

# ***XV. FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA***

Kolozsvár, 2010. március 25-26.

## **NAGY ENERGIASŰRŰSÉGŰ HEGESZTÉSI ELJÁRÁSOK TÖBB SZEMPONTÚ RENDSZEREZÉSE**

**BITAY Enikő, BAGYINSZKI Gyula**

### **Abstract**

The welding is the most important joining technology. In this paper we give a survey and a classification of the high energy source welding methods, in order to help the selection of the proper combination of materials and processes.

### **Key words:**

plasma, electron beam, laser

### **Összefoglalás**

A hegesztés a legfontosabb kötőtechnológia. Ennek meghatározó részterülete a nagy energiasűrűségű hegesztési eljárások. Jelen cikk ezek több szempontú rendszerező áttekintését tűzte ki célul, segítve a megfelelő változat kiválasztását.

### **Kulcsszavak:**

plazma, elektronsugár, lézer

## **1. Bevezetés**

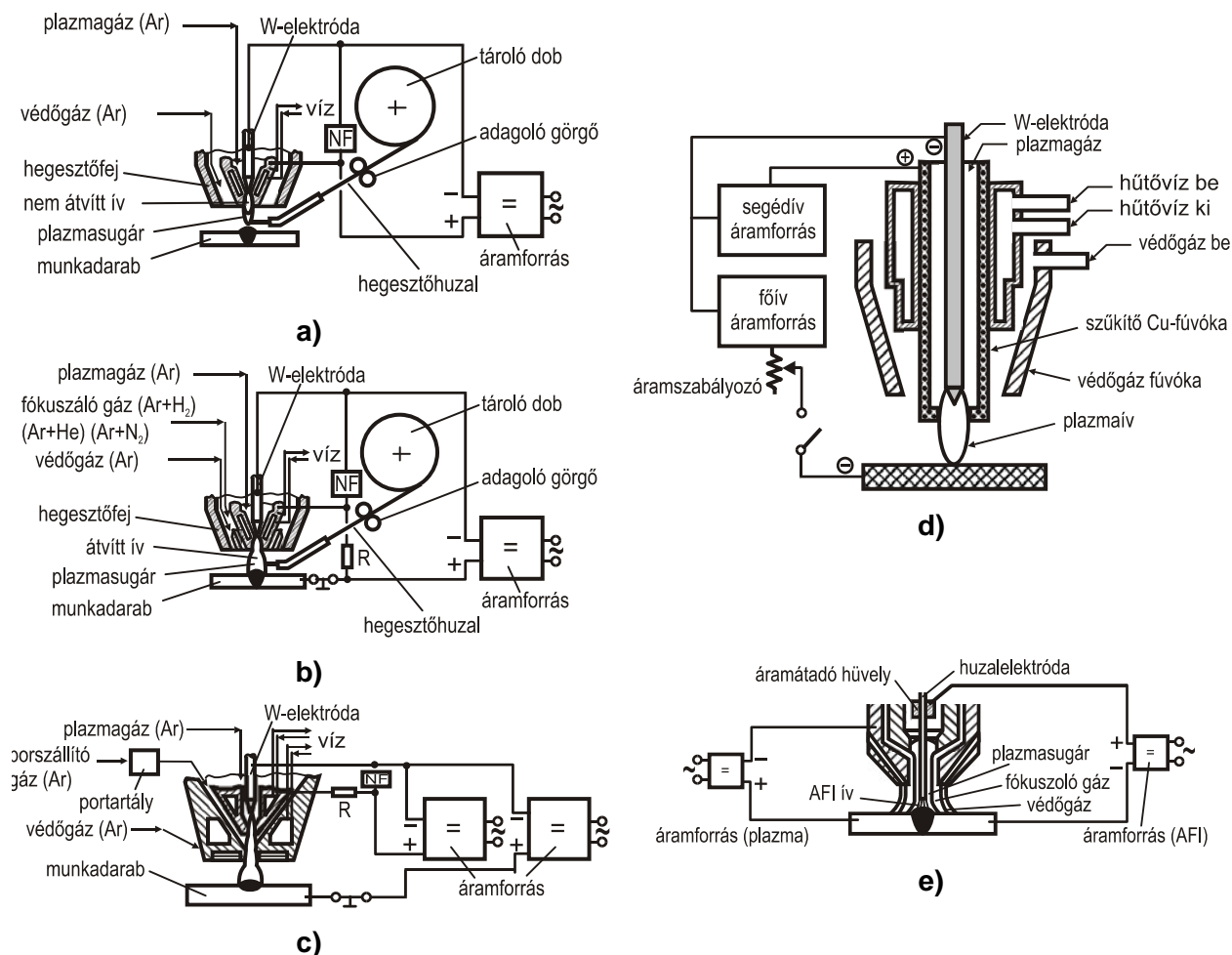
Nagy energiasűrűségről vagy nagy teljesítménysűrűségről akkor szokás beszélni, ha a fajlagos teljesítmény- (energia-) bevitel meghaladja a  $10^2 \text{ W/mm}^2 = 10^4 \text{ W/cm}^2 = 10^8 \text{ W/m}^2$ -es értéket. Ez a határérték azonban nem különíti el jól és egyértelműen a hagyományos, illetve az általában nagy energiasűrűségüként említett vagy ismert hőforrásokat. Így bevezették az ultra (vagy extrém) nagy energiasűrűség fogalmát is, mely már ténylegesen csak a plazmás-, de főképp az elektronsugaras- és a lézeres hőforrásokat jellemezheti, ami számszerűsítve két nagyságrenddel nagyobb, vagyis a  $10^4 \text{ W/mm}^2 = 10^6 \text{ W/cm}^2 = 10^{10} \text{ W/m}^2$ -es érték – sugárfókuszolás útján történő – megvalósíthatóságát jelenti. Ezeket a hőforrásokat az anyagtechnológiák több területén (pl. vágás, felületkezelés) is alkalmazzák, amelyek közül most a hegesztési eljárásokat tekintjük át.

