



Mechanikai tulajdonságok meghatározása a mélységérzékeny Vickers-keménységmérés módszerével

GUBICZA JENŐ – JUHÁSZ ANDRÁS

A cikk a klasszikus Vickers-keménységmérés továbbfejlesztéseként kidolgozott mélységérzékeny keménységmérés módszerét mutatja be. Ez az eljárás megtartva a klasszikus módszer előnyeit, fizikai tartalommal tölti meg a keménységmérést. Az új eljárással az anyag Vickers-keménysége (HV), Young-modulusza (E) és törési szívóssága (K_{IC}) kiegészítő mérések nélkül kapható meg.

Az anyagtudománnyal foglalkozó kutatóknak évtizedek óta célja, hogy olyan módszereket dolgozzanak ki, amelyekkel egyszerűen, gyorsan és anyagtakarékosan vizsgálhatják a szilárd testek mechanikai tulajdonságait. Az egyik talán legelterjedtebb ilyen módszer a Vickers-keménységmérés, amelyet a 20-as években fémek képlékeny tulajdonságainak jellemzésére fejlesztettek ki. A mérés során egy szabványos alakú gyémántpiramist nyomnak állandó terheléssel a minta síkra munkált felületébe. Az anyag de-

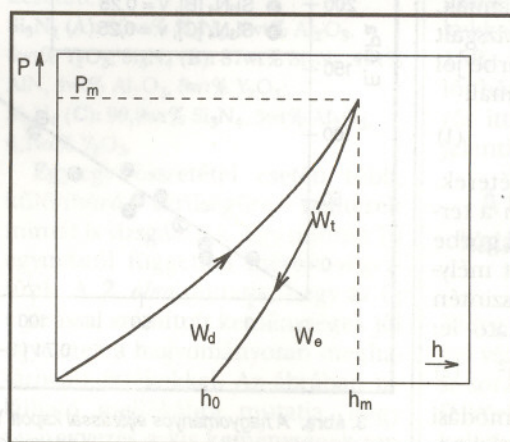
formációval szembeni ellenállását jellemző Vickers-keménységet (HV) a terhelőerő (P) és a fénymikroszkóppal mért nyomatló (d) segítségével számíthatjuk ki. Az elegendően nagy terhelőerővel ($P \geq 10N$) mért Vickers-keménység (az ún. makrokeménység) anyagjellemző (azaz nem függ a terhelőerő nagyságától), értéke képlékeny fémek esetén a folyáshatárral arányos.

Az elektronika fejlődésének köszönhetően a klasszikus Vickers-keménységmérést továbbfejlesztették. Ennek eredményeként kb. 20 évvel ezelőtt jelent meg a mechanikai anyagvizsgálatban az ún. mélységérzékeny Vickers-keménységmérés (depth sensing indentation = DSI) módszere. A mérés során a számítógép által vezérelt mérőberendezés a szabványos Vickers-piramist a be-

rendezés típusától függően állandó benyomódási vagy terhelési sebességgel a minta síkra polírozott felületébe nyomja, majd ugyanekkora sebességgel kiemeli. A mérés alatt a gép a terhelőerő (P) nagyságát a benyomódási mélység (h) függvényében folyamatosan regisztrálja és felveszi az ún. benyomódási görbét. Az 1. ábra egy sematikus benyomódási görbét mutat. A mérés első, terhelési szakaszán az erő folyamatosan növekszik a benyomódási mélység növekedésével, miközben az anyag a fej alatt rugalmasan és képlékenyen deformálódik. Az előre beállított maximális terhelőerő (P_m) elérése után a fej állandó sebességgel kiemelkedik az anyagból. Ezen az ún. tehermentesítési szakaszon az anyagban lévő rugalmas feszültségek egy része megszűnik, az anyag rugalmasan relaxálva erőt fejt ki a piramisra. A tehermentesítési szakaszban miközben az erő P_m -ről nullára, a mélység a h_m maximális értékről a h_0 maradó értékre csökken. A mélységérzékeny keménységmérés, meghagyva a hagyományos Vickers-keménységmérés előnyeit (egyszerűség, anyagtakarékosság), az anyag mechanikai tulajdonságainak sokoldalú jellemzésére al-

