

Válaszok a Dr. Zsoldos Ibolya kérdéseire

Tisztelt Bíráló!

Köszönöm szépen a munkám elbírálását, a konstruktív megjegyzéseket és az érdekes kérdéseket!

A felmerült kérdésekre (megjegyzésekre) legjobb tudásom szerint válaszoltam.

Kérdések és válaszok

1. kérdés. 3. fejezet (β -szál orientáció meghatározása):

A β -szál orientációit a (3.10) kifejezéssel adja meg úgy, hogy az első Miller-indexszel, mint paraméterrel határozza meg az összes többi indexet. A formula hiányzott az irodalomból, és ennek pótlása azért is jelentős, mert a többi szál (α -tól θ -ig) valamely nevezetes sík normálisával párhuzamos vagy merőleges orientációval definiált, a β -szál meghatározása azonban nem adódik egyszerűen. Észrevételek, kérdések:

Nekem zavaró volt, hogy amikor először definiálja a $(hkl)[uvw]$ Miller-indexeket, akkor kerek és szögletes zárójeleket használ, de később ezek helyett kapcsos és „pipás”, $\langle \dots \rangle$ zárójeleket ír. Van-e oka a különböző jelöléseknek?

Válasz

A $(hkl)[uvw]$ Miller indexek konkrét orientációra utalnak, pl. $(01-1)[111]$, viszont gyakran nem konkrét orientációra hivatkozunk, hanem az összes szimmetrikusan azonos komponensre. Köbös kristály esetén egy orientációnak 24 ekvivalens komponense van, és ezeket kapcsos és kúpos (pipás) zárójelekbe vesszük, pl. a $\{011\}\langle 111 \rangle$ az összes 24 ekvivalens orientációt reprezentálja: $(1\ 0\ 1)[-1\ -1\ 1]$, $(1\ 1\ 0)[-1\ 1\ 1]$, $(0\ 1\ 1)[1\ -1\ 1]$, $(0\ -1\ 1)[-1\ 1\ 1]$, $(1\ -1\ 0)[1\ 1\ 1]$, $(-1\ 0\ 1)[1\ 1\ 1]$, $(-1\ -1\ 0)[1\ -1\ 1]$, $(-1\ 1\ 0)[-1\ -1\ 1]$, $(0\ 1\ 1)[-1\ 1\ -1]$, $(1\ 0\ 1)[1\ 1\ -1]$, $(0\ -1\ 1)[1\ -1\ -1]$, $(-1\ 0\ 1)[-1\ -1\ -1]$, $(-1\ 1\ 0)[1\ 1\ -1]$, $(1\ 1\ 0)[1\ -1\ -1]$, $(1\ -1\ 0)[-1\ -1\ -1]$, $(-1\ -1\ 0)[-1\ 1\ -1]$, $(0\ 1\ -1)[1\ 1\ 1]$, $(1\ 0\ -1)[1\ -1\ 1]$, $(0\ -1\ -1)[-1\ -1\ 1]$, $(-1\ 0\ -1)[-1\ 1\ 1]$, $(1\ 0\ -1)[-1\ 1\ -1]$, $(0\ -1\ -1)[1\ 1\ -1]$, $(-1\ 0\ -1)[1\ -1\ -1]$, $(0\ 1\ -1)[-1\ -1\ -1]$

2. kérdés (megjegyzés). Nem szerencsés a „ $h=1 - \{101\}\langle 121 \rangle$, ...” leírás (11. oldal első bekezdésében), helyette egyértelmű és stílusos lett volna: „for $h=1: \{101\}\langle 121 \rangle$, ...”, vagy: „in case of $h=1: \{101\}\langle 121 \rangle$, ...”.

Válasz

A javaslatot elfogadom és egyetértek azzal, hogy másként is lehetett volna fogalmazni az adott mondatot.

3. kérdés. A 11. oldal első bekezdése magyarázatra szorul. (3.10) kifejezés $h \rightarrow \infty$ esetén nem adja ki közvetlenül az $\{101\}\langle 121 \rangle$ indexeket, hiszen majdnem minden index ∞ -hez tart.