## **2. A plazmahegesztés eljárásváltozatai**

### **a) Eljárásváltozatok az ívfenntartás helye szerint:**

– *plazmasugár-hegesztés* (belsőívív hegesztés): az ív a W-elektroda és a hűtött Cu-fúvóka között ég (1/a. ábra), így a látható plazmasugárban nem folyik áram, ezért elektromosan nem vezető anyagokhoz is alkalmazható;

- *plazmaív-hegesztés* (külsőívű hegesztés): a plazmafűvőka által leszűkített ív az elektróda és a munkadarab között ég (**1/b. ábra**), ezért elektromosan vezető – elsősorban fémes – anyagokhoz alkalmazható;
- *kombinált plazmahegesztés* (kettősívű hegesztés): a plazmasugár- és a plazmaív-hegesztés kombinációja (**1/c. ábra**), azaz mind a belső, mind a külső ív egyaránt részt vesz a hegesztési (hő)folyamatban.



**1. ábra** Plazmahegesztés fontosabb eljárásváltozatai

**b) Eljárásváltozatok a jellemző áramerősség-tartomány szerint:**

- *kisáramú* (0,1–20 A közötti) vagy *mikroplazma-hegesztés* (**1/d. ábra**): tulajdonképpen a vékony anyagok (0,02–1,5 mm) plazmaív-hegesztő eljárása, mely az igen kis áramerősségek esetén is stabil ívet biztosít;
- *középáramú* (20–100 A közötti) vagy *beolvasztó-* („melt-in”) technikájú *hegesztés*: elsősorban kézi plazmaív-hegesztéshez;
- *nagyáramú* (100 A feletti) vagy *kulcslyuk-* („key-hole”) technikájú *hegesztés*: elsősorban gépesített plazmaív-hegesztéshez.

**c) Eljárásváltozatok a megvalósuló áramprogram szerint:**

- *egyenáramú plazmaív-hegesztés (1/d. ábra)*: jellemzően egyenes polaritással (elektróda a negatív póluson) megvalósuló folyamatos áramú hegesztés;
- *impulzus(technikájú) plazmaív-hegesztés*: mind beolvasztó-, mind kulcslyuk-technika esetén akár 10 kHz-cel is végezhető, jól szabályozható beolvadású hegesztés;
- *váltakozó polaritású plazmaív-hegesztés*: négyszög hullám-formával megvalósuló hegesztés olyan fémek esetében, amelyeknek felületén könnyen (újra)képződik a passzíváló oxidréteg (pl. alumínium és magnézium). A fordított polaritású félhullámra az oxidbontás, az egyenes polaritású félhullámra a beolvasztás jellemző.

**d) Eljárásváltozatok hozaganyag-alkalmazás szerint:**

- *hozaganyag nélküli plazmaív-hegesztés (1/d. ábra)*: vékonyabb anyagok kötőhegesztéséhez;
- *huzaladagolásos plazmaív-hegesztés (1/b. ábra)*: az adagolt hegesztőhuzal bekeveredése jól szabályozható és alacsony mértéken tartható a teljesítmény változtatása révén;
- *poradagolásos plazmaív-hegesztés (1/c. ábra)*: a felrakandó por a tárolótartályból egy előkamrába jut, ahonnan argonáram juttatja a hegesztőfejbe. A belső ív hatására megolvadt port a plazmasugár mozgási energiája a külső ív által megolvasztott munkadarab-felületre sodorja.

**e) Eljárásváltozatok kiegészítő gáz hozzávezetése szerint:**

- *kiegészítő gáz nélküli plazmahegesztés (1/a. ábra)*: az egy plazmagázos, védőgázburkos hagyományos plazmahegesztés;
- *két plazmagázos (plazma)hegesztés*: a csőszerű kialakítású volfrámelektrodán keresztül egy másodlagos plazmagázt is hozzávezetnek, mellyel keskenyebb, de mélyebb beolvadás érhető el adott áramerősségnél (fajlagos hőbevitelnél);
- *fókuszológázos plazmahegesztés (1/b. ábra)*: megfelelő összetételű és áramlási sebességű fókuszológáz hozzávezetésével végzett hegesztés. A kiegészítő gázt koncentrikusan, a védőgázburkon belül vezetik a plazmafúvókából kilépő plazmaoszlop köré, annak koncentrálása érdekében.

**f) Eljárásváltozatok más eljárásokkal való kombinálás szerint:**

- *plazma-MIG-hegesztés* vagy *plazma-AFI-hegesztés (1/e. ábra)*: a fogyóelektrodás semleges védőgázos hegesztés ívoszlópa köré stabilizáló plazmaívet vezetve, nagy huzalkinyúlással, nagy fajlagos leolvadás érhető el, illetve a hegesztési sebesség is jelentősen megnövelhető;
- *plazma-TIG-hegesztés* vagy *plazma-AWI hegesztés*: a volfrámelektrodás semleges védőgázos ívhegesztéssel való kombinálás elsősorban gépesített, illetve automatizált hegesztésekhez a hegesztési sebesség és a varratminőség optimalizálására szolgál;

- *plazma-lézer-hegesztés*: az elektronabszorpció és a fotonabszorpció egyesítésével végzett ömlesztő hegesztés, melynek további két alváltozata:
- elkülönített lézer- és plazmafejjel megvalósuló elrendezés, közös munkafelületre irányítva;
- közös hatásvonalú elrendezés, melyben a fókuszolt lézersugárzás hozzávezetése a volfrámelektroda kúpos üregén, illetve a plazmaíven keresztül történik (**7/b. ábra**).

