

І.Я. Стадник, канд. техн. наук
Тернопільський національний технічний
університет імені І. Пулюя
О.В. Ковальов, канд. техн. наук,
В.В. Шутюк, канд. техн. наук
Л.І. Удворгелі
Національний університет харчових
технологій

ВПЛИВ АДГЕЗІЇ ТІСТА НА ПРОЦЕС ЗАМІШУВАННЯ

Представлено удосконалення технології замішування при сприянні високоефективного впливу адгезії на процес тістоутворення в тістомісильній камері нової машини дискретної дії. Обертано площу контакту адгезиву та складові, формуючі роботу на подолання адгезії і деформації тіста при визначенні критеріїв, які впливають на процес тісто утворення, відповідно до кожного певного періоду стадії замішування.

Ключові слова: тістоутворення, адгезія, адгезив, субстрат, формуючий канал, деформація, напруження.

Удосконалення технології замішування тіста і створення високоефективного обладнання — актуальне наукове завдання. Розроблення і розрахунок нових процесів та обладнання потребують глибокого і всебічного вивчення найбільш значних фізико-механічних властивостей напівфабрикатів хлібопекарської промисловості. Значна адгезійна властивість тіста суттєво ускладнює технологічний процес і зумовлює додаткові затрати енергії. Цьому напряму приділяється недостатньо

© І.Я. Стадник, О.В. Ковальов, В.В. Шутюк, Л.І. Удворгелі, 2010

It was presented improvement technology of mixing with the assistance of adhesion effective method on the making dough process in the new discrete machine chamber. It was substantiate the adhesive contact area and components which has influence on the making dough process according to the certain period of each stage of mixing.

Keywords: dough making process, adhesion, substance, adhesive, strain, stress

уваги, тому фізичну природу адгезії до цього часу досліджено не повністю.

Пошук нових шляхів зниження адгезії можливий тільки після вивчення фізичної природи цього явища. Адгезія виникає в результаті адсорбції молекул тіста на поверхні робочого органа в найтоншому (до 20 нм) поверхневому шарі. Одночасно ці молекули пов'язані з основним об'ємом замішаного тіста. Тому на першій і частково другій стадіях замішування, при відносному

переміщенні тіста і мисильного барабана, молекули тіста, які адсорбувалися на поверхні, обертаються разом із мисильним барабаном. Якщо сили міжмолекулярного з'єднання в тісті стають слабшими, ніж сили адсорбції, то маса тіста розривається на деякій відстані від поверхні мисильного барабана. Такі явища відбуваються в період тістоутворення і в процесі пластикації тіста. Вони залежать від реологічних властивостей тіста на момент процесу замішування, ступеня шорсткості, товщини шару тіста. Дослідження впливу фізичних і реологічних властивостей тіста на процес замішування в конструктивних особливостях нової машини з метою поліпшення якості хлібобулочних виробів — завдання актуальне.

Серед компонентів тіста найбільшу енергію адсорбції до металів має вода. Якщо її видалити з поверхні тістової заготовки, то адгезія повинна зменшитися. При цьому інтенсивність випаровування поверхневої вологи має бути дуже великою, щоб тонка скоринка тіста, що виникає, перешкождала видаленню вологи з об'єму тістової заготовки. Подібні умови можна отримати тільки при дуже великих швидкостях витікання тіста під тиском крізь отвір профільного каналу тістомісильної камери. Тісто має пружні, в'язкі і пластичні властивості, тобто належить до пружно-в'язкопластичних тіл. Адгезія подібних тіл, як і когезія частинок, рідин і плівки, залежить від площі контакту між тістом (адгезивом) і шорсткою металевою поверхнею, з якою воно контактує. Метою цієї роботи є дослідження процесу заповнення тістом виямок шорсткої поверхні мисильного барабана та її вплив на інтенсивність проходження процесу замішування.

