

Тараненко М. Є.  
Нарижний О. Г.

## РОЗВИТОК ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ЕФЕКТУ ДЛЯ ШТАМПУВАННЯ ВИСОКОТОЧНИХ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ

*В статті відзначена мала ефективність використання традиційних схем електрогідрравлічного штампування при виготовленні великогабаритних листових деталей. Запропоновано використовувати для прототипного виробництва таких деталей багатоелектродні розрядні блоки. Зроблено висновок про їх потенційну ефективність та особливості процесу, що ускладнюють штампування. Визначено причини цих ускладнень: недостатня керованість потоками енергії у просторі та різке падіння параметрів навантаження після декількох сотень ЕГ-розрядів. Задачами дослідження стало обґрунтування можливостей просторового управління навантаженням в межах технологічного простору та підвищення стійкості робочих електродів, що піддаються великим силовим навантаженням та електричній ерозії.*

*За допомогою математичного моделювання показано, що процес передачі енергії від генератора струму до об'єкту обробки носить струминний характер. Це дає можливість управління потоками енергії у просторі технологічного блоку. На практичних прикладах показано можливість подальшого збільшення ефективності самих процесів формоутворення та експлуатаційних характеристик обладнання. Експериментальним шляхом підтверджено досліджувані результати.*

*Експериментальні доробки елементів технологічного оснащення електрогідрравлічного пресу дозволили збільшити період міжремонтної експлуатації до одного місяця, що є задовільним для дослідницького виробництва.*

*При більшій інтенсивній експлуатації встаткування можна використати варіант оснащення одного преса двома комплектами багатоелектродних розрядних блоків, при якому один блок експлуатується, а другий – ремонтується. При виконанні робіт використовувався метод математичного моделювання, адекватність якого підтверджено раніше, і експериментальний метод.*

**Ключові слова:** електричний розряд у рідині, управління потоками енергії, імпульсне навантаження, електроди, листова заготовка, штампування.

Електрогідрравлічний ефект (ефект Л. Юткіна) давно використовується у листоштампувальному виробництві [1-4]. Розроблено установки (електрогідрравлічні преси) та технології штампування різнотипних деталей. Вони привабливі низькими строками, витратами на технологічну підготовку виробництва (ТПВ) та достатньо широкими технологічними можливостями. Але їх поштучна технологічна продуктивність менша, ніж на механічних пресах.

Багаторічні дослідження техпроцесів електрогідрравлічного штампування (ЕГШ) дозволили встановити, що їх ефективність помітно знижується при штампуванні деталей з габаритами 0,3...0,5 м. Це, в основному, пояснюється необхідністю використання розрядних камер (РК) великого об'єму з їх високою піддатливістю самої конструкції РК, великим об'ємом передавального середовища, що заповнює камери, та сформованим об'ємом порожнини деталі, відносно великим вилітом робочих електродів (РЕ) всередині порожнини РК.

Відносно мала ефективність електричного вибуху у РК великого об'єму викликає необхідність використання багатоімпульсного режиму навантаження, який подовжує цикл штампування деталі, сприяє більш інтенсивному зношенню РЕ. Підвищення кількості енергії, що виділяється при розряді енергії, не призводить до скорочення тривалості циклу штампування, але підвищує зношення усього оточуючого технологічного середовища.

Проте, ідея використання багатоімпульсного режиму штампування великогабаритних деталей для прототипного їх виготовлення авіаційно-космічних конструкцій, автомобільного виробництва та інших апаратів залишалася достатньо привабливою.

Метою цієї роботи є опис досліджень, які призводять до значного підвищення ефективності ЕГШ за багатьма складовими цього поняття. А саме: можливість управління навантаженням у просторі та часі, реалізація ефектів зниження спротиву деформуванню та підвищення ступеню релаксації остаточних напружень при віброімпульсному навантаженні та підвищення стійкості технологічної системи.

Грунтуючись на результатах попередніх досліджень про те, що більш ефективні ЕГ-розряди у РК малого об'єму, необхідністю управління параметрами навантаження вздовж поверхні деталі, небажаності виділення більш 20...25 кДж на одній електродній парі та деякими іншими міркуваннями, в ХАІ було запропоновано схему багатоелектродного розрядного блоку (БРБ) та схему багатоконтурного генератора імпульсних струмів (ГІС) (рис. 1).

БРБ являє собою товсту (жорстку) металеву плиту, у якій з визначеним кроком виконані глухі отвори (камери). Всередині усіх цих камер встановлюються робочі електроди.