Válasz

$$\{h, 1, h+1\} \left\langle \frac{h(h+1)}{3/4-h}, \frac{2h(h+1)}{1/2-h}, \frac{h^2}{h-3/4} + \frac{2h}{h-1/2} \right\rangle \quad (3.10)$$

A 3. 10 kifejezés megfelel a kristálytani alapszabálynak: $hu+kv+lw=0$

$$\frac{h^2(h+1)}{3/4-h} + \frac{2h(h+1)}{1/2-h} + \frac{h^2(h+1)}{3/4-h} - \frac{2h(h+1)}{h-1/2} = \frac{h^2(h+1)}{3/4-h} + \frac{2h(h+1)}{1/2-h} - \frac{h^2(h+1)}{3/4-h} - \frac{2h(h+1)}{1/2-h} = 0$$

A 3. 10 összefüggés érvényes az egész Euler-térre és az összes h, k, l, u, v, w Miller indexekre. Például a $h=1$ esetén a 3.10 összefüggés megadja az $(1 \ 1 \ 2)[-8 \ -8 \ 8] \equiv (1 \ 1 \ 2)[-1 \ -1 \ 1]$ komponenst, $h=3$ esetén megkapjuk a $(3 \ 1 \ 4)[-48/9 \ -96/10 \ 576/90] \equiv (3 \ 1 \ 4)[-5 \ -9 \ 6]$ -t, és a végtelen nagy szám esetén, pl. $h=10^{25}$ megkapjuk $(10^{25} \ 1 \ 10^{25})[-10^{25} \ -2 \times 10^{25} \ 10^{25}]$ elosztva 10^{25} -tel megkapjuk: $\approx (1 \ 0 \ 1)[-1 \ -2 \ 1]$.

4. kérdés 20. oldal 2. bekezdésében a feszültség gradiens tenzor elemeire vonatkozó egyenlőségekben a középső egyenlőség nem igaz (valószínűleg elírás):

$$\dot{\epsilon}_{33} \neq L_{11}$$

Válasz

here h_i and h_f are the initial and final sheet thickness, whereas Δt is the time increment. This simple geometric approach accounts for a constant strain rate, which affects the results of simulations if the CP model is rate-dependent. In PSC the resulting strain rates are: $\dot{\epsilon}_{11} = -\dot{\epsilon}_{33} = L_{11} = -L_{33}$.

Nem elírásról van szó, hanem az lehet félrevezető, hogy az $\dot{\epsilon}_{33} = L_{11} = -L_{33}$ új sorba került. A képlet következő: $\dot{\epsilon}_{11} = -\dot{\epsilon}_{33} = L_{11} = -L_{33}$

5. kérdés. A (4.7) összefüggésben „p” kitevő? Ha igen, akkor (4.5)-(4.6)-ból hogyan jön (4.7)? Mi a különbség a „p” és az „s” paraméterek között? „p” pontos jelentését meg kellene adni.

Válasz

$$L = \begin{bmatrix} 0.5\pi\dot{\epsilon}_{11} \sin(\pi\tau) & 0 & m^{-1}\pi\dot{\gamma} \sin(2\pi\tau) \\ 0 & 0 & 0 \\ -m\pi\dot{\gamma} \sin(2\pi\tau) & 0 & -0.5\pi\dot{\epsilon}_{11} \sin(\pi\tau) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\dot{\gamma}^p = \dot{\gamma} \exp\left(\frac{s-1}{s}\right) \quad (4.6)$$

$$L^p = \begin{bmatrix} 0.5\pi\dot{\epsilon}_{11} \sin(\pi\tau) & 0 & m^{-1}\pi\dot{\gamma}^p \sin(2\pi\tau) \\ 0 & 0 & 0 \\ -m\pi\dot{\gamma}^p \sin(2\pi\tau) & 0 & -0.5\pi\dot{\epsilon}_{11} \sin(\pi\tau) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

