

Kúszási folyamatok modellezési lehetőségei

Réger Mihály

Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

reger.mihaly@bgk.uni-obuda.hu

***Abstract:** The paper describes the calculation method of creep parameters in two, basically different cases. In the first approach the governing parameter is the stress, in the other case the strain controls the creep process. The stresses and strain developing in the surface area of solidifying steel slab can be described partly by elastic and partly by plastic material laws.*

***Keywords:** creep; surface cracks; continuous casting; crack formation criteria*

1 Bevezetés

A dolgozat a folyamatosan öntött acél lemezbugák felület közeli tartományában kialakuló feszültségi és alakváltozási viszonyok jellemzésével foglalkozik. A szekunder hűtési zónában a lemezbuga felületét ciklikus termikus hatások érik, mely elsősorban a felületen működő hűtőhatásból, illetve az azt követő visszamelegedésből jön létre. A felület lehülése során a felületi rész termikus zsugorodását az alatta (a buga belseje irányában) lévő anyagrész akadályozza, ennek eredményeként a felületen húzófeszültség alakul ki. A feszültség eredményeként az adott hőmérsékleti viszonyoknak megfelelő kúszás jön létre, ez csökkenti az aktuális feszültségi szintet. A visszamelegedéskor hasonló, de fordított a helyzet, a felületi rész termikus tágulását az alatta lévő anyagrész gátolja, ez nyomófeszültséget, illetve ismételten kúszási alakváltozást generál. Ebben a megközelítésben feltételezzük, hogy a vastagság irányú feszültségek elhanyagolhatók a laterális (öntési és arra merőleges irányú felülettel párhuzamos) feszültségekhez képest.

2 A gyakorlatban alkalmazható kúszási modellek

A lemezbuga kristályosodása során a szilárd kéregben kialakuló alakváltozások és feszültségek közötti kapcsolatot részben a rugalmas, részben a képlékeny alakváltozásra érvényes összefüggések adják meg. A rugalmas alakváltozás a Hooke törvény, a maradó alakváltozás pedig a kúszási egyenletek alapján vehető figyelembe. Adott feszültség esetén a rugalmas alakváltozás mértéke a rugalmassági modulusz segítségével határozható meg, ennek értéke erőteljesen függ a hőmérséklettől. A jelen munkában a következő, Mizukami nevéhez fűződő összefüggést alkalmaztuk [1]:

$$E = 1000 * (968 - 2.33 \cdot T + 1.9 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 5.18 \cdot 10^{-7} \cdot T^3) , \quad (1)$$

ahol az E a rugalmassági modulusz MPa-ban, a T hőmérséklet °C-ban értelmezett.

A primer és szekunder kúszás folyamatának együttes, formális leírásának lehetőségeit Kozłowski elemzi [2]. Hat egyenlet típust ismertet, illetve hasonlít össze, nemcsak az eredmények megbízhatósága, hanem az egyenletek numerikus módszerekben való alkalmazhatóságának szempontjából is. A következő táblázat az előzetes számítások alapján további elemzésre kiválasztott három megközelítés alapvető jellegzetességeit foglalja össze.

1A modell:

$$\dot{\varepsilon} = C \cdot \exp\left(\frac{-Q}{T}\right) \cdot \sigma^n \quad (2)$$

ahol

$$C = 24233 + 49973 \cdot (Cwt\%) + 48757 \cdot (Cwt\%)^2$$

$$Q = 49480$$

$$n = 5.331 + 0.004116 \cdot T - 2.116 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$$

2 modell:

$$\dot{\varepsilon} = C \cdot \exp\left(\frac{-Q}{T}\right) \cdot \left[\sigma - a_\varepsilon \cdot \varepsilon_p^{n_\varepsilon}\right]^n \quad (3)$$

$$C = 0.3091 + 0.209 \cdot (Cwt\%) + 0.1773 \cdot (Cwt\%)^2$$

$$Q = 17160$$

$$n = 6.365 - 4.521 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1.439 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$$

$$m = -1.362 + 5.761 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1.982 \cdot 10^{-8} \cdot T^2$$