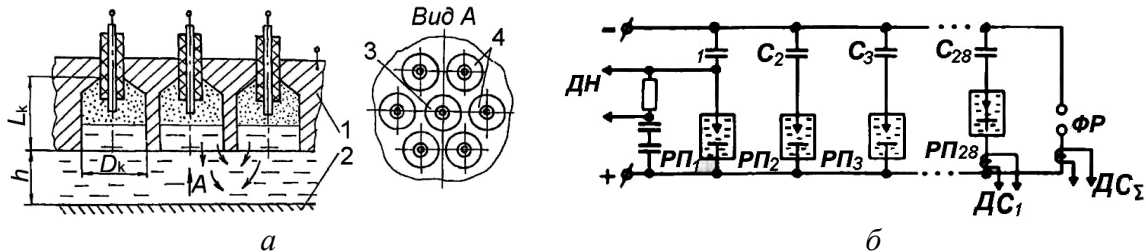


Рис. 1. Принципові схеми (1 – розрядна камера; 2 – предмет обробки; 3 – камера, у якій здійснюється основний розряд; 4 – шість камер, у яких здійснюється додаткові розряди; точками позначено зону ППП; С – батарея конденсаторів; ФР – формуючий розрядник; РП – робочий проміжок; ДС – датчик струму; ДН – датчик напруги):

*a* – БРБ; *б* – електрична схема комутації ГІС

Високовольтний підводний розряд проходить між центральним струмопровідним стрижнем електроду та внутрішньої поверхнею порожнини. Таким чином сформована кожна електродна пара.

Принципова схема комутації ГІС деяким чином відрізняється від традиційних схем тим, що паралельно усім контурам містять батарею конденсаторів у робочому розрядному проміжку, а також паралельно включений один формувальний розрядник. При його замиканні висока напруга подається одночасно на усі робочі проміжки. Це дозволяє спростити схему ГІС та полегшити можливість управління тривалістю циклу виділення енергії на різних розрядних проміжках.

Для контролю режиму виділення енергії ГІС оснащується датчиками струму у кожному робочому контурі та одним датчиком сумарного струму, що встановлений на лінії приєднання формувального розрядника.

Досліджувалися при відпрацюванні технології штампування великих листових деталей два БРБ з 46 та 28 розрядними порожнинами.

Зовнішній вигляд 28-електродного БРБ (зі знятою спрямовальною плитою) та типова конструкція розташування електродів показана на рис. 2.

Дослідно-промислове відпрацювання технології штампування показало цілком задовільні результати. Було відштамповано дослідні партії високоточних дзеркал антен космічного зв'язку з апертурою 900 мм, низка листових напівторів різних розмірів та форм перерізу. При цьому використовувалась наступна послідовність. На першому етапі до ГІС підключалися електродні пари, що знаходилися над важкоформутовувальними ділянками деталі ті відповідно заготовки. На них виділялася середня енергія відносно потрібної максимальною. На другому етапі проводилося калібрувальне навантаження з максимальною енергією. Це дозволило знизити кількість ЕГ-розрядів, необхідних для повної формозміни деталі. Середня кількість розрядів для штампування деталей з алюмінієвих сплавів товщиною 1,5...2,5 мм та найбільш глибокими зонами формоутворення, що знаходяться ближче до периферії деталі, складає 8...12 шт. Діапазони виділення енергії на одній електродній парі знаходяться у межах 10...20 кДж.

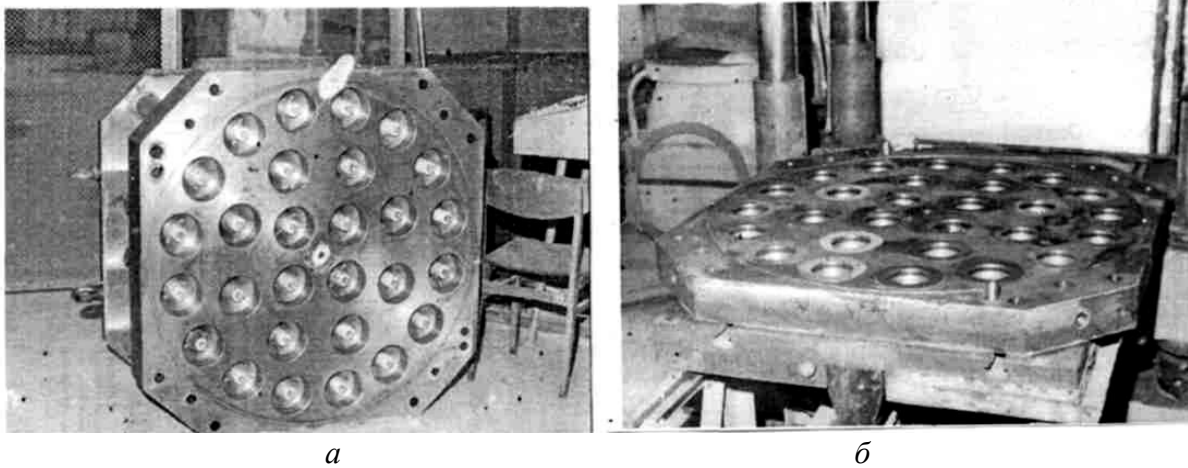


Рис. 2. Зовнішній вигляд 28-контурного БРБ (зі знятою спрямувальною плитою) (а), (б) – спрямувальна плита, розміри у плані 1130 x 130 мм

