XIII. FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 2008. március 14-15.

AZ ÚJRAKRISTÁLYOSÍTÓ HŐKEZELÉS MATEMATIKAI MODELLEZÉSE

Mucsi András, Borossay Béla

Abstract

This paper deals with the specific features and applications of recrystallisation heat treatment. On the basis of experimental results we try to find the proper mathematical description of the process. The effect of changes of heat treating parameters on the kinetic of the process and on the material properties after the treatment is also discussed.

Összefoglalás

A dolgozat részletezi az újrakristályosító hőkezelés sajátosságait, alkalmazásait. Kísérleti eredmények alapján keres megoldást a folyamat matematikai formulákkal történő leírására. Elemzi a paraméterek változtatásának hatását a folyamat kinematikájára és az anyag hőkezelés utáni állapotára.

1. Bevezetés, célkitűzés

A fémek hidegalakítása során a keménységük, szilárdságuk megnő, további alakíthatóságuk pedig csökken. A lágyítás nélküli maximális hidegalakíthatóság azt az alakítási mértéket jelenti, amelynél a munkadarab bármely pontjában az összehasonlító alakváltozás értéke még éppen megegyezik. Ahhoz, hogy ennél az értéknél nagyobb alakváltozást lehessen létrehozni, a munkadarabot ki kell lágyítani. A kilágyulás az újrakristályosodás hatására jön létre, melyet termikus aktiválással (hevítéssel) idézhetünk elő [5]. Az előzetes hidegalakítás mértékétől, a hevítés hőmérsékletétől, és ahogy a dolgozat mé-

1. ábra A mechanikai tulajdonságok és a szemcseszerkezet változása újrakristályosodás során

rései bebizonyították, a kiinduló szemcsemérettől is függ az újrakristályosodás sebessége, az újrakristályosodott szövetszerkezet, és ezzel a további alakíthatóság. Amennyiben a hőkezelés szükséges időtartamát túllépjük, megindul egy ún. szekunder újrakristályosodás, melynek eredménye

az, hogy az anyag szemcséi durvulnak, ezáltal a további alakíthatóság illetve mind a szilárdsági, mind a szívóssági jellemzők leromlanak. A rekristallizáció folyamatát, és a tulajdonságok változását az 1. ábra szemlélteti.

A cél tehát az, hogy adott újrakristályosítási paraméterek mellett matematikai formulák segítségével megadjuk a hőkezelés szükséges időtartamát, vagy az adott idő alatt létrehozható átalakult hányadot. A matematikai formulák felállításához és a bennük szereplő konstansok meghatározásához az 1. ábrát vegyük alapul. Az ábrán látható, hogy az átalakult hányad növekedésével a szilárdság és a keménység szinte azonos ütemben csökken. Azt is megállapíthatjuk, hogy 0% átalakult hányadhoz a hidegalakítás utáni keménység (amely annál nagyobb, minél nagyobb volt az előzetes hidegalakítás, és minél kisebb a szemcseméret), közel 100% átalakult hányadhoz pedig a kilágyult állapotot jellemző keménység tartozik. A modellkészítés során feltételeztük, hogy a keménység az átalakult hányad lineárisan csökkenő függvénye.

2. Az elvégzett kísérletek, a matematikai modell

A kísérleti anyag 99,5% tisztaságú, 20x1 mm méretű alumínium szalag volt, lágyított állapotban 20 HV keménységgel és 70 MPa szilárdsággal. Az újrakristályosodás, és annak sebessége a kiinduló szemcseméret, a hevítés hőmérséklete, és az előzetes hidegalakítás mértékének függvénye. A kísérleti programban kétféle szemcseméret (0,08 mm, 0,2 mm), négyféle, húzó igénybevétellel létrehozott alakítási mérték (5%, 15%, 25%, 40%), és három hevítési hőmérséklet (240°C, 430°C, 580°C) alkalmazására került sor. A hőkezelést különböző időpontokban megszakítva mértük a próbatestek keménységét, erre mutat példát a 2. ábra.