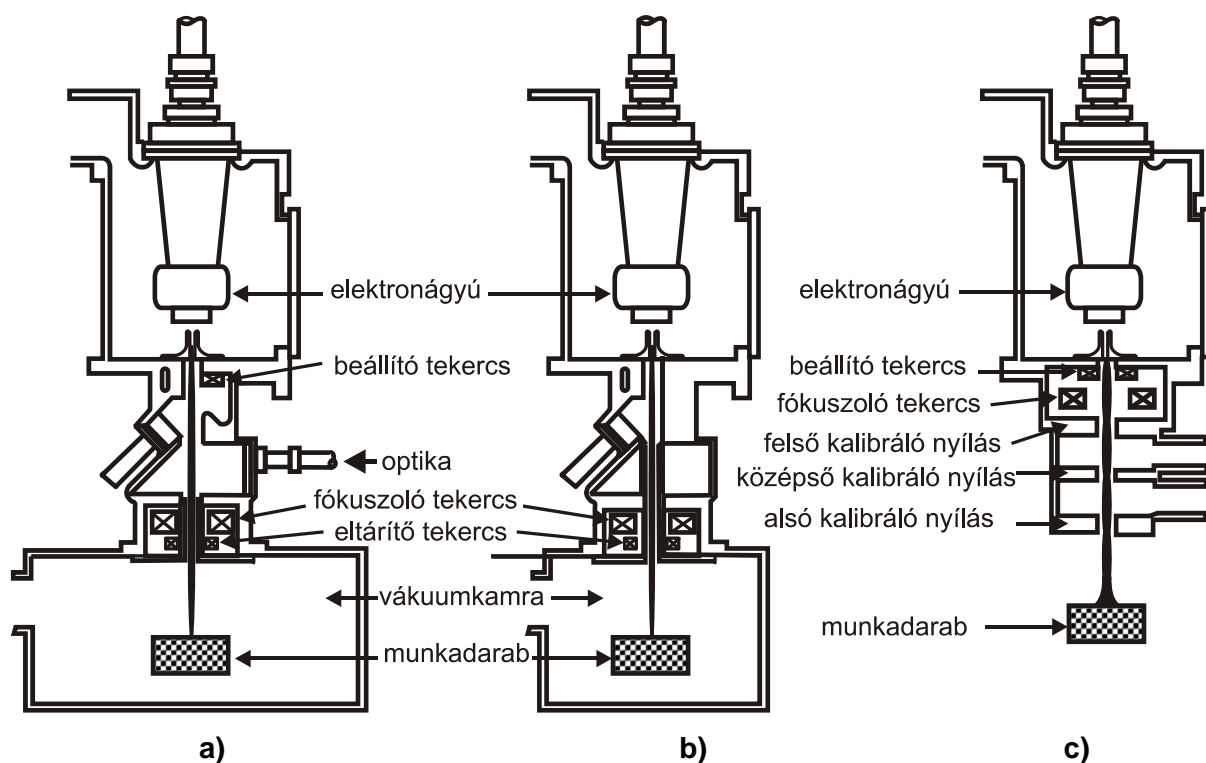
**g) Eljárásváltozatok gépesítettségi szint szerint:**

- *kézi plazmahegesztés*: mind a hegesztési főmozgások megvalósítása, mind a munkadarab adagolása emberi erővel történik. A műveleteket tehát a hegesztő végzi, ellenőrzi és irányítja;
- *gépesített plazmahegesztés*: a hegesztési főmozgások megvalósítása kisebb-nagyobb arányban, a munkadarab adagolása teljesen emberi erővel történik;
- *automatizált plazmahegesztés*: mind a hegesztési főmozgások megvalósítása, mind a munkadarab adagolása gépi úton, önműködően történik, „humán” beavatkozásra gyakorlatilag nincs szükség, de folyamat-felügyeletre igen.

### **3. Elektronsugaras hegesztés eljárásváltozatai**

**a) Eljárásváltozatok a munkadarab-környezet nyomástartománya szerint:**

- *nagyvákuumos hegesztés (2/a. ábra)*: klasszikus, nagytisztaságú környezetet, szennyezés-, oxid-, és nitridmentes felületet biztosító eljárás, melynél fő probléma a nagy leszívási (vákuum-létrehozási) időtartam. Az alkalmazások tág körét átfogó nagy kamrák mellett zsilipeléssel osztható kamrás ill. célorientált kiskamrás megoldások is születtek e hátrány kiküszöbölésére;
- *középvákuumos hegesztés (2/b. ábra)*: valójában a tömeggyártásban jól alkalmazható célgépes elektronsugaras hegesztést jelent, melynek egyik irányzata elővákuumozással gyorsított kis kamrában végrehajtandó folyamatos adagolású hegesztést tesz lehetővé, míg a másik irányzata rendkívül gyors leszívású minimalizált kamraméretű célkészülékben valósul meg, egyenkénti adagolással. Mindkét esetben kamraméret-csökkentéssel, illetve kisebb vákuumszinttel javult a kihasználtsági fok ill. a termelékenység;
- *nemvákuumos hegesztés (2/c. ábra)*: a munkadarab nincs vákuumkamrába zárva, így a méretkorlát és a leszívási idő probléma feloldottá válik, viszont az elérhető beolvadási mélység és varrat tisztaság lecsökken, illetve a röntgensugár-veszély megnő. Alkalmas védőgáz és minimális munkadarab-ágyú távolság alkalmazása javít a helyzeten.



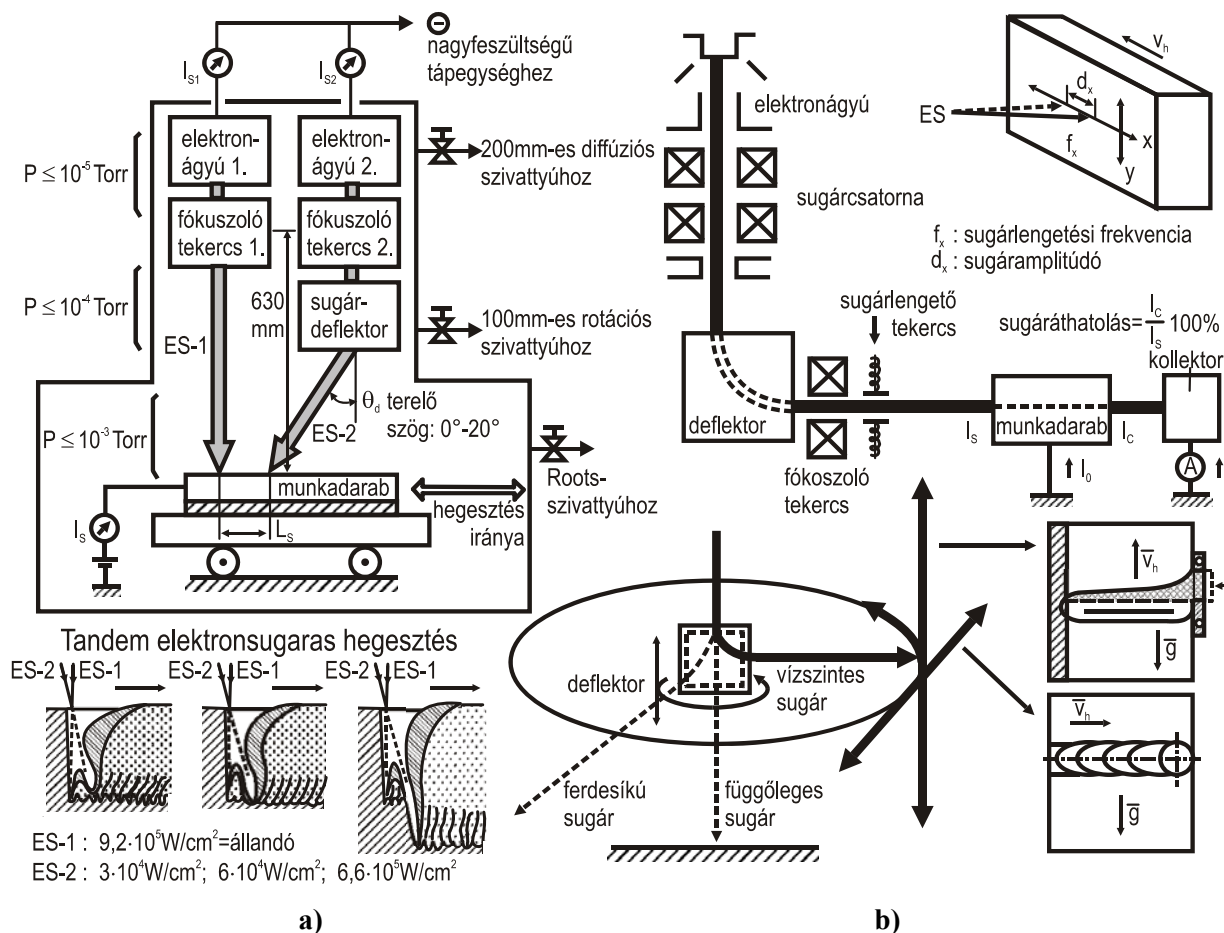
**2. ábra** Elektronsugaras hegesztés eljárásváltozatai környezeti nyomás szerint

