

## 11. NAGYSEBESSÉGŰ FORGÁCSOLÁS (HSC)

A **forgácsolás** a gépipari megmunkálások területén talán a **legköltségesebb tevékenység**, ugyanakkor a fejlesztésére fordított beruházás folyamatosan növekszik. Ezt a helyzetet alapvetően a gyártási igények indokolják.

### ***Nagysebességű megmunkálás (angol rövidítése HSC)***

Mit nevezünk **nagysebességű** megmunkálásnak:

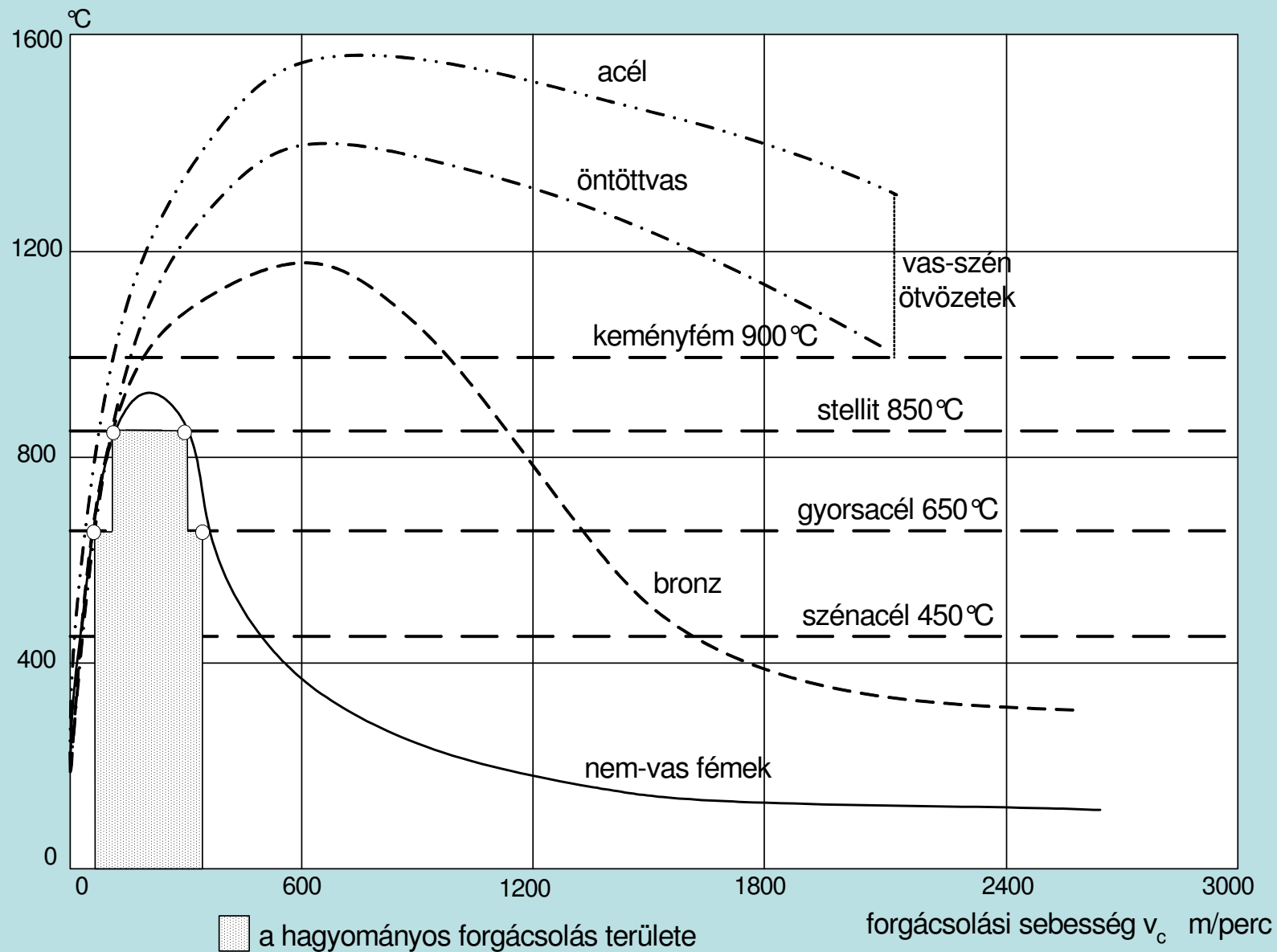
- **Nagy forgácsoló sebességgel** végzett megmunkálást?
- **Nagy fordulattal** végzett megmunkálást?
- **Nagy előtolással** végzett megmunkálást?
- **Nagy fordulattal és előtolással** végzett megmunkálást?
- **Nagy termelékenységű** megmunkálást?

A HSC kutatását először az indította el, hogy szükség volt a titán és a magasan ötvözött fémek megmunkálhatóságát biztosító technológiákra. A kutatásokat az a felismerés is vezérelte, hogy a **HSC jelentősen javítja a megmunkálási pontosságot** és a **felület minőségét**, emellett kiválóan alkalmas az alumínium-ötvözetek befejező megmunkálására. A fentiek mellett a jelenlegi és a jövőbeni **fejlesztés célja** a HSC által biztosítható **nagy termelékenység** [37]

Bár egy **Salomon** nevű gépészmérnök már **1931-ben** bejelentette a nagysebességű megmunkálásra vonatkozó **szabadalmát** (Német Szabadalmi Hivatal lajstromszáma: No. 523594), azonban relatíve sok időnek kellett eltelnie, amíg azt a gyakorlatban is sikeresen alkalmazták. Az 1950-es évek és 1960-as évek eleje előtt nem volt meg az az alapvető tudás, ami lehetővé tette volna a további előrehaladást a nagysebességű fémforgácsolás folyamat megismerésében.