A (4.7) összefüggésben a „p” felső index, mely egy adott rétegre utal, például p lehet a felület vagy a felület alatti réteg:

$$L^{felület} = \begin{bmatrix} 0.5\pi\dot{\epsilon}_{11} \sin(\pi\tau) & 0 & m^{-1}\pi\dot{\gamma}^{felület} \sin(2\pi\tau) \\ 0 & 0 & 0 \\ -m\pi\dot{\gamma}^{felület} \sin(2\pi\tau) & 0 & -0.5\pi\dot{\epsilon}_{11} \sin(\pi\tau) \end{bmatrix}$$

Az „s” ez egy szám, mely megadja a réteg elhelyezkedését a felülethez képest (s=1: felület; s→0: középréteg). A munkában a „p”-t a következő módon definiáltam: „here, the superscript p indicates the position of a given layer with respect to the surface of a rolled sheet.” (21. oldal).

6. kérdés. Az FLM modell az x-z síkon definiált áramlási vonalak mentén egyirányban történő anyagáramlást feltételez. Mennyire reális közelítés az y-irányú anyagáramlás figyelmen kívül hagyása? Mennyire reális az „e” vastagság (4.5. ábra jelölésével) a henger előtti szakaszban ($x > L_d$ -nél)?

Válasz

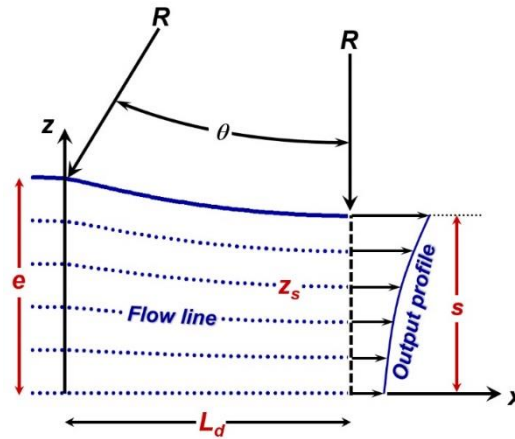
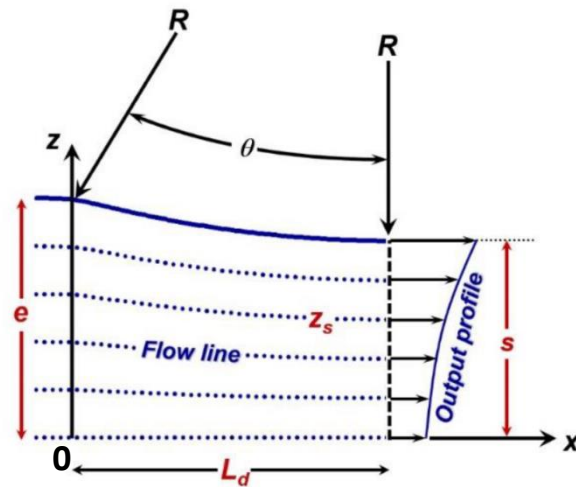


Fig. 4.5. Schematic illustration of a sheet geometry in the roll gap with the parameters of the flow-line model employed [3s].

Az FLM modell hideg hengerlésre alkalmazható, ahol az anyag jelentős x -irányú megnyúlást szenved, viszont az y -irányú anyagáramlás vagy nulla értékű, vagy elhanyagolhatóan kicsi. A kísérleti hengerlésnél nem volt megfigyelhető az y -irányú deformáció. Az y -irányú deformáció előfordulhat meleg, illetve félmeleg hengerléskor, viszont ezeket a folyamatokat nem modelleztük sem a VEM sem az FLM segítségével. Az „e” vastagság, ez az anyag kiinduló félvastagsága (bemeneti paraméter, mely szükséges a modellezéshez). A henger előtti szakaszban, az „e” vastagság eltérhet a kiinduló félvastagságtól (0.5-0.7% lehetséges).

