

Нарижний О. Г.  
Тараненко М. Є.

## МОДЕЛЮВАННЯ ВІЛЬНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ТРУБЧАСТОЇ ЗАГОТІВКИ ЗА УМОВ ДІЇ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

*Стаття присвячена дослідженням процесу роздачі трубчастої заготовки в умовах дії електрогідралічного розряду. Такі процеси широко використовуються при виготовленні кінцівок трубопроводних систем у літако-, двигуно- та автомобілебудуванні, при виготовленні перенастроюваних транспортних систем для переміщення сипких матеріалів (зерно, борошно та ін.), для герметизації стиків у теплообмінниках тощо. Цим процесам власний високий ступінь пластичного деформування заготовки за один технологічний перехід, а також складна кінетика формоутворення за участю рідкої та пароплазменної частин технологічної системи. Існує значна потреба розробки методів дослідження таких систем та процесів за допомогою, зокрема, математичного моделювання. Існуючі математичні моделі процесів формоутворення не враховують явища потоншення тонкошарової заготовки, яке є третьою головною деформацією.*

*Мета роботи – удосконалення та уточнення механіко-математичної моделі вільної роздачі трубчастої заготовки при електрогідралічному навантаженні за рахунок використання скінченно-елементної апроксимації теорії оболонок з урахуванням потоншення, а також дослідження закономірностей та особливостей механічних процесів руху елементів технологічної системи та напружено-деформованого стану заготовки з урахуванням цього удосконалення.*

*Наведено структурну схему моделі технологічної системи, розміри, матеріальні властивості, умови збурення техпроцесу, умови механічної взаємодії елементів системи, спосіб удосконалення моделі. Наведені результати моделювання механічних процесів в технологічній системі та напружено-деформованого стану заготовки з використанням удосконаленої математичної моделі.*

*Удосконалення моделі доцільно та відповідає результатам експериментів. Загалом модель адекватна, методика має достатню точність, Потоншення має неоднорідний характер та змінюється в діапазоні 1.2...14 %, Отриманий ККД процесу відповідає даним експерименту. Для підвищення ККД технологічного процесу бажано утилізувати остаточний запас внутрішньої енергії парогазової порожнини, наприклад, повторним навантаженням.*

*В подальшому удосконалена модель може бути використана для дослідження штампування в матрицю, герметизації стиків та аналізу повторного навантаження новим розрядом.*

**Ключові слова:** електрогідралічний розряд, трубчаста заготовка, вільна роздача, потоншення, особливості деформування, математична модель.

Електрогідралічний ефект (ЕГЕ) реалізується при підводному високовольтному електричному розряді. При цьому енергія, що була запасена в конденсаторній батареї, перетворюється в механічну роботу пластичного деформування заготовки. В світовій практиці розрахунків таких процесів використовується теплова модель електричного вибуху – в визначений момент часу у деякій малій області (канал розряду) виділяється велика кількість тепла. Це призводить до утворення в малій області суцільного середовища речовини з дуже високими термодинамічними параметрами. З плином часу ця область інтенсивно розширюється, від неї в незбурене середовище розповсюджуються ударні хвилі, а сама область перетворюється в паро-газову порожнину (ПП), яка дуже швидко поширюється. Утворені ударні хвилі, високошвидкісні потоки рідини та тиск навантажують пружно-пластично деформуємі перешкоди – заготовку та елементи технологічного оснащення.

Загалом, техпроцеси електрогідралічної обробки широко використовуються в машинобудуванні та мають потенціал для поширення і удосконалення. Вони використовуються для штампування великогабаритних деталей із плоских заготовок (літако- та автомобілебудування, виготовленні теплообмінників, дзеркал антен космічного зв'язку), трубчастих заготовок (різноманітні кінцівки трубопроводів літальних апаратів та двигунів, трубопроводів сипких середовищ і таке інше).

З точки зору механіки суцільних середовищ технологічну систему, яка використовує електрогідралічний ефект, можна розглядати як гетерогенне деформівне середовище, яке обмежене вільними, пластично деформуємими та жорсткими границями. Характер перебігу перетворення енергії в корисну роботу деформування заготовки залежить від співвідношення

значень параметрів перерахованих елементів технологічної системи, їх взаємного розташування, геометричної форми та розмірів границь.

В цих умовах аналітичні методи розрахунку параметрів та планування та керування технологічних процесів обробки зустрічає труднощі, що виникають з-за практичної неможливості визначити перебіг деяких внутрішніх процесів, тому використовується метод математичного моделювання механічних процесів обробки, оснований на чисельних розрахунках математичних моделей механічних процесів.

*Огляд літературних джерел.* В роботі [1] зроблений висновок, що дослідження систем, які використовують ЕГЕ, неможливе лише за рахунок експерименту та вказаний альтернативний шлях, а саме – математичне моделювання процесів та систем, які використовують ЕГЕ. В роботі [2] відзначається позитивний вплив високої швидкості деформування, що характерний для електрогідролічного навантаження, на характеристики деформованості металів. Таким чином існує потреба в розробці та удосконалення методів моделювання.

При моделюванні виготовлення різних деталей [3] – [7] використовується однакові схеми технологічної системи, яка включає парогозову порожнину, рідину, заготовку та оснащення. З цього витікає існування типової схеми, близькість математичних моделей процесів, а також близькість методичних питань, які розглядаються при реалізації моделей.