2. ábra Az 580 °C-os hevítés hatása a 0,08 mm átlagos szemcseátmérőjű próbatestekre

Ha ismerjük a keménységértékeket az idő függvényében, az adott próbatesthez tartozó átalakult hányad a következő képlettel számítható [6,7]:

$$x = -\frac{HV(t) - HV_{\max}}{HV_{\max} - HV_{\min}} \quad (1)$$

A kapott átalakult hányad-idő értékeket a 2. ábrán láthatjuk. A többi kísérlet idő-átalakult hányad görbéire a folyamatot elméletben leíró Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) egyenletet kell ráfektetnünk, melynek általános alakja:

$$x = 1 - e^{-k \cdot t^n} \quad (2)$$

Az egyenletben x jelöli az átalakult hányadot ($0 \leq x < 1$), n anyagi állandó, t az időt (s), k pedig a folyamat sebességét jellemző függvény melyet Arrhenius-egyenletként ismerünk:

$$k = A(\varepsilon, d) \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}} \quad (3)$$

A függvényben Q az aktiválási energia, mely anyagjellemző; R az univerzális gázállandó, T a hőmérséklet (K), az $A(\varepsilon, d)$ pedig az ún. frekvencia faktor, ebben kerestük a szemcseméret és az alakítás mértékének hatását a folyamat sebességére.

A meglévő, mérésből származó adatok felhasználásával megállapíthatjuk az Avrami-egyenlet n kitevőjét, és a kísérletekhez tartozó k értékeket. Ehhez a következő alakra kell hoznunk az Avrami-egyenletet:

$$\ln \ln \frac{1}{1-x} = \ln k + n \cdot \ln t \quad (4)$$

Ha ábrázoljuk az $\ln \ln 1/(1-x)$ értékeket az $\ln t$ függvényében, olyan egyenest kapunk, melynek meredeksége n , y tengelymetszete pedig $\ln k$. A kísérletek adataiból az n kitevő értéke $n=1,874$ -nek adódott, a k értékek pedig kísérletenként különböznek. Ha két kísérlet kiinduló szemcsemérete és alakítási mértéke ugyanaz volt, akkor a két kísérlet k értékeivel meghatározhatjuk az Arrhenius-egyenlet Q aktiválási energiáját:

$$Q = \frac{-R \cdot \ln \frac{k_1}{k_2}}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (5)$$

Az aktiválási energia ~ 73 kJ/mól értékűnek adódott, melyből továbbszámolva megállapíthatjuk a különböző kísérletekhez tartozó A értékeket. Feltételeztük, hogy az A frekvencia faktor valójában azt fejezi ki, hogyan függ a folyamat sebessége az alakítás mértékétől, és a kiinduló szemcsemérettől. Az kísérleti adatokból - a már meghatározott aktiválási energiával - számított A értékeket a (6), (7), és (8) összefüggések segítségével sikerül jó közelítéssel leírni.

$$A = a \cdot (1 + \varepsilon)^b \quad (6)$$

Az egyenletben ε a relatív alakváltozás mértéke, a szemcseméret hatását pedig az a és b paraméterek fejezik ki, melyek szemcseméret függése a (7) és (8) összefüggésekkel írható le.

$$a = 0,07127 \cdot d^{-0,08629} \quad (7)$$

$$b = 2,96329 \cdot d^{-0,34758} \quad (8)$$

A (7) és (8) egyenletekben d a mm-ben mért átlagos kiinduló szemcseméret.

3. A modellezés eredménye

A modellezés során nyert függvények segítségével megállapíthatjuk a kívánt átalakult hányadhoz tartozó hőkezelési időtartamot bármilyen kiinduló szemcseméret, alakítási mérték és hőkezelési hőmérséklet esetén. Természetesen a négy paraméter közül bármelyik meghatározható a másik három ismeretében. A modell alkalmazásával a gyakorlatban az újrakristályosító lágyítás műveletének energiaszükséglete optimalizálható, a nem kívánatos szekunder újrakristályosodás pedig elkerülhető.

4. Felhasznált irodalom:

1. <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/GER/default.asp?catid=68&pageid=879734023>
2. <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/GER/default.asp?catid=68&pageid=1020802148>
3. <http://www.physik.uni-augsburg.de/~ferdi/materialpraktikum/anleitungen/Rekristallisation.pdf>
4. <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/GER/default.asp?catid=68&pageid=370347413>
5. Dr. Köves Elemér: Alumínium kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1984.
6. Erik Woldt: New Kinetic Model for Primary Recrystallization of Pure Metals, Metallurgical and Materials Transactions, Oktober 2001.
7. M. Réger – S. Takács – T. Réti: Modellierung der Rekristallisationskinetik von Weichstahl, IV. Konferenz „Metallkundliche Probleme der Werkstoffentwicklung”, Freiberg, 13. bis 15. September 1989.

Mucsi András, hallgató
e-mail: mucsi.andras@freemail.hu

Munkahely: Budapesti Műszaki Főiskola Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Cím: 1081, Hungary, Budapest, Népszínház u. 8.

Borossay Béla, intézeti mérnök
e-mail: borossay.bela@bgk.bmf.hu