**b) Eljárásváltozatok az egyidejűleg működtethető elektronágyúk száma szerint:**

- *egyágyús elektronsugaras hegesztés (2. ábra)*: hagyományos elrendezésű, munkakamrára szerelt szülő elektronágyúval megvalósuló hegesztés;
- *tandem elektronsugaras hegesztés (3/a. ábra)*: két külön is beállítható paraméterű elektronágyú ugyanazon kamrához csatlakozva egyidőben dolgozik. Az első sugár által készített varrat - nagy energiasűrűség miatt előfordulható - hibáit (magas varratdudor, ún. lándzsahatás, gyökporozítás) a másik sugár korrigálja.

**c) Eljárásváltozatok a sugárpozícionálás lehetősége szerint:**

- *egypozíciós elektronsugaras hegesztés (2. ábra)*: rendszerint függőleges irányultságú, az elektronágyú hossz tengelyébe eső sugárhelyzetű hegesztés;
- *vezérelt sugáreltérítésű elektronsugaras hegesztés*: meghatározott pályaalak és irány szerint, külön sugáreltérítés-vezérlő egységgel megvalósított hegesztés;
- *többpozíciós elektronsugaras hegesztés (3/b. ábra)*: az elektronágyú hossz tengelyéhez képest elfordítható, illetve azzal párhuzamosan mozgatható sugárterelő (deflektor) alkalmazásával megvalósuló hegesztés, amivel lehetővé válik kevesebb munkadarab manipulációval (egyszerűbb manipulátorral) – egy vákuumleszívás mellett – a munkadarab több oldalának hegesztése.



3. ábra Elektronsugaras hegesztés eljárásváltozatai sugárbeállítás szerint

**d) Eljárásváltozatok a megvalósuló üzemmód és sugárintenzitás szerint:**

- *folyamatos bekapcsolású elektronsugaras hegesztés*: a varratmélység/varratszélesség viszony módosítása végett defókuszolással (szélesítéssel) vagy anélkül végzett hegesztés;
- *impulzus üzemmódú elektronsugaras hegesztés*: a sugár be- és kikapcsolásával, vagyis elektronikus úton megvalósított szaggatásával végzett hegesztés, melynek célja a hegesztési munkarend keményebbé (kisebb fajlagos hőbevitelűvé) tétele, továbbá a varratszélesség csökkentése;
- *sugárlegetéssel (oszillálással) megvalósított elektronsugaras hegesztés*: dinamikusan (meghatározott pályaalak, irány, frekvencia és amplitúdó szerint) eltérített sugárral végzett hegesztés a hőeloszlás és varratalak módosítása céljából.

**e) Eljárásváltozatok hozaganyag-alkalmazás szerint:**

- *hozaganyag nélküli elektronsugaras hegesztés*: klasszikus nagyvákuumú, minimális illesztési rés-méretű, legelterjedtebben alkalmazott kötőhegesztés;
- *betétlemezes elektronsugaras hegesztés*: cső- vagy más zárt alakra hajlított lemez alkotó menti hegesztése, amikor a lemez széleinek párhuzamossága nehezen biztosítható;

- *huzalos elektronsugaras hegesztés*: 12 mm lemezvastagságig, kb. 2 mm-es illesztési hézaggal megvalósuló hegesztés;
- *poranyagos elektronsugaras hegesztés*: vastag szelvények keskenyrés változatú kötőhegesztése, melyhez az illesztési hézag alsó nyílását varrattal vagy alátétlemezzel le kell zárni.