Але експлуатаційні показники БРБ виявилися не дуже задовільними. Так після 300...500 розрядів та енергії, що виділяється за один розряд 20 кДж, починав порушуватися заданий режим розряду. Він оцінювався за осцилограмами розрядних струму в одному контурі та напруги на розрядному проміжку. Після 400...450 розрядів падіння заданої напруги у період передрозрядної стадії досягало 50%, що не є припустимим.

Для рекомендації використання багатоконтурних ЕГ-пресів у промисловому виробництві (навіть серійному) необхідно було усунути цей недолік. Він міг бути вирішений двома шляхами:

- встановленням на БРБ швидкозмінної конструкції кріплення електродів;
- встановленням механізму швидкого порушення режимів ЕГ-розрядів.

Зовнішній огляд зруйнованих електродів показав, що основними причинами є руйнування високовольтної ізоляції на зануреному кінці електроду та, як слідство, збільшення оголеної поверхні центрального струмопровідного стрижня електроду та електроерозійне зношення торцевої поверхні стрижня (рис. 3).



Рис. 3. Зовнішній вигляд зруйнованої частини електроду  $\varnothing 45$  мм. На вставці – препаровані ділянки електродів

Для розуміння обставин слід відзначити, що у робочому стані електроди в БРБ знаходяться у вертикальному положенні. При заповнюванні розрядних порожнин водою на торцевій частині електроду затримуються дрібні пухирці повітря, що витісняються водою. Під дією ударних хвиль, що виходять з зони розряду, пухирці зхлопуються та створюють невеликі кумулятивні струмені. Ці струмені руйнували місце дотику склопластикової високовольтної ізоляції з металевою поверхнею стрижня. У результаті створювалась кільцева порожнина навколо стрижня (див. вставку на рис. 3). При повторних розрядах ця порожнина прогресивно

заглиблювалась. В окремих випадках після ~500 розрядів вона досягала 120...150 мм за глибиною. При визначеному витонченні шару ізоляції траплявся її пробій (місце пробією відзначено колом). У результаті електрод виявлявся непрацездатним.

Стала очевидною необхідність моделювання процесу передачі та розповсюдження енергії у обмеженому об'ємі розрядної порожнини.

### Моделювання процесу розповсюдження потоків енергії у обмеженому об'ємі розрядної порожнини.

У практиці моделювання імпульсних процесів деформування [6-8] використовуються різні програмні продукти. Перевага віддається більш простим, що потребують невеликих обчислювальних ресурсів. З їх допомогою досліджуються поля тиску, які реалізуються у замкнутих розрядних камерах під дією ударних хвиль. Деформування заготовки досліджується тільки на етапі калібрування. У розглянутій схемі навантаження подібний підхід малоефективний, тому що у ній присутня велика (за площиною) кількість меж, що мають різні деформаційні характеристики.

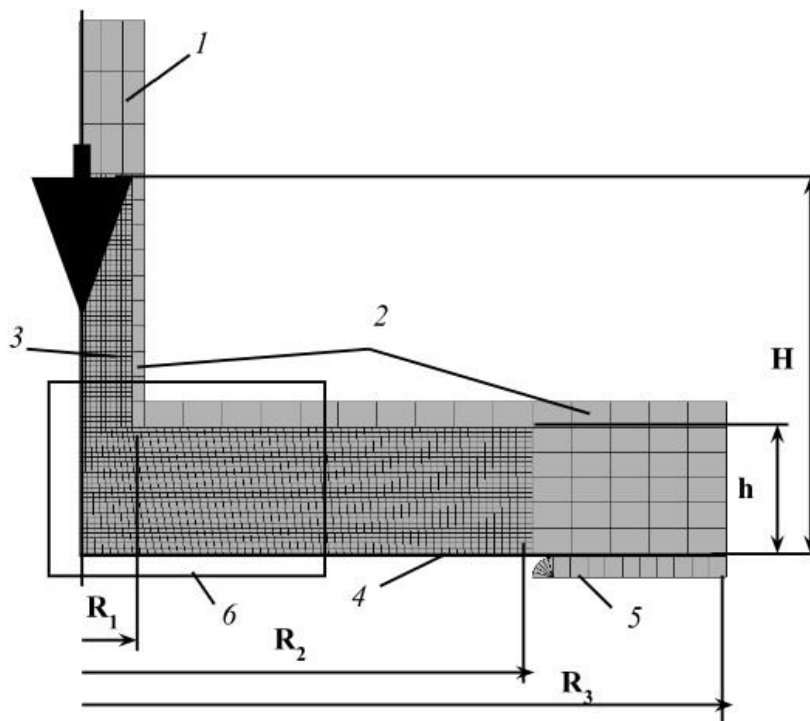


Рис. 4. Схема розрахункової моделі (1 – жорсткий поршень, що імітує межу парогазової порожнини з високим тиском; 2 – камера; 3 – рідина; 4 – заготовка; 5 – витягувальне кільце):