A **nagyfordulatú főorsók kifejlesztése** lehetővé tette nagy forgácsolási sebességek alkalmazását a magas fordulatszám révén. Az első felfedezésektől, amelyek részben feltételezésekből álltak az anyag nagysebességű forgácsolás közbeni viselkedéséről, jelentős idő telt el, mire a **megfelelő gépek rendelkezésre álltak** a gyakorlati alkalmazások számára.

A forgácsoló sebesség és hőmérséklet kapcsolatát a 11.1. ábra szemlélteti [124].



11.1. ábra

A forgácsolási hőmérséklet függése a forgácsolási sebességtől

## **11.1. A folyamat és a gépek átfogó fejlesztése**

Amikor 1981-ben a Darmstadt-i Műszaki Egyetem Gépgyártástechnológiai és Szerszámgépek Intézete (továbbiakban PTW) fokozta kutatását a nagysebességű technológia területén, kutatási programokat terveztek, hogy lehetővé tegyék a szoros kapcsolatot a technológia és a gépek, géprészek fejlesztése között (11.2. ábra) [124].

Ez azt jelentette, hogy a folyamat és a komponensek között kölcsönhatások vezettek az első speciálisan nagysebességű megmunkálásra tervezett szerszámgépekhez. Azonban a folyamatfejlesztés több, mint pusztán a fémforgácsoló technológiáról meglévő tudás kiterjesztése.

A folyamat magában foglalja az összes perifériális kapcsolatot is. Ez az, amiért a forgácsoló anyagok és szerszámok fejlesztését csakúgy, mint az új megmunkálási stratégiák kidolgozását és CAD/CAM rendszerekkel való kölcsönhatását is tartalmazzák programjaik (11.3. ábra).