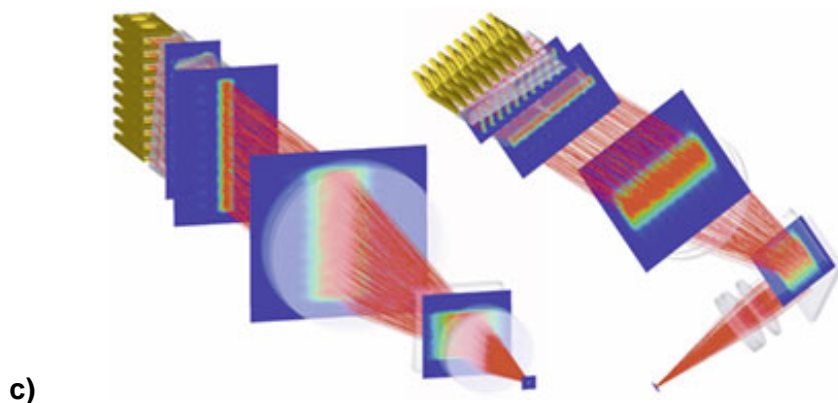
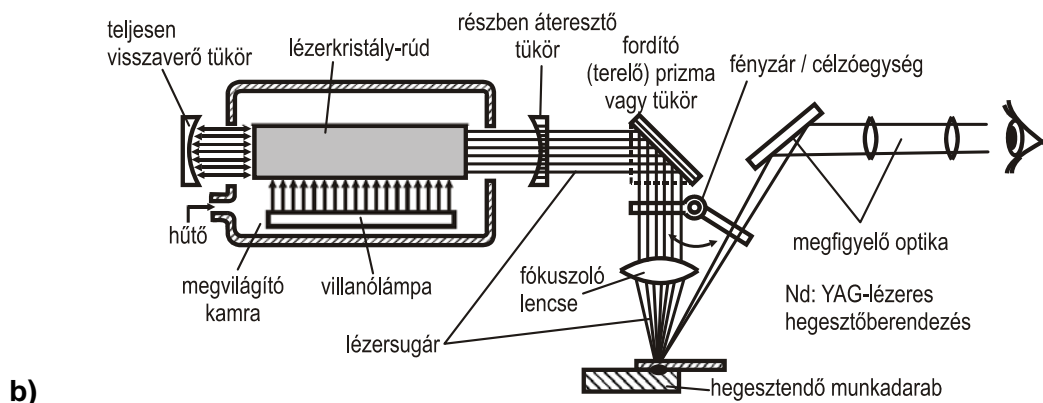
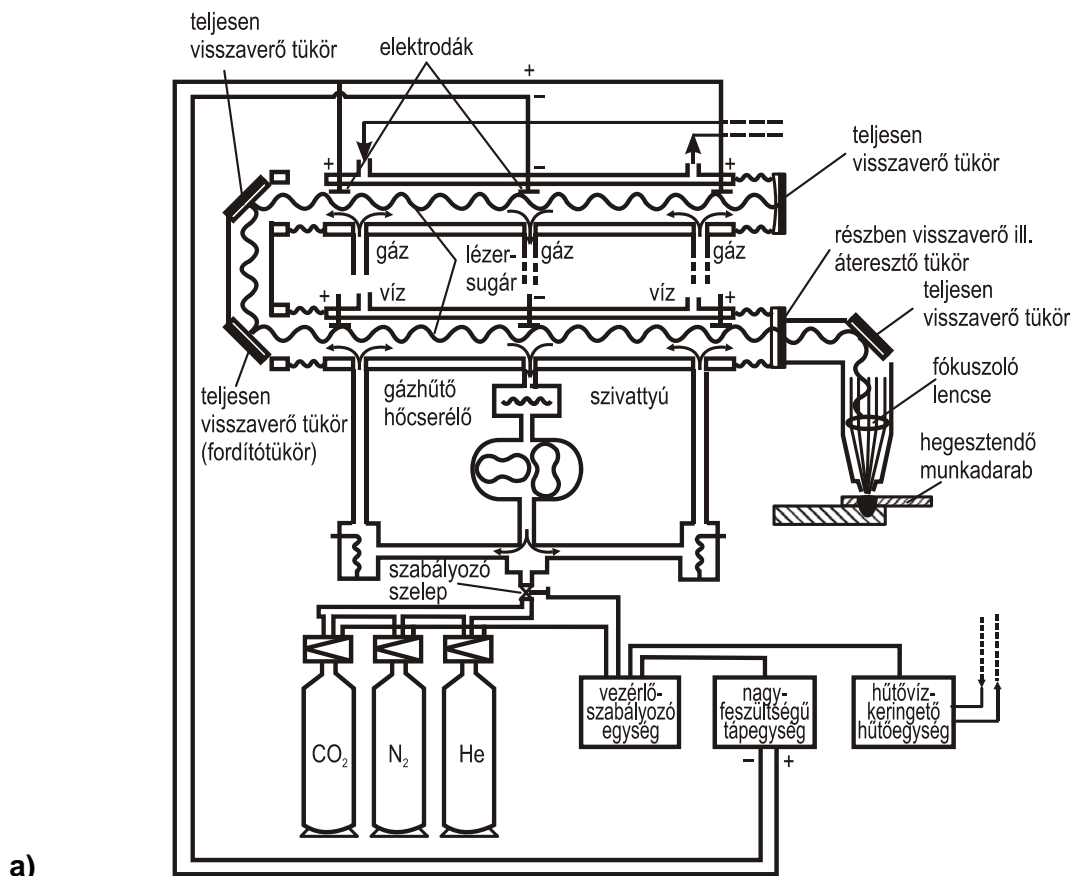
#### **4. Lézeres (vagy lézersugaras) hegesztés eljárásváltozatai**

##### ***a) Eljárásváltozatok a lézersugárzást kibocsájtó anyag ill. a gerjesztés módja szerint:***

- *gáz-* (pl. 10,6  $\mu\text{m}$ -es hullámhosszúságú sugárzást produkáló  $\text{CO}_2$ -, pontosabban  $\text{CO}_2+\text{N}_2+\text{He}$  gázkeverék-) *lézeres hegesztés (4/a. ábra)* elektromos gázkisülés közben fellépő elektronütközéses gerjesztéssel: üveg-, kvarc-, kerámia-csövekben, kis nyomáson, állandó cserélődést biztosító hossz- vagy keresztáramoltatással megvalósuló hegesztés;
- *szilárdtest-* (pl. 1,06  $\mu\text{m}$ -es hullámhosszúságú sugárzást produkáló Nd:YAG-, vagyis  $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ -) *lézeres hegesztés (4/b. ábra)* optikai szivattyúzással (fénygerjesztéssel): Xe- vagy Kr- villanólámpákkal, nagynyomású Hg-gőz lámpával, hosszúívű Xe- vagy Kr-kisülési lámpákkal, jód-kvarc lámpával gerjesztett hegesztés;
- *dióda-* (pl. 0,9–1,03  $\mu\text{m}$ -es hullámhosszúságú sugárzást produkáló, közvetlen vagy száloptika csatlósú) *lézeres hegesztés (4/c. ábra)*: szennyezett félvezetők pn-átmeneteiben, elektron-lyuk párok előállításával megvalósuló hegesztés.

