

**HŐSOKK-ÁLLÓSÁG BECSLÉS SZERSZÁMANYAGOKRA****ESTIMATION OF THERMAL SHOCK RESISTANCE FOR TOOL MATERIALS**Bagyinszki Gyula<sup>1</sup>, Bitay Enikő<sup>2</sup><sup>1</sup>Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Magyarország, 1081 Budapest, Népszínház u. 8, bagyinszki.gyula@bgk.uni-obuda.hu<sup>2</sup>Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, 540485 Târgu-Mureş, O.p. 9, C.p. 4., ebitay@ms.sapientia.ro**Abstract**

The thermal shock can appear either as an instantaneous heat effect (in case of a rapid sub-cooling) produced within relatively large (perhaps variable) temperature limits, or a local stress due to the high temperature gradient. The heat stress developed as effect of the heat stroke – in superposition with the stresses related to the mechanical loads – can cause the exceeding of the admissible strength limit. This leads to certain fissures or even fracture when deformation is obstructed in special in case of materials of limited plasticity. This paper deals with the estimation possibilities of the thermal shock resistance for certain database included tool materials.

**Keywords:** thermal shock resistance, thermal stress, distortion, tool steels, ceramics.

**Összefoglalás**

A hősokk lehet "lökésszerű" hőhatás (pl. gyors túlhűtéskor), viszonylag nagy (esetenként változó) hőmérsékletváltozások között, vagy nagy hőmérséklet-gradiens okozta lokális igénybevétel. A hőlökés, hőfok-különbség hatására kialakuló hőfeszültség - különösen egyidejűleg ható mechanikai terheléssel - az anyag (határ)szilárdságát elérő feszültséget, az akadályozott alakváltozás (nem eléggé képlékeny anyagoknál) pedig repedést, sőt törést eredményez(het). Jelen cikk a hősokk-állóság becslésének lehetőségével foglalkozik, szerszámanyagok adatait alapul véve.

**Kulcsszavak:** hősokk-állóság, hőfeszültség, vetemedés, szerszámacélok, kerámiák.

**1. Bevezetés**

A fizika hőtani fejezetéből közismert

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (1)$$

képlet, illetve annak az egyszerű Hook-törvény felhasználásával

$$\alpha \cdot \Delta T = \frac{\Delta L}{L_0} = \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

illetve

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3)$$

alakra átrendezett formája az akadályozott hőtágulás okozta hőfeszültségek problematikájának szemléltetésére alkalmas [1], de mértékadó számításokra csak korlátozottan (például egy mindkét végén mereven befogott rúd, vagy egy merevített környezetben hegesztett tompavarrat esetében). Hőkezelendő darabok, hűtött melegező szerszámok esetében célszerű a geometriától (méretektől) lényegében függetlenített, a lokális feszültségekre koncentráció számításai összefüggéseket alkalmazni.

## 2. Hőfeszültségek

Ha egy darab hőtágulása vagy zsugorodása akadályozott, hőfeszültségek keletkeznek benne. Célszerű különbséget tenni külső kényszer okozta (pl. mindkét végén mereven befogott rúdban), és külső kényszer nélkül, a darabban kialakuló hőmérséklet-gradiens miatti hőfeszültség között. Felírható, hogy:

$$C \cdot \Delta\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (4)$$

ahol  $E$  a rugalmassági modulus;  $\alpha$  a lineáris hőtágulási együttható;  $C = 1$  egytengelyű kényszerre,  $1-\nu$  kéttengelyű kényszerre ill. a szokásos hűtési (pl. hőkezelési) viszonyokra, és  $1-2\nu$  háromtengelyű kényszerre;  $\nu$  a Poisson-tényező. Ezzel számítható az indukált feszültség [2]:

$$\Delta\sigma = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{c} \quad (5)$$

1. táblázat. Néhány elterjedt szerszámacél fontosabb mechanikai és termikus tulajdonságai

Szerszámacélok	ötvözetlen szerszámacél	hidegalakító szerszámacél	melegalakító szerszámacél	(forgácsoló) gyorsacél	műanyagforma (szerszám)acél
EN anyagjel	C105U	X210Cr12	X40CrMoV5-1	HS6-5-2	40CrMnNiMo8-6-4
EN számjel	1.1545	1.2080	1.2344	1.3343	1.2738
régi MSZ jel	S101	K1	K13	R6	-
AISI jel	W110	D3	H13	M2	P20
$E$ [GPa]	209	211	216	228	210
$\nu$ [-]	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
max. $R_m$ [MPa]	1510	2500	2040	2570	1660
min. $R_m$ [MPa]	1440	2100	1940	2220	930
$\alpha$ [ $10^{-6}/^\circ\text{C}$ ]	10,5	12,3	10,5	10,2	11,6
$\lambda$ [W/m $\cdot$ °C]	48,4	30,5	28,7	22,0	44,7