В статті [8] описана загальна математична модель системи, яка використовує модель ідеального газу для з потоком тепла в ППП, пружностискаєму рідину з можливістю кавітації, пружно-пластичну заготовку за моделлю поведінки Джонсона-Кука [9] та жорстким недеформованим оснащенням, які взаємодіють за контактньо-ударним способом.

В роботах [10] та [11] використані неповні моделі, в яких вплив ППП та рідини на деталь виражений імпульсом тиску, визначеного за допомогою технологічного експерименту. Такий підхід ускладнює, а іноді унеможливує моделювання.

В роботах [12], [13] розглянуті неповні моделі з жорсткими прямокутною та циліндричною камерами без заготовки. За рахунок порівняння з експериментом та квазістатичними розрахунками обґрунтована адекватність моделі, а також точність методики в асимптотичному сенсі.

В роботі [14] модель з одноразовим електрогідролічним розрядом поширено на випадок багатьох послідовних розрядів, що діють на заготовку.

Для дискретизації та рішення рівнянь моделі часто використовується пакет програм LS-DYNA [15], лише для деяких неповних моделей – пакет Abaqus [10], [11]. Це пов'язано з використанням гібридного метода скінченних елементів (ALE) для моделювання ППП та рідини.

У роботі [4] наведено результати експериментальних досліджень вільної роздачі циліндричних тонкостінних оболонок з алюмінієвого сплаву. Наведено залишкові розміри оболонок після деформування, що мають характерну бочкоподібну форму, що відповідають певним електрофізичним параметрам. Ці результати використовуються для порівняння з результатами моделювання та обґрунтування адекватності моделі.

В роботі [6] відзначений великий ступінь потоншення заготовки за умов електрогідролічного деформування і експериментально визначено його закономірність. В інших розглянутих роботах це питання не розглядається.

Метою роботи є удосконалення математичної моделі процесу та методики моделювання вільної роздачі трубчастої заготовки для аналізу механічних процесів, а в подальшому – для оптимізації технологічного процесу та технологічної системи.

*Опис технологічної системи.* Технологічна система, яка розглядається і використовує ЕГЕ, включає дві частини - електрофізичну та механічну. Перша частина системи забезпечує електричний розряд у рідині та керує ним. Друга частина організує механічний рух і включає чотири елементи, кожен з яких відіграє певну роль: ППП, рідина, технологічний об'єкт та оснащення (рис. 1).

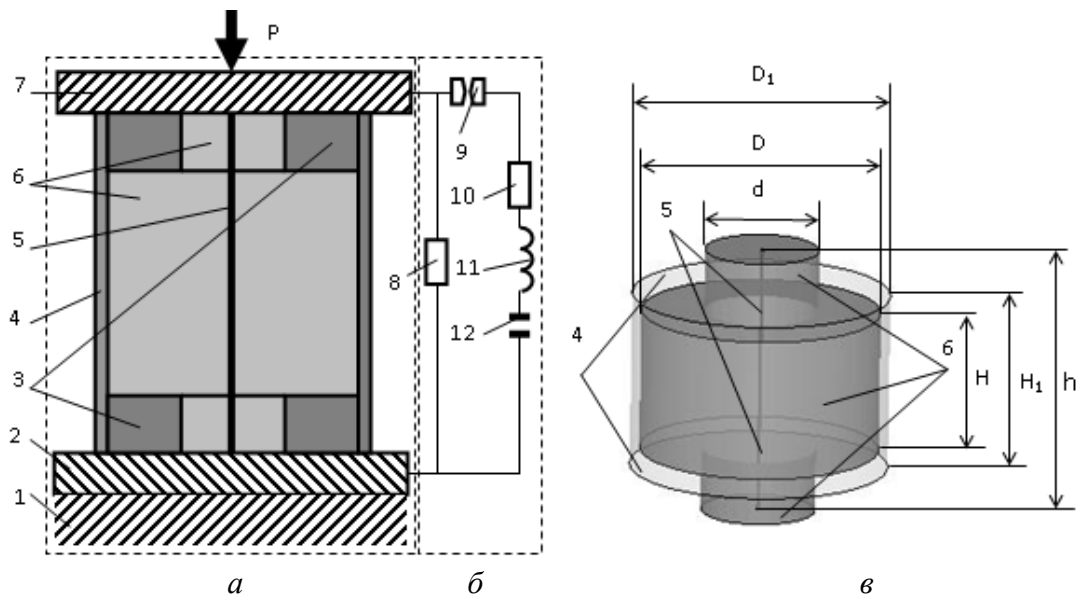


Рис. 1. Схема пристосування ( *a* – механічна частина: 1 – основа, 2, 7 – верхня та нижня плити, 3 – центруючі поліетиленові кільця, 4 – заготовка, 5 – ініціююча дротинка, 6 – технологічна рідина, 8 – електричний опір ланцюга, 9 – повітряний розрядник, 10 – внутрішній електричний опір, 11 – електрична індуктивність ланцюга, 12 – ємність батареї конденсаторів, *б* – електрична частина, *в* – схема заготовки з позначенням розмірів

Кожна частина технологічної системи виконує свою певну функцію. У ПГП виділяється тепло, вона є перетворювачем імпульсу струму в тиск і джерелом імпульсного механічного збурення в системі. Рідина сприймає і розщеплює механічний імпульс від ПГП в три фактори (хвилі тиску, потоки рідини, імпульсне поле тисків), проводить їх і забезпечує об'єднану дію на технологічний об'єкт. Оснащення пов'язує і обмежує елементи, а також каналізує, спрямовує і концентрує дію факторів на об'єкт.

