

## **РЕОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УЩІЛЬНЕННЯ ЛИВАРНИХ ФОРМ ТА СТРИЖНІВ ВІБРАЦІЄЮ**

*В.П. Авдокушин, В.П. Самарай. Реологическое моделирование уплотнения литейных форм и стержней вибрацией.* Приведены математические модели виброуплотнения литейных формовочных смесей, а также рекомендации по совершенствованию технологического процесса формообразования с применением вибрации.

*V.P. Avdokushin, V.P. Samaray. Reologic modelling of condensation of the foundry forms and cores by vibration.* The mathematical models of vibration condensation of foundry form mixes are presented. Some recommendations for perfection of technological process of manufacturing the forms with application of vibration are given.

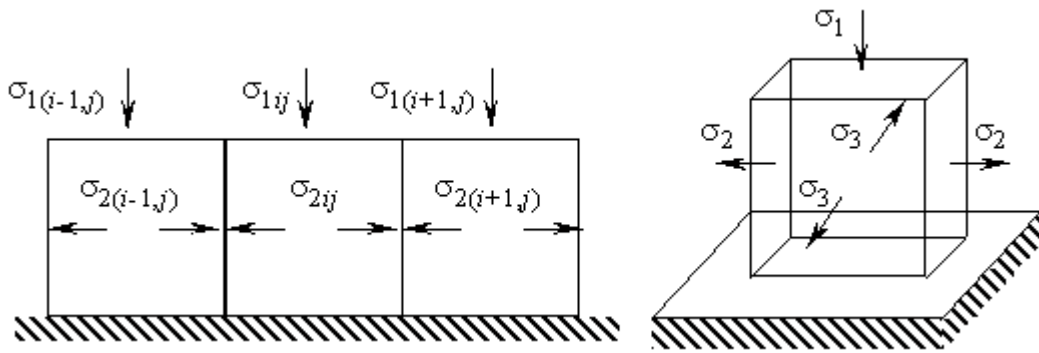
З метою встановлення можливості комплексної оцінки фізико-механічних властивостей формувальних сумішей за результатами вимірювання реологічних характеристик виконано статистичний аналіз взаємозв'язків між міцністю при зсуві та стисканні, пластичною в'язкістю, модулем пружності, граничним напруженням зсуву, насипною масою, згущуваністю та текучістю піщано-бентонітових і сипучих самотвердіючих сумішей. З імовірністю 90...95 % встановлено наявність лінійних кореляційних зв'язків у групі параметрів: міцність при зсуві, в'язкість, згущуваність та насипна густина, а текучість, модуль пружності та граничне напруження зсуву не показують лінійного зв'язку як між собою, так і зі вказаною групою параметрів.

У статично залежній групі як найбільш загальний параметр за результатами розрахунків інтегрованих сил виступає пластична в'язкість.

Виходячи з механізму ущільнення ливарної форми, реологічне моделювання цього процесу може здійснюватись таким способом. Об'єктом моделювання є система, до якої входить модельна плита з моделлю складного профілю, опока та формувальна суміш, насипана на модель. Обраний переріз ливарної форми умовно розділяється горизонтальними та вертикальними площинами на елементарні об'єми призматичної форми. Сліди вертикальних площин розділяють форму на зони відповідно до профілю моделі: границі зон повинні проходити через площини вертикальних стінок моделі та опоки. Нахилені або закруглені поверхні відображаються східчастими профілями.

Сліди горизонтальних площин розділяють форму на шари висотою  $dx$ . Ширина підзон та товщина шарів (тобто ширина та висота елементарних об'ємів суміші) визначаються з умов виконання вимог макрореологічного моделювання. Приймавши за висоту опоки  $H$ , координату будь-якого шару суміші позначимо  $H - x$ , де  $x$  — віддалення від верхнього зрізу опоки. Відносно кожного шару, що розглядається, нижчележачі шари суміші, які за розглянутим механізмом процесу мають більш високі реологічні параметри, приймаються як жорстка підпора, через яку передаються вібраційні коливання.

В такому разі загальний процес ущільнення елементарного об'єму суміші можна розглядати як наслідок взаємодії трьох (двовимірне моделювання) або п'яти (тривимірне моделювання) складових компонент напружень (див. рисунок).



Схеми напружень у елементарному об'ємі суміші: а — двовимірна, б — тривимірна

Перетікання формувальної суміші відбувається, коли головні більші напруження сусідніх елементів настільки взаємно відрізняються, що з'являється можливість стискання елементарного об'єму у вертикальному напрямку і його розширення за рахунок стискання (ущільнювання) суміжного елемента в горизонтальному напрямку. Умовою перетікання суміші є ситуація, коли горизонтальні напруження, стискаючі суміжний елемент, стануть для нього головними напруженнями, а вертикальні — меншими. Для розрахунків горизонтального та вертикального стиснення приймаємо спрощено, що суміжні торцеві поверхні елементів суміші можуть рухатись незалежно один від одного.

