

УДК 664.143.4.001.57

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНИХ ХАРЧОВИХ СЕРЕДОВИЩ

Лавріненко Н.М., д.ф.-м.н.

Науково-технологічний центр "Реактивелектрон" НАН України

Бескровний О.І., к.т.н.

Донецький національний технічний університет

Тел.(066) 040-04-35

Анотація – у роботі досліджено структурно-механічні характеристики харчових мас при перемішуванні, а, саме, поведінку частинок наповнювача в формі кулі в дисперсній фазі під впливом деформації простого зсуву.

Ключові слова – перемішування дисперсних середовищ, деформаційна мода, включення (у формі кулі)-оболонка-матриця, ефективно зсувне напруження.

Постановка проблеми. Перемішування харчових мас у технологічних процесах забезпечує досягнення декількох результатів: (1) змішування – поєднання об'ємів двох і більше компонентів з метою отримання однорідної суміші; (2) пластикації – зміна структурно-механічних характеристик матеріалу від твердої до в'язкої консистенції або зниження в'язкості; (3)збиття – перетворення одно- або двофазних систем в дво- або трифазну систему насиченням газовою фазою [1]. Процес перемішування супроводжується складними фізичними, хімічними і біохімічними процесами. З гідродинамічної точки зору процес перемішування зводиться до динамічної взаємодії обертових робочих органів змішувача з в'язким середовищем, яке залежить від структури і характеру потоків, що виникають у в'язкому середовищі. Надалі розглядається деформаційна мода простого зсуву. Для якісного аналізу фізичної картини, що виникає при перемішуванні, розглянемо поведінку включення у матриці при деформації простого зсуву, тобто розглянемо трифазну систему: включення (кластер у формі кулі), оболонка і матриця.

Аналіз останніх досліджень. Необхідно зазначити, що це питання інтенсивно вивчалось представниками різних наукових напрямків. Грунтуючись на аналітичних розв'язках у [2], дослідники в області композиційних матеріалів і дефектів у твердих тілах

досліджували поведінку включення, що має неідеальний зв'язок з матрицею [3]. Як показано в [4], гіпотеза Ешелбі не виконується для циліндричних та еліптичних включень з прослизанням. Суть гіпотези Ешелбі полягає у тому, що вплив постійного напруження, прикладеного на нескінченності, приводить до встановлення постійного напруження усередині включення, тобто, при довільній комбінації чистого і простого зсувів, при довільній орієнтації і характеристичному співвідношенні еліпсоїдального включення всередині нього завжди встановлюється однорідне напруження, яке описується одним єдиним тензором напружень. Цей результат має фундаментальне значення у прикладних науках, оскільки в реальних системах зв'язок між включенням та матрицею, як правило, не є ідеальним або через прослизання на міжфазній границі, або через наявність третьої фази, тобто оболонки. Неоднорідно напружений стан усередині включення, як видно, не впливає на гідродинамічну течію, але може викликати перехід в іншу деформаційну моду, або стимулювати метаморфні реакції. Крім того, неоднорідність напружень усередині включення у значній мірі впливає на еволюцію текстури [5].

Метою статті є дослідження структурно-механічних характеристик харчових мас при перемішуванні: поведінка дисперсного середовища з наповнювачем у вигляді зерен у формі кулі під впливом деформації простого зсуву.

Основна частина. У якості моделі використовувалася трифазна система: включення (зерно наповнювача)-оболонка-матриця, що знаходиться під впливом деформації простого зсуву. Система достатньою мірою ізольована, так що граничні умови не чинять на включення збурюючої дії. Вважаємо, що взаємодією між включеннями можна знехтувати. Оскільки передбачається, що ефективна в'язкість оболонки менше ефективної в'язкості матриці, то оболонку можна вважати шаром мастила. Це дає можливість розглядати також і граничний випадок, коли товщина шару змащення прямує до нуля, але прослизання між включенням та матрицею дозволено. У припущенні плоских деформацій задача розв'язується у двовимірному випадку. Включення має форму круга – розглядається вироджена форма. У [3] отримано замкнутий аналітичний розв'язок задачі для випадку кругового включення з прослизанням. Для чисельного моделювання процесу ми будемо використовувати метод скінченних елементів, який дозволяє вивчати різну геометрію, нелінійні матеріальні властивості (неньютонівські рідини) і скінченні деформації.