7. kérdés. A 4.5. ábrán hol van az $x=0$ pont? Ha a jobboldalon, a hengerekből kilépő „s” vastagságnál, akkor (4.8) összefüggésben $x>L_d$ helyett nem $x<-L_d$ lenne helyes? Vagy az ábra tükörképét kellene mutatni?



Válasz:

Az $x=0$ pont a z és az x metszetésénél van. A rés belépési pontjától balra (az anyag még nem deformált pontjainak) koordinátái negatívak és az anyag félvastagsága $=e$. Az ábra és a 4.8 összefüggés helyesen definiálja az L_d -t.

8. kérdés. A (4.8) összefüggésnél mik a peremfeltételek a ϕ függvényre, az első és második „x” szerinti deriváltakra $x=0$ -nál és $x=L_d$ -nél? Ezek pontosan, vagy csak közelítőleg teljesülnek a felírt összefüggésre?

Válasz:

A modell a deformációkat az anyag áramlás sebességek alapján számolja ki:

$$\dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial}{\partial x} v_x(x, z) + \frac{\partial}{\partial z} v_z(x, z) = 0$$

Mindkét sebesség (v_x és v_z) a $\phi(x, z)$ függvénye:

$$v_x = \lambda(x, z) \frac{\partial \phi(x, z)}{\partial z}$$

$$v_z = - \lambda(x, z) \frac{\partial \phi(x, z)}{\partial x}$$

$$z_s = \phi(x, z) = z\zeta(x) = \begin{cases} z \frac{1}{e} \left[1 + \left(\frac{s}{e} + \left(1 - \frac{s}{e} \right) \left(\frac{L_d - x}{L_d} \right)^{2.1} \right)^{-\Lambda} \right]^{\frac{1}{\Lambda}} & x \leq L_d \\ z \frac{1}{e} \left[1 + \left(\frac{s}{e} \right)^{-\Lambda} \right]^{\frac{1}{\Lambda}} & x > L_d \end{cases}$$

Ahhoz, hogy a $\phi(x, z)$ függvény első és a második deriváltja ne okozzon numerikus problémát, a Λ paraméternek nagy értékűnek kell lennie. A munkában elvégzett szimulációkban $\Lambda=100$.

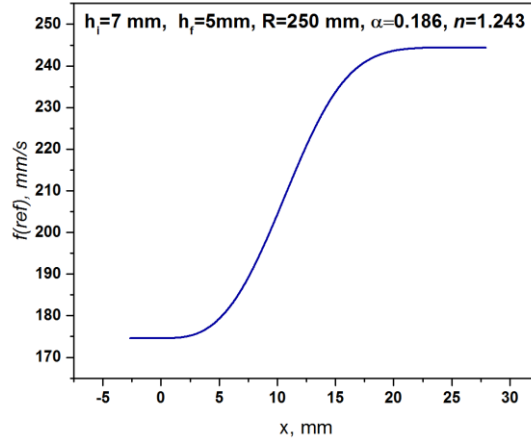
Az $x=0$, és az $x=L_d$ pontokban tudjuk definiálni nem csak a ϕ függvény értékeit, hanem a sebességeket a deformációkat és a deformáció sebességeket is, mivel a modell egyik peremfeltétele az, hogy a belépési és kilépési sebességek ismertek és az összefüggésük következő: $ev_{in}=sv_{out}$ (e és s bemeneti és kilépési vastagságok).

9. kérdés (megjegyzés). A (4.8) összefüggéssel definiálja a „flow-line” vonalakat, amelyek a sebességirányokat adják meg a különböző mélységű rétegekben. De azt nem írja le, hogy az 4.6. ábrán bemutatott anyagáramlás sebességeket hogyan számolta?