Деформація, яка викликається стискаючими напруженнями, визначається за рівнянням

$$\varepsilon = \sigma_1 / F(\vartheta_{\text{еф}}, \eta_{\text{еф}}, E_{\text{еф}}),$$

де  $\varepsilon$  — деформація;

$F(\vartheta_{\text{еф}}, \eta_{\text{еф}}, E_{\text{еф}})$  — реологічна модель формувальної суміші;

$\vartheta_{\text{еф}}, \eta_{\text{еф}}, E_{\text{еф}}$  — ефективні значення пластичної міцності (границі текучості), в'язкості та модулю пружності формувальної суміші.

Реологічна модель, тобто конкретний вигляд функції  $F(\vartheta_{\text{еф}}, \eta_{\text{еф}}, E_{\text{еф}})$ , визначається за результатами реологічних випробувань [1, 2].

Вертикальне ущільнююче напруження, яке діє на елементарний шар товщиною  $dx$ , є сумою напружень, що викликані силою тяжіння  $\sigma_m$  та інерції  $\sigma_i$  вищележачого стовпа суміші висотою  $x$ ,

$$\sigma_1 = \sigma_m + \sigma_i.$$

Напруження, що викликане силою тяжіння,

$$\sigma_m = \delta(t) x g,$$

де  $t$  — час;

$\delta(t)$  — щільність суміші, що змінюється у процесі ущільнення від  $\delta_0$  (насипна щільність) до деякого граничного значення  $\delta_{\text{max}}$ ;

$g$  — прискорення сили тяжіння.

Напруження, викликане силою інерції,

$$\sigma_i = \delta(t) x a,$$

де  $a$  — віброприскорення.

Для гармонічних коливань

$$a = A(H - x) \omega^2 \sin \omega t,$$

де  $A(H - x)$  — амплітуда коливань на рівні  $(H - x)$ ;

$\omega$  — кутова частота коливань.

Інтенсивність згасання коливань суміші залежить від її щільності і описується експоненціальним законом

$$A(H - x) = A e^{(-\alpha(\delta) / 2(H - x))},$$

де  $A$  — амплітуда коливань віброплощини;

$\alpha(\delta)$  — коефіцієнт згасання коливань;

$H - x$  — відстань елементарного шару, що розглядається, від джерела вібрації.

Після відповідних підстановок і перетворювань одержимо

$$\sigma_1 = \delta(t) x g + \delta(t) x A e^{(-\alpha(\delta) / 2(H - x))} \omega^2 \sin \omega t = \delta(t) x (g + A e^{(-\alpha(\delta) / 2(H - x))} \omega^2 \sin \omega t).$$

Бічний тиск розраховується згідно з законом граничної рівноваги як

$$\sigma_2 = \xi(\delta) \sigma_1,$$

де  $\xi(\delta)$  — ефективний коефіцієнт бокового тиску в залежності від щільності, або

$$\sigma_2 = (\sigma_2 - 2 \operatorname{ctg} \theta(\delta)) / \operatorname{tg}^2 \theta(\delta),$$

де  $\theta(\delta)$  — ефективний кут обрушення.

$$\theta(\delta) = 45 + \varphi(\delta) / 2,$$

де  $\varphi(\delta)$  — ефективний кут тертя;

$c(\delta)$  — ефективний коефіцієнт зв'язності.

Результуючий бічний тиск на границі двох елементів визначається як різниця головних менших напружень. Якщо головні менші напруження дорівнюють один одному або коефіцієнт рівноваги менше, ніж граничне його значення, суміш може ущільнюватись тільки лінією дії головних більших напружень:

$$\sigma_{2 \text{ рез}} = \sigma_{2 ij} - \sigma_{2i(j-1)} \text{ — для перетікання ліворуч;}$$

$$\sigma_{2 \text{ рез}} = \sigma_{2 ij} - \sigma_{2i(j+1)} \text{ — для перетікання праворуч;}$$

$$\sigma_{2 \text{ рез}} = \sigma_{2 ij} - \sigma_{2i(j-1)} \text{ — для перетікання назад;}$$

$$\sigma_{2 \text{ рез}} = \sigma_{2 ij} - \sigma_{2i(j+1)} \text{ — для перетікання вперед.}$$

Додатне значення  $\sigma_{2 \text{ рез}}$  означає, що ущільнюючий тиск діє на відповідний суміжний елемент  $i(j - 1)$ ,  $i(j + 1)$ ,  $(i - 1)j$ ,  $(i + 1)j$ , а елемент  $ij$  зазнає деформації у горизонтальному напрямку. Негативне

значення  $\sigma_{2 \text{ рез}}$  означає, що ущільнюючому тиску підлягає елемент  $ij$ , а суміжні елементи  $i(j - 1)$ ,  $i(j + 1)$ ,  $(i - 1)j$ ,  $(i + 1)j$ , деформуються у горизонтальному напрямку, і суміш з них перетікає у  $ij$ -елемент.