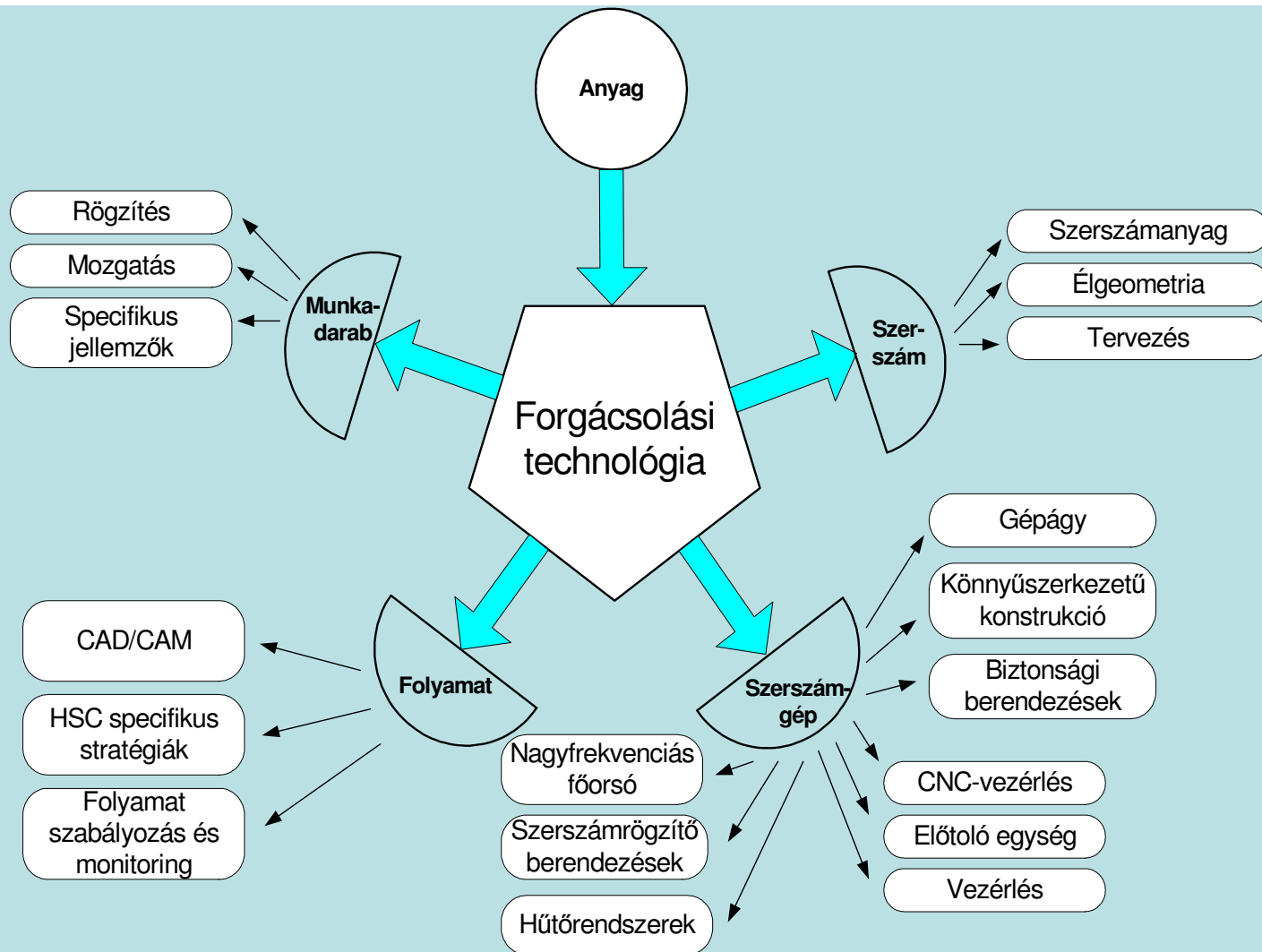
11.2. ábra

*A nagysebességű megmunkálás teljes vizsgálata*

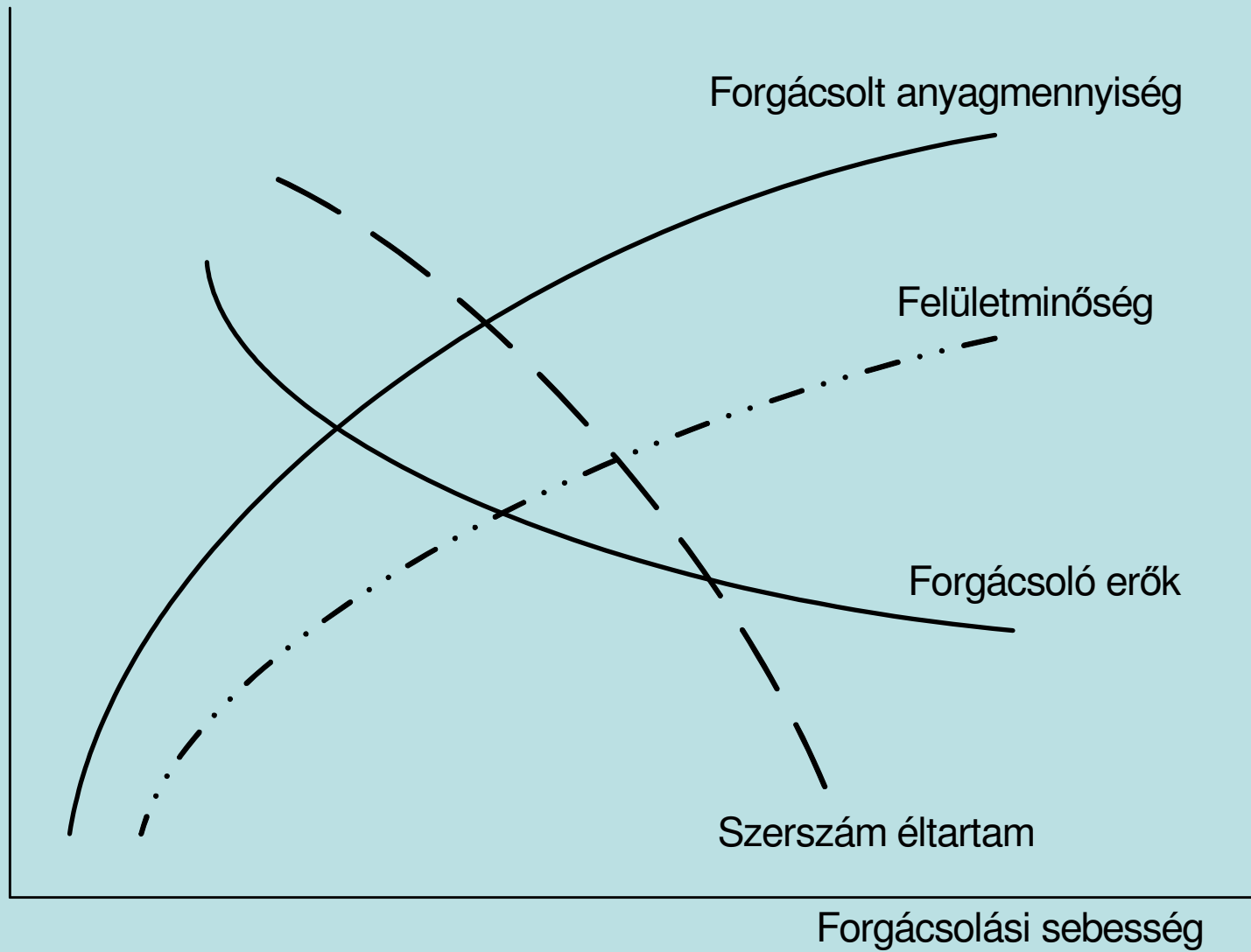
Ez az átfogó filozófia számos további előnnyel is járt, amelyek teljesen új piacokat nyitottak a HSC alkalmazások számára. Az eredeti feltételezés után, ami csak a fémeltávolítás mértékének növelését tette lehetővé, a PTW által végzett tanulmányok is azt mutatták, hogy a forgácsolási **sebesség növelésével** nemcsak a **forgácsoló erők csökkenthetők**, hanem a hőmennyiség is teljesen elosztható a forgácsokkal, így jobb minőségű felületek készíthetők, és hogy a megmunkálás egy nem-kritikus rezgési területen végezhető (11.4. ábra).

Napjainkban ezek a tények az elterjedt HSC alkalmazási lehetőséghez vezetnek, ahogy a 11.1. táblázatban is látható. Ezek között a **vezető területek** a **süllyeszték-** és **öntőformagyártás**, az **úrrepülés-technika**, a deformációra hajlamos kritikusan **vékony falvastagságú alkatrészek**, valamint a **precíziós alkatrészek** gyártása.

Bár jelenleg még nem a nagysebességű megmunkálás a módszer az ún. ultraprecíziós alkatrészek gyártására, a HSC messzire behatol a nagy pontosságú fémforgácsolás területére. Az Ra 0.2 $\mu$ m és Rz max. 3 $\mu$ m értékek többé már nem rendkívüliek.



11.3. ábra  
*A folyamat és a gép teljes (együttes) fejlesztése*



11.4. ábra  
*A nagysebességű megmunkálás jellemzői*



## Biztonsági óvintézkedések

Ebben a folyamatban **nagy centrifugális erők lépnek** fel, a HSC alapvetően tartalmaz egy bizonyos veszély lehetőséget (11.5. ábra).

A számos különböző összetett kutatási projekteken belül, különösen a nagysebességű forgácsolószerszámokra, szabványosított biztonsági és tesztelési irányelvekre, a biztonság-orientált szerszámtervezésre, a laboratóriumi mérésekre és a kezelőszemélyzet egészségvédelmére, valamint a védőkabinok tervezési konfigurációira vonatkozóan kell különös figyelmet fordítani.

