
**МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДЕФОРМУВАННЯ
КЕРАМІКИ НА ОСНОВІ НІТРИДУ КРЕМНІЮ**

Гнилиця І.Д., к.т.н.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
Івано-Франківськ, Україна*

При проведенні високотемпературного деформування встановлено, що різні механізми переносу маси вносять різний вклад у загальну деформацію і формування структури. Ступінь проявлення кожного окремого механізму залежить від початкового стану матеріалу (розмір зерен у вихідній структурі, кількість β -фази, кількість анізотричних зерен, кількість і склад між зернової фази) та умов деформування (температура, зусилля, ступінь обтиску).

Максимальний вплив на швидкість деформації в'язкий плин між зернової фази буде мати на початковому етапі, коли між зернами основного матеріалу є товсті шари рідкої між зернової фази, які можуть взаємно переміщатись. Із збільшенням часу ізотермічної витримки під навантаженням вплив в'язкого плину буде зменшуватись внаслідок витіснення між зернової фази на поверхню зразка і поступової її кристалізації. Хоча між зерновою фазою поступово кристалізується, деяка її кількість все ж залишається в аморфному стані і саме ця частина між зернової фази буде дозволяти подальше проходження в'язкого плину.

Початок ковзання по границях зерен є первинним і основним механізмом пластичної деформації. Для проявлення пластичності нітридокремнієвих матеріалів, необхідна наявність дуже дрібних зерен розмір яких не перевищує 1 мкм.

На початковому етапі деформування в присутності великої кількості рідкої між зернової фази існують умови для інтенсивного протікання зерно границного ковзання і воно разом з в'язким плинком між зернової фази визначає найвищу швидкість деформації. По мірі витіснення між зернової фази на поверхню зразка і її кристалізації, зерно границне ковзання буде поступово зменшуватись до моменту коли частина видовжених зерен почне проходити положення в якому значення дотичних напружень максимальні. На протязі часу коли видовжені зерна будуть проходити положення максимальних дотичних напружень, в якому зерно границне ковзання найбільш полегшене, будемо спостерігати сталу швидкість деформації. Після закінчення цього інтервалу часу інтенсивність зерно границного ковзання продовжує знижуватись до досягнення стадії встановленого деформування зі сталою швидкістю де зерно границне ковзання характеризується певною сталою швидкістю.

На стадії встановленого деформування ми маємо справу з високотемпературною повзучістю, але протікання якої проходить в певних специфічних умовах. При повзучості зерно границне ковзання значно стримується наявними в структурі матеріалу хаотично орієнтованими видовженими зернами β - Si_3N_4 . При високотемпературній екструзії створюються умови, які сприяють переорієнтації видовжених зерен, в результаті чого останні перестають бути стримуючим фактором, зерно границне ковзання полегшується і приводить до зростання швидкості деформації.

В перехідній зоні матриці видовжені зерна знаходяться в неоднорідному полі напружень. Під дією моменту сил, який виникає в цьому полі, видовжені зерна β - Si_3N_4 займатимуть положення співвісне з поздовжньою віссю симетрії матриці. Поворот зерен також здійснюється шляхом проковзування по границях зерен, але не в поздовжньому, а в поперечному напрямку. Оскільки переорієнтація зерен проходить завдяки ковзанню по границях, то вона теж суттєво залежить від кількості і в'язкості

рідкої між зернової фази. Поздовжній рух зерен при зерно граничному ковзанні в свою чергу також може сприяти їх повороту.

Під час високотемпературного деформування за рахунок різної рівноважної концентрації для зерен різних розмірів і за рахунок особливостей кристалохімічної будови гексагональних зерен β -фази, між зернами основного матеріалу буде проходити перенос маси за механізмом розчинення – перехід через між зернову фазу – осадження. На початковій стадії процес розчинення переважає над процесом осадження, атоми основного матеріалу надходять в рідку фазу, але ще не встигають пройти через неї і осісти на новому місці. Тому кількість рідкої між зернової фази в початковий період максимальна, в'язкий плин між зернової фази, зерно граничне ковзання та поворот зерен полегшені і, відповідно, максимальна швидкість деформування. Із збільшенням часу ізотермічної витримки при температурі деформування проходить витіснення між зернової фази в периферійні області зразка і поступова кристалізація рідкої між зернової фази, що в свою чергу приводить до зниження інтенсивності процесу розчинення – осадження. На стадії встановленого деформування в неоднорідному полі напружень розчинення – осадження буде проходити через зерно граничні шари аморфної між зернової фази, забезпечуючи подальший ріст видовжених зерен β -фази вздовж напрямку деформування.