Válasz:

Az FLM módszer definiálja az anyagáramlási vonalakat, amelyek a sebességirányokat határozzák meg a különböző mélységű rétegekben. Ahhoz, hogy bevezessük az anyagáramlás vonalak menti sebességek közötti különbségeket, két modell paramétert alkalmazunk (α és n). A „flow-line” vonalak sebességirányait egy úgynevezett referencia függvény adja meg (24 képlet a Decroos, K., Sidor, J., Seefeldt, M. A new analytical approach for the velocity field in rolling processes and its application in through-thickness texture prediction. Metallurgical and Materials Transactions A. 45A, 2014, 948-961 cikkben):

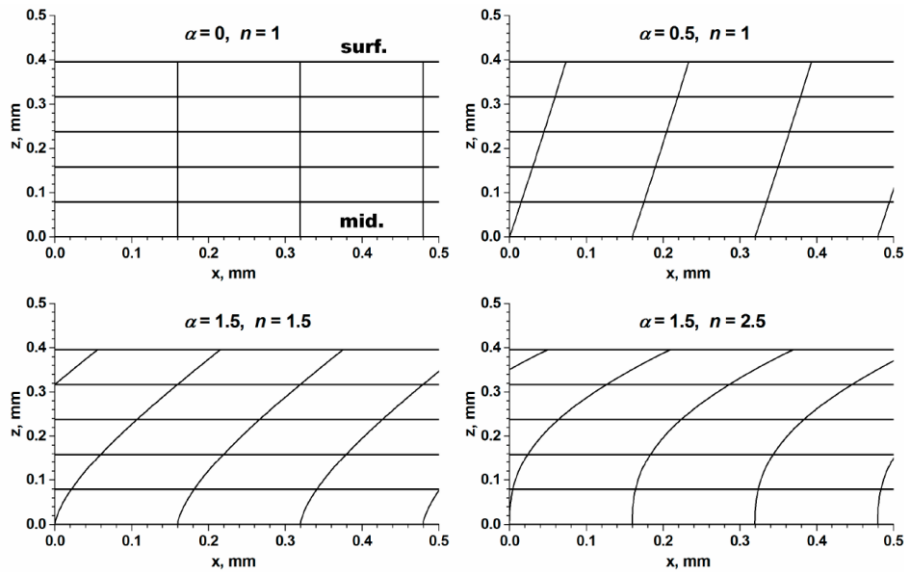
$$f_{1,\text{ref}}(x) = \left[1 - e^{-a\left(\frac{x}{d}\right)^b} \right] (v_{\text{OUT}} - v_{\text{IN}}) + v_{\text{IN}}$$



Ahol $b=3$, x az α modell paraméter és a rés geometriának a függvénye, $d=L_d$. A referencia függvény által kiszámolható az anyag sebessége az x -mentén (a referencia függvény azonos mindegyik réteg esetén). A v_x és v_z sebességek α és n modell paraméter által befolyásolhatók:

$$\begin{aligned} f_2 - f_1 &= \alpha(e v_{\text{IN}} \zeta - f_{1,\text{ref}}) = \alpha \Delta f_{\text{ref}} \\ v_x(x, z_s) &= f_1(x)(1 - z_s^n) + f_2(x)z_s^n \\ &= [f_2(x) - f_1(x)]z_s^n + f_1(x) \end{aligned}$$

Az n paraméter hatással van az anyag áramlási sebességére a különböző mélységű rétegekben z_s ($v_x = v_x(z_s, n)$). Különböző α és n értékekkel különböző hengerlési peremfeltételek vehetők figyelembe (ld. az alábbi ábrát). Az α definiálja az x - z elmozdulásának nagyságát, az n meghatározza az elmozdulási profil alakját.



10. kérdés (megjegyzés). Az „ α ” és az „ n ” modellparaméterek hatását részletesen elmagyarázza a 25-28. oldalon, de a paraméterek definícióját csak később, a 32-33. oldalon tárgyalja. Ez eléggé megnehezítette a megértést.