A **nagy sebességgel** leváló **forgács** és a nagy nyomással betáplált hűtő-kenő folyadék miatt a **munkateret burkolattal kell ellátni**.

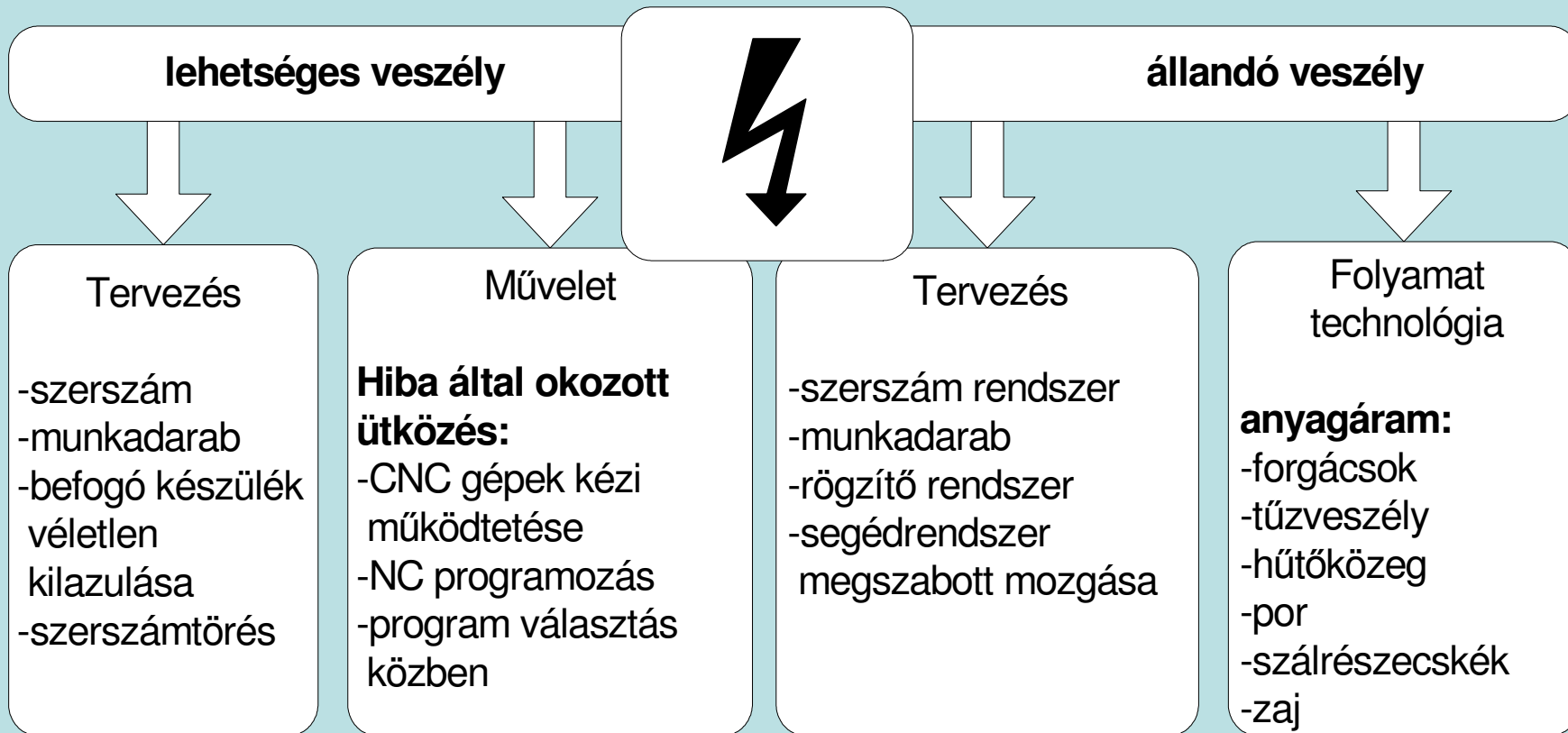
*A nagysebességű megmunkálás néhány jellegzetes alkalmazási területei*

<b>Technológiai előnyök</b>	<b>Alkalmazási terület</b>	<b>Alkalmazási példák</b>
Nagy forgácsolt anyagmennyiség	Könnyűfém ötvözetek	Repülőgép gyártás és űrrepülés technika
	Acél és öntöttvas	Süllyeszték és öntőforma gyártás
Kiváló felületminőség	Precíziós megmunkálás	Optikai ipar, finommechanikai alkatrészek
	Speciális munkadarabok	Csavarkompresszorok
Kis forgácsoló erők	Vékonyfalú munkadarabok megmunkálása	Repülőgép és űrrepülés technikai termékek, gépjárműipar, háztartási eszközök
Nagyfrekvenciás rezgések keletkezésének megelőzése	Nehezen megmunkálható munkadarabok rezgésmentes megmunkálása	Precíziós mechanizmusok és optikai ipar
A forgács hőelvezetése	Belsőfeszültség-mentes forgácsolás	Precíziós mechanizmusok
	Hideg munkadarabok	Magnézium ötvözetek

Mivel a **nagysebességű megmunkálás** nagyon **jó felületi minőség elérését** teszi lehetővé, a későbbi **befejező műveletek** sok esetben részben vagy teljesen elhagyhatók, például ez látható a turbinagyártásban, ahol napjainkban a turbinalapátokat teljes egészében marással állítják elő.

