

УРАХУВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОСТІ В УМОВАХ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ЗМАЩЕННЯ НА ВИТЯЖНОМУ РЕБРІ МАТРИЦІ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ

**Драгобецький В.В., Пузир Р.Г.,
Кременчуцький державний політехнічний університет.**

Вступ. Створення універсальних методів визначення оптимальних силових характеристик технологічних процесів виготовлення деталей методами листового штампування вимагає вивчення фізики явищ, які відбуваються в зоні контакту заготовки з інструментом. Встановлення закономірностей контактування при пластичній деформації, що виникає під дією великих навантажень, - надзвичайно складна задача, що змінюється під впливом величезного числа факторів. Надійних і універсальних методів розрахунку напруг контактної тертя, які враховують особливості технологічних процесів листового штампування, не розроблено.

Мета роботи. В технологічних процесах листового штампування при застосуванні мастил з визначеними реологічними властивостями є всі умови для забезпечення рідинного режиму фрикційної взаємодії між заготовкою й інструментом. Застосування мастил для зниження сил контактної взаємодії технологічно, економічно й не вимагає великих економічних витрат. В існуючих розрахунках динамічного поведіння заготовки запізнана гідродинамічна модель, що враховує сили тертя на фланці, припускає стаціонарність плинності мастильного шару між заготовкою й інструментом, що не повною мірою враховує динамічний характер деформування. Тому найбільш доцільно розглянути питання гідродинамічного змащення стосовно до процесів листового штампування з урахуванням нестационарності.

Матеріал і результати дослідження. В основу гідродинамічної теорії покладені відомі рівняння гідродинаміки [1], які описують рух ньютонівської рідини

$$\rho \frac{D\bar{\mathbf{v}}}{Dt} = -\nabla p + \eta \Delta \bar{\mathbf{v}} + 3^{-1} \eta \nabla (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}) + 2(\nabla \eta) \nabla \bar{\mathbf{v}} + (\nabla \eta) (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}) - 2 \cdot 3^{-1} (\nabla \eta) (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}) + \lambda \nabla (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}) + (\nabla \lambda) (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}) + \rho \bar{\mathbf{F}}, \quad (1)$$

де ρ - щільність рідини;

$\frac{D}{Dt}$ - матеріальна похідна;

p - локальний тиск;

η - зсувна в'язкість;

$\bar{\mathbf{v}}$ - вектор локальної швидкості;

λ - об'ємна в'язкість;

$\bar{\mathbf{F}}$ - вектор сили.

Це рівняння разом з рівнянням стану $p=p(\rho, T)$, залежністю зсувної в'язкості від густини $\eta=\eta(\rho, T)$, залежністю об'ємної в'язкості від щільності $\lambda=\lambda(\rho, T)$,

граничними та початковими умовами цілком визначають тиск, густину й компоненти швидкості при ізотермічному руху рідини.

Рівняння може бути застосоване також до неізо-термічного руху однорідної рідини, але при цьому необхідно використовувати для визначення залежних перемінних також рівняння енергії на додаток до граничних умов, які враховують температуру або потік тепла. В'язкість і густина будуть тепер також функціями температури.

Для описування руху мастильної рідини між інструментом та виробом при листовому штампуванні λ покладається рівним нулю. При цьому підстановка в рівняння (1) векторної тотожності

$$\Delta \bar{\mathbf{v}} = \nabla (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}) - \nabla (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}) \quad (2)$$

приводить загальне рівняння до виду, отриманому Мілн-Томсоном.

У час руху мастильного шару в розглянутому випадку градієнти тисків і температури малі, й члени $\nabla \eta$ і $\nabla \lambda$ можна опустити. Крім того, вважаємо, що ρ постійно (нестислива рідина, $\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}=0$) і постійна в'язкість η . Тоді рівняння (1) зводиться до однієї з форм рівнянь Нав'є-Стокса:

$$\rho \frac{D\bar{\mathbf{v}}}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{v}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{v}} \right) = -\nabla p + \eta \Delta \bar{\mathbf{v}} + \rho \bar{\mathbf{F}}. \quad (3)$$

Тензор тисків (напруги тертя), що виражається через обумовлені тиски і швидкості, має вид

$$\bar{\mathbf{P}} = -p \bar{\mathbf{I}} + \lambda (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}) \bar{\mathbf{I}} + 2\eta \bar{\mathbf{K}}, \quad (4)$$

де $\bar{\mathbf{I}}$ - одиничний тензор;

$\bar{\mathbf{K}}$ - тензор швидкостей деформацій,

$$\bar{\mathbf{K}} = 0,5 \left[\nabla \bar{\mathbf{v}} + (\nabla \bar{\mathbf{v}})^t \right] - 3^{-1} \bar{\mathbf{I}} (\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}).$$

Внаслідок нелінійності рівнянь Нав'є-Стокса загальний метод їхнього рішення поки що не знайдений і вирішити їх без введення окремих допусків, і без урахування конкретних умов протікання технологічних процесів листового штампування неможливо.