Геометричні параметри системи, показаної на рис. 1, *в*, наступні: малий діаметр камери  $d = 32$  мм, внутрішній діаметр оболонки,  $D = 67$  мм, середній діаметр оболонки  $D_1 = 70$  мм, висота камери  $h = 75$  мм, розмір  $H = 40$  мм, висота оболонки  $H_1 = 50$  мм, товщина оболонки  $\delta = 5$  мм. Поперечні початкові розміри каналу розряду  $0,5 \times 0,5$  мм, довжина каналу розряду  $h = 75$  мм, об'єм каналу  $V = 1,875 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$ .

Речовина каналу розряду (в подальшому ПГП) має властивості ідеального газу з сталою адіабати  $\gamma = 1,26$  та густиною за нормальних умов  $1,25 \text{ кг/м}^3$ .

Технологічна рідина має густину  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  та тиск кавітації  $P_c = 10^5 \text{ Па}$  з об'ємним модулем пружності  $K = 2,25 \cdot 10^9 \text{ Па}$ .

Матеріал заготовки – алюмінієвий пружно-пластичний сплав 7039 з швидкісним зміцненням за Джонсоном-Куком [13] з коефіцієнтами  $B = 3,37 \cdot 10^8$ ,  $C = 3,43 \cdot 10^8 \text{ Па}$ ,  $D = 0,01$ ,  $m = 0,41$ , та густиною  $2700 \text{ кг/м}^3$ . На жаль, в літературі майже немає досліджень механічних параметрів вітчизняних матеріалів для моделі Джонсона-Кука, тому використовується модель з близьким за хімічним складом та технологічним використанням сплаву 7039. Для дискретизації оболонки використані скінченні елементи з потоншенням.

На рис. 2 зображено залежність потоку тепла в ПГП, загальна величина тепла  $28000 \text{ Дж}$ . Від'ємне значення відповідає витратам тепла ПГП на додаткове випарування рідини.

Для рішення системи рівнянь та нерівностей математичної моделі механічних процесів в досліджуємі системі використаний пакет LS-DYNA [8]. Дискретизація твердих елементів

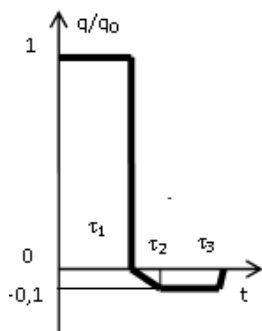


Рис. 2. Залежність потоку тепла від часу

виконана за методом лагранжевих скінченних елементів (МСЕ), а дискретизація ПГП та рідини – за гібридним методом МСЕ-ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian). Дискретизація та рішення за часом виконано за явним методом скінченних різниць.

За умови імпульсного збурення напружено-деформований стан елементів технологічної системи має особливості, які розглянуті нижче.

Розрахунки виконані в системі одиниць СІ.

**Особливості руху ПГП.** Спочатку утворюються розрядний канал завтовшки 0,5×5 мм, який швидко перетворюється в парогазову порожнину (ПГП), що змінює свою форму (рис. 3, а) та об'єм (рис. 4).

ПГП витискає рідину без перемішування, границя між ПГП та рідиною має форму осесиметричної поверхні. Помітний сильний вплив оснастки на форму ПГП (рис. 3, а).

На рис. 4 показано залежність зміни об'єму від часу. Графік має дві майже лінійні ділянки. Перша відповідає періоду притоку тепла, друга – адіабатичному процесу деформування заготовки. За досліджений час об'єм ПГП змінюється від  $1.9 \times 10^{-8} \text{ м}^3$  до  $1,35 \times 10^{-4} \text{ м}^3$ , або в 7105 раз (!), що не можливо для звичайного МСЕ, а отримано завдяки варіанту ALE.

На рис. 5 зображено залежність кінетичної та внутрішньої енергії ПГП від часу. Внутрішня енергія ідеального газу це тепло. За рахунок зовнішнього джерела тепла (омічних втрат електричної енергії) внутрішня енергія зростає з 19 Дж до 23664 Дж, а потім зменшується за рахунок витрати на роботу руху рідини і, особливо, за рахунок деформування заготовки. Остаточна величина внутрішньої енергії є значним фактором зниження ККД техпроцесу. Кінетична енергія ПГП в масштабі рисунка майже дорівнює нулю, її дійсна максимальна величина менше 25 Дж. Графік кінетичної енергії має коливальний характер на початку процесу, що пояснюється сумісними коливаннями швидкості та тиску, але коливання не перевищують величини 120 Дж та в масштабі рисунку не виразні.

