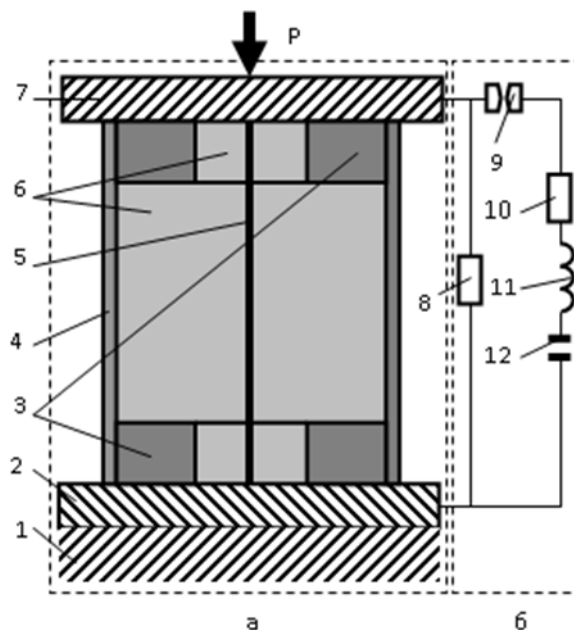


**АНАЛІЗ ДВОВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВІЛЬНОЇ РОЗДАЧИ ЦИЛІНДРИЧНОЇ  
ЗОГОТІВКИ ЕЛЕКТРИЧНИМ ВИБУХОМ В РІДИНІ**Національний аерокосмічний університет ім. М.Э. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», Україна

При виготовленні виробів авіа- та автомобіле- будівництва використовується технологія імпульсного штампування, яка заснована на дії електричного вибуху в технологічній рідині. Один з трьох різновидів цієї технології використовує довгі (в сотні міліметрів довжиною) розряди, що ініціюються вибухом тонкого дротика, і застосовується для деформування довгих тонкошарових оболонок. Закономірності та особливості таких процесів вивчені частково лише за рахунок технологічних експериментів, тобто фрагментарно.

Доклад присвячений розробці та використанню методики чисельного комп'ютерного моделювання механічних процесів, що виникають в технологічній системі вільної роздачі осесиметричної заготовки при дії коаксіального електричного вибуху, в двовимірному варіанті.

На рис. 1 показано типову схему технологічної системи, яка включає механічну частину, яка підлягає аналізу, та електрофізичну частину, яка обумовлює вибух. Математична модель технологічної системи включає математичні моделі відповідно електрофізичної та механічної частин.



а – механічна частина, б – електрична частина)

Рисунок 1 – Рис.1. Схема технологічної системи

Механічна частина включає основу (1), нижню (2) та верхню (7) сталеві плити, що стискають рухомі деталі тиском  $P$ , центруючі поліетиленові кільця (3), трубку тонкошарову заготовку з алюмінієвого сплаву (4), ініціюючу електричний вибух дрітинуку (5), технологічну рідину (6). Електрофізична частина зображена у вигляді електричного контуру, що характеризується величиною електричного опору  $r$  (8), включає повітряний розрядник (9), батарею конденсаторів з внутрішнім опором  $R_0$  (10), індуктивністю  $L$  (11), ємністю  $C$  (12). Процеси в електрофізичній частині тривають дуже короткочасно і незалежно от процесів руху в механічній частині та описуються звичайним диференціальним рівнянням

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R(i,t) + R_0}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0 \quad (1)$$

з початковими умовами

$$i(0) = 0, \quad \frac{di}{dt} = -\frac{U_0}{L}, \quad (2)$$

де  $i$  – розрядний струм;

$t$  – час;

$R$  – активний опір каналу розряду;

$U_0$  – початкова напруга конденсаторної батареї.

Після підриву дротинки утворюється парогазова порожнина (ПГП), наповнена плазмою. При протіканні струму в плазмі утворюється тепло омічних втрат, що має вигляд функції часу

$$E(t) = \int_0^t (\partial R(i, \partial d \tau) \quad (3)$$

За рахунок теплового поширення ПГП утворюється рух плазми, а через те – рух рідини та заготовки. Таким чином механічна частина є імпульсною термодинамічною машиною.

Механічна частина включає два дуже рухомих елементи, ПГП (як наслідок та розвиток початкового каналу електричного розряду) та технологічну рідину, в якості якої використовують воду. Рух цих елементів має характер високошвидкісних вихорів в замкненій коморі, що утворена жорсткими стінками технологічного устаткування та деформуємої заготовки. Механічні властивості матеріалів та контактний ударний характер взаємодії елементів технологічної системи обумовлюють дуже нелінійний характер математичної моделі процесів, яка не має аналітичних рішень.

З урахуванням властивостей руху елементів системи обраний метод скінчених елементів, причому для деформуємої заготовки в лагранжевій формі, а для парогазової порожнини та рідини - в мішаній ейлерово- лагранжевій формі ALE. Раніше опубліковані результати моделювання за тривимірною моделлю [1] дають обґрунтування для використання двовимірної моделі, що дозволяє більш раціонально використати можливості та ресурси комп'ютера, скоротити час розрахунків та отримати результати з більш високою точністю. Для комп'ютерної реалізації використаний пакет LS-DYNA [2], в останніх версіях якого з'явилася можливість розрахунків двовимірних моделей ALE.

Елементи механічної частини мають наступні властивості. Плазма ПГП має властивості ідеального газу з постійною адіабати  $\gamma = 1,26$  та густиною за нормальних умов  $1,25 \text{ кг/м}^3$ . Технічна рідина має властивості води з густиною  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , тиском кавітації  $P_c = 10^5 \text{ Па}$ , об'ємним модулем стискання  $K = 2,25 \times 10^9 \text{ Па}$ . Матеріал заготовки – пружно-пластичний алюмінієвий сплав з модулем Юнга  $1,3 \times 10^{11} \text{ Па}$ , густиною  $2700 \text{ кг/м}^3$ , початковою межею пластичності  $2,1 \cdot 10^8 \text{ Па}$ , та зміцненням за Джонсоном- Куком [1]

$$\sigma_T = (B + C \dot{\epsilon}_p^m) (1 + D \ln \dot{\epsilon}_p), \quad (4)$$

де  $B = 2,65 \times 10^8 \text{ Па}$ ,  $C = 4,26 \times 10^8 \text{ Па}$ ,  $D = 0,015$ ,  $m = 0,34$  – емпіричні коефіцієнти,

$\dot{\epsilon}_p$  – швидкість пластичної деформації.

Для визначення ударно- контактної взаємодії між ALE елементами та лагранжевими елементами технологічної системи використаний метод штрафу та ключове слово \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID, а між лагранжевими – \*CONTACT\_2D\_ \_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO-SURFACE/

В доповіді в подробицях описана двовимірна модель механічних процесів в технологічній системі, наведені результати моделювання, виконаний аналіз результатів, отриманих в двовимірній постановці, а також в порівнянні з результатами технологічних експериментів та розрахунків за тривимірною моделлю процесу вільної роздачі.

### **Список використаних джерел**

1. Нарыжный А.Г. Моделирование свободной раздачи цилиндрической оболочки в условиях действия электрогидравлического эффекта. Вісник двигунобудування.-2019, №2 (49). С. 40-48.
2. LS-DYNA® keyword user's manual (LS-DYNA R11).- Livermore: LSTC, 2018. – 3186 р.
3. Johnson G.R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proceedings of the 7th international symposium on ballistics. – 1983. – P. 541-547.