Gubicza Jenő az ELTE matematika-fizika szakán szerzett diplomát 1992-ben. 1993 és 1996 között az ELTE Általános Fizika Tanszékén különböző anyagok mechanikai tulajdonságainak vizsgálatával foglalkozott. Munkájának egyik eredménye a mélységérzékeny Vickers-keménységmérésre alapozott új mechanikai anyagvizsgáló módszer kifejlesztése volt. A kutatási eredményeit összefoglaló PhD disszertációját 1997 elején „summa cum laude” eredménnyel védte meg. Jelenleg az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézetének munkatársa, kutatási területe a szilícium-nitrid alapú kerámiák mechanikai tulajdonságainak vizsgálata.

Juhász András az ELTE kémia-fizika szakán diplomázott 1973-ban, azóta az ELTE Általános Fizika Tanszékének oktatója, jelenleg docensi beosztásban. Kutatási területe fémes és nemfémes szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságai. Kandidátusi disszertációját 1990-ben védte meg, témája fémötvezetek szuperképlékenysége. Jelenleg üvegek és kerámiák mikroszerkezetének és mechanikai tulajdonságainak összefüggéseit vizsgálja.



1. ábra.

A mélységérzékeny Vickers-keménységmérés során felvett görbék és az ezekből meghatározható benyomódási munkák. P a terhelőerő, h a benyomódás mélységét, P_m a maximális terhelőerő, h_m ill. h_0 a maximális ill. a maradó benyomódási mélységet, W_t , W_e és W_d pedig a teljes, a rugalmas és a disszipált munkákat jelöli

kalmak, mert például a tehermentesítés során bekövetkező relaxációból az anyag rugalmas tulajdonságaira következtethetünk.

A klasszikus mechanikai anyagjellemzők (pl. keménység, Young-modulusz) meghatározása a mélységérzékeny keménységmérésből nem egyszerű feladat. Az ismert megoldások [1-5] a hagyományosan kapott értékektől eltérő eredményeket adnak [1-3], vagy a benyomódási görbékből nagy bizonytalansággal meghatározható paramétereket használnak fel a számításoknál [4, 5]. Mi az ELTE Általános Fizika Tanszékén egy olyan kiértékelési eljárást dolgoztunk ki, amely a mérésből kis bizonytalansággal határozza meg az anyag Vickers-keménységét, Young-moduluszát és törési szívósságát. Az új módszerrel kiszámított keménységek és moduluszok jó egyezést mutatnak a hagyományos eljárásokból adódó értékekkel.

A benyomódási görbékből meghatározható paraméterek

Mélységérzékeny keménységméréseink során egy számítógép által vezérelt MTS 810 típusú hidraulikus anyagvizsgáló berendezés nyomta a gyémántpiramist a minta síkra polírozott felületébe. A mérések a makrokeménység tartományában történtek ($P_m = 50-200$ N).

A Vickers-piramist a terhelési és a tehermentesítési szakaszon ugyanakkora benyomódási sebességgel mozgattuk. A nyomófej sebességét a $v = 10^{-3}-10^{-2}$ mm/s sebességtartományba választottuk. A vizsgált minták között a legkülönbözőbb anyagok szerepeltek: fémek, műanyag, alkálihalogenid, üveg és kerámiák.

Tapasztalataink szerint a vizsgált anyagok esetén a terhelési görbe jól leírható másodfokú polinommal:

$$P = c_2 h + c_3 h^2, \quad (1)$$

ahol c_2 és c_3 illesztési paraméterek. A tehermentesítési szakaszon a terhelőerő és a tehermentesítési görbe végpontjától ($P = 0$) számított mélység ($h - h_0$) közötti kapcsolat szintén másodfokú polinommal írható le:

$$P = c_2^* (h - h_0) + c_3^* (h - h_0)^2 \quad (2)$$

ahol h_0 a maradó benyomódási mélység, c_2^* és c_3^* pedig illesztési pa-

raméterek. A mélységérzékeny keménységmérés során a $P(h)$ görbék felvétele lehetővé teszi, hogy a benyomódás folyamatát energetikailag is jellemezzük.