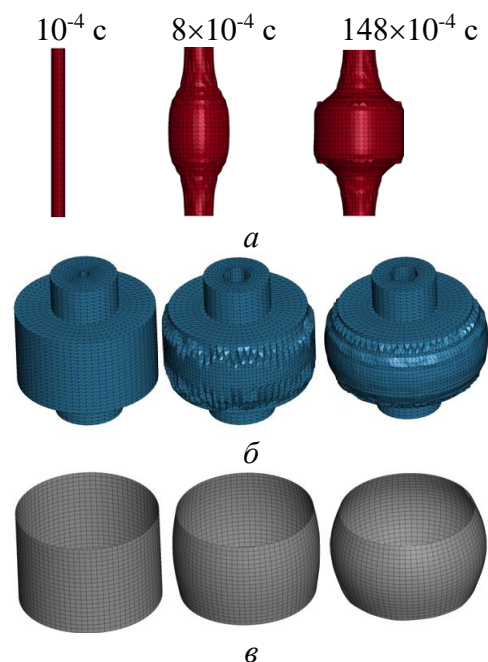


Рис. 3. Вигляд ПГП (а), рідини (б) і заготовки (в) в різні моменти часу

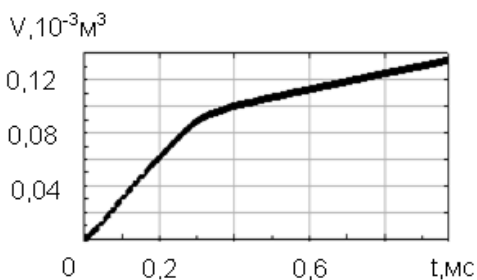


Рис 4. Зміна об'єму ПГП за часом

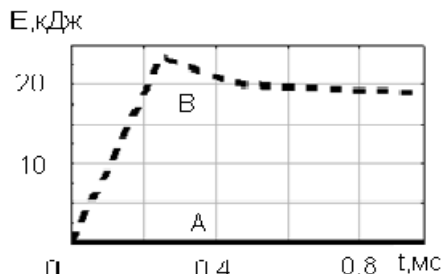


Рис. 5. Залежність кінетичної (А) та внутрішньої (В) енергії ПГП від часу

**Особливості руху технологічної рідини.** На рис. 3, б показано вигляд рідини в різні моменти часу. Внутрішній отвір поступово займає ПГП, а зовнішня поверхня – це контактний

інтерфейс з оболонкою та оснащенням, з часом вона приймає бочковидну форму. Наприкінці розрахунку скрізь рідину проникає ПГП, а сама рідина витікає скрізь щілини, що утворюються між оболонкою та кришками, як показано на рис. 6.

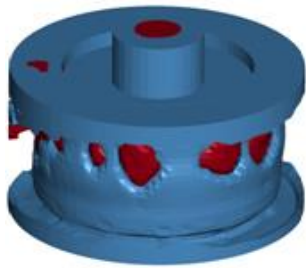


Рис. 6. Вигляд рідини та ПГП наприкінці процесу

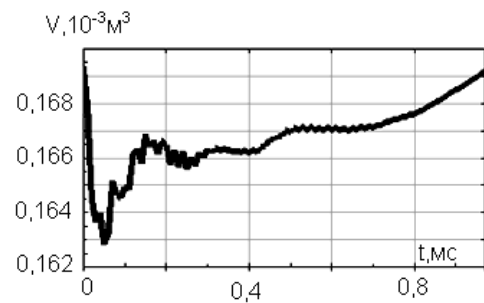


Рис. 7. Зміна об'єму рідини за часом

Під час руху рідина змінює не тільки форму, але й об'єм, як показано на рис. 7, що пояснюється тиском в рідині. Початковий, а також остаточний об'єм дорівнює  $0.1694 \text{ м}^3$ , а мінімальний –  $0.1627 \text{ м}^3$ . Рідина, як і ПГП, відчуває коливання, що пояснюється її пружною стисливістю.

Стисливість рідини разом з імпульсним характером збудження має ще один наслідок – хвильовий характер тиску на початку процесу. На рис. 8 показано складну хвильову картину тиску на початку процесу, яка отримана за допомогою двовимірної осесиметричної моделі з тими ж параметрами. Видно хвильовий фронт на підході до заготівки, справа від якого тиск відсутній (показано синім кольором), а зліва червоні області високого тиску.

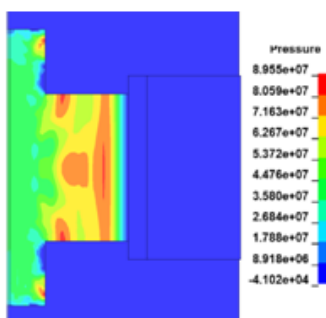


Рис. 8. Хвильова структура поля тиску в рідині, Па (час  $2 \times 10^{-5} \text{ с}$ )

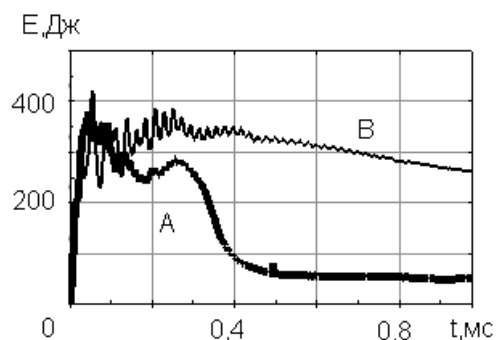


Рис. 9. Залежність кінетичної (B) та внутрішньої (A) енергії рідини від часу

На рис. 9 показано залежність кінетичної та внутрішньої енергії рідини за часом. Видно, що рідина не накопичує енергію в значній мірі, вона лише передає збурення від ПГП до оболонки. Максимальна величина внутрішньої енергії, яка є потенційною енергією пружної деформації, отримана саме в той час коли тиск та стискання рідини (рис. 7) максимальні. Внутрішня та кінетична енергія рідини набуває коливань, що пов'язані з її об'ємними коливаннями (рис. 9). Остаточна величина внутрішньої енергії є фактором зниження ККД техпроцесу. Кінетична енергія має незначну величину, це обґрунтовує висновок, що в дослідженій системі потоки рідини (гідропотік) не можуть розглядатися в якості фактора деформування заготівки. Рух рідини важливий тому, що він забезпечує змочування контактної поверхні оболонки для передачі тиску з боку рідини. Для підвищення ККД потрібно підвищити швидкість гідро потоку.