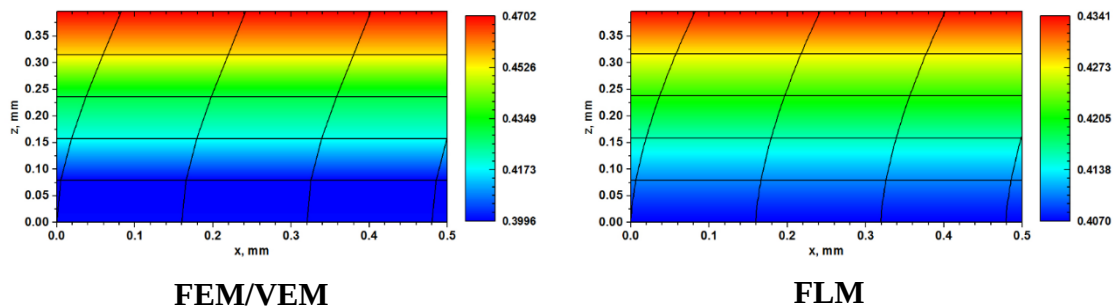
Válasz:

Az értekezést olyan logika alapján építettem fel, hogy egyszer leírtam a modell vázlatát (25-28 oldal) és utána kitértem a modell paraméterek meghatározására (32-33 oldal). A modellparaméterek meghatározásának külön figyelmet szenteltem, mivel fontos volt kimutatni, hogy az ismert „ α ” és „ n ” segítségével olyan eredményt megkaphatunk, amely összehasonlítható a végeelem szimulációval.

11. kérdés. A 4.8 és 4.9 ábrákon bemutatott, végeelem és FLM (flow-line) modellel számolt eredmények futási idejében mekkora különbség adódott?

Válasz:

$$\varepsilon=0.296, h_i = 1.125\text{mm}, R=64.5\text{mm}, \mu=0.2$$



A végeelem futási ideje órákban mérhető (Deform 2D, 30 perc – 2 óra (elem szám függő)), viszont az FLM szimuláció másodpercek alatt (1-2 s) lefut (a C++ nyelven leprogramozott algoritmus használata esetén).

12. kérdés (megjegyzés). 4.13-15 ábráknál nem írja, hogy ezek kísérleti, vagy számolt eredmények. Bár ki lehet következtetni, de azért jó lett volna egy megerősítés.

Válasz:

4.13-15 ábrákon kísérleti eredmények láthatók, bár ez az ábrákból nem derül ki, viszont a szöveg utal rá, hogy ezek mért eredmények.

13. kérdés (megjegyzés). A hengerlési technológiák paramétereit mindig pontosan megadja. De hogy a méréseket és a különböző modellekkel történt számításokat milyen mintákon végezte, azt általában nem mutatja meg. Mi volt a bemenete egy modellszámításnak? (pl. minta mérete, szemcseszám, szemcsenagyság, eloszlás, stb.)

Válasz:

A kristályképlékenyalakítási modellek esetén, a szemcseméret és az eloszlás nem vehető figyelembe, viszont fontos egy statisztikai reprezentatív térfogatelemmel dolgozni (4000-20000 orientáció).

Bemeneti paraméterek, amelyek szükségesek a textúra szimulációkhoz:

A kiinduló textúra (4000-20000 orientáció), a szemcsék morfológiája, a képlékenyalakváltozási sebességek (L_{ij}), deformáció értéke, keményedési paraméterek (nincsenek jelentős hatással a textúra szimulációra), csúszási rendszer és kristályszerkezet típusa.

14. kérdés (megjegyzés). A számolt és mért eredmények közötti eltérésekre az ID (texture index) paramétert vezeti be. A „m” modellparamétert úgy optimalizálja, hogy az ID index minimális legyen.

- ID számításánál az integrált mindhárom Euler-szög szerint értelmezi? Azaz hármasszögintegrálról van szó, és így a teljes vizsgálati térfogatra összegzi az eltéréseket?

