiai tervezés mai módszertana – a számítógépes támogatás mértékétől függetlenül – egységesnek mutatkozik abban, hogy a gépgyártási folyamatok tervezését hierarchiai szintek szerint tagolva, felülről-lefelé haladva kell végrehajtani. A „felülről-lefelé” egyfelől azt jelenti, hogy az összetettebb, nagyobb tervezési egységektől az egyszerűbb, kisebb egységek irányába, másfelől a kevésbé részletezett folyamatszakaszoktól az egyre részletezettebb folyamatszakaszok irányába kell haladnia a tervezésnek. A tervezési folyamatra tehát mindvégig a fokozatos megközelítés jellemző, a tervezés eredménye (outputja) ugyanakkor rendkívül eltérő lehet a tervezés tárgyától, a gyártási körülményektől, a kitzűzött céloktól és egyéb tényezőktől függően.

Nincs teljesen egységes álláspont viszont a hierarchiai szintek célszerű számát és az egyes szintekhez hozzárendelhető feladatok tartalmát illetően.

Az egyik álláspont szerint a gépgyártástechnológiai folyamatok tervezésének legfelső hierarchiai szintje a technológiai előtervezés és a további tervezési fázisok három autonóm területe: a szerelés, az előgyártmány gyártás és az alkatrészgyártás technológiai folyamatának tervezése. Az alkatrészgyártás technológiai folyamatainak tervezését – felülről-lefelé haladva a hierarchiában – ez a koncepció öt szintre tagolja:

- előtervezés
- műveleti sorrendtervezés
- művelettervezés
- műveletelemek tervezése
- utófeldolgozás (posztprocesszálás).

A technológiai folyamat előtervezése ebben a hierarchiában különleges helyet foglal el. Az összes tervezési tevékenység közül ez a legnagyobb hatókörű, amely a gyártmány szerkezet lebontása (gyártmány → szerelési egység → részegység → szerelvény → alkatrészcsoport → egyedi alkatrész) során nyert valamennyi „helyben gyártandó” alkatrész potenciális gyártási lehetőségeit és környezetét feltérképezi, ezáltal a teljes gyártás koncepcióját, stratégiáját meghatározza. Ezen a szinten két alapvető döntéssorozat hajtódik végre. Az egyik döntéssorozat a gyártás főbb szakaszai – az előgyártmány gyártás, az alkatrészgyártás és a szerelés – közötti csatlakozási felületek meghatározására, a másik a felsorolt szakaszokat megvalósító gyáregységek, üzemek, gyártósorok, gyártórendszerek kijelölésére irányul. Az előtervezés során választják meg az előgyártmányok típusait, alakítják ki az egyes alkatrészek szerelés előtti állapotjellemzőit, itt történik meg a szerelési és gyártási méretláncok meghatározása, a gyártórendszerek „előválasztása” és ezzel együtt a gyártási folyamat elvi vázlatának (eljárások, berendezések) rögzítése. Az előtervezéshez csatlakoznak a szerelés, az előgyártmánygyártás és az alkatrészgyártás konkrét környezetre és feltételekre aktualizált tervezésének legfelső szintjei.