*Особливості руху заготівки.* На рис. 3, в показано кінетику формоутворення заготівки. Спочатку вона має трубчасту форму, а під кінець отримує бочковидну. Під час деформування зростає внутрішня енергія оболонки, яка є перетвореною сумою робіт пружної та, в основному, пластичної деформації.

На рис. 10 показано залежність від часу внутрішньої та кінетичної енергії оболонки. Видно, що внутрішня енергія починає зростати після закінчення впорскування порції тепла в ПГП, тому не залежить від форми залежності потоку тепла, а тільки від його кількості. Також початок деформування, а, найважливіше, його основна величина відбуваються значно пізніше розповсюдження хвиль тиску (рис. 9). Тому хвилі тиску не можуть бути основним фактором формоутворення при ЕГ деформуванні, вони тільки починають формоутворення. Головним фактором формоутворення заготовки є тиск рідини на протязі всього часу. На графіку внутрішньої енергії (рис. 10) видно плато, яке позначає закінчення зростання роботи пластичної деформації.

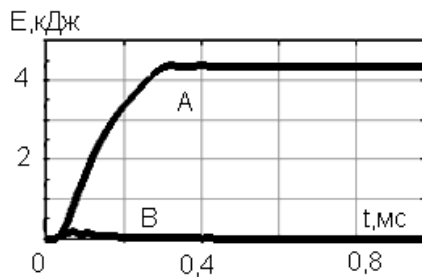


Рис. 10. Залежність кінетичної (B) та внутрішньої (A) енергії оболонки від часу

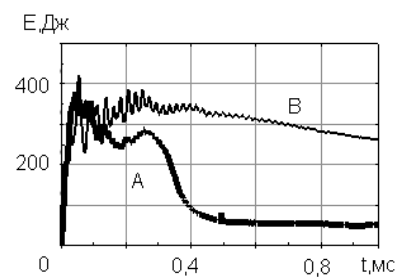


Рис. 11. Залежність середнього значення тиску на внутрішній поверхні оболонки від часу

Кінетична енергія заготовки має несуттєво малу величину і також не може розглядатись як важливий фактор формоутворення заготовки.

На рис. 11 показано залежність середнього по площі контакту тиску рідини на внутрішній поверхні оболонки. Видно затримку росту тиску на початку процесу, яка пояснюється скінченною швидкістю розповсюдження хвиль тиску. Потім тиск швидко підвищується до  $65 \cdot 10^6$  Па і деякий час коливається близько цього значення. На рис. 10 видно зростання внутрішньої енергії, яка відповідає початку пружно-пластичного деформування оболонки. Із розвитком деформування, тобто переміщеннями оболонки, відбувається поширення ПГП та зменшення тиску. Зростання внутрішньої енергії за умови зменшення тиску пояснюється збільшенням площі оболонки.

На рис. 12 показано графік залежності зближення торців оболонки, яке досягає 6 мм, що призводить до відриву торців від поверхні кришок. Ця зміна осьового виміру оболонки є проявом поперечних деформацій, обумовлених коефіцієнтом Пуассона. Видно на графіку затримку деформування, пов'язану із скінченною швидкістю хвиль тиску, коливання та плато наприкінці, яке обумовлено закінченням радіальних переміщень оболонки.

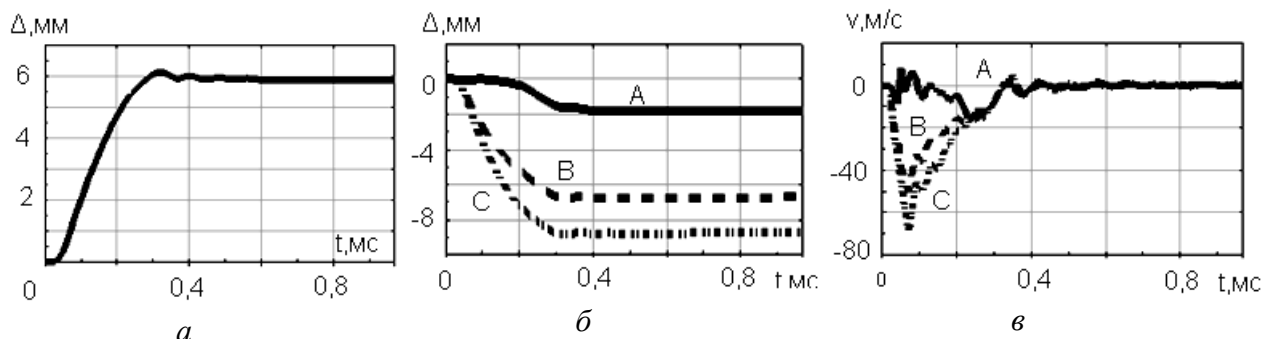


Рис. 12. Залежність наближення торців (а), радіальних переміщень (б) радіальних швидкостей (в) від часу

На рис. 12, б показано залежність радіальних переміщень трьох точок оболонки (A – точка на торці, B – точка посередині між торцем та екватором, C – точка на екваторі).

Ці графіки мають ті ж особливості, що й графік зменшення осьового розміру оболонки (рис. 12, *а*). На рис. 12, *в* показано залежність радіальних швидкостей тих же точок. Відзначимо коливальний характер швидкостей та їх зменшення до нуля в кінці процесу.