Стрілкою позначений напрямок руху поршня у початковий момент часу.  $R_1 = 20$  мм;  $R_2 = 175$  мм;  $R_3 = 250$  мм;  $H = 150$  мм;  $h = 50$  мм; товщина заготовки 5 мм

Для моделювання механічних процесів у розрядних порожнинах БРБ та у суміщених з ними об'ємах технологічного простору обраний пакет LS-DYNA, обчислювальне середовище якого дозволяє обирати відповідні варіанти досліджуваної гетерогенної системи. Вона являє собою (рис. 4) вісесиметричну трубу, яка суміщена з циліндричним корпусом камери, порожнини яких заповнені рідиною. У верхній частині труба має глуху стінку. У радіальному напрямку рідина у камері на достатньому віддаленні обмежена жорсткими стінками. У нижній частині камера замкнута пласкою деформівною перешкодою (заготовкою). На периферії заготовка спирається на витягувальне кільце. Система вісесиметрична, що дає можливість моделювання процесів у ній у двовимірному формулюванні.

Заготовка виконана з пружно-пластичного матеріалу зі ступеневим деформаційним зміцненням типу алюмінієвого сплаву Д16. Рідина пружна лінійно-стискана та в'язка, може

спиратися розтягуванню до  $10^4$  Па. Об'ємний модуль пружності  $0,4 \cdot 10^{11}$  Па, коефіцієнт в'язкості 0,5. Заготовка затиснута між нерухомою камерою та витягувальним кільцем, але має можливість пересуватися у радіальному напрямку з тертям за Кулоном, коефіцієнт тертя  $\mu = 0,4$ .

Поршень рухається згідно заданого закону, що має вигляд нерівнобічного трикутника.

Спочатку у нерухомій рідині розповсюджується хвиля тиску, на рис. 5 показано фрагмент рідини та тонові картини розподілу тиску на етапах руху хвилі тиску у каналі (а) та у камері у момент досягнення фронтом поверхні заготовки (б). Стрілками показано напрямок руху фронту хвилі, світлим тоном знизу та справа показано зони незбуреної рідини. При русі хвилі у каналі виражені передній (1) та задній (2) фронти тиску, які практично мають пласку форму. При виході з гирла каналу до камери передній фронт хвилі тиску набуває сферичну форму та рухається у радіальному напрямку.