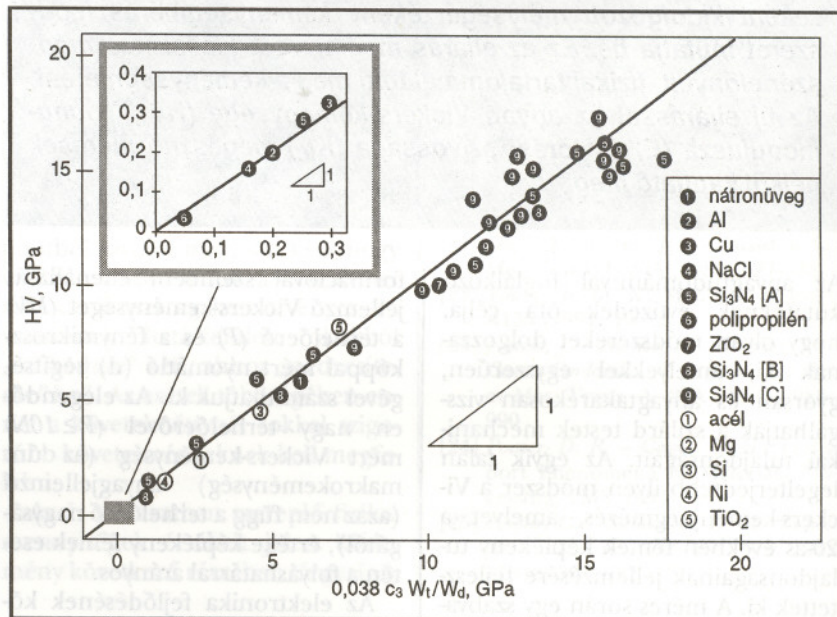
A terhelési görbe alatti terület megegyezik azzal a munkával, amelyet a maximális mélység eléréséig arra fordítunk, hogy az anyagot rugalmasan és képlekenyen deformáljuk, tömörítsük illetve repedéseket hozunk létre benne. Ezt a munkát teljes munkának nevezzük és a kö-

vetkező formulával adhatjuk meg (1. ábra).

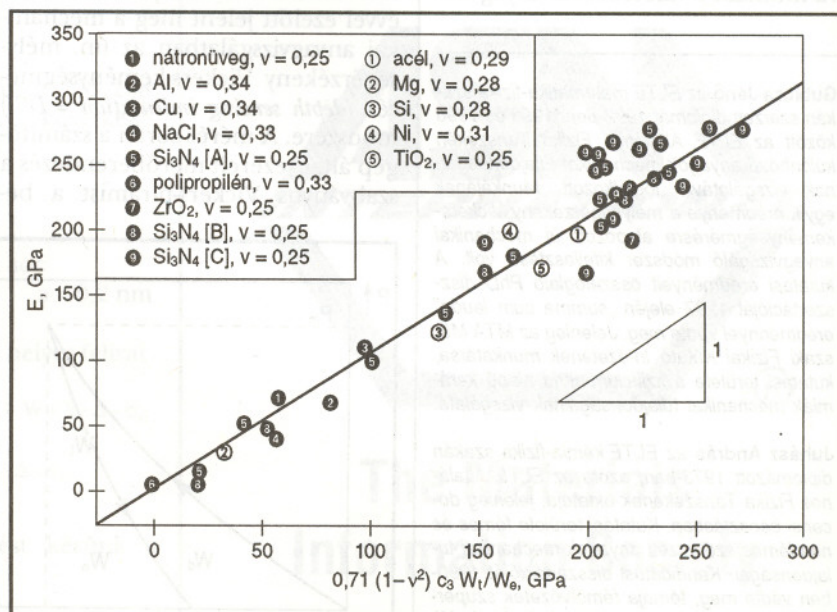
$$W_t = \int_0^{h_m} P dh \quad (3)$$

Ennek egy részét a rugalmas relaxáció alatt visszakapjuk. Ez az ún. rugalmas munka, amely a tehermentesítési görbe alatti területtel egyezik meg:

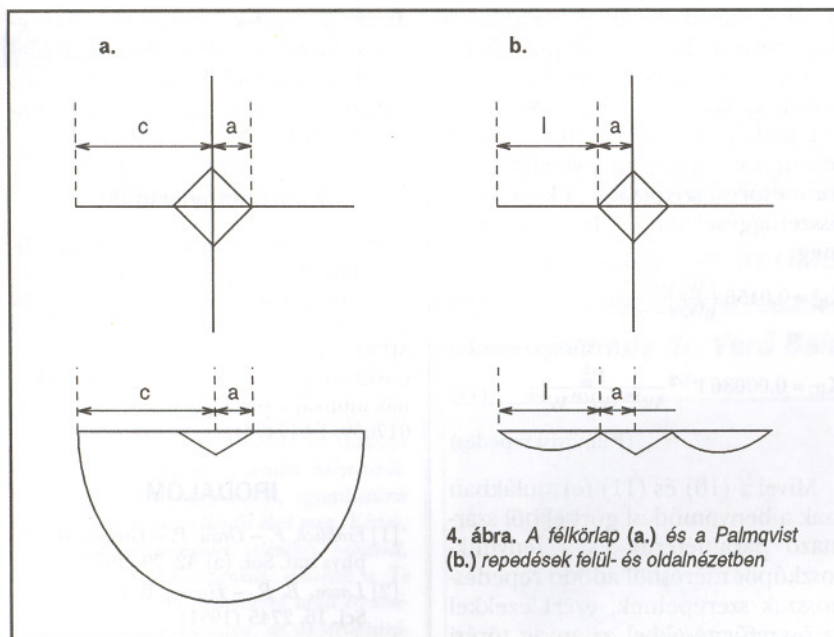
$$W_e = \int_{h_0}^{h_m} P dh \quad (4)$$



2. ábra. A hagyományosan meghatározott keménységek a (6) összefüggésből kiszámított értékek függvényében



3. ábra. A hagyományos eljárással kapott Young-moduluszok és a (7) formulából kiszámított értékek közötti kapcsolat



4. ábra. A félkörilap (a.) és a Palmqvist (b.) repedések felül- és oldalnézetben

A kettő különbsége adja a benyomódási ciklus során disszipálódott energiát:

$$W_d = W_t - W_e \quad (5)$$

Tapasztalataink alapján a benyomódási munkák hányadosai az általunk alkalmazott terhelési tartományban függetlenek a terhelőerőtől, nagyságukat csak az anyag mechanikai tulajdonságai szabják meg. A benyomódási görbék itt bevezetett paramétereinek segítségével a vizsgált minta Vickers-keménysége, Young-modulusza és törési szívóssága meghatározható.

A keménység meghatározása a benyomódási görbékéből

A mélységérzékeny Vickers-keménységmérés során a keménységnyom méretének meghatározásakor az optikai nyomleolvasást elektronikus mélységméréssel helyettesíthetjük. Tökéletes Vickers-nyomgeometriát feltételezve a nyomátló és a benyomódási mélység között teljesül a $d = 7h$ kapcsolat. A terhelési és tehermentesítési szakaszon egyaránt bekövetkező rugalmas deformáció miatt azonban a valóságban a fenti összefüggés sem h_m , sem h_0 behelyettesítésével nem teljesül. Következésképpen a hagyományos keménység meghatározása a mélységérzékeny Vickers-keménységmérésből nem egyszerű feladat.