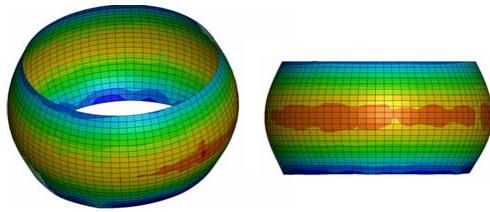


Рис. 13. Розподіл остаточних деформацій (*а*) та відносного потоншення (*б*)

На рис. 13 показано розподіл остаточних пластичних деформацій та відносних потоншень оболонки. Максимальні значення позначені червоним кольором, розташовані на екваторі і сягають 32 % для деформацій та 14 % для відносного потоншення.

Мінімальні величини потоншення та деформацій спостерігаються на торцях оболонки позначені синім кольором і мають значення 0,8 % для деформацій та 1,2 % для потоншень.

Відзначимо неоднорідність потоншень та деформацій в дотичному напрямку.

На рис. 14 показано кінетику зміни деформацій та напружень фон Мізера в тих трьох точках утворюючої, що й на рис. 12, *б*. Для деформацій характерні загальні особливості геометричних параметрів НДС (рис. 12, *а* і *б*), тобто спочатку затримка, потім монотонне зростання і наприкінці стає значення. Такий же самий характер мають залежності відносного потоншення. Для напруг особливим є початкове зростання до максимуму, при якому починається пластичне деформування оболонки, а потім зниження нижче актуальної межі пластичності і зупинки деформування, внаслідок чого утворюється поле остаточних напруг.

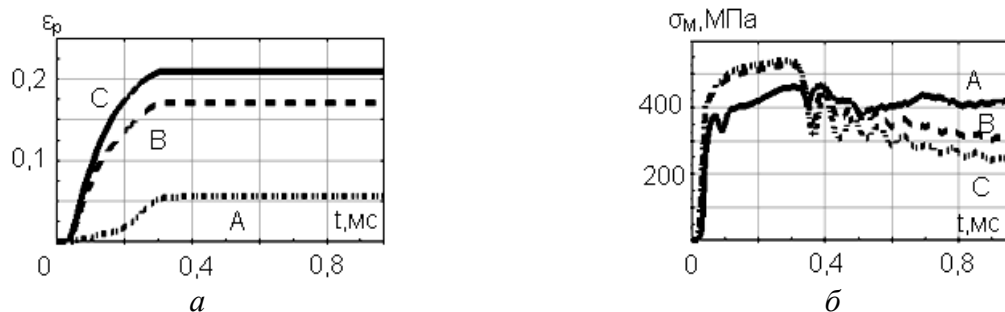


Рис. 14. Залежність пластичних деформацій (*а*) та напруг фон Мізера (*б*):

А – точка на торці, В – точка між торцем та екватором, С – точка на екваторі

*Загальна характеристика руху системи.* Загальною особливістю механічних процесів в системі є існування різних форм руху (хвильовий, коливальний, монотонний) та самовільна зміна форм руху. Кожна з форм є нестійкою, тому змінюється іншою, коли для цього виникають умови. Ця особливість підкреслює нестійкість рівнянь механічного руху. Ще однією проявою нестійкості є гідродинамічна форма, завдяки якій утворюються «протуберанці» ПГП, а також перемішування ПГП та рідини. В природі ці явища починаються механічними флуктуаціями руху, при обчислюваннях в якості флуктуацій виступають чисельні похибки, зокрема – округлення значень чисел. Ці особливості є природними і відзначаються в експериментах.

Математична модель техпроцесу сформульована як тривимірна, але в процесі розрахунків отримані результати, які послідовно мають осесиметричний характер, що підкреслює адекватність моделі.

На рис. 15 показано залежність кінетичної та внутрішньої енергії від часу загалом для всієї системи. Залежності мають ті ж особливості, які відзначені для ПГП (рис. 5), але максимум загальної внутрішньої енергії дорівнює вже 28000 Дж.



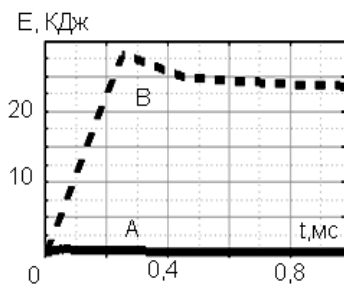


Рис. 15. Залежність кінетичної (А) та внутрішньої (В) енергії системи від часу

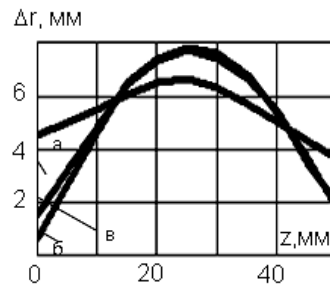


Рис. 16. Остаточні радіальні переміщення вздовж осі

Нижчий рівень енергії ПГП (у порівнянні з енергією системи) пояснюється поділенням загальної енергії між ПГП, рідиною та оболонкою з самого початку процесу. ККД процесу дорівнює  $4472,2/28000 = 0,17$  та був би більше, як би на протікання рідини скрізь щілини. Загалом фактори зниження ККД техпроцесу – витікання рідини разом з внутрішньою енергією та залишки внутрішньої енергії в рідині і, особливо, в ПГП.

На рис. 16 показано вигляд утворюючої в експерименті (а) та в двох перерізах оболонки за розрахунком (б) та (в). Вони досить близькі (відносна похибка визначення переміщення у порівнянні з номінальним радіусом оболонки 8,5 %), що говорить на користь адекватності математичної моделі процесу та точності методики розрахунків.

При вільному деформуванні оболонки остаточна форма є сукупним результатом великої численності внутрішніх факторів та параметрів системи, тому остаточна близькість результатів розрахунку та експерименту є загальною мірою адекватності математичної моделі.