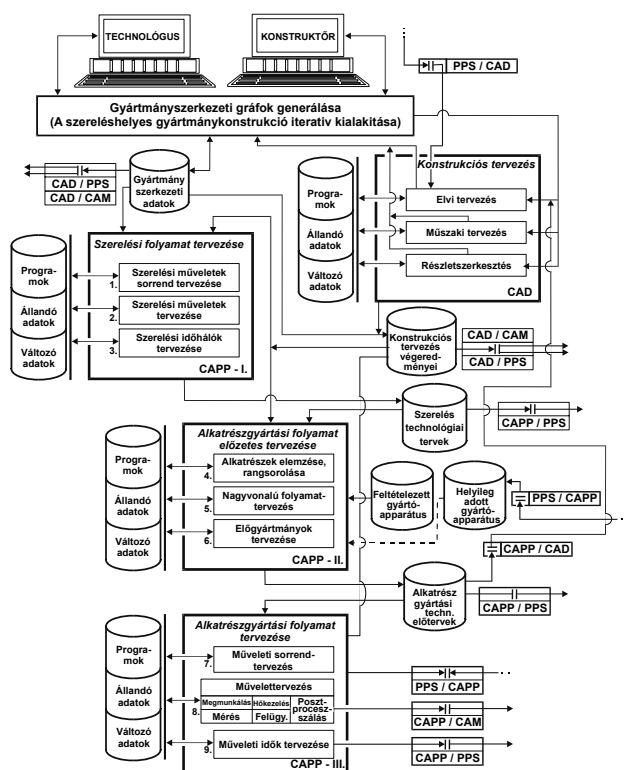
A vázolt *ötlépcsős* tervezési rendszer koncepciója – a legfelső, technológiai előtervezési szint kivételével – kiforrottnak és elméletileg jól megalapozottnak tekinthető, így a CAPP-rendszerek kifejlesztéséhez vagy utólagos elemzéséhez egyaránt jól felhasználható. A legfelső szint tartalma és a megoldandó feladatok megközelítési módja ma még több szempontból vitatott. Alapvető elvi különbség az alacsonyabb tervezési szintekhez képest egyfelől az, hogy az előtervezés nem csupán az adott termék egyetlen alkatrészére, hanem a terméknek az adott gyárban (üzemben, gyártórendszerben) gyártandó összes alkatrészére, az előgyártmányokra és a szerelésre is vonatkozik, másfelől egy magas szinten automatizált, igényes előtervező rendszernek közvetlen kapcsolatot kell teremtenie a konstrukciós tervezés, a technológiai tervezés és a termelésirányítás számítógépes rendszerei között.

Horváth Máttyás az előtervezés automatizálására olyan, vegyes felépítésű rendszert javasol [32], amelyben a variáns-, a generatív- és a vario-generatív módszerek, valamint a mesterséges intelligencia módszerei egyaránt helyet kapnának. A javaslat szerint szakértőrendszer szükséges a szerelési családfa, a szerelési vázlat és a méretlánc megoldások meghatározásához, a generatív módszer alkalmas a méretláncok elemzésére, az előgyártmányok meghatározására és az alkatrészek szerelés előtti állapotainak megtervezésére. Vario-generatív módszert ajánl a gyártórendszerek kiválasztásához, végül a variáns módszert javasolja az előgyártmányok típusának, valamint az előgyártási, alkatrészgyártási és a szerelési folyamat elvi vázlatának (a gyártási szakaszoknak és sorrendjüknek) meghatározására.

Ez a koncepció az egyes tervezési feladatokhoz elvben olyan megoldási eszközöket rendel hozzá, amelyek tervezésmetodikai szempontból jól megfelelnek azok sajátosságainak. A tényleges megvalósításhoz azonban ma még jórészt hiányoznak a feltételek, mindenképp a megfelelően általános, ugyanakkor kellően részletes gyármodellek és a szakértő rendszerek ún. meta-algoritmusai. Szerényebb átmeneti megoldásként Horváth Máttyás a variáns módszer kizárólagos alkalmazását ajánlja [32]. Ennek lényege az, hogy az aktuális alkatrészt egyszerű osztályozórendszerrel azonosítják, az ún. gyártábla segítségével ahhoz gyártórendszereket, valamint normatív költség- és időadatokat rendelnek, folyamatosan karbantartva a gyártórendszerek terhelési feltételeit és szabad kapacitásait. Az eljárás előnye a gyorsaság; az előkalkuláció és a középtávú tervezés segítése. Hátránya, hogy a megfelelő geometriai tervezés és a méretlánc elemzés hiányában nem létesít közvetlen kapcsolatot a konstrukció, a technológia és a termelésirányítás között és lényegében az alkatrészgyártás előtervezésére korlátozódik.

A technológiai előtervezésre a [32]-ben megfogalmazott elveket felhasználva és továbbfejlesztve célszerűnek látszik egy olyan, a mai üzemi gyakorlathoz jól illeszkedő rendszerfejlesztési koncepciót kidolgozni, amely az ajánlott magas teljesítőképességű, vegyes felépítésű rendszer és az alkatrészgyártásra szorítókorlátozó variánselvű rendszer, mint két határeset között helyezkedik el. Eszerint a gépgyártási folyamatok tervezését következtetési sorrendben három nagyobb fázisra tagoljuk, amelyek mindegyike célszerűen további 3-3 tevékenység-szakaszra bontható (v.ö. 1. ábra):

- I. Gyártmányszerelési folyamat tervezése
 1. Szerelési műveletek sorrendtervezése
 2. Szerelési műveletek tervezése
 3. Szerelési időháló összeállítása
- II. Alkatrészgyártás előzetes tervezése
 1. Alkatrészek elemzése, rangsorolása
 2. Nagyvonalú folyamattervezés
 3. Előgyártmányok tervezése
- III. Alkatrészgyártási folyamat tervezése
 1. Műveleti sorrendtervezés
 2. Megmunkálási műveletek tervezése
 3. Műveleti idők meghatározása.