Korábbi dolgozatainkban [6, 7] közölt gondolatmenet alapján a Vickers-keménységet (HV) a benyomódási paraméterek segítségével megadó összefüggés a következő alakban írható fel:

$$HV = 0,038 c_3 \frac{W_t}{W_d} \quad (6)$$

A (6) összefüggés érvényességének ellenőrzése céljából az új módszerrel számított Vickers-keménységeket összehasonlítottuk a hagyományos módon meghatározott értékekkel a legkülönbözőbb anyagok esetén. Ezek az anyagok a következők voltak: acél, alumínium, vörösréz, nikkel, magnézium, szilícium, polipropilén, nátrium-klorid, natronüveg, titán-dioxid kerámia, cirkónium-dioxid kerámia és szilícium-nitrid alapú kerámiák. Az utóbbi minták háromféle összetételben készültek:

Si_3N_4 (A): 90wt% Si_3N_4 , 4wt% Al_2O_3 , 6wt% Y_2O_3 ; Si_3N_4 (B): 87wt% Si_3N_4 , 4wt% AlN , 4wt% Al_2O_3 , 5wt% Y_2O_3 ; Si_3N_4 (C): 90,9wt% Si_3N_4 , 3wt% Al_2O_3 , 6,1wt% Y_2O_3 .

Egy-egy összetétel esetén több, különböző sűrűségűre szinterelt mintát is vizsgáltunk. Egy mintán 10 egymástól független mérést végeztünk. A 2. ábra mutatja, hogy az új eljárással számított keménységek jól egyeznek a hagyományos meghatározott értékekkel. Az ábrában található mellékábra mutatja, hogy a jó egyezés a kis keménységek tar-

tományában ($HV \leq 0,3$ GPa) is teljesül. Egy-egy anyagon a hagyományos és az új módszerrel mért keménységek szórása közel megegyező nagyságú volt. A keménységsszámok szórása anyagfajtánként különböző, 3,6–13,5% közötti érték volt. A szórás a porózus kerámiákra a legnagyobb, amit a felületi inhomogenitásokkal magyarázhatunk.

A Young-modulusz meghatározása a benyomódási görbékéből

A benyomódásból nyerhető paramétereknek a minta klasszikus rugalmas állandóival való megfeleltetése nem könnyű feladat, mert mind a terhelési mind a tehermentesítési görbe alakja egyaránt függ az anyag rugalmas és képlékeny tulajdonságaitól is. A keménységre vonatkozó (6) formulához hasonló alakú összefüggést találtunk a minta Young-modulusza (E) és a benyomódási paraméterek között [6, 8]:

$$E = 0,71 (1 - \nu^2) c_3 \frac{W_t}{W_e} \quad (7)$$

amelyben a benyomódási görbékéből adódó mennyiségeken kívül a minta ν Poisson-száma is szerepel. A Young-modulusz kiszámításánál a Poisson-szám helyére irodalmi adatokat helyettesítettünk. A (7) összefüggésből adódó moduluszokat összehasonlítottuk a hagyományos mérésekből kapott értékekkel. Ezek a mérések a kerámiaminták esetén négyponos hajlítóvizsgálatokat, a többi minta esetén egytengelyű nyújtó- és összenyomó vizsgálatokat jelent. A 3. ábra mutatja, hogy az új módszerrel meghatározott Young-moduluszok jól egyeznek a hagyományos eljárásokból kapott értékekkel. A moduluszok szórása 4,8–15% közötti, anyagfajtánként különböző érték volt. A nagyobb szórás itt is a kerámiaanyagok esetén jelentkezett.