2. táblázat. Néhány elterjedt szerszámacél kalkulált hőszokk-állósága

$\Delta T$ hőszokk-állóság	ötvözetlen szerszámacél	hidegalakító szerszámacél	melegalakító szerszámacél	(forgácsoló) gyorsacél	műanyagforma (szerszám)acél
max. $R_m$ -ből	489 °C	684 °C	639 °C	785 °C	484 °C
min. $R_m$ -ből	466 °C	575 °C	607 °C	677 °C	271 °C

Az a képesség, hogy egy anyag(darab) a hirtelen hőmérséklet-változást elviseli, a hőszokk-állóság, aminek mértékét kifejező

$$\Delta T = C \cdot \frac{R_m}{\alpha \cdot E} = (1 - \nu) \cdot \frac{R_m}{\alpha \cdot E} \quad (6)$$

Ha ez meghaladja az anyag  $R_m$  lokális szakítószilárdságát (mint kritikus határ-feszültséget), károsodást eredményez(het).

## 3. Hőszokk-állóság szerszámacélok esetében

A számítások illusztrálására néhány ismert szerszámacél 1. táblázatban szereplő adatait vettük alapul. Mind a mechanikai, mind a termikus anyagtulajdonságok hőmérsékletfüggők, ezért átlagértékeket képeztünk adatbázisból [3, 4] vett jellemzőkből.

A szilárdsági adatokat a hőkezelési cél-tól függően megválasztott megeresztési hőmérséklet is jelentősen befolyásolja, ezért célszerű egy intervallum határértékeit számba venni. (Egyes szerszámacélokra eleve a keménység /HRC<sub>min</sub>, HV<sub>min</sub>/ a mértékadó előírás, nem pedig a szilárdság jellemző értéke.)

képlettel [2] adódik a maximális megengedhető hőmérséklet-különbség (ill. kis távolságon belüli hőmérséklet-gradiens).  $R_m$  minimális értékével számítva az eredmény kedvezőtlenebb (2. táblázat).

Amikor egy anyag(darab) felületi hőmérséklete hirtelen változik - „belső” kényszer van -, az anyag  $\lambda$  hővezetési tényezője is meghatározóvá válik, ill. a hőátadás számszerűsíthető a  $h$  hőátadási tényezővel.

Így egy másik közelítő becslés kapható az „A” ill. egy „B” faktor bevezetésével [2]:

$$A = \frac{t \cdot \frac{h}{\lambda}}{1 + t \cdot \frac{h}{\lambda}}, \text{ illetve } B = \frac{C}{A} \quad (7)$$

3. táblázat. „A” faktor értékei (jellemző méret:  $t = 10 \text{ mm}$ )

Hűtés módok (és hőátadási tényezők)	Anyagcsoportok növekvő hővezetési tényező szerint			
	Habok	Polimerek	Kerámiák	Fémek
Lassú (nyugvó) léghűtés ( $h \approx 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ )	0,75	0,5	0,03	0,003
Gyors (áramló) léghűtés ( $h \approx 100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ )	1	0,75	0,25	0,03
Lassú (nyugvó) vízhűtés ( $h \approx 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ )	1	1	0,75	0,23
Gyors (áramló) vízhűtés ( $h \approx 10000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ )	1	1	1	0,1...0,9

A  $\lambda$  hővezetési tényezők ismeretében számított „A” faktor értékeihez példánkban a  $h = 10000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$  értéket vettünk figyelembe. A kapott 0,1...0,9 közé eső „A” értékkel pedig a  $\Delta T$  hősokek-paraméter értéke kalkulálható, mint a maximális megenged-

ahol  $t$  egy jellemző méret (a hőáram irányában); a  $t \cdot h/\lambda$  mennyiség szokásos elnevezése a Biot-modulus vagy Biot-szám.

A 3. táblázat megadja az „A” faktor értékeit, ha a jellemző méret  $t = 10 \text{ mm}$ .

A  $B \cdot \Delta T = R_m / (\alpha \cdot E)$  alapján a hőkárosodással szembeni ellenállást kifejező  $\Delta T$  hősokek-paraméter értéke így alakul:

$$\Delta T = \frac{A}{C} \cdot \frac{R_m}{\alpha \cdot E} = \frac{A}{1-\nu} \cdot \frac{R_m}{\alpha \cdot E} \quad (8)$$

hető hőmérséklet-különbség (kis távolságon belüli hőmérséklet-gradiens). A 4. táblázat a kiválasztott szerszámacélokra jellemző „A” faktor értékeit, és az ezzel korrigált hősokek-állósági értékeket mutatja.