Відомо, що адгезію визначають відриванням тіста від поверхні, вимірюючи зусилля відриву. За цим зусиллям розраховують адгезійну стійкість. Тому адгезійна стійкість $f_{\text{від}}$ (дорівнює відношенню зусилля відриву зразка $F_{\text{від}}$ до площі номінального контакту $S_{\text{н.к}}$) залежить від розмірів поверхні й адгезиву, умов контакту і відриву тіста. Робота, що витрачається на зміну контакту замішаного тіста з поверхнею мисильної камери та мисильного барабана на подолання адгезії і деформації тіста $A_{\text{деф}}$, становитиме

$$A_{\text{від}} = A_{\text{ад}} + A_{\text{деф}} = F_{\text{від}} dx = F_{\text{ад}} dx + F_{\text{деф}} dx, \quad (1)$$

де $F_{\text{ад}}$, $F_{\text{деф}}$ — зусилля адгезії і деформації; X — висота підняття тіста над поверхнею при відриві шматка тіста (рис. 1); $F_{\text{від}}$ — зусилля відриву шматка тіста від поверхонь пластифікатора і мисильного барабана.

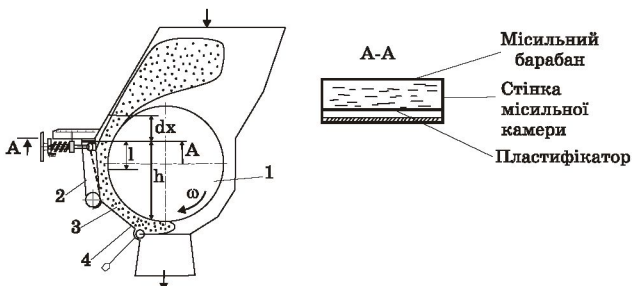


Рис. 1. Схема відокремлення замішаного тіста: 1 — мисильний барабан; 2 — пластифікатор; 3 — адгезив (тісто); 4 — мисильна камера (субстрат)

Розглянемо складові, що формують роботу відриву:

$$F_{\text{ад}} = \int_0^l df_{\text{ад}} = \int_0^l f_{\text{ад}} b l d l = f_{\text{ад}} b l^2. \quad (2)$$

Деформаці. тіста визначають за формулою

$$F_{\text{деф}} = \tau_0 \frac{V_{\text{від}}}{h} b l, \quad (3)$$

де $V_{\text{від}}$ — швидкість відриву тіста від поверхні мисильного барабана під дією зовнішніх сил; t_0 — дотичні напруження: $\tau = \eta j$; η — пластична в'язкість тіста; j — градієнт швидкості зсуву; b — ширина мисильного органа (барабана); l — довжина мисильного органа, $2\pi Rl$.

Робота, яка визначається зусиллям відриву, витрачається на подолання адгезії $F_{\text{ад}}$ і деформації тіста при виході через прямокутну формувальну поверхню між мисильним барабаном і пластифікатором $F_{\text{деф}}$:

$$F_{\text{від}} = F_{\text{ад}} + F_{\text{деф}}. \quad (4)$$

Площа номінального контакту

$$S_{\text{н.к}} = 2\pi R l. \quad (5)$$

З урахуванням відношень (2) і (3)–(5) зусилля відриву набере вигляду

$$F_{\text{від}} = S_{\text{ад}} \left(f_{\text{ад}} + \tau_0 \frac{V_{\text{від}}}{h} \right). \quad (6)$$

Відношення (6) справедливе для контакту з ідеально гладенькою поверхнею мисильної камери і пластифікатора. На основі рівнянь (2), (6) визначаємо вплив на адгезійну стійкість факторів, які піддаються експериментальному визначенню на нашій тістомісильній машині (τ , h , τ_0 , $V_{\text{від}}$).

Проаналізуємо вплив швидкості на процес відриву шматка тіста від поверхонь машини. При $V_{\text{від}} \rightarrow 0$, $F_{\text{від}} \rightarrow S_{\text{н.к}} f_{\text{ад}}$ для гладенької поверхні і $F_{\text{від}} \rightarrow \alpha S_{\text{н.к}} f_{\text{ад}}$ для мисильного барабана. Тут α — коефіцієнт формування площі контакту.