A törési szívósság meghatározása a benyomódási paraméterekből

Rideg anyagok nagyobb terhelésekkel végzett Vickers-keménységmérés során a négyzetes nyom sarkainál félkörilap ill. Palmqvist repedések keletkezhetnek. A két repedéstípus

sematikus felülnézeti és oldalnézeti képét mutatja a 4. ábra. Az 1970-es években ismerték fel, hogy e repedések lehetőséget adnak az anyag repedésterjedéssel szembeni ellenállásának jellemzésére, törési szívósságának meghatározására az egyszerű, anyagtakarékos Vickers-keménységméréssel. Félkörlap és Palmqvist repedések esetén a felszíni repedés-hosszából a minta törési szívósságát (K_{IC}) a következő összefüggések segítségével számíthatjuk ki [9-12]:

$$K_{IC} = 0,016 \left(\frac{E}{HV} \right)^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}} \quad (8)$$

(félkörlap repedés)

$$K_{IC} = 0,0193 l^{-1/2} HV a \left(\frac{E}{HV} \right)^{2/5} \quad (9)$$

(Palmqvist repedés)

ahol HV a Vickers-keménység, E a Young-modulus, P a terhelőerő, a a Vickers-nyom félátlója, c ill. l a félkörlap ill. Palmqvist repedés karakterisztikus hossza (4. ábra). A (8) és (9) formulákban a hagyományos keménységmérésből adódó paraméterek mellett a minta Young-modulus is szerepel, amelyet eddig más mérési eljárással kellett meghatározni. Ez szabályos alakú próbatest kialakítását követelte meg, ami kis mennyiségben rendelkezésre álló vagy nehezen megmunkálható anyag esetén problematikus volt.

Az (1), (3), (6-7) formulák és a hagyományos keménységdefiníció felhasználásával a K_{IC} -t megadó (8-9) összefüggések olyan alakra hozhatók, amelyekben a benyomódásból származó paraméterek mellett csak a minta Poisson-száma szerepel. Mivel törékeny anyagokra $0 \leq$

$v \leq 0,3$, ezért ha ezekben az átalakított formulákban a v -től függő mennyiségek helyébe $0,975$ -t helyettesítünk, akkor ez a K_{IC} számolásánál legfeljebb 2,5%-os hibát okoz. Mindezek figyelembevételével a minta törési szívósságát a következő összefüggésekkel határozhatjuk meg:

$$K_{IC} = 0,0156 \left(\frac{W_d}{W_c} \right)^{1/2} \frac{P_m}{c^{3/2}} \quad (10)$$

(félkörlap repedés)

$$K_{IC} = 0,00086 l^{-1/2} \frac{P_m^2}{W_c^{1/2} W_d^{1/10} W_c^{2/5}} \quad (11)$$

(Palmqvist repedés)

Mivel a (10) és (11) formulákban csak a benyomódási görbékből származó paraméterek és a fénymikroszkópos mérésből adódó repedés-hosszak szerepelnek, ezért ezekkel az összefüggésekkel az anyag törési szívóssága a mélységérzékeny Vickers-keménységmérésből, kiegészítő mérések nélkül meghatározható.

Összefoglalás

Az utóbbi években az anyagvizsgálatban egyre elterjedtebbé vált egy új módszer, a mélységérzékeny Vickers-keménységmérés. Ez a módszer megőrzi a hagyományos keménységmérés előnyeit, több és értékesebb információt ad az anyag mechanikai tulajdonságairól mint elődje, mert nemcsak a maradó nyomból következtet az anyag mechanikai jellemzőire, hanem az egész benyomódási folyamatot rögzíti. A mélységérzékeny Vickers-keménységmérés olyan kiértékelési eljárását dolgoztuk ki, amellyel az

anyag Vickers-keménységét, Young-modulusát és törési szívósságát kiegészítő mérések nélkül, gyorsan, egyszerűen és anyagtakarékosan határozhatjuk meg.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki dr. Lendvai János tanszékvezető egyetemi tanárnak, dr. Vörös Györgynek (ELTE Általános Fizika Tanszék) valamint dr. Arató Péternek (MTA MFKI) a kutatómunkában nyújtott segítségükért. Köszönettel tartozunk az OTK-nak munkánk pénzügyi támogatásáért (T-017639, T-017474).