3 modell:

$$\dot{\varepsilon} = C \cdot \exp\left(\frac{-Q}{T}\right) \cdot \left[\sigma - a_{\varepsilon} \cdot \varepsilon_p^{n_{\varepsilon}}\right]^n \quad (4)$$

$$C = 46550 + 71400 \cdot (Cwt\%) + 12000 \cdot (Cwt\%)^2$$

$$Q = 44650$$

$$n = 8.132 - 1,54 \cdot 10^{-3} \cdot T$$

$$a_{\varepsilon} = 130,5 - 5,128 \cdot 10^{-3} \cdot T$$

$$n_{\varepsilon} = -0.6289 + 1,114 \cdot 10^{-3} \cdot T$$

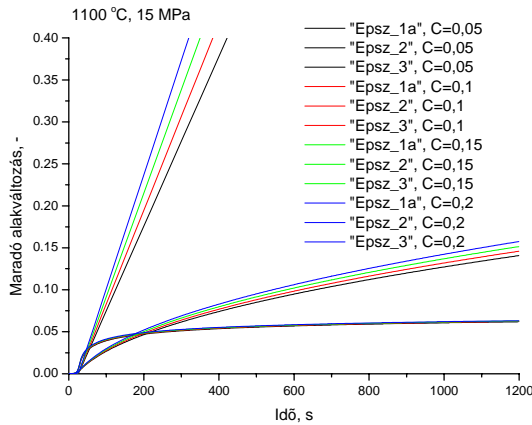
ε_p = a már létrejött képlékeny alakváltozás mértéke.

Az egyenletekben a (Cwt%) az acél karbontartalma tömegszázalékban kifejezve, a T pedig a hőmérséklet, Kelvin fokban megadva. A Q a modellben a tradicionális jelöléssel szemben az ún. „aktivációs energia konstans” (valójában az aktivációs energia és a gázállandó hányadosa), mértékegysége szintén Kelvin.

3 A kúszási modellek alkalmazása

A karbontartalom a (2)-(4) összefüggések szerint szintén befolyásolja a feszültségre adott alakváltozási válasz nagyságát. A hatás mértékének megítéléséhez próbaszámítást végeztünk a 0,05-0,2 tömeg % karbontartalom tartományban. Az eredmények az 1 ábrán láthatók, melynek alapján megállapítható, hogy a karbontartalom változása ebben a tartományban a 2-es és 3-as modell számítási eredményeit alig befolyásolja. Megjegyzendő, hogy a modellek kidolgozásának háttérül szolgáló mérések lényegesen nagyobb karbontartalom tartományt öleltek fel.

A kúszási modellek tesztelése céljából feszültség, illetve alakváltozás vezérelt esetek megvalósulását elemeztük. Egy feszültség vezérelt terhelési esetben az alakváltozási sebesség és a válaszjel, az alakváltozás megvalósulását a 2. ábra diagramjai illusztrálják.



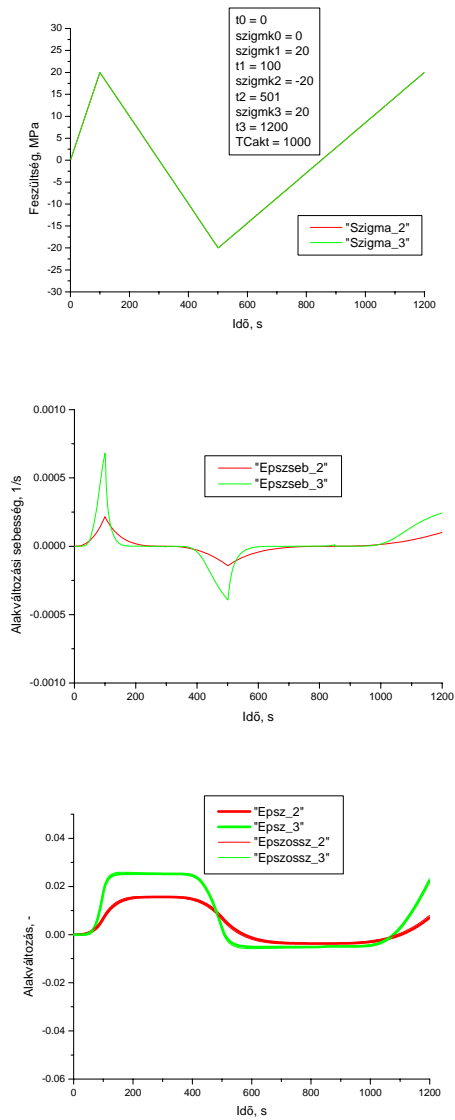
1. ábra

A karbontartalom hatása a kúszási alakváltozásra (1A, 2, 3 modell)