Наявність меж системи може вплинути на рух включення [6], тому у всіх моделях передбачається, що довжина включення складає

лише 5% від довжини зони зсуву. Товщина оболонки (шару мастила) змінюється від 0 до 50% довжини радіуса круга. Товщина проміжного шару H задається у відсотках. Кут зсуву φ є мірою зсувних деформацій γ і визначається формулою $\gamma = \operatorname{tg} \varphi$.

Граничні умови задано у вигляді постійної зсувної швидкості деформацій на верхній і нижній сторонах і вільних від напружень бічних сторонах. За означенням зсувна швидкість деформацій дорівнює $\dot{\gamma} = \frac{\partial v_x}{\partial y}$, v_x - горизонтальна швидкість в декартовій системі координат. Додатне значення γ відповідає зсуву верхньої сторони зліва направо.

Розглянута реологія відповідає ньютонівським рідинам і неньютонівським рідинам, підпорядковуваним степеневому закону, коли тензор напружень τ_{ij} і тензор швидкостей деформацій $\dot{\varepsilon}_e$ пов'язані співвідношенням $\tau_{ij} = 2\eta \dot{\varepsilon}_{ij}$, де η – ефективна в'язкість матеріалу, яка за означенням дорівнює $\eta = B \dot{\varepsilon}_e^{\left(\frac{1}{n}-1\right)}$. Тут $\dot{\varepsilon}_e$ – швидкість ефективних деформацій, n – показник ступеня, B – матеріальна константа, яка у випадку ньютонівської рідини ($n = 1$) дорівнює в'язкості. Швидкість ефективних деформацій визначається формулою

$$\dot{\varepsilon}_e = \sqrt{\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{xx} - \dot{\varepsilon}_{yy}}{2}\right)^2 + \dot{\varepsilon}_{xy}^2} \text{ аналогічно визначенню ефективного зсувного}$$

$$\text{напруження } \sigma_e = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2}.$$

У нашому випадку (форма включення – куля) відсутня залежність від кута орієнтації включення. На рис. 1-5 показані характерні особливості розподілу тиску P і ефективного зсувного напруження σ_e , обумовлені наявністю проміжного шару.

Для того, щоб зрозуміти вплив проміжного шару на поведінку включення, розглянемо спочатку два граничних випадки – дуже жорстке (рис. 1) і дуже слабе (рис. 2) кругові включення без проміжного шару. Природно, що найбільший тиск виникає біля границь жорсткого включення у двох квадрантах, що відповідає набіганню потокових ліній простого зсуву на включення. Завдяки симетрії абсолютні значення збурень тиску у всіх чотирьох квадрантах рівні. У разі слабого включення у порівнянні з жорстким включенням області стиснення стають областями розтягування,

області, в яких швидкість деформацій дорівнює нулю, стають сильно деформованими областями. Тиск у кластері дорівнює нулю, хоча тепер у ньому найбільша швидкість ефективної деформації і найменше значення ефективного зсувного напруження.