## ВИСНОВКИ

Отримані результати містять багату інформацію про перебіг механічних процесів в технологічній системі, які неможливо дослідити експериментально, особливо рух ПГП, технологічної рідини, а також розвиток напружено-деформованого стану заготовки.

1. Мету роботи досягнуто, удосконалення моделі (урахування потоншення заготовки як третьої головної деформації) доцільно та відповідає результатам експериментів. Потоншення має неоднорідний характер та змінюється в діапазоні 1,2...14 %.

2. Загалом модель адекватна, методика рішення має достатню точність. Незважаючи на тривимірність модель дає результати, які загалом мають осесиметричний характер. Доцільно розробити двовимірну осесиметричну модель процесу, яка дозволить скоротити час роботи процесора та підвисити точність розрахунків за тієї ж кількості вузлових переміщень.

3. Особливістю розвитку механічного процесу є природне чергування етапів – початкового хвильового, перехідного – коливального та кінцевого – квазістатичного. Основний етап деформування заготовки – перехідно-коливальний. Хвильовий етап лише починає рух оболонки. Під час кінцевого етапу заготовка не деформується.

4. Об'ємна деформація ПГП сягає величини 710500 %. Така величина (та загалом – можливість реалізації моделі) отримана завдяки використанню ALE– сумісного ейлерово-лагранжевого метода скінченних елементів.

5. Отриманий ККД процесу ( $\approx 0,17$ ) відповідає даним експерименту. Для підвищення ККД технологічного процесу бажано утилізувати остаточний запас внутрішньої енергії ПГП, наприклад, повторним навантаженням.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Woo M., Lee K., Song W., Kang B., Kim J. Numerical estimation of material properties in the electrohydraulic forming process based on a kriging surrogate model. *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi. Vol. 2020, Article ID 3219829. 12 p. <https://doi.org/10.1155/2020/3219829>
2. Dariani B. M., Liaghat G. H., Gerdooei M. Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Journal of Engineering Manufacture*. 2009. pp. 703–712, <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM1430>



3. Woo M., Kim J. Inverse parameter estimation to predict material parameters of the Cowper–Symonds constitutive equation in electrohydraulic forming process. *Journal of Engineering Mathematics*. 132 : 8. 22 p. <https://doi.org/10.1007/s10665-021-10175-7>
4. Косенков В. М., Бычков В. М., Жекул В. Г., Поклонов С. Г. Электрические разряды большой длины в воде и их влияние на энергию пластической деформации цилиндрической оболочки. *Электронная обработка материалов*. 2013. № 49 (3). – С. 63–69.
5. Mamutov A.V., Golovashchenko S. F., Bessonov N. M., Mamutov V. S. Electro-hydraulic Forming of low volume and prototype parts: process design and practical examples. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021. V. 5 (47), pp. 1-20.
6. Atieh S. Carvalho A. A., Santillana I. A. First results of SFR cavity fabrication by electro- hydraulic forming at CERN. *Proceedings of SFR 2015*. Whistler, BC, Canada. Press Release 25 sept. 2015, pp. 1–7. ISBN 978-3-95450-178-6.
7. Mamutov A.V., Golovashchenko S. F., Mamutov V. S., Bonnen J. F. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. V. 219, pp. 84–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.045>
8. Нарыжный А. Г. Моделирование свободной раздачи цилиндрической оболочки в условиях действия электрогидравлического эффекта. *Вісник движунобудування*. 2019. № 2. – С. 40-48.
9. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> international symposium on ballistics, The Hague, 19-21 April 1983*, pp. 541–547.
10. Mane T. Goel V., Kore S. D. Finite element modeling of electro-hydraulic forming of sheets. *3rd international conference on materials processing and characterisation (ICMPC 2014)*. *Procedia materials science*, 2014. V. 6, pp. 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.012>
11. Bjorkstrom D. FEM simulation of electrohydraulic forming. Stockholm: Kungliga Tekniska Hogskolan. 2008. 88 p.
12. Нарыжный А. Г. Вычислительная модель электрогидравлического эффекта. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. Сб. науч. тр. НАУ им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков. 2012. № 54. – С. 112 - 124.
13. Mamutov V., Golovashchenko S., Mamutov A. Simulation of high-voltage discharge channel in water at electro- hydraulic forming using LS-DYNA. *13 th international LS-DYNA users conference*, 8-10 june 2014, pp. 1–9.
14. Taranenko M., Naryzhniy O. Modelling the process of interaction of a pulsed jet with a workpiece by electrohydraulic forming. In: *Nechyporuk, M. at all (eds.) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering 2021*, *Springer International Publishing*, 2022. pp. 484-496. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_41)
15. LS-DYNA Keyword user’s manual. Livermore: LST an ANSYS comp. 2021. 3826 p.