A kúszási-relaxációs folyamatok alakváltozás vezérelte módon is megvalósulhatnak. Ebben az esetben tehát a vezérlő paraméter nem a feszültség, hanem a kényszer alakváltozás mértéke, melynek eredményeként feszültség jön létre az alkatrészben. Ez a feszültség a az idő függvényében maradó alakváltozást generál. Egy modellezési példa számítási eredményeit mutatja a 3. ábra.

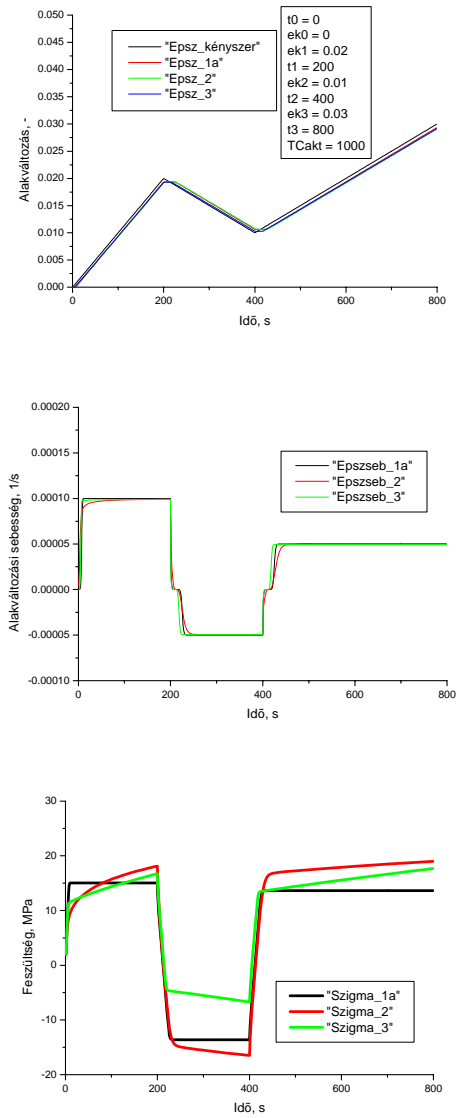
4 Kúszási folyamatok ciklikus hőmérsékletváltozás során

A bemutatott modellek a ciklikus hőmérsékletváltozás eredményeként megvalósuló kúszási jelenségek leírására is alkalmasak. A ciklikus hőmérsékletváltozás a folyamatos öntés viszonyai között ciklikus kényszer alakváltozást eredményez. Egy egyszerű, a 3. ábrán bemutatott kényszer alakváltozás vezérelte esetben az alakváltozás – feszültség kapcsolatot a 4. ábrán bemutatott diagram reprezentálja.



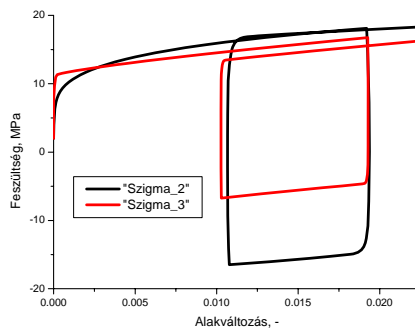
2. ábra

A felső ábra szerinti feszültségváltozás hatására kialakuló alakváltozási sebesség és alakváltozási értékek az idő függvényében (2, 3 modell)