За допомогою даних умов можна визначити дійсну адгезію за результатами адгезіометрії при незначних швидкостях відриву тіста, коли $V_{\text{від}} \rightarrow 0$. Ці умови повністю відповідають процесам, що відбуваються на третій стадії замішування. Крім цього, відома фактична площа контакту фаз. Мінімальна фактична площа контакту $S_{\text{н.к}}$, утворена контактом тіста з поверхнею пластифікатора, де $\alpha = 1$. Максимальна площа контакту дорівнює площі поверхні мисильного барабана (субстрату) S_c (рис. 2).

$$S_{\text{н.к}} \leq S_{\text{ф.к}} \leq S_c.$$

Номінальну площу контакту легко визначити за геометрією адгезиву або субстрату. Площа субстрату

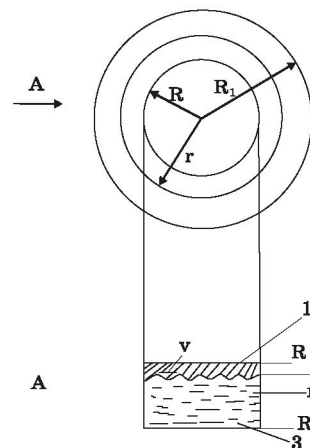


Рис. 2. Визначення фактичної площі контакту мисильного барабана і тіста: 1 — субстрат; 2 — поверхня субстрату; 3 — адгезив (тісто)

із урахуванням рельєфної поверхні (залежить від частоти і виду її оброблення) відома. Тому в загальному вигляді рельєф поверхні із стороною a можна записати подвійним рядом Фур'є:

$$Z = \sum_{m,n=1}^{\infty} a_{m,n} \sin \frac{\pi m x}{a} \cos \frac{\pi n y}{a}, \quad (7)$$

де Z — висота нерівностей; $a_{m,n}$ — коефіцієнти Фур'є; x, y — декартові координати; m, n — номери гармонік.

Сили адгезії при цьому дуже малі.

Вираз (7) характеризує профіль будь-якої поверхні. Вибираємо на поверхні елемент площею ds :

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} dx dy.$$

Знаючи форму профілю, тобто dz/dx і dz/dy , можна інтегруванням визначити S_0 із урахуванням рельєфу поверхні. Оскільки рельєф поверхні місильного барабана є конусом із кутом $\gamma = 60^\circ$ при вершині, то в будь-якому довільно вибраному перерізі рельєф має вигляд рівностороннього трикутника (рис. 3). Тоді довжина утвореної профілем поверхні вдвічі збільшить довжину середньої лінії профілю. Отже, площа поверхні субстрата буде вдвічі більшою від номінальної площі контакту.

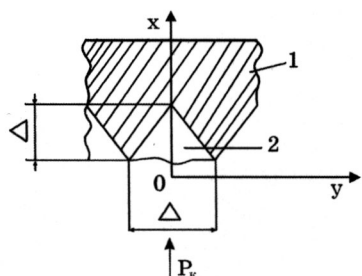


Рис. 3. Заповнення каверни на поверхні субстрата 1 адгезивом 2

У реальних умовах тісто не повністю контактує з поверхнею місильного барабана. Повнота заповнення шорсткої поверхні пропорційна тиску і часу контакту тіста з місильним органом і ділянкою пластифікатора, а також його в'язкості:

$$h/d \sim (p_k t_k / \eta)^{1/2}.$$

При замішуванні в місильній камері відбуваються певні процеси. Ці процеси супроводжуються значними деформаціями, яким сприяє профіль поверхні місильного барабана. Особлива увага при дослідженні процесу пластикації тіста зосереджується на створенні тиску пластифікатором. Тому розглядатимемо нестабільний процес заповнення тістом виїмок поверхні місильного барабана.

Можна припустити, що тісто контактує із шорсткою поверхнею при контактному тиску P_k . Шорсткість місильного барабана характеризується середньоквадратичним значенням нерівностей R_z . При цьому каверна на поверхні місильного барабана заповнена тістом (рис. 3). Якщо розміри макромолекул тіста значно менші за виїмки поверхні, то на течію тіста в машині поширюється закон механіки суцільних середовищ і відбувається двовимірний течійний рух. При цьому сили інерції відповідно малі, а сили гідростатичного тиску, в'язкого тертя і капілярні взаємно рівноважені. В таких умовах для одержання основних критеріїв подібності даної течії достатньо розглянути одновимірне рівняння руху тіс-

та. При ізотермічній течії, коли значення температури тіста і місильного барабана однакові (це видно із дослідів), рівняння руху має вигляд

$$Q = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}, \quad (8)$$

де p — тиск; x, y — декартові координати; τ_{xy} — дотичне напруження; ρ — густина тіста.