## REFERENCES

1. Woo M., Lee K., Song W., Kang B., Kim J. Numerical estimation of material properties in the electrohydraulic forming process based on a kriging surrogate model. *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi. Vol. 2020, Article ID 3219829. 12 p. <https://doi.org/10.1155/2020/3219829>.
2. Dariani B.M., Liaghat G.H., Gerdooei M. Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Journal of Engineering Manufacture*, 2009. pp. 703–712, <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM1430>.
3. Woo M., Kim J. Inverse parameter estimation to predict material parameters of the Cowper–Symonds constitutive equation in electrohydraulic forming process. *Journal of Engineering Mathematics*. 132 : 8. 22 p. <https://doi.org/10.1007/s10665-021-10175-7>.
4. Kosenkov V.M., Bichkov V.M., Zhekul V.G., Poklonov C.G. Long-length electrical discharges in water and their effect on the energy of plastic deformation of a cylindrical shell. *Electronic processing of materials - 2013*. № 49 (3). pp. 63–69. (In Russian).
5. Mamutov A.V., Golovashchenko S.F., Bessonov N. M., Mamutov V.S. Electro-hydraulic forming of low volume and prototype parts: process design and practical examples. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021. V. 5 (47). 20 p., <https://doi.org/10.3390/jmmp5020047>.
6. Atieh S. , Carvalho A.A., Santillana I.A. First results of SFR cavity fabrication by electro- hydraulic forming at CERN. *Proceedings of SFR 2015*, Whistler, BC, Canada. Pre-press Release 25 sept. 2015. pp. 1–7. ISBN 978-3-95450-178-6.
7. Mamutov A.V., Golovashchenko S.F., Mamutov V.S., Bonnen J.F. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. № 219. pp. 84–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.045>.
8. Naryzhniy A.G. Simulation of free expansion of a cylindrical shell under the action of the electrohydraulic effect. *Herald of Aeroenginebuilding*. 2019, №2. pp. 40–48. (In Russian).
9. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> international symposium on ballistics, The Hague, 19-21 April 1983*, pp. 541–547.

10. Mane T. Goel V., Kore S.D. Finite element modeling of electro-hydraulic forming of sheets. *3rd international conference on materials processing and characterisation (ICMPC 2014)*, Procedia materials science, 2014. V. 6, pp. 105–114. <https://doi.org/0.1016/j.mspro.2014.07.012>
11. Bjorkstrom D. FEM simulation of electrohydraulic forming. Stockholm: Kungliga Tekniska Hogskolan. 2008. 88 p.
12. Naryzhniy A.G. Computational model of the electrohydraulic effect. *Open information and computer integrated technologies*, 2012. № 54. – pp. 112–124. (In Russian).
13. Mamutov V., Golovashchenko S., Mamutov A. Simulation of high-voltage discharge channel in water at electro-hydraulic forming using LS-DYNA *13<sup>th</sup> international LS-DYNA users conference*, 8-10 June 2014. pp. 1–9.
14. Taranenko M., Naryzhniy O. Modelling the process of interaction of a pulsed jet with a workpiece by electrohydraulic forming. In: *Nechyporuk, M. at all (eds.) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering 2021, Springer International Publishing*, 2022. pp. 484–496. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5-41>
15. LS-DYNA Keyword user's manual. - Livermore: LST an ANSYS comp. 2021. 3826 p.

**Naryzhnyi O., Taranenko M. Simulation of free deformation of a tubular blank under the condition of electro hydraulic loading**

*The article is devoted to the study of the process of forming the pipe billet in conditions of electrohydraulic discharge. Such processes are widely used in the manufacture of the ends of pipeline systems in the aircraft, engine and automotive industries, in the manufacture of reconfigured transport systems for moving bulk materials (grain, flour, etc.), for sealing heat exchanger joints, etc. These processes are characterized by a high degree of plastic deformation of the workpiece during one technological transition, as well as complex kinetics of formation with the participation of liquid and vapor plasma parts of the technological system. There is a significant need for the development of research methods for such systems and processes using, in particular, mathematical modeling. Existing mathematical models of forming processes do not take into account the phenomenon of thinning of the thin-layer workpiece, which is the third main deformation.*

*The purpose of the work is to improve and clarify the mechanical-mathematical model of the free distribution of the pipe billet under electrohydraulic loading by using the finite-element approximation of the theory of shells taking into account thinning, as well as to study the regularities and features of the mechanical processes of the movement of the elements of the technological system and the stress-strain state of the billet with taking into account this improvement.*

*The structural diagram of the model of the technological system, dimensions, properties of the material, conditions of violation of the technical process, conditions of mechanical interaction of system elements, method of improving the model are given. The results of modeling mechanical processes in the technological system and the stress-strain state of the workpiece using an improved mathematical model are presented.*

*Improvement of the model is appropriate and corresponds to the results of experiments. In general, the model is adequate, the method has sufficient accuracy, the thinning has a heterogeneous character and varies in the range of 1.2...14%, the obtained process efficiency corresponds to the experimental data. To increase the efficiency of the technological process, it is desirable to dispose of the final reserve of internal energy of the steam-gas cavity, for example, by reloading.*

*In the future, the improved model can be used to study indentation in the matrix, sealing of joints and analysis of reloading with a new discharge.*

**Key words:** electrohydraulic discharge, pipe billet, free distribution, thinning, features of deformation, mathematical model.

**Нарижний Олександр Георгійович** – канд. техн. наук, доц. НАУ ім. М. С. Жуковського «ХАІ»

**Naryzhnyi Olexandr** – Candidate of Technical Science, Associate Professor of NAU “KhAI”

E-mail: o.naryzhniy@khai.edu

ORCID: 0000-0002-5379-1964

**Тараненко Михайло Євгенович** – д-р техн. наук, проф. НАУ ім. Н. С. Жуковського «ХАІ»

**Taranenko Mykhailo** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of NAU “KhAI”

E-mail: m.taranenko@khai.edu

ORCID: 0000-0003-4126-0979

НАУ ім. Н. С. Жуковського «ХАІ» – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків

NAU “KhAI” – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv

*Статья надійшла до редакції 25.06.24 р.*