3. ábra

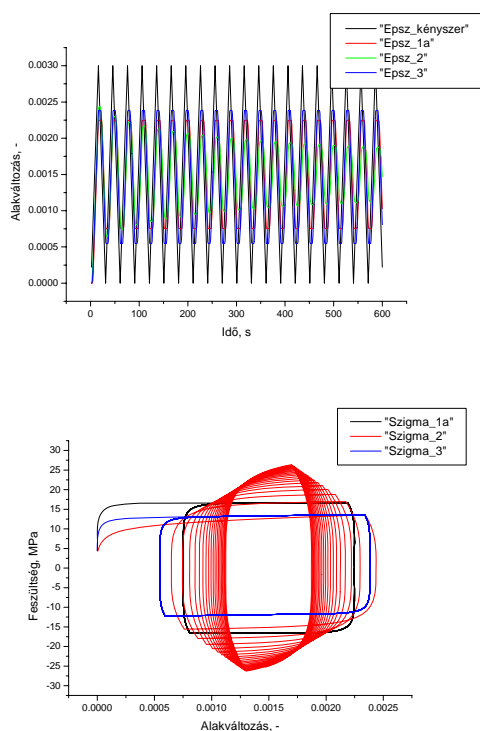
A felső ábra szerinti kényszer alakváltozás hatására kialakuló alakváltozási sebesség és feszültség értékek az idő függvényében (1A, 2, 3 modell)



4. ábra

A 3. ábra szerinti kényszer alakváltozás hatására kialakuló képlékeny alakváltozás feszültség diagram (2, 3 modell)

Bonyolultabb helyzet alakul ki, ha ciklikus kényszer alakváltozást feltételezünk. Az alakváltozás-feszültség hurok az 1A és a 3-as modellben önmagába záródik (fekete és kék görbe), mivel az első esetben az alakváltozási sebesség nem függ a folyamat lefolyásától illetve annak eredményétől (sem az időtől, sem a létrejött alakváltozástól), csak a feszültségtől. Formailag hasonló a helyzet a 3-as modell esetében, ez is önmagába záródik, de egészen más okból. Mivel a ciklikus kényszer alakváltozásként szimmetrikus a húzás-nyomást feltételeztünk, így a megvalósult képlékeny alakváltozás is szimmetrikus lesz, vagyis a (4) egyenlet szerint a megvalósult képlékeny alakváltozásból adódó hatás is szimmetrikus marad. Ugyanakkor a 2-es modell szerint adódó hurok a ciklusok során folyamatosan keskenyedik, illetve a csúcspont feszültség nő, mivel az idő is szerepel a (3) összefüggésben. Feltételezhető, hogy az 1A és 3-as modell kevésbé reális eredményt szolgáltat, hiszen ez azt jelentené, hogy az hőmérsékleti ciklusok ismétlődése során a vizsgálati anyag mindig ugyanabban a - kezdetivel megegyező - állapotban marad. A folyamatban lévő kísérleti munka eredményeként választ várunk arra a kérdésre is, hogy a szimmetrikusan és nem szimmetrikusan ismétlődő alakváltozási ciklus sorozatban változik-e az alakváltozás feszültség hurok alakja és ha igen, milyen irányban és mértékben.



5. ábra

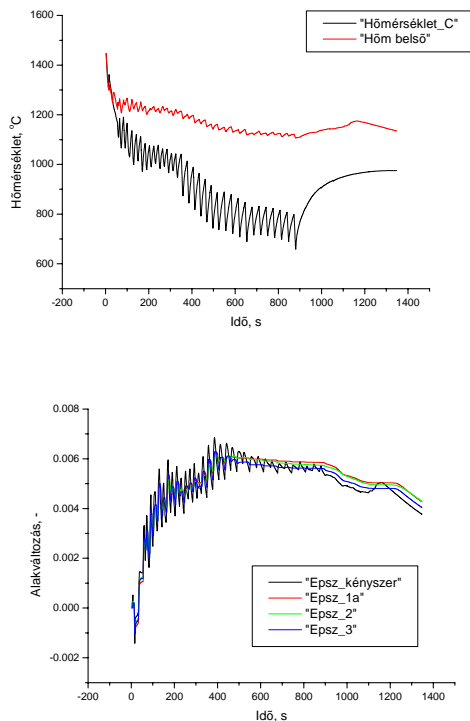
A ciklikus kényszer alakváltozás hatására kialakuló képlékeny alakváltozás feszültség diagram (1A, 2, 3 modell)

5 Alkalmazás a folyamatos öntés viszonyaira

Az előző fejezetekben bemutatott számítási módszerek – természetesen bizonyos korlátozásokkal – alkalmazhatók a lemezbugák felületén kialakuló feszültségi és alakváltozási viszonyok jellemzésére [3].