1. ábra Kilenc-szintű, korszerű struktúrájú CAPP rendszer a legfontosabb interfészek feltüntetésével.

Az új rendszerstruktúra előnye főként a CAD/CAPP/CAM, valamint a CAPP/PPS integráció kiépítésében mutatkoznak meg [30, 31].

4.2. A technológiai paraméterek szerepe a robusztus folyamattervezésben

Az optimális technológiai paraméterek meghatározása (pl. forgácsoló megmunkálások esetén az optimális forgácsolási feltételek rögzítése) a technológiai folyamatok tervezésének egyik klasszikus, rendszeresen visszatérő feladata. Az olyan forgácsoló műveletekre, amelyeknél a leválasztott pillanatnyi forgácskeresztmetszet első közelítésben konstans (vagyis ún. *kvázistacionárius* forgácsolási folyamat esetében), az optimalizálási modell hosszú idő óta ismert és számos megoldási módszert is publikáltak.

A feladat matematikai modellje a következőképpen fogalmazható meg [30, 31]:

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

$$S = \{s_j(\mathbf{u})\}, \quad j = 1, \dots, J, \quad \mathbf{u} \subset U \quad (2)$$

$$C = \{c_k(\mathbf{u}, \mathbf{s})\}, \quad k = 1, \dots, K, \quad \mathbf{s} \subset S \quad (3)$$

$$E = \{e_j(\mathbf{u})\} \quad (4)$$

$$\Phi = \{\varphi_m(\mathbf{u}, \mathbf{s})\}, \quad m = 1, \dots, M \quad (5)$$

ahol:

U - a technológiai paraméterek halmaza,
 S - az állapotváltozók halmaza,
 C - a termelési célfüggvények halmaza,
 E - az állapotegyenletek halmaza,
 Φ - a korlátozó relációk halmaza.

A korlátozó relációkat - attól függően, hogy csak egy, vagy egyszerre több technológiai paraméterre, mint optimalizálandó független változóra vonatkoznak-e - szokás *homogén*, illetve *inhomogén* korlátfeltételeknek is nevezni. Az (5) összefüggés részletesebben így is felírható:

$$\Phi = \left\{ \begin{array}{l} u_{i,\min} \leq u_i \leq u_{i,\max}, \quad i = 1, \dots, I; H_{j,\min} \leq \\ H_j(\mathbf{u}, \mathbf{s}) \leq H_{j,\max}, \quad j = 1, \dots, J \end{array} \right\} \quad (6)$$

Az (5) halmazban az u_i -re vonatkozó egyenlőtlenségek a homogén, a $H_j(\mathbf{u}, \mathbf{s})$ -ra vonatkozó egyenlőtlenségek az inhomogén korlátfeltételeket jelentik.

Leggyakrabban az alábbi két célfüggvény egyikét használják:

$$c_1(\mathbf{u}, \mathbf{s}) \rightarrow \text{minimum} \quad (7)$$

$$c_2(\mathbf{u}, \mathbf{s}) \rightarrow \text{maximum} \quad (8)$$

ahol c_1 költség típusú, c_2 termelékenység típusú célfüggvény.

Az (1) - (8) összefüggéseket konkretizáljuk a nagyoló esztergálás esetére. Ekkor

$u_1 \Rightarrow d[\text{mm}]$ - a fogásmélység,

$u_2 \Rightarrow f[\text{mm}/\text{ford}]$ - a főorsó-fordulatonkénti előtolás,

$u_3 \Rightarrow v[\text{m}/\text{min}]$ - a forgácsolási sebesség;

Φ : a korlátfüggvények halmaza (pl. az előtolás mértékadó felső korlátja: $f \leq f_{\max}$, a megengedhető forgácsolási teljesítmény: $P(d, f, v) \leq P_{\max}$);

C : az optimalizálandó paraméterektől és az állapotváltozóktól függő célfüggvény (pl. a művelet vagy művelelem költsége vagy termelékenysége);

S : az állapotváltozók halmaza (pl. $s_1 \Rightarrow T$: a szerszám éltartama, $s_2 \Rightarrow Q$: az anyagleválasztási folyamat intenzitása),

E : az állapotegyenletek halmaza (pl. az általános Taylor-féle szerszáméltartam-egyenlet, $T = T(\mathbf{u})$;

az anyagleválasztás intenzitása, $Q = Q(\mathbf{u})$).