IRODALOM

- [1] Fröhlich, F. – Grau, P. – Grellmann, W.: phys stat. Sol. (a) 42, 79 (1977)
- [2] Lawn, B. R. – Howes, V. R.: J. Mater. Sci. 16, 2745 (1981)
- [3] Sakai, M.: Acta metall. Mater. 41, 1751 (1993)
- [4] Pharr, G. M. – Oliver, W.C. – Brotzen, F. R.: J. Mater. Res. 7, 613 (1992)
- [5] Oliver, W. C. – Pharr, G. M.: J. Mater. Res. 7, 1564 (1992)
- [6] Gubicza J. – Juhász A. – Tasnádi P. – Arató P. – Vörös Gy.: J. Mat. Sci. 31, 3109 (1996)
- [7] Gubicza J. – Juhász A. – Lendvai J.: J. Mat. Res. 11, 2964 (1996)
- [8] Gubicza J. – Juhász A. – Arató P. – Szomert P. – Tasnádi P. – Vörös Gy.: J. Mat. Sci. Lett. 15, 2141 (1996)
- [9] Dietz, M. – Tietz, H. D.: J. Mat. Sci. 25, 3731 (1990)
- [10] Ponton, C. B. – Rawlings, R. D.: Mat. Sci. And Techn. 5, 865 (1989)
- [11] Anstis, G.R. – Chantikul, P. – Lawn B. R. – Marshall, D. B.: J. Am. Cera. Soc. 64, 533 (1981)
- [12] Niihara, K. – Morena, R. – Hasselman, D. P. H.: J. Mat. Sci. Lett. 1, 13 (1982)

MŰSZAKI-GAZDASÁGI HÍREK

Új, a karbonszálak fluormentesítésére szolgáló eljárást fejlesztettek ki a NASA Lewis Research Centerben (Cleveland, Ohio), amellyel a szálak tulajdonságai adott felhasználási célnak megfelelően állíthatók be. Például az új módszerrel igen nagy modulusú szál állítható elő, amely egyébként a korábbi módszerekkel csak nagy nehézségek árán volt elérhető. Olyan szál is előállítható az új módszerrel, amely sokkal jobban nedvesíthető, mint a jelenleg kaphatók, és amely segítségével lényege-

sen nagyobb szilárdságú MMC-k gyárthatók, mint eddig.

Advanced Materials and Processes, Vol 152. No. 1. July 1997, p. 9.

A lézeres vágáshoz és hegesztéshez szükséges paraméterek könnyen kiolvashatók a lézeres megmunkálások adatbázisából, amelyet a Manufacturing Technology Information Analysis Center (Chicago) fejlesztett ki. A kompozitok, kerámiák és fémek CO₂- és NdYAG-lézeres vágására és hegesztésére vonatkozó adatokat

gyűjtöttek össze a világon fellelhető forrásokból. A vágással kapcsolatos információk magukba foglalják a vágandó anyag vastagságát, a lézersugár sebességét, az impulzus hosszát, frekvenciáját, a teljesítményt, a lencse fókusztávolságát és a sugátmérőt. A hegesztésre vonatkozó információk a következők: a hegesztendő anyag vastagsága és a rés szélessége, a varrat típusa, a beolvadási mélység, az impulzus hossza, a frekvencia és a teljesítmény, a védőgáz nyomása és a sugár átmérője.

A szoftver magába foglal továbbá egy olyan modellt is,

mely előre jelzi a vágás és a hegesztés folyamatát. Ehhez a modellhez a felhasználó új input-adatokat vihet be, beleértve a megmunkálandó anyag jellemzőit is. A becslő modell a lézeres vágáshoz olyan diagramot rendel, amely a vágható vastagságot ábrázolja a vágás sebessége és a foltátmérő/tényleges lézer teljesítmény függvényében. A hegesztéssel kapcsolatban is generál egy olyan diagramot, amely a beolvadási mélységet ábrázolja a hegesztés tényleges idejének függvényében. *Advanced Materials and Processes Vol. 153. No. 1. 1997. July p. 12.*