Válasz:

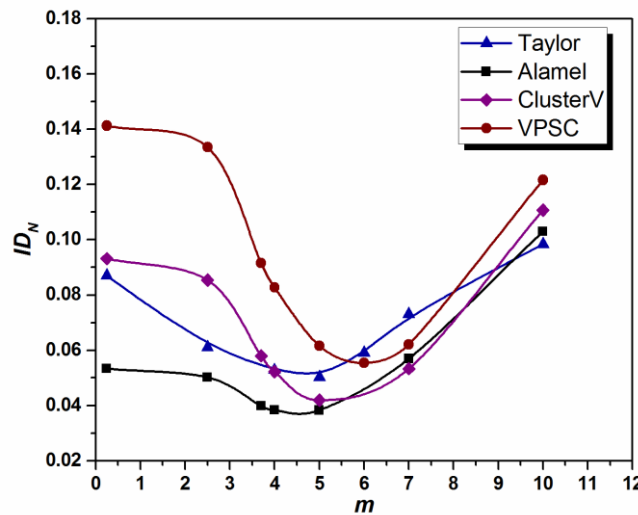


Fig. 4.18. Effect of SGM model parameter m (see equation 4.7 for details) on the quality of texture prediction [4s].

$$ID_N = \frac{ID}{TI} = \frac{\int [f_1(g) - f_2(g)]^2 dg}{\int [f_1(g)]^2 dg} \quad (4.22)$$

Az ID számításánál az integrálás az Euler-térben és mindhárom Euler-szög szerint történik. Viszont fontos megjegyezni, hogy ez nem hármassintegrálás, hanem numerikus integrálás, mely a mért és a modellezett függvény különbségét számolja az Euler-térben. Mindkét esetben (mért és modellezett ODF-nél) először a diszkrét pontokból kiszámoljuk a folyamatos ODF függvényt, és utána az adott függvénynek meghatározzuk az értékeit a diszkrét pontokban. Tipikusan az Euler-tért felbontjuk $5^\circ \times 5^\circ \times 5^\circ$ -os tartományokra. Így egy orientáció 3 Euler-szög koordinátával rendelkezik. Az Euler-tér alapzónájában (minden orientáció csak egyszer jelenik meg) minden pontra meghatározzuk az ODF függvény különbségeket.

15. kérdés. A kísérleti referenciának választott $f_1(g)$ ODF (orientation distribution function) eloszlásfüggvény egy konkrét mérésből lett megválasztva, vagy több mérés átlagából? Mennyire tekinthető homogénnek a kristályorientáció eloszlása szimmetrikus és aszimmetrikus hengerlések esetén? Mekkora szórás van egy mintán belül (különböző helyeken mérve), vagy ugyanolyan módon előkészített minták azonos technológiai paraméterekkel történő hengerléseinél? Volt-e ilyen mérés, vagy vannak-e a szakirodalomban erre vonatkozó adatok? Összességében: mennyire reális a kísérleti referencia megválasztása?

Válasz:

Az $f_1(g)$ több mérés átlagából lett meghatározva.

Az EBSD által mért eredmények esetén, a több millió pontból felépülő térképeket (egy szemcse akár 1000 mérési pontot is tartalmaz) úgy alakítjuk át, hogy kiszámoljuk minden egyes szemcsének az átlagos orientációját és ezt használjuk bemeneti adatsorként a textúra szimulációhoz. Fontos, hogy a mérés több ezer szemcsét tartalmazzon (~10.000). Ha több tízezer szemcsét sikerült lemérni EBSD-vel (pl. 50.000), elsőként kiszámoljuk az ODF függvényt és utána alkalmazzuk a Tóth és Van Houtte deskretizálási technikát (Textures and Microstructures, 1992;19:229) az orientációk számának csökkentése érdekében. Még a relatív gyors kristályképlékenységi modellek is sok időt igényelnek, ha a kristályok száma nagy (pl. 50.000 vagy több). Ezért célszerű az orientációk számát csökkenteni.

Bizonyos textúra szórás mindig megfigyelhető egy mintán belül ($ID \sim 0.05$) és ez független attól, hogy szimmetrikusan vagy aszimmetrikusan volt hengerelve a minta. Nagyon fontos megjegyezni, hogy nem a mért szemcsék száma fontos, hanem hogy mennyire reprezentatív textúrával rendelkeznek a mért szemcsék. Ha az adott alakítási technológia képes homogén textúra eloszlást biztosítani az anyag egész térfogatában, a limitált számú szemcse is képes reprezentálni az egész anyagot.