4. táblázat. Néhány elterjedt szerszámacélra kalkulált „A” faktor és korrigált hősokek-állóság

Korrigált $\Delta T$ hősokek-állóság	ötvezetlen szerszámacél	hidegalakító szerszámacél	melegalakító szerszámacél	(forgácsoló) gyorsacél	műanyagforma (szerszám)acél
„A” faktor	0,674	0,766	0,777	0,820	0,691
$\Delta T$ max. $R_m$ -ből	653 °C	1039 °C	984 °C	1276 °C	663 °C
$\Delta T$ min. $R_m$ -ből	623 °C	873 °C	936 °C	1102 °C	372 °C

#### 4. Kerámiák hősokek-állósága

Hősokek-hatással szembeni érzékenység a hőmérsékleti gradiens(ek)ből származó belső feszültségekből, ill. a kerámiák ridegességéből ered. A hősokek-állósági (*Thermal Shock Resistance*) paraméterük a

$$TSR = \frac{\lambda \cdot R_h}{\alpha \cdot E} \quad (9)$$

formulával [5] fejezhető ki, ahol  $\lambda$  a hővezetési tényező,  $R_h$  a hajlítószilárdság,  $\alpha$  a hőtágulási együttható,  $E$  a rugalmassági modulus. Ezek mellett a geometria (alak, méretek) is befolyásolja a hősokek-állóságot. Az 5. táblázat néhány műszaki kerámia főbb mechanikai és termikus tulajdonságait [3, 5] mutatja, kiegészítve a (9) formulával számolt hősokek-állósági paraméterrel.

5. táblázat. Néhány műszaki kerámia fontosabb mechanikai és termikus tulajdonságai

Műszaki kerámiák	nagy tisztaságú alumínium-oxid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	részlegesen stabilizált cirkónium-oxid (ZrO <sub>2</sub> )	szinterelt szilícium-nitrid (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	szilícium-alumínium-oxinitrid (SIALON)	nem túlnyomással szinterelt szilícium-karbid (SiC)
<i>E</i> [GPa]	360	210	330	230	450
<i>R<sub>h</sub></i> [MPa]	520	1000	1000	355	600
<i>α</i> [10 <sup>-6</sup> /°C]	8,0	5,0	3,5	3,0	4,8
<i>λ</i> [W/m·°C]	30	2,2	27	18	110
TSR [W/m]	5417	2095	23377	9261	30556

## 5. Vetemedés minimalizálása

Szerszámoknál fontos a termikus (pl. hőkezelési) eredetű vetemedés minimalizálása is, ami szintén függ a kialakul(hat)ó hőmérséklet-gradienstől. Állandósult esetre vonatkozó Fourier-egyenlet szerint:

$$p = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (10)$$

ahol *p* az egységnyi idő alatt, egységnyi felületen bevitt hőáram (teljesítménysűrűség); *λ* a hővezetési tényező, *dT/dx* a kialakult hőmérséklet gradiens.

A (2) formulát ( $\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$ ) felhasználva, annak hely (*x*) szerinti deriváltját képezve, majd (10)-ből a *dT/dx* hőmérséklet-gradienst *p/λ* alakban behelyettesítve, a

$$\left| \frac{d\varepsilon}{dx} \right| = \alpha \cdot \frac{dT}{dx} = \alpha \cdot \frac{p}{\lambda} = p \cdot \frac{\alpha}{\lambda} = \frac{p}{\left(\frac{\lambda}{\alpha}\right)} \quad (11)$$

összefüggés adódik a vetemedést jellemző *dε/dx* alakváltozási gradienstre [2]. Adott geometria és *p* hőáram esetén a *dε/dx* akkor minimális, ha az anyagot jellemző *λ/α* hányados maximális. A választott anyagokra vonatkozóan a *λ/α* hányados értékeit a 6. táblázat tartalmazza.

 6. táblázat. Vetemedési hajlamot minősítő *λ/α* hányados értékei

Szerszámacélok	C105U	X210Cr12	X40CrMoV5-1	HS6-5-2	40CrMnNiMo8-6-4
<i>λ/α</i> [10 <sup>6</sup> W/m]	4,61	2,48	2,73	2,16	3,85
Műszaki kerámiák	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SIALON	SiC
<i>λ/α</i> [10 <sup>6</sup> W/m]	3,75	0,44	7,71	6,00	22,92

## 6. Következtetések

A hőfeszültségek, illetve a hősokk-állóság közelítő számításának (becslésének) szerepe lehet pl. a szerszámgyártás (hőkezelés) és a szerszámalkalmazás (hűtés-kenés) terén. Nagy pontosságú, illetve megbízható számítások a bemutatott egyszerűbb matematikai modellek és adatbázisból nyert (nem mért) átlagértékek felhasználásával nem végezhetők, de a kapott adatok összehasonlításra, figyelemfelhívásra (a lehetséges problémák iránt) alkalmasak lehetnek.

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Bagyinszki, Gy.: *Anyagismeret*, Óbudai Egyetem - BGK, Budapest, 2011.
- [2] Ashby, M. F.: *Materials Selection in Mechanical Design*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.
- [3] *Cambridge Engineering Selector 4.5*, Granta Design Limited, Cambridge, 2004.
- [4] *EQUIST WELD Acélkalauz*, SACIT Acéltanácsadó Kft., Budapest, 2011.
- [5] IZTK in Zusammenarbeit mit den Mitgliedsfirmen der Fachgruppe Technische Keramik im VKI e. V.: *Breviary Technical Ceramics*, Fahner Verlag, Lauf, November 2004.