Для листового штампування можна прийняти наступні допущення[5]:

1. Рідина мастильного шару нестислива.

2. В'язкість різних ділянок мастильного шару постійна.

3. Режим тертя в мастильному шарі внаслідок малого зазору ламінарний.

4. Мастильна рідина прилипає до твердих стінок інструмента і заготовки.

Процеси листового штампування проводяться переважно при швидкостях деформування 0,3-0,5 м/с. Час розгону периферійної ділянки заготовки до таких швидкостей складає 0,02-0,04 с [2].

Заготовку, яка деформується, розбиваємо на ряд елементарних ділянок, прийнявши додаткові гіпотези про характер руху мастильного шару, наприклад, як сукупність плоскопаралельних й вісесіметричних течій. Пропонується визначити напруги контактної

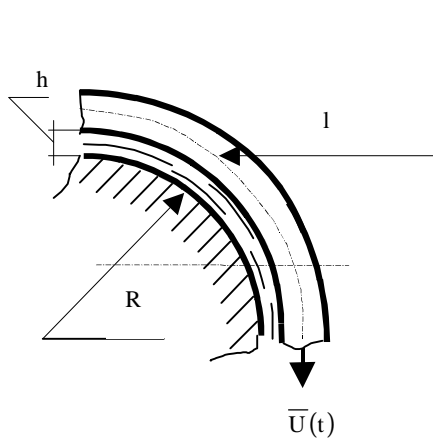


Рисунок 1 - Течія мастила на радіусі матриці

Компоненти швидкості в циліндричній системі координат будуть

$$v_2 = v_1 = 0; \quad v_3 = v_3(X_1).$$

Рівняння руху будуть мати вигляд

$$\frac{\partial p}{\partial X_1} = \rho \frac{v_3^2}{X_1}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial v_3}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X_3} = \eta X_1 \left(\frac{\partial v_3}{\partial X_1^2} + \frac{1}{X_1} \frac{\partial v_3}{\partial X_1} - \frac{v_3}{X_1^2} \right). \quad (6)$$

Рівняння нерозривності дає тотожність.

З (5) походить $p = p(X_1)$. Вважаємо, що $p(X_3) = \text{const}$ [3]. Заміняємо прискорення його середнім по товщині в'язкого шару значенням, тобто

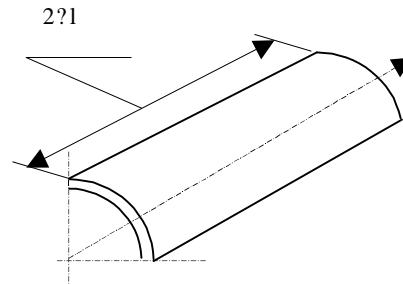
$$\frac{\partial^2 v_3}{\partial X_1^2} + \frac{1}{X_1} \frac{\partial v_3}{\partial X_1} - \frac{v_3}{X_1^2} = \eta^{-1} h^{-1} \int_0^h \frac{\partial v_3}{\partial t} dX_1. \quad (7)$$

Розв'язуючи диференціальне рівняння (7) з урахуванням граничних умов

$$v_3|_{X_1=R} = 0, \quad v_3|_{X_1=R+h} = U(t),$$

взаємодії найбільш характерної для всіх технологічних процесів листового штампування ділянки заготовки - радіуса заокруглення матриці. Крім того, зробимо усереднення деяких змінних величин на живому перетині мастильного шару. У результаті тривимірної течії замінюється одномірною. Однак усереднення величин буде лише в тому випадку відповідати реальним процесам деформування, коли усереднення буде зроблено з урахуванням нестационарності.

Зважаючи на те, що радіус матриці малий ($R = 10\delta$), тороїдальну поверхню, утворену на витяжному ребрі, замінюємо циліндричною, яка розгорнута по середній лінії (мал.1).