При ізотермічній витримці і кристалізації між зернової фази деформування відбувається зі сталою швидкістю за рахунок повороту існуючих видовжених зерен в перехідній зоні матриці та зерно граничного ковзання по тонких зерно граничних шарах аморфної між зернової фази, а компенсація викликаних ковзанням зерен розмірних змін проходить завдяки в'язкому плину між зернової фази.

Загальну швидкість деформації після закінчення перерозподілу зерен і між зернової фази, тобто на спадаючій ділянці кривої швидкості деформації можна представити через суму окремих складових:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_{2\max} \quad (1)$$

де ε – загальна швидкість деформації після припинення доущільнення; ε_0 – швидкість деформації за рахунок зерно граничного ковзання по тонких зерно граничних шарах аморфної між зернової фази; ε_1 – швидкість деформації за рахунок в'язкого плину між зернової фази та зерно граничного ковзання; ε_2 – швидкість деформації за рахунок повороту видовжених зерен; $\varepsilon_{2\max}$ – збільшення швидкості деформації за рахунок повороту видовжених зерен при проходженні ними кута максимальних дотичних напружень.

Швидкість сталого деформування ε_0 для кожного конкретного матеріалу (вид матеріалу і вид активуючих добавок) є деякою константою на протязі відрізка часу коли стан структури матеріалу дозволяє деформування в стані пластичності.

Швидкість деформації за рахунок в'язкого плину між зернової фази та зерно граничного ковзання ε_1 може бути представлена рівнянням виду:

$$\varepsilon_1 = \frac{PK_1}{TU} \cdot e^{-\frac{t}{K_1}} \quad (2)$$

де P – тиск на пуансоні; K_1 – кількість між зернової фази під час деформування; T – температура під час деформування; U – ступінь обтиску; t – час деформування.

Дане рівняння відображає прямо пропорційну залежність швидкості деформації за рахунок в'язкого плину між зернової фази та зерно граничного ковзання від прикладеного тиску та кількості між зернової фази і обернено пропорційну залежність цієї величини від температури і ступені обтиску. Залежність швидкості деформації від часу деформування вибрана обернено експоненціальною, причому крутизна спадання залежить від кількості між зернової фази.

Швидкість деформації за рахунок повороту видовжених зерен ε_2 та величину збільшення швидкості деформації за рахунок повороту видовжених зерен при проходженні ними кута максимальних дотичних напружень $\varepsilon_{2\max}$ можна виразити рівняннями:

$$\varepsilon_2 = \frac{PK_2K_3}{TUK_1t} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{2\max} = \frac{PK_2}{TU} \cdot e^{-K_2(t-t_0)^2} \quad (4)$$

де P – тиск на пуансоні; K_2 – кількість видовжених зерен в структурі матеріалу; K_3 – середня довжина видовжених зерен; T – температура під час деформування; U – ступінь обтиску; K_1 – кількість між зернової фази під час деформування; t – час деформування; t_0 – час максимуму проходження видовженими зернами положення найбільших дотичних напружень.

Рівняння (3), (4) відображають прямо пропорційну залежність швидкості деформації за рахунок повороту видовжених зерен від прикладеного тиску та кількості видовжених зерен в структурі і обернено пропорційну залежність цієї величини від температури і ступеня обтиску.

Рівняння (3) представляє основний вклад повороту видовжених зерен в загальну швидкість деформації. Чим більша довжина видовжених зерен (коефіцієнт K_3) тим більший вклад вони вносять в загальну деформацію. Присутність кількості між зернової фази (коефіцієнт K_1) в знаменнику даного рівняння відображає повільніше спадання складової швидкості за рахунок повороту видовжених зерен при більшій кількості між зернової фази.

Рівняння (4) являє собою функцію нормального розподілу і буде вносити вклад в загальну швидкість деформації лише в околі часу t_0 під час проходження зернами положення під кутом 45° до осі матриці. Поеднання складових швидкості, виражених рівняннями (2), (3) і (4) в деякий момент часу приведе до появи горизонтальної ділянки на кривій швидкості деформації. Тривалість часу проявлення складової вираженої рівнянням (4) визначається коефіцієнтом K_2 , тобто кількістю видовжених зерен в структурі.

Підставляючи рівняння (2), (3), (4) в рівняння (1) отримаємо рівняння загальної швидкості деформації:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 + \frac{P}{TU} \cdot \left(K_1 \cdot e^{-\frac{t}{K_1}} + K_2 \cdot \left(\frac{K_3}{K_1 t} + e^{-K_2 \cdot (t-t_0)^2} \right) \right) \quad (5)$$

В загальному випадку представлено рівняння можна застосовувати для опису кривої швидкості деформації іншого керамічного матеріалу, який має добавки, що при високій температурі формують між зернову фазу, і видовжені зерна в структурі.