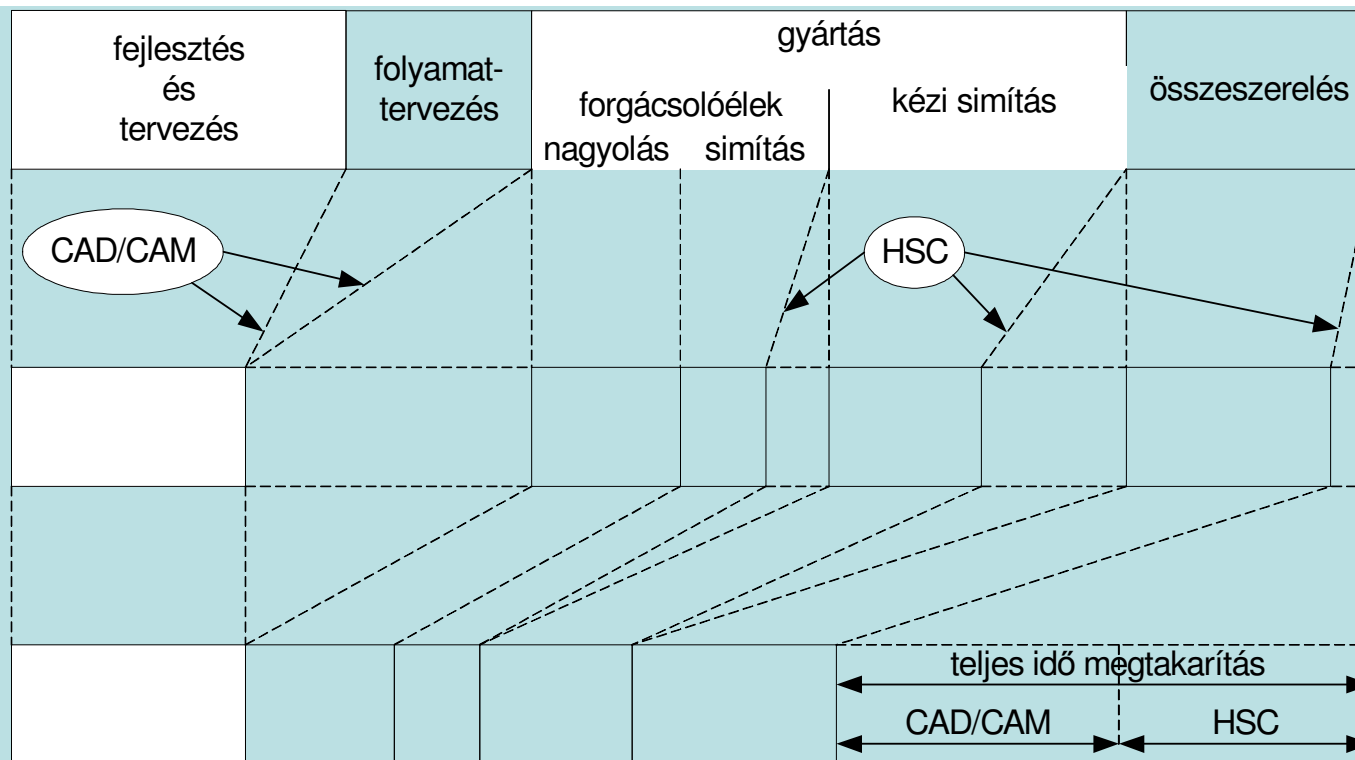
Egy másik speciális példa a süllyeszték- és öntőformagyártás, ahol olyan felületek érhetők el, amelyek már nagyon közel vannak a kívánt végső alakpontossághoz és felületminőséghez.

Ez lényegesen lecsökkenti a kézi utómunkálási időt (11.6. ábra). Az időmegtakarításban a kézi megmunkáláson a max. 80%, a költségmegtakarításban pedig a max. 30% teljesen reális.



11.5. ábra  
*Veszélyforrások a HSC gépekben*

Adott pontosság, ill. felületi érdesség elérése érdekében, szükség lehet egy befejező köszörülési műveletre. A köszörülendő felületek jobb előkészítésének köszönhetően a köszörülési idő jelentősen lecsökkenthető.