A kúszási modell alkalmazása során feltételezzük, hogy egy adott, az öntési irányra merőleges metszetben a lemezbuga szilárd kérgében definiálható egy átlagos hőmérséklet (a továbbiakban ezt „belső hőmérséklet”-nek nevezzük), azaz átlagos fajtérfogat. A szilárd kéreg felületén kialakuló kényszer alakváltozást ezen átlagos fajtérfogat és a felületen uralkodó viszonyoknak megfelelő fajtérfogat különbözősége reprezentálja. Intenzív felületi hűtés esetén például a vizsgált metszetben a felület közelében nyúlási kényszer alakváltozás, a kéreg belső részén pedig nyomás irányú kényszer alakváltozás történik.

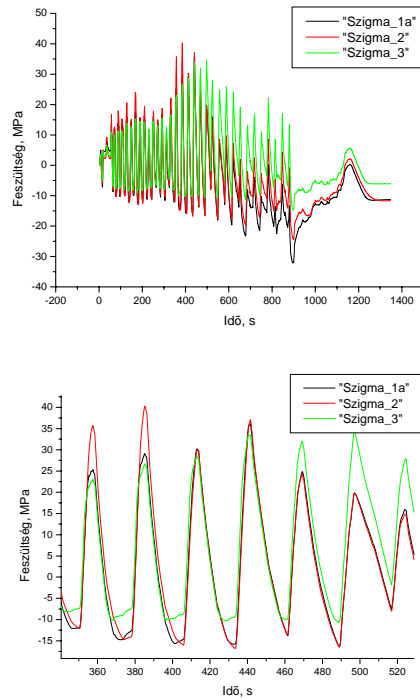
Egy tipikus vertikális öntőgépen megvalósuló öntési esetben a felület és a „belső” hőmérséklet különbségét illusztrálja 6. ábra diagramja. Ugyanezen ábrán a zsugorodások, tágulások és a kúszási előtörténet figyelembevétel számított kényszer alakváltozása, valamint a különböző modellek szerint megvalósult alakváltozási függvényt is feltüntettük.



6. ábra

A „belső” és külső (felületi) hőmérséklet alakulása egy jellegzetes öntési folyamatban, valamint az ebből adódó kényszer és megvalósult alakváltozás mértéke az idő (meniszkusz szinttől számított távolság) függvényében (1A, 2, 3 modell)

A kényszer alakváltozás természetesen kényszer alakváltozási sebességet generál, valamint a képlékeny alakváltozás megvalósulása közben kialakuló, a különböző modellekkel becsült feszültségek is meghatározhatók. Ez utóbbi függvényeket a 7. ábrán a teljes öntési folyamatra, valamint – a jobb áttekinthetőség érdekében – annak csak egy részletére vonatkozóan mutatjuk be.



7. ábra

A három modell alapján becsült feszültségi értékek az öntési idő függvényében (1A, 2, 3 modell)

Következtetések, összefoglalás

A bemutatott számítási eljárás alkalmazásával – természetesen egy sor feltételezés elfogadásával – bármely öntési irányú felületi alkotó mentén meghatározható az öntési irányú feszültség. A modellezési eredmények ellenőrzése, illetve a valóságnak leginkább megfelelő eredményeket szolgáltató modell kiválasztására jelenleg is kísérletek folynak a Dunaújvárosi Főiskola Gleeble 3800-as berendezésén. A kutatómunka hosszútávú célja, hogy az öntési folyamat során a lemezbugában kialakuló feszültségek ismeretében a felületi repedések kialakulására vonatkozóan információt adjon. Ennek érdekében a repedésképződés feltételrendszerét is definiálni kell.

References

- [1] Mizukami et al.: Tetsu-to-Hagané, 1977, Vol. 63 (146) p. S-652
- [2] Kozłowski, P. F. et al.: Simple Constitutive Equations for Steel at High Temperature, Met. Trans. A, Vol. 23A, March 1992, pp. 903-918
- [3] Réger M.: A lemezbugák felületén kialakuló feszültségek és alakváltozások becslése, FMTÜ, Kolozsvar, ISSN 2067-6808, 2010, pp. 255-258