Az itt bemutatott általános matematikai modellstruktúra bármilyen forgácsoló megmunkálás esetén alkalmazható a konkrét modell származtatására. Amennyiben vannak olyan paraméterkombinációk, amelyek az összes korlátfeltételt kielégítik, vagyis a megoldáshalmaz nem *üres* halmaz, az optimális paraméter-értékek és a célfüggvény extrémuma numerikus és/vagy grafikus eljárásokkal meghatározható [30, 31].

Meg kell azonban jegyezni, hogy a bemutatott matematikai modell alapján meghatározott u_i paraméterek használhatósága erősen korlátozott. Ennek okai a következők:

- Nem-stacionárius forgácsolási folyamat esetében a modell nagyon bonyolulttá válhat.
- A műveletelemenként külön-külön számított lokális optimumok nem robusztusak, ellenkezőleg, rendkívül érzékenyek a változásokra. Az optimalizálási feladat matematikai modellje csak technológiai és fizikai korlátozásokat tartalmaz. Az így meghatározott adatokat - NC szerszámgépek számítógépes programozása esetén - azonnal az alkatrészprogramba posztprocesszálják. Ez az *előidejű* tervezés nem számolhat a termelési folyamat olyan eseményeivel, amelyek a termelés tényleges megvalósítása, a *valós idejű* gyártásirányítás során merülnek fel (pl. kapacitások kiesése, szerszámhiány, rendelések prioritásának megváltozása, stb.). A korszerű gyártás nem az egyes műveletelemek, nem is az összetettebb műveletek költségoptimumát, hanem a *teljes gyártási folyamat* sok esetben összetett, többkomponenses *jó-sági fokának* (performance index) optimalizálását igényli. Mai tudásunk szerint ez igen nehéz feladat. Számítógéppel integrált rendszerekben a technológiai tervezés, a termelésstervezés és a műhelyszintű termelésirányítás (*Shop Floor Control*, SFC) integrált együttműködése hozhat megoldást.

A szerzőnek Detzky Ivánnal és Erdélyi Ferencsel közösen végzett sokéves kutatómunkája, amelybe 1993-tól Rayegani Farzad is bekapcsolódott, arra vezetett, hogy az előbbieken említett integrációt egy célszerűen megválasztott új állapotváltozó, a *technológiai intenzitás* (*material removal rate (MRR)* [cm^3/min] változó) jelentősen támogathatja [30, 31]. A kutatócsoport javaslata szerint a nagyoló műveletek tervezésénél *elegendő a technológiai intenzitást optimalizálni*. Ez egyszerűbben és gyorsabban megoldható, mint a fogásmélység, előtolás és forgácsolási sebesség háromváltozós optimalizálási feladata. Fontos felismerés, hogy csoporttechnológiai módszerek alkalmazása esetén a vezéralkatrésze számított optimális intenzitás az egész csoportra érvényes. Ha az alkatrészek nyers- és készdarabját CAD-rendszerrel tervezték, a műveletekben leválasztandó anyagterfogat (V_m [cm^3/min]) számítógéppel könnyen és gyorsan számítható. Ez pedig lehetővé teszi, hogy a termelésirányítás számára legfontosabb adatok, a megmunkálási idők és költségek számíthatók legyenek. A szükséges összefüggések a következők:

$$Q = d \cdot f \cdot v \quad (9)$$

$$t_g = \frac{V_m}{Q} \quad (10)$$

$$T = \left(\frac{C_v d^{1-x_v} f^{1-y_v}}{Q} \right)^q \quad (11)$$

$$\tau = \frac{K_\Sigma}{kV_m} = \frac{1}{Q} + \frac{Q^{q-1}}{R^q} \quad (12)$$

$$R = C_s \cdot f^{1-y_v} \quad (13)$$

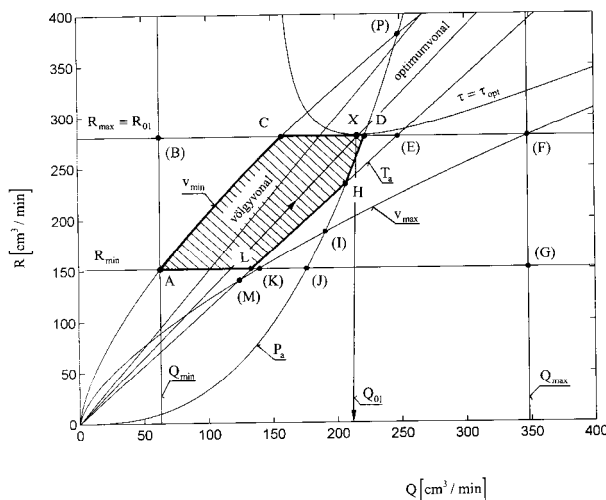
$$C_s = \frac{C_v d^{1-x_v}}{\left(\frac{K_{sb}}{kN_{\acute{e}l}} + t_{cs} \right)^m} \quad (14)$$

$$q = 1/m \quad (15)$$

ahol:

- Q - az anyagleválasztás intenzitása [cm^3/min],
- d - a fogásmélység [mm],
- f - az előtolás [mm/ford],
- v - a forgácsolási sebesség [m/min],
- t_g - a gépi főidő [min],
- V_m - a leválasztandó (működési) anyagterefogat [cm^3],
- T - a szerszám éltartama [min],
- C_v, x_v, y_v, m - empirikus kvázikonstansok, amelyek munkadarab- és szerszámél anyag párosításoként állandók,
- τ - a fajlagos anyagleválasztási idő [min/ cm^3],
- K_Σ - a művelet(-elem) összköltsége [Ft],
- k - a környezeti percköltség [Ft/min],
- $R=R(d,f)$ - egy új állapotváltozó, amely a d,f forgácsolási paraméterek monoton függvénye és dimenziója azonos a Q dimenziójával [cm^3/min],
- C_s - a szerszám komplex jellemzője egy adott anyagcsoport megmunkálásakor,
- K_{sb} - a szerszám alkalmazásával kapcsolatos teljes költség [Ft],
- $N_{\acute{e}l}$ - a szerszámlemez cserélhető éleinek száma,
- t_{cs} - az egy él cseréjéhez szükséges átlagos idő [min].

A módszer technikai részleteibe nyújt betekintést a 2. ábra. A teljes algoritmus –illusztratív példákkal – a [31] F1 Függelékében megtalálható.



2. ábra: Az optimumpont helyét R_{\max} és az optimumvonal metszéspontja jelöli ki: $X(Q_{01}, R_{\max})$.

Az ábrán zárójelbe írt betűkkel jeleztük azokat a pontokat, amelyek potenciálisan szóbajöhetnek a mindenkor keresési tartomány meghatározásakor, de a jelen esetben nem tartoznak az aktuális optimalizálási tartományhoz.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] CVETKOV, V. D. 1965. Principi avtomatizacii projektirovanija optimalnih tehnologiceszkih processzov v masinosztroenii. *Masinosztroitel'*, No.6, pp. 7-10.
- [2] NIEBEL, B. W. 1965. Mechanized process selection for planning new designs. *ASME 33rd Annual Meeting collected papers*. V65. Book 4, Paper No.737.
- [3] CAM-I: Automated Process Planning System (CAPP). 1976. Systems Manual (Version 2, Release 1), Arlington, Texas
- [4] STEUDEL, H. J. 1984. Computer-aided process planning: past, present and future. *International Journal of Production Research*, 22 (2), 253-266.
- [5] EVERSHEIM, W. and SCHULZ, J. 1985. CIRP technical reports: survey of computer aided process planning systems. *CIRP Annals*, 34 (2), 607-613.
- [6] HAM, I. and LU, S.C.-Y. 1988. Computer-aided process planning: the present and the future. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 37 (2), 663-675.
- [7] ALTING, L. and ZHANG, H. 1989. Computer aided process planning: the state-of-the-art survey. *International Journal of Production Research*, 27 (4), 553-585.
- [8] TÓTH, T. and VADÁSZ, D. 1977. TAUPROG-T: Programsystem for automatic planning of complete technological process of rotation symmetric parts. *COMPCONTROL '77. International Conference*, Proceedings of Section CAM, Warsaw, pp.194-202.
- [9] CSER, I. and TÓTH, T. 1986. Computer-aided technological process planning: methods, systems and application experiences. In: *Modelling and design of flexible manufacturing systems*, edited by Kusiak, A. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, pp.249-285.
- [10] TÓTH, T. and VADÁSZ, D. 1986. The TAUPROG system family: application experiences and new results of development. In: *Software for discrete manufacturing*, edited by CRESTIN, J. P. and McWATERS, J. F. (PRO-