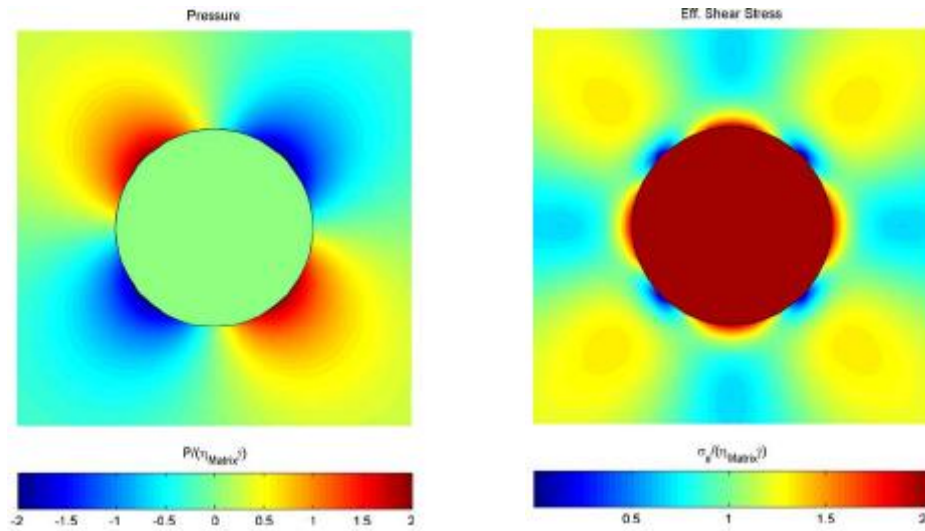


Рис. 1. Жорстке кругове включення; відсутній проміжний шар; ідеальний зв'язок між матрицею і включенням.

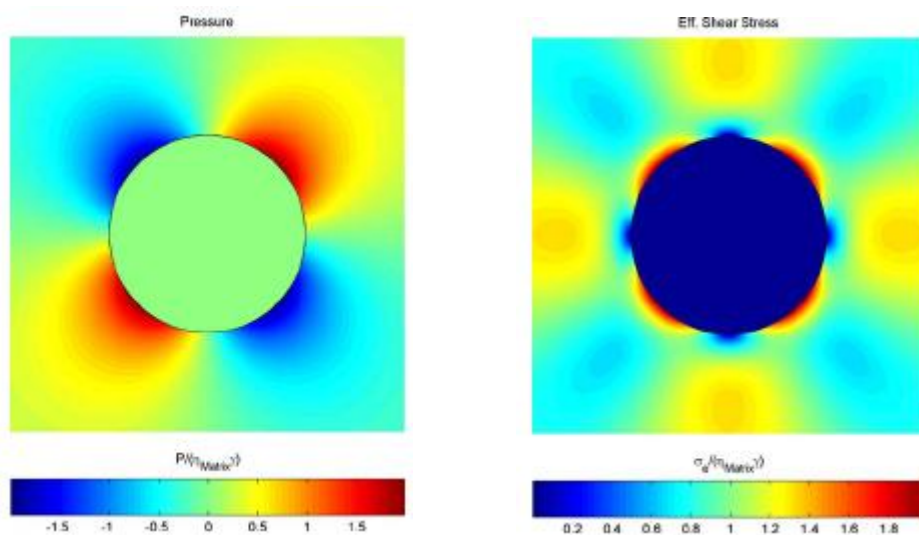


Рис. 2. Слабке кругове включення; відсутній проміжний шар; ідеальний зв'язок між матрицею і включенням.

Повністю підтверджується гіпотеза Ешелбі: хоча зміна відносного значення в'язкості в жорсткому і слабкому включених повністю змінює кінематичні та динамічні параметри, всередині включення стан однорідний і всі параметри мають постійне значення.