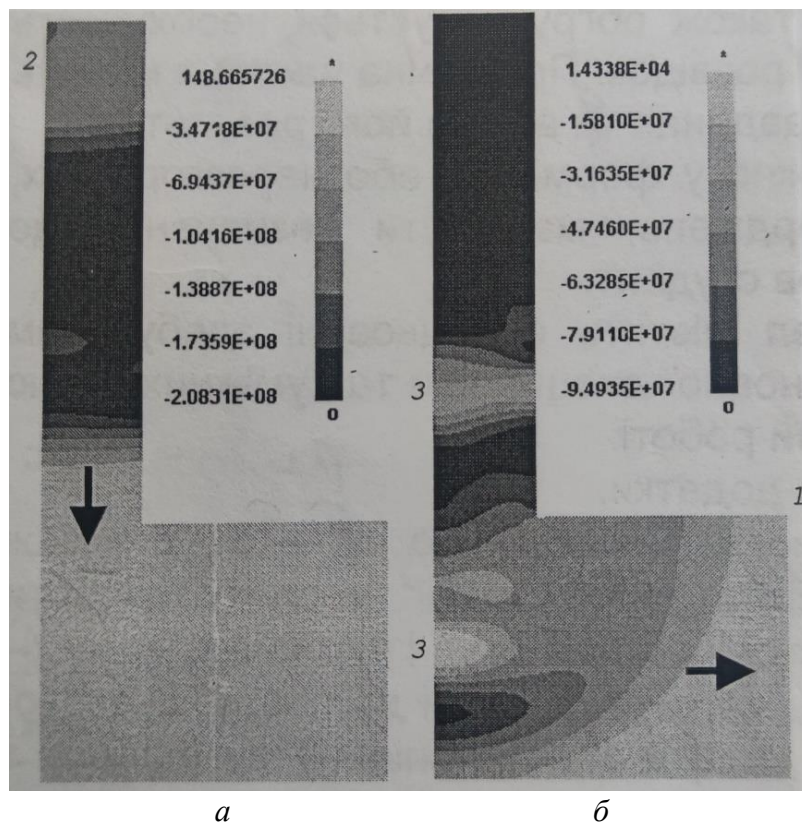


Рис. 5. Картини руху хвилі тиску у каналі та камері

Рівень тиску падає, максимальний тиск спостерігається у каналі та під ним у камері, їх величини менші у два рази у порівнянні з першим етапом. У подальшому спостерігається ще більш значне зниження тиску, що обумовлено відокремленістю хвилі від джерела збурення, збільшенням площі фронту та здійсненням роботи по деформуванню заготовки. Зона підвищеного тиску стає шарувато-неоднорідною, що пов'язано з перевіддзеркаленням та інтерференцією, а також обмеженістю спротиву рідини розтягувальним напруженням. Спостерігається дві зони стовпа рідини (світлі ділянки 3, рис. 5, б). У подальшому спостерігається затухання хвилі тиску та значний рух рідини.

На рис. 6 показаний фрагмент б системи, зверху якого нанесені траєкторії руху точок рідини. Група точок (а) розташована у гирлі каналу, група (б) – у камері біля гирла, група (в) у донній частині камери на поверхні заготовки, група (г) – на відстані трьох радіусів каналу від гирла. Точки групи (а) створюють розширюючий донизу струмінь. Траєкторії точок криволінійні та у кінці розглянутого процесу підіймаються вгору. Точки групи (б) мають спочатку нахилені під кутом  $45^\circ$  прямолінійні, а потім криволінійні, підняті догори, траєкторії. Рух точок груп (а) і (б) можна характеризувати як вихровий. Точки групи (в) рухаються спочатку

вниз разом із заготовкою, а потім горизонтально, створюючи придонний плин. Точки групи (г) переважно переміщуються в радіальному напрямку та униз разом із заготовкою. Рух рідини сильно неоднорідний, а переміщення великі, досягають величини 108 мм.

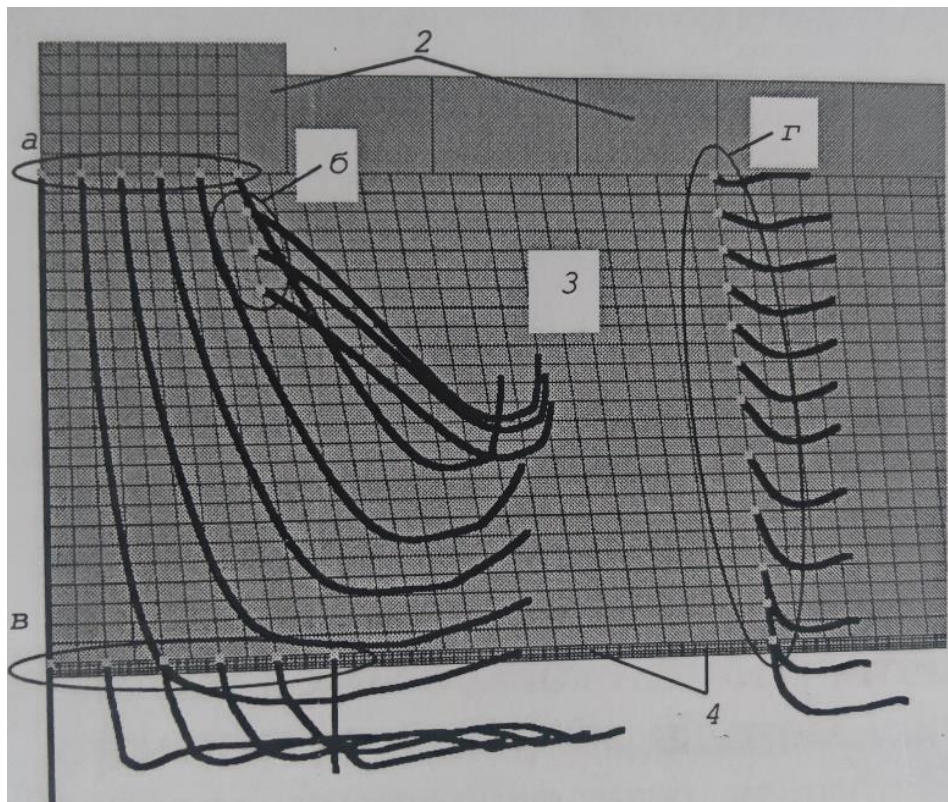


Рис. 6. Траєкторія руху точок заготовки

На рис. 7 показана тонова картина розподілу швидкостей рідини на деформованій конфігурації для фрагмента б. Праворуч показана шкала швидкостей (чим темніше область, тим вище швидкість руху). Стрілками показані переважні напрямки швидкостей. Лінії сітки відповідають лініям матеріальної системи координат. Зміни сітки показують характер руху рідини. Угорі струменя спостерігається радіальне стискання, у нижній зоні під порожниною (б) рух рідини має шаруватий характер.