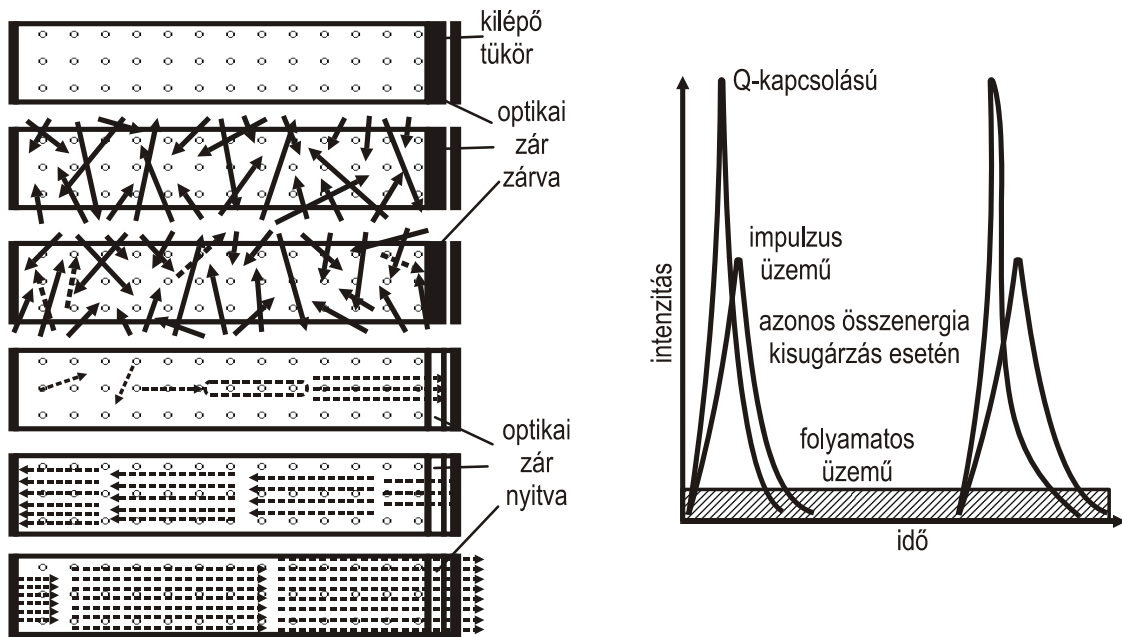
##### ***b) Eljárásváltozatok a megvalósuló üzemmód és sugárintenzitás szerint:***

- *folyamatos üzemű lézeres hegesztés*: megfelelő névleges teljesítményű berendezéssel megvalósuló, sugárszagatás nélküli hegesztés. Például a gázlézerek kimenő teljesítménye alapvetően a gerjesztett térfogat függvénye és a folyamatos gázáramlás hatékony hűtéssel nagy teljesítmények elérését teszi lehetővé;
- *impulzus üzemű lézeres hegesztés (5. ábra)*: olyan berendezéssel megvalósuló hegesztés, amelynél a névleges teljesítmény wattokban fejezhető ki, de mivel az impulzus időtartama rendkívül rövid is lehet, ezért a kimenő teljesítmény a névlegesnél több nagyságrenddel nagyobb lehet (igen kicsi összenergia mellett);
- *Q-kapcsolású lézeres hegesztés (5. ábra)*: a kilépő tükrök és a lézeraktív anyag közé még egy optikai zárat helyeznek el, ami mindaddig meggátolja a gerjesztett atomok indukált sugárzását, amíg a lézeranyagban lehetőleg valamennyi atomot nem sikerült gerjesztett állapotba hozni. Pumpálás után a zár nyitásával lavinaszerűen épül fel a nagyerejű lézerhatás.



4. ábra Lézeres hegesztés eljárásváltozatai lézeranyag és gerjesztési mód szerint





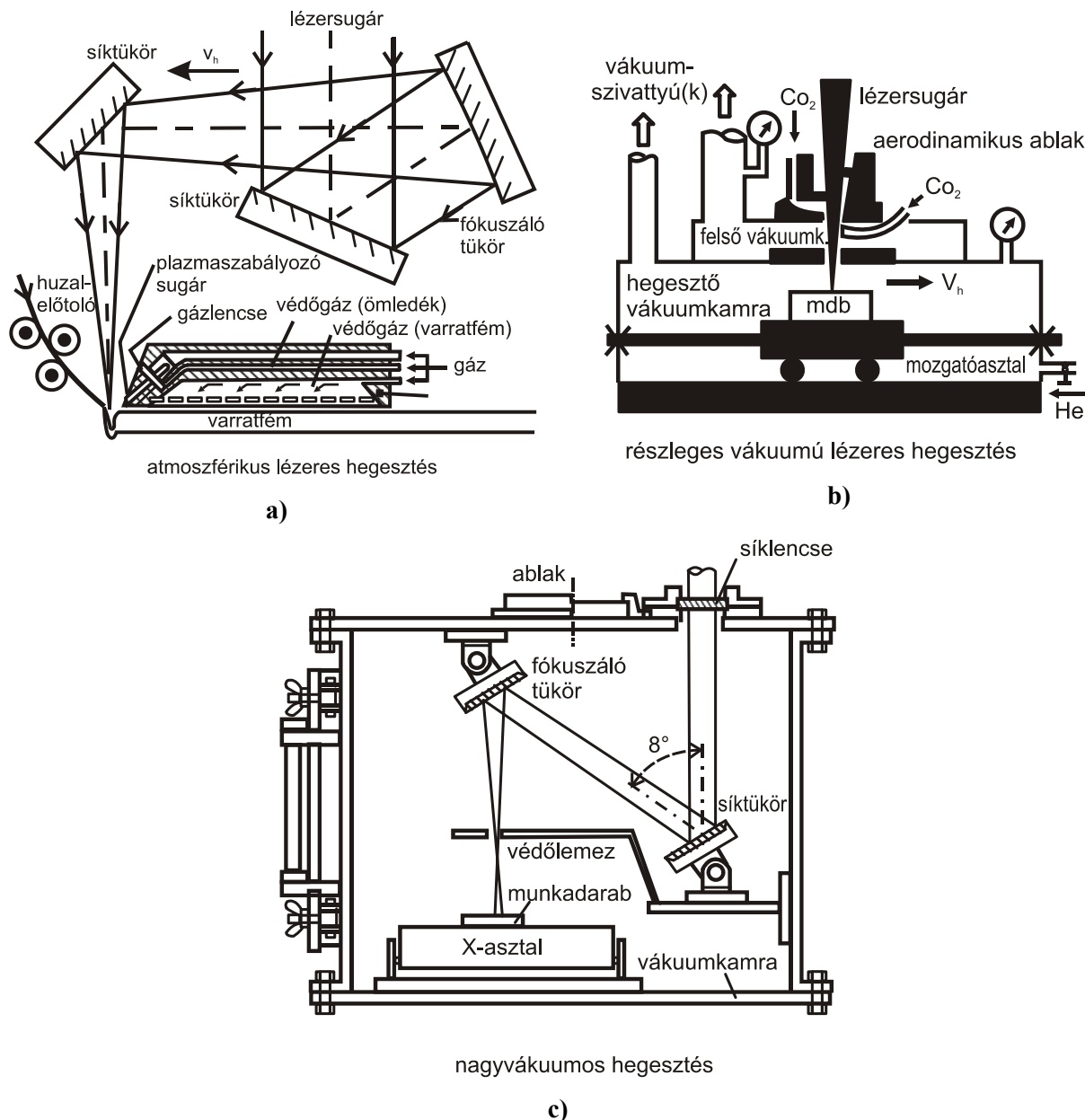
5. ábra Lézeres hegesztés eljárásváltozatai üzemmód és sugárintenzitás szerint