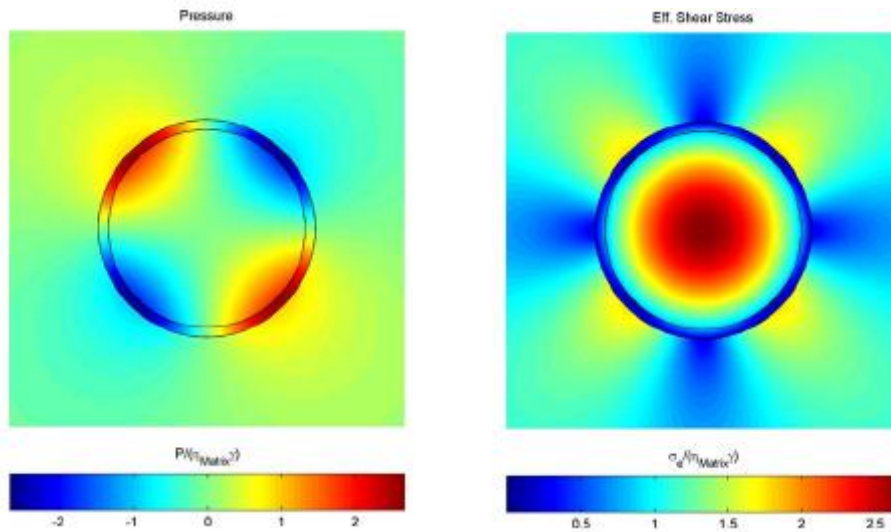


Рис. 3. Жорстке кругове включення з проміжним шаром $H = 10$; $\eta_{\text{labricant}} / \eta_{\text{matrix}} = 1/10$.

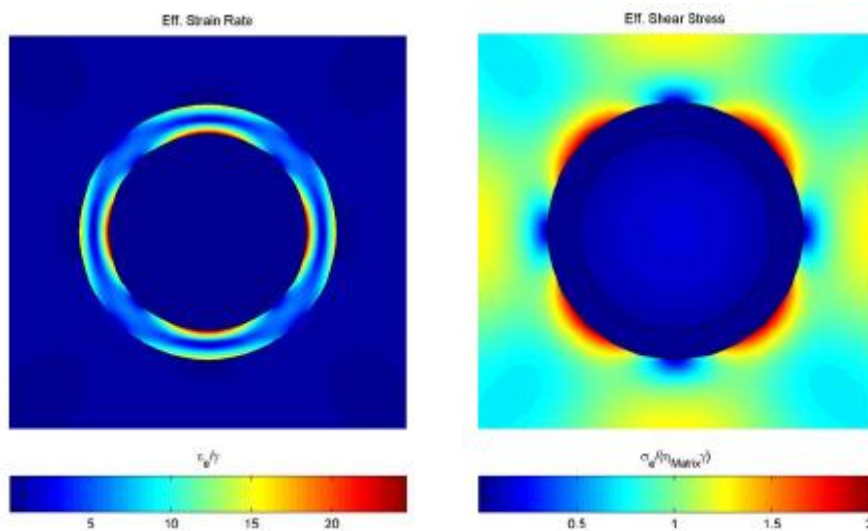


Рис. 4. Жорстке кругове включення з проміжним шаром $H = 30$; $\eta_{\text{labricant}} / \eta_{\text{matrix}} = 1/1000$.

Введення прослизання між включенням та матрицею за посередництвом проміжного шару (шару мастила) приводить до неоднорідного розподілу напружень і швидкості деформацій усередині включення (рис. 3-4), що узгоджується з аналітичним розв'язком [7].

Таким чином, проміжний шар сприяє поширенню зовнішнього тиску всередину включення. З іншого боку, зменшення в'язкості проміжного шару приводить до того, що матриця не «відчуває» більше включення і розподіл тиску в матриці нагадує випадок слабого включення. Цей ефект – маскування жорсткого включення –

посилюється при збільшенні товщини проміжного шару. Вплив проміжного шару на швидкість ефективних деформацій полягає в тому, що він відіграє роль концентратора деформацій і характеризується найбільшим значенням швидкості ефективних деформацій. Амплітуда ε_e зростає при зменшенні в'язкості проміжного шару, але зменшується при збільшенні його товщини. Вплив проміжного шару на ефективне зсувне напруження аналогічно його впливу на P – при зменшенні в'язкості проміжного шару і збільшенні його товщини матричні значення прямують до значень у випадку слабого включення. Найменші значення σ_e спостерігаються у проміжному шарі.