Рідина відділилася від твердих поверхонь штока (ділянка (а)), а частково – від камери й заготовки, утворивши порожнину (б). Поле швидкостей сильно неоднорідне, спостерігаються одночасно дві окремі зони високих швидкостей, відзначені темним тоном. Поблизу порожнини (в) у рідині спостерігається вихровий рух. Через неоднорідність поля швидкостей у зоні (в) очікується зхлопування частини границі вільної поверхні порожнини.

У зоні (г) спостерігається обчислювальний артефакт – проникнення рідини крізь заготовку. Перекручування форми осередків приводить до появи обчислювальної нестійкості процесу моделювання, внаслідок чого обчислювальний процес переривається. Як відомо, це недолік всіх сіткових методів при рішенні завдань із великими неоднорідними деформаціями.

Порівняння розрахункових і експериментальних результатів дозволяє зробити наступні висновки.

Рух рідини має струминний характер і спричиняє локальну дію на заготовку.

Вісесиметричну гетерогенну модель можна використати для визначення характеру й величини тиску рідини на деформовану заготовку з метою використання в простих та обчислювально ефективних моделях деформування заготовки під дією тиску з урахуванням руху заготовки.

Не розглядаючи у даній роботі усі технічно актуальні особливості механізмів взаємодії потоку рідини та деформованої заготовки, відзначимо дві з них. На верхніх твердих границях

зон зміни перерізу струменю рідини створюються області інтенсивно кавітуючої рідини. Це відноситься до верхньої межі камери 2 (рис. 4) або, інакше, верхньої змочуваної поверхні БРБ, нижнього торцю робочого електрода та іншим поверхням технологічного блоку. Під дією інтенсивного багатократного імпульсного навантаження на цих поверхнях спостерігається значна кавітаційна ерозія (руйнування поверхні).

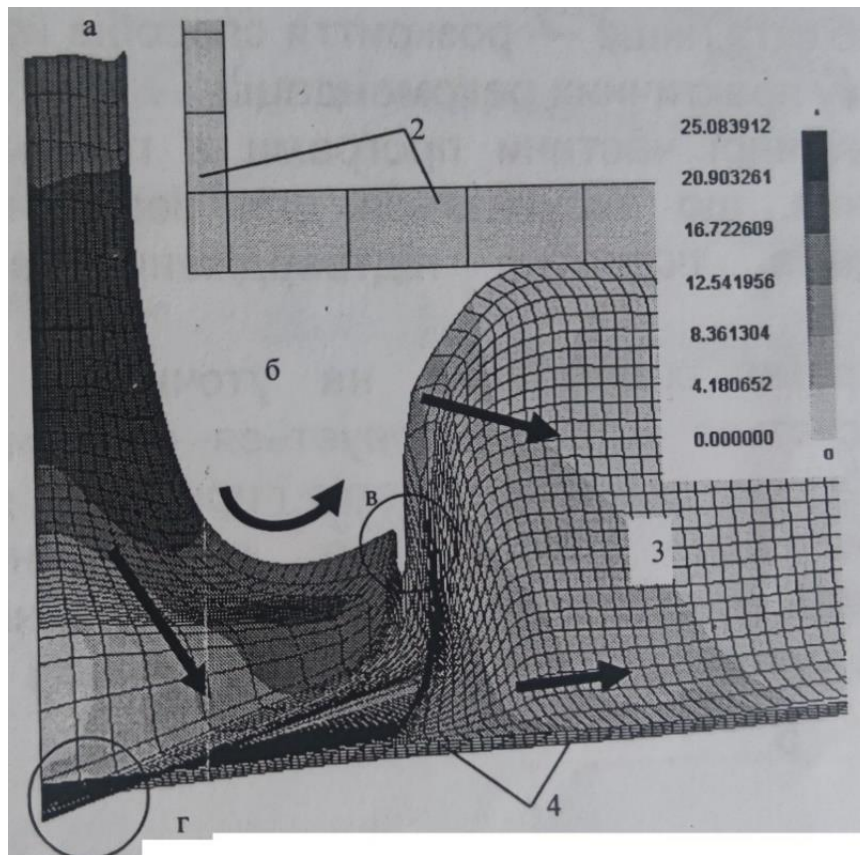


Рис. 7. Картина розподілу швидкостей рідини

По мірі приближення до заготовки струмінь рідини розширюється у радіальному напрямку та у ній створюються зони пониженого тиску (рис. 5, б). Тобто, струмінь енергії, що переноситься, витрачається нераціонально. Зменшити витрати можливо створивши зони підвищеного тиску навколо струменя.