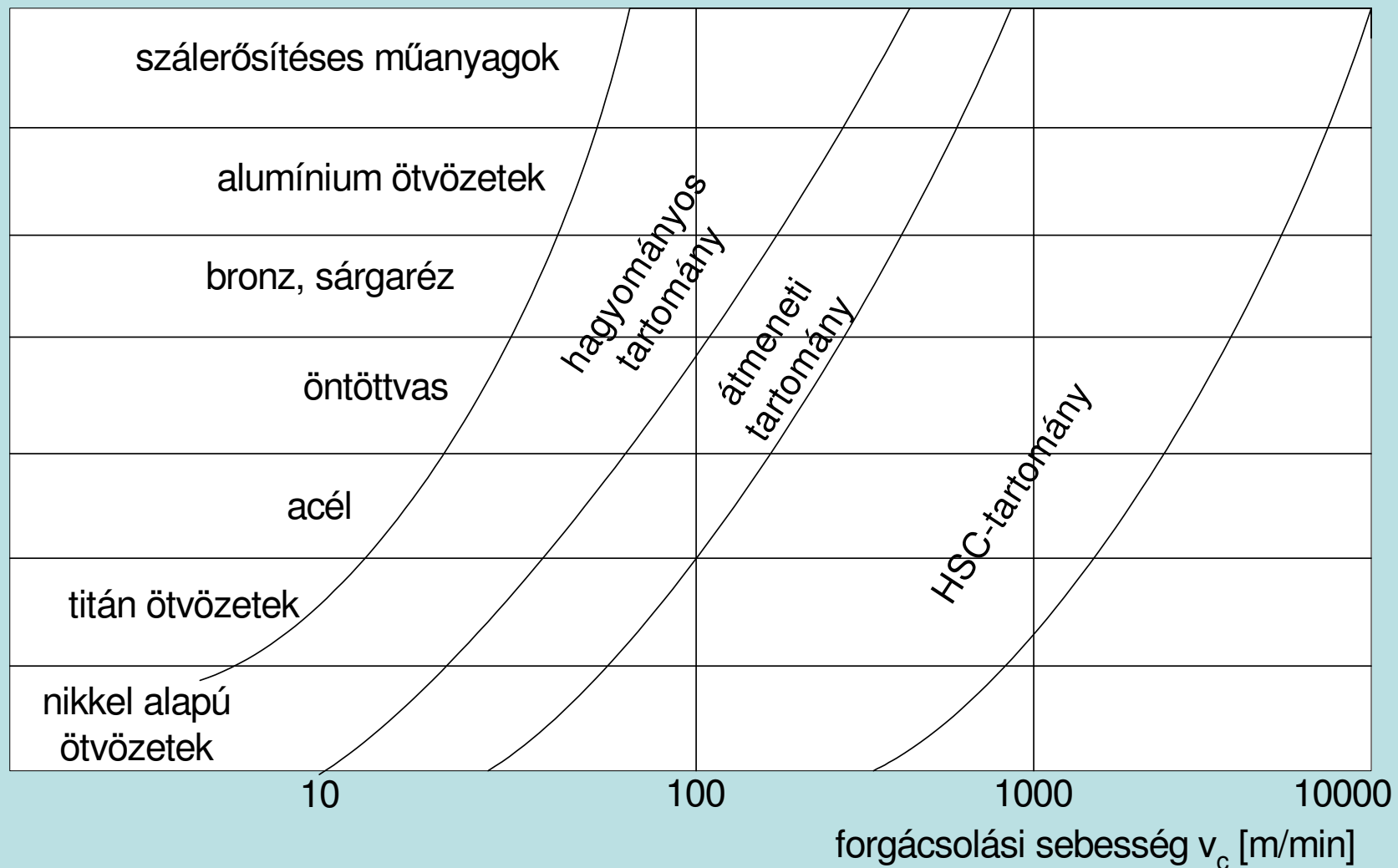


11.6. ábra

*A racionalizálás lehetősége az értéknövekedési láncban*

## 11.2. Napjaink HSC kutatásai

A nagysebességű megmunkálás területén történő fejlődések következménye, hogy pl. a 15000 ford/min főorsó fordulatszám és a 25 m/min előtolás érték csaknem hétköznapiak számít napjainkban. A trend a nagyobb sebességek irányába tart. Különösen az acél és öntöttvas megmunkálásnál, a jelenlegi szabvány már lehetővé teszi az adott HSC tartományba való belépést (11.7. ábra) [37], [86].



11.7. ábra  
*Forgácsolási sebesség karakterisztikák különböző megmunkálható anyagok esetén*

Bár napjainkban a nagysebességű megmunkálás területén magas szintű tudás van a kutatók birtokában, a kutatásnak és legfőképpen a fejlesztésnek folytatódnia kell.

Németországban folyó kutatások:

- főorsók **mágneses csapágyainak** kifejlesztése Al-ötvözetek nagysebességű marásához,
- HSC-hez **szükséges szerszámok, szerszámgépek** és szerszámgép-részek fejlesztése,
- HSC folyamatok **kísérleti vizsgálata**,
- a HSC **alkalmazási területének feltárása**, hatékonysági vizsgálatok.

Az USA-ban folyó ilyen irányú kutatások fő témái:

- a HSC **tudományos** alapjainak **feltárása**,
- **lézersugárral** segített HSC,
- **Al, Ni és Ti ötvözetek** nagysebességű esztergálása és marása.

Jelenleg a HSC kutatások legfőbb ösztönzői azok a törekvések, amelyek a nehezen forgácsolható anyagok hatékony megmunkálására, a repülőgép-motorok anyagainak, valamint a nagyméretű alakító-szerszámok (karosszériagyártás) anyagainak megmunkálására irányulnak.

Az esztergálás és a marás mellett nagy lehetőség van a fúrás sebességének megnövelésére, elsősorban az élgeometria változtatása, a kopásálló keményfém élananyag és a szerszámon keresztül vezetett hűtő-kenő folyadék révén.

A HSC kutatása magában foglalja a megmunkáló rendszer összes elemének kutatását.

A **nagy forgácsolási sebesség** hatása:

- az **anyag** rendkívül **rideggé válik** a forgácsolóél előtt,
- a **forgács** a forgácstőnél **képlékeny alakváltozás nélkül** letörik,
- a forgács leválasztásához szükséges **energia csökken**,
- a **képződő hő csökken**.



A forgácsolási folyamat jellemzői

- a) **kis** radiális és axiális **fogásvétel** (kis forgácskeresztmetszet),
- b) **egyenirányú marás** alkalmazása,
- c) **hűtés nagy nyomású levegővel**, illetve szerszámon keresztül.

a) Kis fogásvétel

- a munkadarab **nem melegszik fel** (kis kontaktfelület, nagy előtolás),
- **kisebb** forgácsoló **erő** ébred:
  - **kisebb szerszám elhajlás**,
  - **kíméli a főorsó csapágyazást**, a golyósorsókat és a szánvezetékeket,
  - **hosszabb szerszám élettartam**,
  - nagyon **finom felületi érdesség** ( $\approx Ra = 0,2\mu m$ ).

## b) Egyenirányú marás alkalmazása

- a **forgácsoló élre nyomófeszültség hat**, kisebb az él letöredezésének veszélye,
- **kevesebb hő fejlődik**, nagyobb szerszám éltartam,
- **kisebb radiális erő ébred**, kedvezőbb a szerszám gépnek.

## c) Hűtés

- **forgács eltávolítása** a forgácsolási zónából,
- **hősokk elkerülése**,
- **nagy nyomású levegővel**, acél és öntöttvas esetén,
- **hűtő-kenő folyadékkal, alumínium esetén**,
- **szerszámon keresztül előnyösebb.**

Az HSC előnyei a nagy termelékenység mellett:

- **nagy** megmunkálási **pontosság**,
- **kis** felületi **érdesség** és vékonyabb befolyásolt felületi réteg,
- **jobb forgácselvezetés** (forgácsmanipuláció),
- a forgácsolási **folyamat** nagyobb **stabilitása**, kisebb rezgésveszély,
- **egyszerűbb szerszámozás**.