Ще в одному випадку гіпотеза Ешелбі порушується навіть при відсутності проміжного шару; це відбувається при перемішуванні неньютонівських матеріалів (рис. 5). Розглянуто матеріали, коли і матриця і включення описуються степеневим рівнянням з показником. Характеристики включення стають неоднорідними тільки через неньютонівську поведінку матриці. Якщо тільки включення описується степеневим законом, то гіпотеза Ешелбі справедлива.

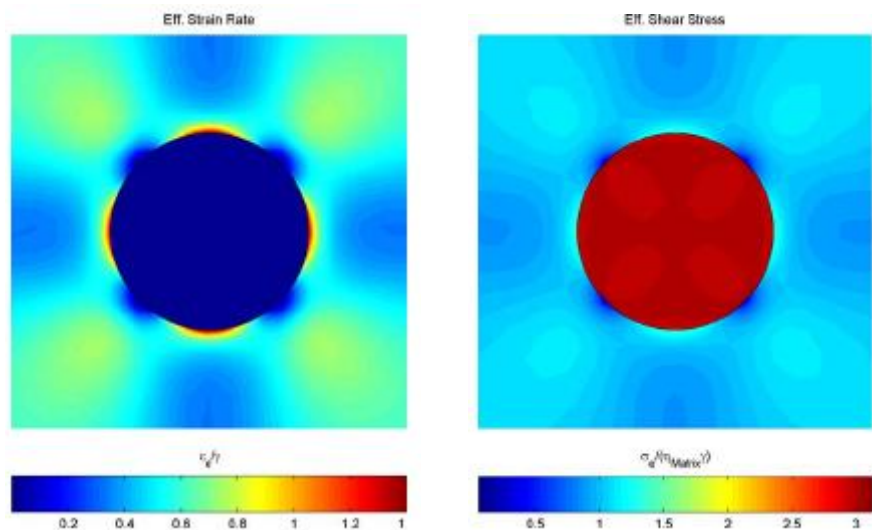


Рис. 5. Жорстке кругове включення; включення і матриця – неньютонівські матеріали:

$$H = 0; \quad n_{clast} = 3.3, \quad n_{matrix} = 3.05, \quad \eta_{clast} / \eta_{matrix} = 10/1.$$

Поведінку при скінченних деформаціях для жорсткого кругового включення з проміжним шаром $H = 10$; $\eta_{lubricant} / \eta_{matrix} = 1/1000$ показано на рис. 6. Скінченна деформація у цьому випадку дорівнює $\gamma = 0.56$. Хоча ця деформація відносно мала, але виявилася достатньою для істотного зменшення товщини проміжного шару в квадрантах стиснення і формування

хвостів. Розподіл напружень виглядає аналогічно початковому розподілу, але гострі кінці хвостів є концентраторами напружень, подібними до концентраторів напружень у вершинах тріщин.