Більш докладно процес взаємодії струменя з заготовкою був продемонстрований з використанням пакету LS-DYNA та використання методу ALE [9]. При цьому розрахункова модель була ускладнена – розглядалися варіанти протікання процесу взаємодії з виділенням енергії одночасно у одній, двох та трьох розрядних порожнинах. Картина взаємодії струменів між собою та заготовкою показана на рис. 8.



1180 мкс

*a*

3000 мкс

*б*

2700 мкс

*в*

Рис. 8. Взаємодія затоплених струменів рідини, що генеруються ЕГ-розрядом, із заготовкою при виділенні енергії в одній (*a*), двох (*б*) і трьох (*в*) розрядних порожнинах: вказаний час закінчення інтенсивної формозміни заготовки

При взаємодії одиночного струменя з заготовкою одночасно деформується остання та струмінь розширюється вздовж поверхні заготовки. При цьому велика доля енергії, що переноситься, витрачається непродуктивно (рис. 8, а). При взаємодії двох струменів (рис. 8, б) спостерігається поворот основного струменя (на рис. справа) у сторону протилежну від управляючого струменя (на рис. зліва). Змінюючи тривалість затримки початку виділення енергії у управляючому струмені відносно основного можливо змінювати кут його повороту. Дослідження варіантів співвідношення кількості енергії, що виділяється у двох струменях, показало, що управляючий струмінь може мати меншу енергію та не впливає суттєво на результат управління.

На рис. 8, в показаний варіант виділення енергії у трьох струменях. Це призводить до стискання центрального (основного) струменя. Таким чином, виникає концентрація енергії, що переноситься основним струменем на меншу площину контакту з заготовкою.

Використання ефекту концентрації при штампуванні показано на рис. 9 при формоутворенні периферійних ділянок дзеркал антен космічного зв'язку.

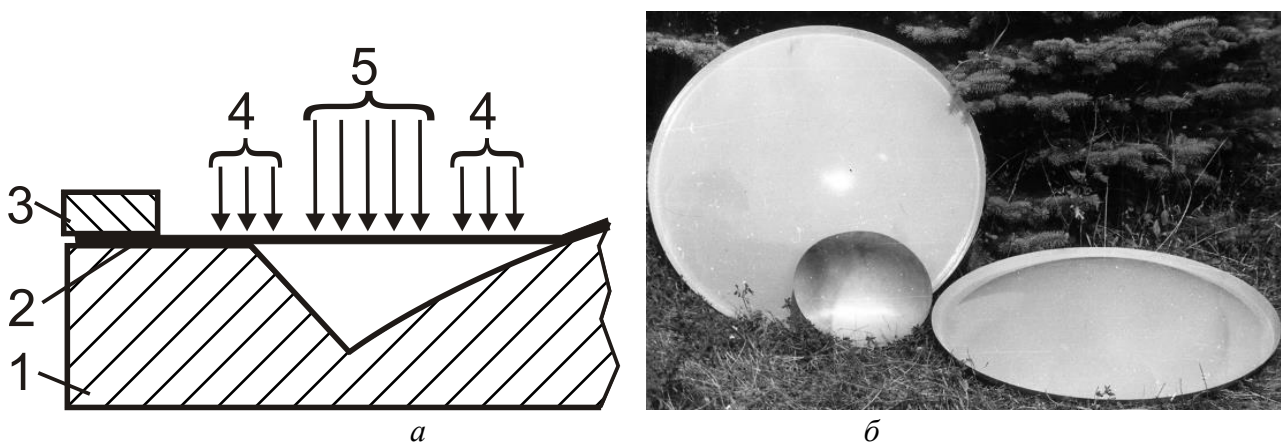


Рис. 9. Схема фрагменту штапового налагодження дзеркала антени (1 – матриця; 2 – заготовка; 3 – притискна плита; 4 – струмені, що обтискають; 5 – основний струмінь):

а – схема навантаження при штампуванні; б – зовнішній вигляд дзеркал антен  $\varnothing 900$  мм

При деформуванні таких деталей для отримання високої точності параболічної поверхні (на рис. справа) необхідно створити умови натягування заготовки на оснастку. Для цього необхідно створити підвищений тиск на ділянці заготовки, що відповідає ділянці суміщення параболічної та фланцевої частин. Дія основного струменя повинна бути сконцентрована безпосередньо на цій ділянці. Не має сенсу прикладати рівномірне поле тиску за всією поверхнею заготовки.