- LAMAT'85, Paris), North-Holland, Amsterdam-New York-Oxford, IFIP, pp. 349-359.
- [11] GOUDA, S. and TARAMAN, K. 1989. CAPP: AAST, present and future. Technical Paper. Society of Manufacturing Engineers. MS.
- [12] ELMARAGHY, H. A. et al. 1993. Evolution and future perspectives of CAPP. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 42 (2), 739-751.
- [13] EVERSHEIM, W. and SCHNEEWIND, J. 1993. Computer-aided process planning – state of the art and future development. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 10 (1-2), 65-70.
- [14] KAMRANI, A. K., SFERRO, P. and HANDELMAN, J. 1995. Critical issues in design and evaluation of computer aided process planning systems. *Computers and Industrial Engineering*, 29 (1-4), 619-623.
- [15] LEUNG, H. C. 1996. Annotated bibliography on computer aided process planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12 (5), 309-329.
- [16] CAY, F. and CHASSAPIS, C. 1997. An IT view on perspectives of computer aided process planning research. *Computers in Industry*, 34 (3), 307-337.
- [17] MARRI, H. B., GUNASEKARAN, A. and GRIEVE, R. J. 1998. Computer-aided process planning: a state of the art. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14 (4), 261-268.
- [18] SHAH, J. J. 1991. Assessment of features technology. *Computer Aided Design*, 23 (5), 331-334.
- [19] SHAH, J., SREEVALSAN, P. and MATTHEW, A. 1991. Survey of CAD/ feature-based process planning and NC programming techniques. *Computer-Aided Engineering Journal*, 8 (1), 25-33.
- [20] YUE, Y. et al. 2002. Study on neural network techniques for computer integrated manufacturing. *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, 19 (1-2), 136-157.
- [21] GUPTA, T. and GHOSH, B. K. 1989. A survey of expert systems in manufacturing and process planning. *Computers in Industry*, 11, 195-204.
- [22] KIRITSIS, D., NEUENDOR, K. P. and XIROUCHAKIS, P. 1999. Petri net techniques for process planning cost estimation. *Advances in Engineering Software*, 30 (6), 375-387.
- [23] METAXIOTIS, K. S., ASKOUNIS, A. and PSARRAS, J. 2002. Expert systems in production planning and scheduling: a state-of-the-art survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13 (4), 253-260.
- [24] LIAO, S. H. 2005. Expert system methodologies and applications – a decade review from 1995-2004. *Expert Systems with Applications*. 28 (1), 93-103.
- [25] PENG, Q., HALL, F. R. and LISTER, P. M. 2000. Application and evaluation of VR-based CAPP system. *Journal of Materials Processing Technology*, 107 (1-3), 153-159.
- [26] SHEN, W., WANG, L. and HAO, Q. 2006. Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: a state-of-the-art survey. *Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Review, IEEE Transactions*, 36 (4), 563-577.
- [27] SHEN, W. et al. 2006. Application of agent-based systems in intelligent manufacturing: an updated review. *Advanced Engineering Informatics*, 20 (4), 415-431.
- [28] ZHANG, W. J. and XIE, S. Q. 2007. Agent technology for collaborative process planning: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32 (3-4), 315-32.
- [29] XUN XU, LIHUI WANG and STEPHEN T. NEWMAN, 2011. Computer-aided process planning – A critical review of recent development and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(1), 1-31.
- [30] TÓTH TIBOR, 2004. Termelési rendszerek és folyamatok. A termelésinformatika alapjai. Miskolci Egyetemi Kiadó, ISBN 963 661 630 2.
- [31] TÓTH TIBOR, 2006. Tervezési elvek, modellek és módszerek a számítógéppel integrált gyártásban. Miskolci Egyetemi Kiadó, ISBN 963 661 339 7 (2. kiadás).
- [32] HORVÁTH MÁTYÁS, 1984. Alkatrészgyártási folyamatok automatizált tervezése. Akadémiai doktori értekezés, MTA Budapest.