Приймаємо, що результуючі бічні тиски дорівнюють 0. Вважаючи, що формувальна та стрижнева суміші є псевдоізотропними дисперсними системами, приймаємо також, що  $\sigma_2$  у всіх чотирьох напрямках однакоє. Тоді  $\sigma_{2 \text{ рез}} = \sigma_{3 \text{ рез}}$ , і через відповідні грані елементів перетікання (горизонтальне ущільнення) відсутнє. Взаємозв'язок між напруженнями має вигляд

$$\sigma_{2 \text{ рез}} = \sigma_{3 \text{ рез}} = \sigma_1 \operatorname{tg}^2 \theta(\delta) = \xi(\delta) \sigma_1.$$

Всі три (для двовимірного моделювання) або п'ять (для тривимірного) складових ущільнень елементу, деформації по вертикалі та горизонталі розраховуються за однією методикою.

Для практичного застосування описаної методики необхідно задати вигляд реологічної моделі, її реологічні константи, а також враховувати, що в процесі ущільнення кожного елементарного шару відбувається зміна вигляду реологічних моделей та їх констант. Необхідні дані для кожного виду суміші визначаються експериментально. Реологічне моделювання та розрахунок констант моделі здійснюється за спеціальною програмою на основі експериментальної кривої деформації.

Для коригування реологічної моделі та її параметрів для кожного шару суміші у заданому інтервалі часу розраховується щільність суміші. Коригування виконується згідно з залежностями, одержаними при обробці кривих деформації для різних щільностей суміші [2].

Щільність суміші визначається за умови

$$\delta_0 dx = \delta(t) (dx - \varepsilon),$$

де  $\delta(t)$  — щільність шару суміші після ущільнення за час  $t$ ;  
 $\varepsilon$  — величина деформації шару після ущільнення, звідси

$$\delta(t) = \delta_0 dx / (dx - \varepsilon).$$

Вплив вібрації на зміну реологічних характеристик враховується шляхом введення ефективних значень граничного напруження зсуву  $\mathfrak{G}_{\text{еф.}}$ , в'язкості  $\eta_{\text{еф.}}$ , модуля пружності  $E_{\text{еф.}}$  в залежності від віброприскорення і щільності суміші

$$\mathfrak{G}_{\text{еф.}}, \eta_{\text{еф.}}, E_{\text{еф.}} = f(a, \delta).$$

При наявності додаткових дій на елементарний об'єм від сусідніх зон за рахунок різного переміщення деформації знаходиться як

$$\varepsilon = \sigma_{1 \text{ рез}} / F(\mathfrak{G}_{\text{еф.}}, \eta_{\text{еф.}}, E_{\text{еф.}}),$$

$$\sigma_{1 \text{ рез}} = (P_1 - P_2) / (dy^2),$$

де  $P_1$  — стискаюче зусилля;

$P_2$  — зусилля тертя з боку сусідніх елементів;

$dy^2$  — горизонтальна площа елементу.

Сила тертя по поверхні моделі та опоки визначається за формулою

$$Tt = \tau_1 \Pi dx = \zeta f \sigma \Pi dx,$$

де  $\tau_1$  — мірна сила тертя;  
П — периметр шару;  
 $dx$  — товщина шару;  
 $\sigma$  — напруження, нормальні до поверхні стінки моделі та опоки;  
 $\zeta$  — коефіцієнт бічного тиску;  
 $f$  — коефіцієнт тертя суміші по поверхні стінки опоки або моделі.

Вимірювана сила тертя визначається як  $\tau_1 = \sigma \operatorname{tg}\psi$ , де  $\psi$  — кут зовнішнього тертя. Для внутрішнього тертя  $\tau_1 = \sigma \operatorname{tg}\varphi$ , де  $\varphi$  — кут внутрішнього тертя.

Розрахунок напруженого стану і деформацій здійснюється по зонах покровоко для заданого інтервалу часу  $\Delta T$ , послідовно для кожного виділеного шару суміші, після чого деформації  $N$  шарів додаються. Потім цикл повторюється для наступного інтервалу часу. Розрахунок зупиняється при вичерпанні заданого інтервалу часу вібрування або по досягненню найбільш можливого ущільнення суміші по всій висоті форми, тобто за умови  $\varepsilon = 0$ .

### Література

1. Формовочные материалы и смеси / Дорошенко С.П., Авдокушин В.П., Русин К. и др. - К.: Вища шк., 1990.
2. Моделирование реологических свойств формовочных смесей / Авдокушин В.П., Дорошенко С.П., Сургучев Е.А. и др. // Литейн. пр-во. - 1986. - № 3. - С. 13.

Надійшла до редакції 9 жовтня 2000 р.