На вільній поверхні тіста виконуються умови безперервності нормальних і відсутності дотичних напружень.

Позначимо радіус кривизни адгезиву на поверхні субстрату (див. рис. 3) Δ , тоді умова безперервності нормальних напружень за формулою Лапласа має вигляд

$$\tau_x = \frac{\delta_{AB}}{\Delta}, \quad (9)$$

де δ_{AB} — поверхневий натяг на границі адгезив — поверхня.

Реологічні властивості тіста в області малих швидкостей деформації, а саме при проходженні через пластифікатор, характеризуються рівнянням Шведова—Бінгама

$$\tau = \tau_0 \sin j = \eta_{пл} j, \quad (10)$$

де τ_0 — умовна границя текучості; $\eta_{пл}$ — пластична в'язкість; j — градієнт швидкості деформації.

Дотичне напруження в напрямку xx

$$\tau_{xx} = 2B \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (11)$$

де $B = \tau/A + \eta_{пл}$; A — другий інваріант тензора швидкостей деформації, одержаний для одновимірної течії:

$$A = \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (12)$$

З урахуванням (10)–(12) рівняння (8) і граничні умови (9) можна записати у вигляді

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tau_0 + \eta_{пл} \frac{\partial v}{\partial x} \right) = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tau_0 + \eta_{пл} \frac{\partial v}{\partial x} \right) = 0. \quad (14)$$

Замінивши диференціали характерними значеннями ($p \approx p_k$; $y \approx \Delta$; $x \approx \Delta$; $v \approx \Delta/t$), одержимо безрозмірнісні

компоненти: $N_1 = \frac{\delta_{AB} t_k}{\Delta \eta_{пл}}$; $N_2 = \frac{\tau_0 t_k}{\eta_{пл}}$; $N_3 = \frac{P_k t_k}{\eta_{пл}}$. (15)

Критерій N_1 характеризує відношення сил поверхневого натягу і в'язкого тертя; N_2 — аналог критерію Сен-Венана для умов нестационарного руху (течії); N_3 — враховує вплив тиску контакту і в'язкого тертя. Таким чином, повнота доповнення виїмок місильного барабана $S_{ф,к}$ змінюється від $S_{н,к}$ до S_0 залежно від відношення параметрів критеріїв N_1, N_2, N_3 . Ці критерії, як і інші, впливають на процес тістоутворення відповідно до кожного певного періоду стадії замішування. Із критеріальних рівнянь видно, що велике значення має пластична в'язкість тіста. На перших хвилинах замішування інгредієнти контактують з поверхнею машини за основним принципом повільної пластичної деформації. При збільшенні тривалості контакту за наявного тиску контактування адгезійна пружність зростає, як правило, за рахунок пластичної течії і визначається пластичною в'язкістю.

Висновок. Для забезпечення постійної площі фактичного контакту, що сприяє кращій адгезії, а отже, перебігу інтенсивного процесу замішування, необхід-

ною умовою є сталість критеріїв. Це означає, що фактична площа контакту $S_{ф.к}$ змінюється від $S_{н.к}$ до S_c залежно від відношення параметрів. Тому шкалу пластифікатора встановлюють на певній глибині для створення формуювального каналу, що відповідає теоретичним і практичним розрахункам.

У таких умовах відбувається інтенсивне замішування тіста за рахунок великих напружень деформацій. Ці умови мають тривати певний період — перша і друга стадії замішування. На третій — тісто пластифікується і автоматично вивантажується із камери машини, тому вплив адгезії має бути мінімальний.

Змінити сили адгезійних зв'язків можна лише за умови, що товщина шару тіста буде незначною і при відділенні від поверхні місильного барабана його поверхня буде чистою.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зімон А.Д. Адгезія харчових мас. — М. 1985.
2. Николаев Б.А. Структурно-механические свойства мучного теста. — М.: Пищ. пром.-сть, 1976. — 246 с.

Надійшла до редколегії 11.06.10 р.