одержимо

$$v_3 = H(X_1^2 + BX_1 - BR^2 X_1^{-1} - R^3 X_1^{-1}) + UK, \quad (8)$$

де

$$B = [R^3 - (R+h)^3] (2Rh + h^2)^{-1};$$

$$K = (R+h)(2Rh + h^2).$$

$$\frac{\partial v_3}{\partial t} = H'(X_1^2 + BX_1 - BR^2 X_1^{-1} - R^3 X_1^{-1}) + U'K(X_1 - R^2 X_1^{-1}) \quad (9)$$

З (9) одержимо

$$H'(t) - H(t)K_3 + U'K_4 = 0, \quad (10)$$

де

$$K_3 = 3\eta h \{ (R+h)^3 - R^3 + 2^{-1} B [(R+h)^2 - R^2] - \ln(1 + hR^{-1}) (BR^2 + R^3) \}^{-1};$$

$$K_4 = K \{ 0,5(2Rh + h^2) - R^2 \ln(1 + hR^{-1}) \} \times \{ 3^{-1} [(R+h)^3 - R^3] + 0,5B [(R+h)^2 - R^2] \}.$$

Вирішуючи (10), одержимо

$$H = [-\exp(-K_3 t)] K_4 \int_0^t \exp(K_3 t) dt.$$

Таким чином, вираз для визначення напруг контактної тертя з урахуванням сил інерції має вид

$$\tau = 3^{-1} \eta H (2BR^2 X_1^{-2} + 2R^3 X_1^{-2}) + 2UKR^2 X_1^{-2}. \quad (11)$$

З отриманого виразу виходить, що напруги контактної тертя головним чином залежать від в'язкості змащення і геометрії інструмента. Дуже важливе практичне значення має той факт, що в'язкість мастил сильно залежить від температури і тиску.

Зі збільшенням температури в'язкість мастил різко зменшується. Як правило, вимогам експлуатації краще задовольняють ті оливи, у яких залежність в'язкості від температури виражена більш слабо. Для оцінки ступеня впливу температури на в'язкість мастил застосовується ряд показників. Одним з них

є відношення $\frac{v_{50}}{v_{100}}$, де v_{50} і v_{100} - кінематична в'язкість відповідно при 50 і 100°C [6].

З підвищенням тиску в'язкість мастил збільшується. Вплив тиску на в'язкість враховується найчастіше за допомогою формули [6]

$$\eta_p = \eta_0 e^{\theta p}, \quad (12)$$

де η_p - динамічна в'язкість при тиску p , кгс/см²;
 η_0 - динамічна в'язкість при атмосферному тиску;
 θ - пезокоефіцієнт в'язкості, см²/кгс.

Розмір пезокоефіцієнта в'язкості залежить від хімічного складу оливи і температури, а також, у меншому ступені від тиску.

У ряді робіт встановлено, що при досягненні значного тиску олива перетворюється у тверде тіло (або у квазітверде) тіло. У цьому випадку реологічні властивості речовини докорінно змінюються. Звичайно залежність в'язкості від тиску в мінеральних оливах виражається більш різко, ніж у рослинних й тваринних.

Таким чином, одночасний вплив температури та тиску на в'язкість змащення й тим самим на напруги фрикційної взаємодії носить складний характер й врахування його в аналітичних залежностях призвело б до невиправданого ускладнення розрахунків. При побудові математичної моделі процесів, що відбуваються в мастильному шарі, дуже важливо уникнути невиправданого ускладнення, що може не дати доступних для огляду результатів і виявитися непридатним для практичних додатків.

Висновки. Аналіз умов протікання технологічних процесів листового штампування дозволяє аналітично описати рух мастильного шару між заготовкою, яка деформується й інструментом, з урахуванням динаміки, для різних параметрів змащення й рі-

зних умов навантаження. Отримані з рівнянь руху мастильного шару аналітичні залежності, що визначають напруги фрикційної взаємодії на радіусі закруглення матриці можуть успішно бути використані при моделюванні процесу штампування деталей практично будь-якої форми.

Використання прийомів, що регулюють напруги контактної тертя між заготовкою й інструментом сприяє поліпшенню якості одержуваних деталей, підвищенню стійкості оснащення, зменшенню енергетичних витрат й витрат матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Хаппель Д., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. - М.: Мир, 1976.-630 с.
2. Шехтер В.Я. Максимальная скорость деформации при глубокой вытяжке листовых металлов. - Кузнечно-штамповочное производство, 1962, № 12.
3. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. - М.: Машиностроение, 1967. - 367 с.
4. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1979. - 520с.
5. Пузырь Р.Г., Драгобецкий В.В. Учет сил инерции в условиях гидродинамической смазки в процессах листовой штамповки // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчук: КДПУ, 2004. - Вип. 6(29), С. 73-75.
6. Грудев А.П., Тилик В.Т. Технологические смазки в прокатном производстве. - М.: Металлургия, 1975.-368с.

Стаття надійшла 25.09.2006р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Шаповалом В.М.