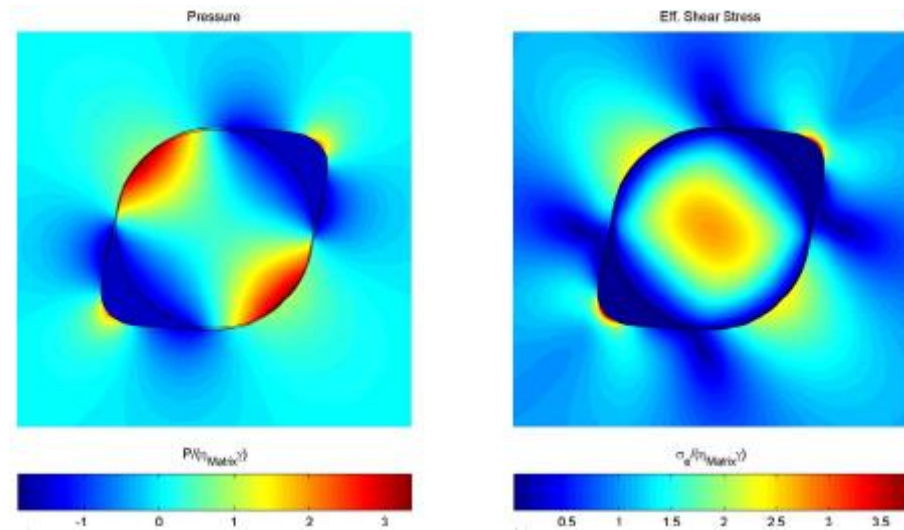


Рис. 6. Скінченні деформації для жорсткого кругового включення з проміжним шаром $H = 10$; $\eta_{\text{lubricant}} / \eta_{\text{matrix}} = 1/1000$.

Таким чином, можна зробити такі *висновки*:

1. При зменшенні в'язкості проміжного шару менше $1/1000$ в'язкості матриці поведінка включення стає нечутливою до подальшого зменшення в'язкості проміжного шару.

2. Для матеріалів з ньютонівською реологією в'язкість проміжного шару повинна бути менше $1/2$ в'язкості матриці для забезпечення повороту включення у протилежному до зсуву напрямку (максимальна товщина проміжного шару повинна бути ≤ 50).

3. Неньютонівська поведінка проміжного шару приводить до встановлення стабільності вже при розходженні ефективних в'язкостей у $1/2$ рази.

Література:

1. Чувахин С.В. Научно-практические основы интенсификации механических процессов при образовании высоковязких кондитерских масс: / С.В. Чувахин // Автореф. диссерт. д-ра техн. наук. – М.: МТИПП, 1990. – 50с.

2. Eshelby J.D., 1959. The Elastic Field Outside an Ellipsoidal Inclusion / J.D.Eshelby // Proceedings of the Royal Society of London Series a - Mathematical and Physical Sciences. – 1959. – v. 252(1271). – P. 561-569.

3. Shen H. Analysis of internal stress in an elliptic inclusion with imperfect interface in plane elasticity / H.Shen, P.Schiavone, C.Q. Ru,

A.Mioduchowski // Mathematics and Mechanics of Solids. –2000. – v. 5(4). – P. 501-521.

4. *Mura, T.* Some new problems in the micromechanics / *T. Mura* // Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing. – 2000. – v. 285(1-2). – P. 224-228.

5. *Kocks U.F.* Texture and anisotropy preferred orientations in polycrystals and their effect on materials properties / *U.F.Kocks, C.N.Tome, H.R.Wenk, H.Mecking, A.J.Beaudoin.* – Cambridge University Press, Cambridge. – 1998, XII. – 676p.

6. *Ildenfonse B.* Mechanical interactions between rigid particles in deforming ductile matrix – analog experiments in simple shear flow / *B.Ildenfonse, D.Sokoutis, N.S. Mancktelow* // Journal of Structural Geology. – 1992. – v.14(10). – P.1253-1266.

7. *Marques F.O.* Rotation of rigid elliptical cylinders in viscous simple shear flow: analogue experiments / *F.O.Marques, S. Coelho* // Journal of Structural Geology. – 2001. – v.23(4). – P.609-617.

8. *Stagni, L.* Elastic field perturbation by an elliptic inhomogeneity with a sliding interface / *L. Stagni* // Journal of Applied Mathematics and Physics. – 1991. – v. 42. – P. 881-819.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ ПИЩЕВЫХ СРЕД

Н. Лавриненко, А. Бескровный

Аннотация - в работе исследованы структурно-механические характеристики пищевых сред при перемешивании, а, именно, поведение частиц наполнителя в форме шара в дисперсной фазе под влиянием деформации простого сдвига.

SIMULATION OF VISCOPLASTIC STIRRING FOOD MASSES

N. Lavrinenko, O. Beskrovnyy

Summary

In this work, the structural and mechanical properties of food masses with stirring, namely the behavior of the filler sphere particles in the dispersed phase under simple shear mode, are discussed.