A HSC korlátai és hátrányai:

- a forgácsoló sebességnek a **szerszámkopás szab határt**, különösen a nehezen forgácsolható anyagok (szuperötvözetek, Ti-ötvözetek, edzett acélok, stb.) megmunkálásakor.
- A jövőben alkalmazandó HSC egyik korlátja lehet az a körülmény, hogy forgácsleválasztáskor **pótlólagos energiára van szükség** a forgácsnak a nyírási zónából való gyors eltávolítására.

## Alkalmazási területek:

- **kisméretű alkatrészek** gyártása,
- **repülőgépgyártás** (alumínium, rozsdamentes acélok...),
- **járműgyártás** (alumínium, öntöttvas, acél...),
- **elektronikai ipar** (alumínium, réz...),
- **orvosi műszer** gyártás (rozsdamentes acélok, titán...),
- **prototípus** gyártás (műanyagok, alumínium...),
- **szerszámgyártás** (edzett szerszámacélok, réz, grafit, alumínium...).

## A HSC alkalmazásának célja:

- költséges és időrabló **kézi műveletek csökkentése** (polírozás),
- **szikraforgácsolási** műveletek **minimalizálása**,
- jobb **méretpontosság**,
- **termelékenyebb** gyártás,
- rövidebb **átfutási idők**.

## Követelmények:

- megfelelő **forgácsolószerszám** és **szerszámtartó**,
- speciális tudású **CAM rendszer**,
- **precízebb** munkavégzés,
- képzett **szakemberek**.

A nagysebességű megmunkálás alkalmazását – a forgácsolás közben állandó terhelés biztosítása mellett – az alábbi körülmények segítik:

- a) hirtelen **irányváltások minimalizálása**,
- b) **fokozatos anyagleválasztás** biztosítása,
- c) **spline interpoláció** lehetősége.

### 11.3. HSC-hez alkalmas szerszámok

A HSC alkalmazásának feltételei:

Szerszám:

- dinamikus **kiegyensúlyozottság**,
- **szimmetrikus** kialakítás,
- **rövid kinyúlás**,
- **pozitív élgeometria**, nagy hátszög,
- **merev felépítés** (kúpos vagy vastagított szár),
- **keményfém szerszám** (vagy lapka) TiAlN bevonattal,
- általában max. Ø20mm-ig (tömeg, kiegyensúlyozás),
- **szerszámon keresztül hűtés** lehetősége,
- **maximális** megengedett **fordulatszám**.

Szerszámtartó:

- dinamikus **kiegyensúlyozottság**,
- szimmetrikus kialakítás,
- **masszív befogás** (ált. hidro-mechanikus vagy zsugorkötés),
- minél **kisebb méret és tömeg**.

A szerszám forgácsolóképességét és ütését az összeszerelt szerszámon kell ellenőrizni!

Nagysebességű megmunkáláskor négy **meghatározó szerszámjellemző** játszik döntő szerepet:

- a szerszám **élanyaga**,
- az **élgeometria**,
- a szerszám **szerkezete**,
- a **szerszám kapcsolódása a főorsóhoz**.

HSC-kor a nagy sebesség miatt a diffúziós kopásnak különösen nagy szerepe van, mivel magas a forgácsolási hőmérséklet. Acél HSC bevonatos és bevonat nélküli keményfémeket, cermet és polikristályos CBN-t ajánlatos használni. Nagy forgácsoló sebességen forgácsolt felület rétegében mindig keletkezik termikus sokk által okozott feszültség.

Kevert kerámia (Al-oxid + TiC) éanyag használatakor a hátkopás kisebb mértékű és ez jelentős éltartam növekedést eredményezhet, különösen szakaszos forgácsoláskor.

A **CBN éanyagú szerszámok** használata HRC 57 keménységű edzett szerszámacélok HSC-kor elfogadható éltartamot eredményez.

**Öntöttvasak** nagy sebességű megmunkálása a  $v_c=750\ldots4500$  m/min sebességtartományba esik. A  $v_c=1250$  m/min-ig keményfém és cermet, fölötte pedig szilíciumnitrid és CBN anyagminőségű szerszám javasolt. Perlites öntöttvashoz a PCBN jobb, mint a SIALON.

Az **egzotikus ötvözetek** megmunkálhatósága minden sebességen nagyon rossz. A Ni alapú ötvözetek esztergálásakor kerámia szerszámanyaggal a forgácsoló sebességet 30 m/min-ról 200 m/min-ra lehet növelni.

Ti-ötvözetek HSC-nél a szerszámkopás igen intenzív, ennek ellenére a keményfém mellett még gyakran használják a gyorsacélt is.



A jövőben a nagy sebességű forgácsolásnál **fő alkalmazási terület a könnyűfém ötvözetek megmunkálása lesz**. Ehhez a K-minőségű keményfém látszik a legmegfelelőbbnek az abrazív kopással szemben mutatott jó ellenálló képessége miatt. Szakaszos forgácsoláshoz viszont kerámia nem alkalmazható.

**Könnyűfémek** nagy sebességű megmunkálására nagyon jó a PCD (gyémánt) szerszámanyag, mert ellenáll az abrazív kopásnak, kicsi a súrlódási tényezője és jó a hővezető képessége. A szemcsenagyság növekedésével szemben nő az él kitöredezésének veszélye.

Rézötvözetek HSC megmunkálására a K10 keményfém és a PCD szerszámanyag a legalkalmasabb. A kevert kerámia és a SIALON az erős adhéziós hajlam miatt nem megfelelő.