**c) Eljárásváltozatok a munkadarab környezetének nyomása szerint:**

- *atmoszférikus lézeres hegesztés (6/a. ábra)*: olyan hegesztés, amelynél védőgáz hozzávezetéssel mind az ömledék-, illetve varratvédelem, mind a képződő plazma szabályozása megoldható és így nagyobb varrat tisztaság, illetve beolvadási mélység biztosítható;
- *részleges vákuumú lézeres hegesztés (6/b. ábra)*: olyan hegesztés, amelyet kis kamraméret, közepes vákuum, gyors vákuum-készenléti idő jellemez, és ennek révén a varrat tisztaság javul, a beolvadási mélység is némileg növekszik, viszont a manipulációs szabadság jelentősen korlátozódik;
- *nagyvákuumú lézeres hegesztés (6/c. ábra)*: olyan hegesztés, amelynél az alacsony nyomás miatt kevesebb plazma képződik, így a beolvadási mélység a hegesztési sebesség csökkentésével javítható, viszont reaktív anyagok hegesztése is lehetővé válik.

**d) Eljárásváltozatok hozaganyag-alkalmazás szerint:**

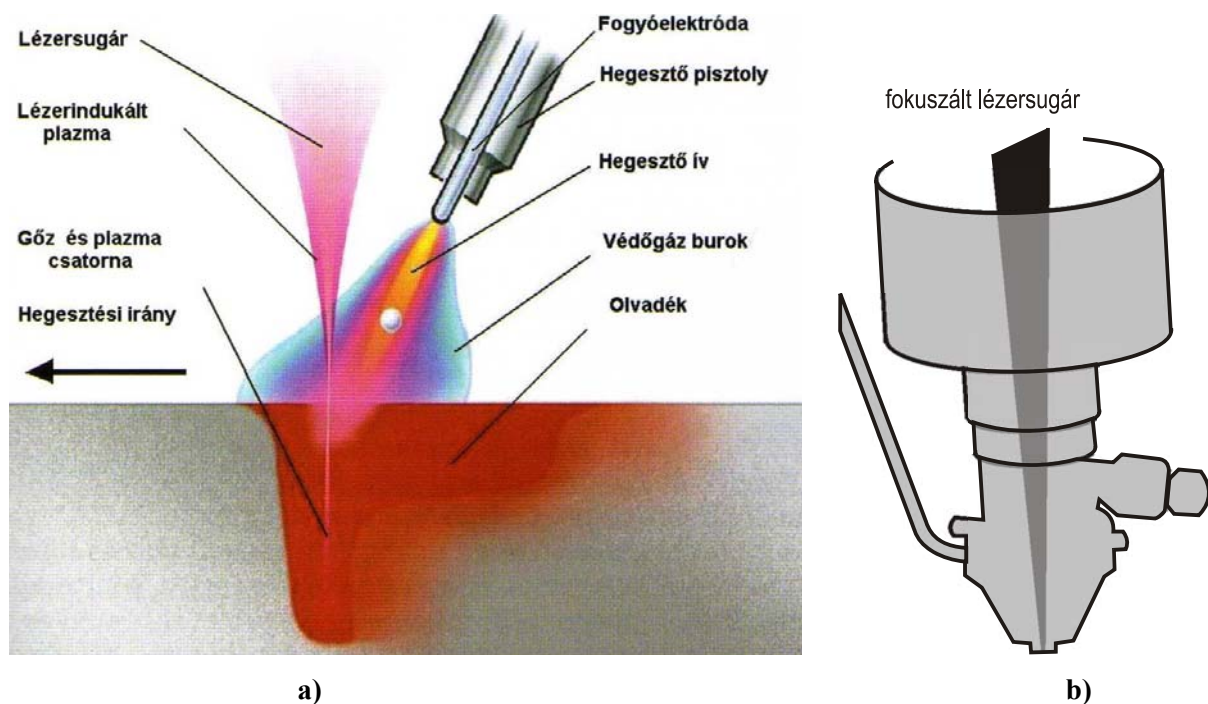
- *hozaganyag adagolás nélküli lézerhegesztés (4/a. ábra)*: vékonyabb anyagok kötőhegesztése;
- *huzaladagolásos lézerhegesztés (6/a. ábra)*: olyan hegesztés, amelynél az adagolt hegesztőhuzal bekeveredése jól szabályozható és alacsony mértéken tartható a teljesítmény változtatása révén;
- *poradagolásos lézerhegesztés*: olyan hegesztés, amelynél a felrakandó port a tárolótartályból egy adagoló juttatja a fókuszolt lézersugár által érintett munkadarab felületre.



6. ábra Lézeres hegesztés eljárásváltozatai környezeti nyomás szerint

**e) Eljárásváltozatok más eljárásokkal való kombinálás szerint:**

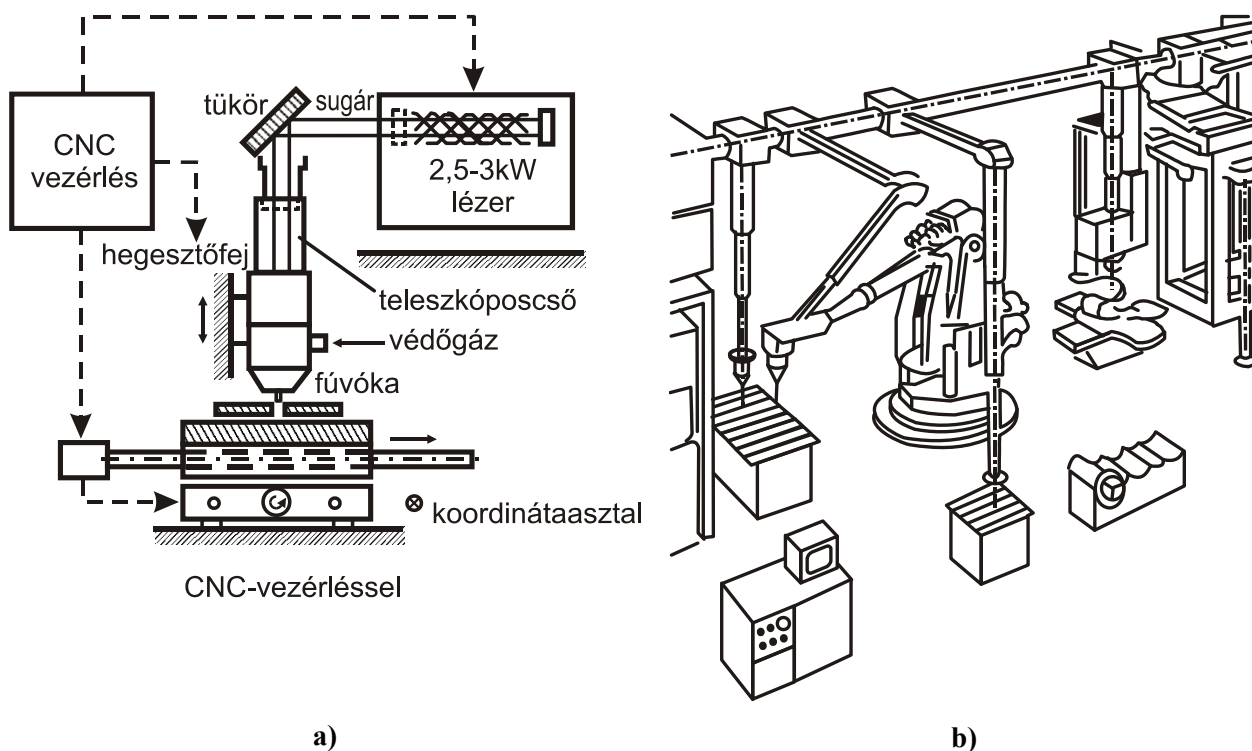
- MIG/MAG-lézer (hibrid-)hegesztés (7/a. ábra): a mélyebb beolvadású lézerhegesztés és a jobb rész-áthidaló-képességű fogyóelektrodás védőgázos ívhegesztés célszerű kombinálása;
- plazma-lézer (hibrid-)hegesztés: a plazmaívhegesztés és a lézerhegesztés társításával végzett ömlesztő hegesztés, melynek további két alváltozata:
- elkülönített lézer- és plazmafejjel megvalósuló elrendezés, közös munkafelületre irányítva;
- közös hatásvonalú elrendezés, melyben a fókuszolt lézersugárzás hozzávezetése a volfrámelektroda kúpos üregén (7/b. ábra), illetve a plazmaíven keresztül történik.



7. ábra Lézeres hegesztés eljárásváltozatai más eljárásokkal való kombinálás szerint

**f) Eljárásváltozatok gépesítés szerint:**

- *gépesített lézeres hegesztés (8/a. ábra):* CNC-vezérlésű munkadarab-pozicionálással vagy lézerfej-mozgatással végzett hegesztés;
- *robotosított lézeres hegesztés (8/b. ábra):* robottal manipulált lézerfejjel (repülő optikával) megvalósuló hegesztés, amelyre varratkövető szenzor is felszerelhető.



8. ábra Lézeres hegesztés eljárásváltozatai gépesítés szerint

## 5. Összegzés

A nagy energiasűrűségű hegesztési eljárások több szempontú rendszerezése lehetőséget ad arra, hogy azok fő sajátosságait kiemeljük, az alkalmazások szempontjából jobban áttekinthessük. Ezáltal egy konkrét feladat esetében egyszerűbbé válhat a megfelelő eljárásválogatás kiválasztása.

## Irodalom

- [1] Baránszky-Jób Imre (szerk.), *Hegesztési kézikönyv*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
- [2] Bauer Ferenc, *Hegesztési eljárások*. (egyetemi jegyzet) - szerkesztette és kiegészítette: Bagyinszki Gyula; Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.
- [3] Bagyinszki Gyula, *Nagy energiasűrűségű hegesztési eljárással készített kötések hegeszthetőségének kérdései*. (Hegesztő szakmérnöki diplomatervezet), BME Mechanikai Technológia és Anyagszerkezetek Intézet, 1993, 139 oldal.
- [4] Bagyinszki Gyula: *A hegesztés és rokon eljárásai rendszerezése*. Hegesztéstechnika XIII. évfolyam, 2002/2. szám, 29–35. oldal.
- [5] Szerkesztette: Gáti József, *Hegesztési zsebkönyv*. COKOM Mérnökiroda Kft, Miskolc, 2003.
- [6] Szunyogh László (főszerk.), *Hegesztés és rokon technológiák Kézikönyv* – Bagyinszki Gyula (szerző): 3.2.7. *Plazmahegesztés*. Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 2007, 204–213. oldal.

**Dr. Bitay Enikő**, egyetemi docens  
Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem  
Műszaki és Humántudományok Kar,  
RO, 540485, Tîrgu Mureş/Marosvásárhely  
OP. 9, CP4.  
Telefon: +40-740-589718  
E-mail: ebitay@gmail.com

**Dr. Bagyinszki Gyula**, főiskolai tanár  
Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész- és  
Biztonságtechnikai Mérnöki Kar,  
Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet,  
Anyag- és Alakítástechnológiai Szakcsoport,  
1081 Budapest, Népszínház u. 8.  
Tel.: (+36-1) 666-5304, Fax: (+36-1) 666-5494  
E-mail: bagyinszki.gyula@bgk.uni-obuda.hu