A **szálerősítésű műanyagok** nagy sebességű forgácsoláskor **erős szerszámkopást** okoznak a nagy súrlódási tényező miatt. Nagy forgácsoló sebességen csak a PCD (gyémánt) anyagú szerszám ad elfogadható éltartamot.

**Grafit** nagysebességű megmunkálásánál fő probléma az **abrazív kopás**. A legjobb szerszámanyag ilyen esetben az abrazív kopásnak kellően ellenálló PCD és PCBN élanyag.

## *A szerszámok szerkezete*

Jelenleg a kopás, a felületi érdesség, a forgácsolóerők és a forgácsolási hőmérséklet szempontjából optimális forgácsoló sebesség tartomány felső határa kb. 6000 m/min. Forgó szerszámok esetében a centrifugális erő a szerszám egész szerkezetét deformálhatja. A forgácsolás közbeni szerszámtörés nagy rongálást, sőt balesetet is okozhat.

. Mindazonáltal a gyorsan forgó szerszámok szerkezetének kialakításakor a következő szempontokat célszerű figyelembe venni:

- a **szerszámtestet szívós anyagból** kell készíteni,
- a szerszámon csak feltétlenül szükséges olyan felületeket kialakítani, amelyek megbontják az eredetileg hengeres alakot,
- **előnyben** kell részesíteni az **alakos csatlakozó felületeket**,
- a szerszámtest és alkatrészeinek **tömege kicsi legyen**,
- a tömegközéppont a lehető legközelebb legyen a forgástengelyhez.

## *A főorsó és a szerszám csatlakozása*

A HSC eredményessége nagymértékben függ a főorsó és a szerszám csatlakozási viszonyaitól, valamint az ott alkalmazott rögzítési módtól, amely különösen szélsőséges körülmények között kell, hogy működjék.

A csatlakozásnak biztosítania kell a **gyors automatikus szerszámcserét**, valamint annak ismétlődési pontosságát. HSC-kor további követelmények is vannak a nagy erők és nyomatékok miatt:

- kis kiegyensúlyozási hiba,
- nagy futáspontosság,**
- nagy pozicionálási pontosság,**
- a **centrifugális erők** minimumra **csökkentése.**

## 11.4. A szerszámgépekkel szembeni követelmények

A HSC alkalmazásának feltételei:

Szerszámgép

- főorsó fordulatszám: 30 000 – 40 000 1/min,
- programozott előtolás: 40 000 – 60 000 mm/min,
- gyorsjáratú előtolás: 60 000 – 90 000 mm/min,
- speciális nagysebességű szervóhajtások (dinamikus viselkedés),
- mondat végrehajtási sebesség: 1 – 20 ms,
- adatátviteli sebesség:  $\approx$  50 000 – 250 000 bit/s (RS 232, ethernet, HDD),
- merev felépítés, hőstabilitás, rezgésérzéketlenség,
- hibakompensálási lehetőségek (hőmérséklet, golyóorsó, pályakövetés),
- program előolvasás,
- spline interpoláció,
- „golyóálló” burkolat.

A nagy sebességű megmunkáláshoz különleges szerszámgépekre van szükség.

A **szerszámgép gép ágyának anyaga** ma már szinte kizárólag **polimerbeton**.

HSC megmunkálógépen a főorsónak rövidnek és merevnek kell lennie. Kezdetben speciális gördülő csapágyazást használtak, de a jövő az aktív mágneses csapágyazásé és légcsapágyaké. Folyamatos működéshez 125 m/s, szakaszos működéshez 150 m/s max. sebesség engedhető meg. A szánokat és egyáltalán minden mozgó egységet olyan anyagokból készítik, amelyek lehetővé teszik a súly csökkentését (Al-Ti ötvözet, szálerősítésű műanyagok, stb.)..

A modern nagy sebességű megmunkálógépek vezetőkei ma már kizárólag görgős kialakításúak.

Az előtoló egységet golyóorsó mozgatja. Az előtolósebesség esetenként elérheti a 100 m/min értéket, emiatt az előtolóműnek jó dinamikai tulajdonságúnak kell lennie.

## 11.5. Perspektívák

Az említett alkalmazási területeken, a **nagysebességű megmunkálás gazdasági hatékonysága** többé már nem vonható kétségbe. Nevezetesen a szerszámszektorban a megnövekedett szerszámélettartam irányába végbement fejlődések hozzá fognak járulni a HSC technológia további alkalmazásaihoz.

Még a hagyományos szerszám gép tudomány néhány területe is előnyt szerzett ebből a kutatómunkából. Mint pl. az említett motor főorsó.

Eredetileg csak nagysebességű gépek készülékrészének lett kigondolva, de előnyei alkalmassá tették lassabb, hagyományos szerszám gépekben való használatát is napjainkban.

A HSC alkalmas lesz mindenfajta anyagból (könnyűfémek, nemfémes anyagok, műanyagok, acél, öntöttvas, nehezen megmunkálható anyagok, stb.) készült alkatrészek megmunkálására úgy, hogy az **egész gyártási folyamat nagysebességű műveletekből** fog állni. Az előnyök a legtöbb esetben a pontosság és a felületi minőség magas színvonalából és a befejező köszörülés kiváltásából adódnak.

A **technológiai szempontból optimális forgácsoló sebesség és előtolás növelése** a CNC vezérlő rendszerek sebességén és az előtolóművek dinamikai tulajdonságain múlik.

Az egyenes vonalú és forgó mozgást végző gépegységek tömege tovább fog csökkenni, merevségük pedig növekedni fog, ennek érdekében egyre nagyobb súlyt kapnak a **könnyűszerkezetes konstrukciók**.

Egyes speciális furat-megmunkálási feladatokhoz (pl. a nyomtatott áramkörök fúrása) hamarosan megjelennek a 300000...400000 ford/min fordulatszámra képes szerszámgépek (szerszámátmérő kisebb, mint 0,5 mm).