З цього прикладу просторового управління навантаженням при штампуванні великогабаритних листових деталей виходять переваги такої тактики штампування. Вони проявляються у наступному:

- скороченні витрат енергії на штампування з-за зменшення потрібної кількості розрядів;
- скорочення тривалості циклу штампування;
- можливості отримання високоточних деталей;
- підвищення стійкості робочих електродів.

Слід відзначити, що загальна ефективність (місячна або річна продуктивність) ЕГ-пресів у багато в чому залежить від стійкості (ефективної працездатності) елементів технологічної системи, що зношуються. Уникати зношувальності таких елементів досить складно. При забезпеченні максимальної стійкості конструктивними способами слід забезпечити малотрудо-



містку заміну зношених елементів на нові або відновлені. При чому період стійкості слід узгоджувати з виробничими ритмами. Так у результаті аналізу виробничих планів було прийнято рішення про допустиму заміну електродів через 20...25 робочих змін (раз у місяць). Для цього у результаті експериментів була відпрацьована конструкція частини електроду, яка занурена до рідини (рис. 10). У цій конструкції місце торцевого стику високовольтної склопластикової ізоляції з металевим стрижнем прикрито металевою шайбою, яка приварена до стрижня. Бокова поверхня шайби конічна з гострою нижньою кромкою та закругленою бічною.

На обточену поверхню електроду наноситься тонкий шар епоксидної смоли для підвищення змочуваності поверхні.

Експерименти показали, що стійкість такої конструкції збільшилась з 500 до 2000...3000 розрядів при енергії, що виділяється, 5...8 кДж. Запропонована конструкція дозволила підвищити довжину (площу поверхні), яка піддається ерозії. Крім цього, облегшила потенційний ремонт електроду.

Для спрощення знімання/встановлення електродів до БРБ при ремонті була використана конструкція його кріплення у корпусі (рис. 11). В ній кріплення електроду здійснюється за допомогою затискних еластичних кілець. У якості еластомеру використовувалися тверді сорти гуми або листовий поліуретан.

Описані доопрацювання елементів технологічного оснащення ЕГ-преса дозволили встановити період міжремонтної експлуатації в один місяць (при однозмінній роботі), що є задовільним для дослідного виробництва.

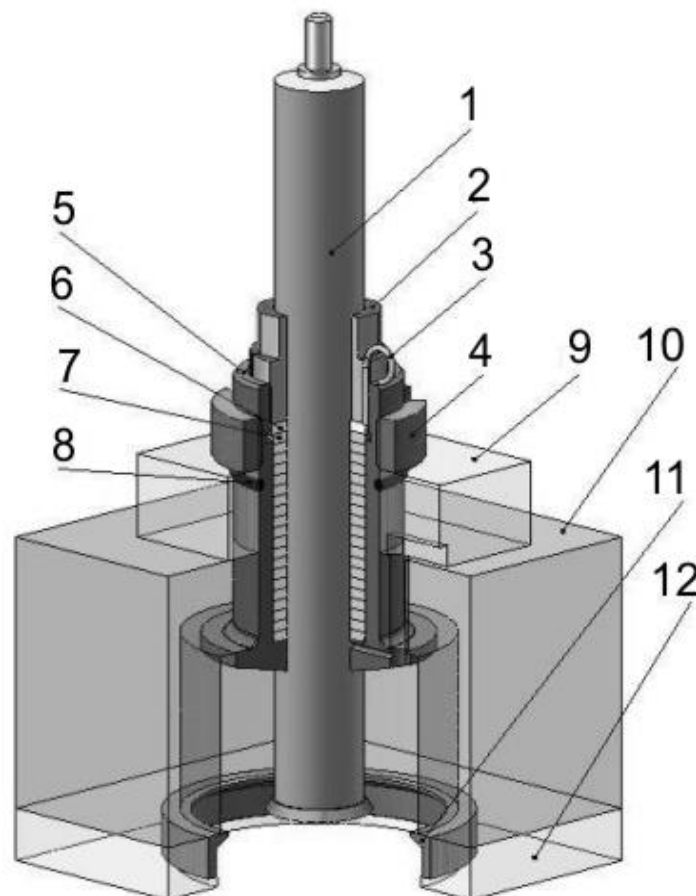


Рис. 11. Типовий елемент кріплення електродів в БРБ конструкції ХАІ

(1 – робочий електрод; 2 – затискна гайка; 3 – штифт; 4 – гайка; 5 – корпус; 6 – шайба; 7 – кільце гумове (11–19 шт.); 8 – кільце ущільнювальне; 9, 10 – дренажна та розрядна плита; 11 – розрядне кільце; 12 – спрямувальна плита). Діаметр порожнини 130 мм

При більш інтенсивній експлуатації обладнання можна використовувати варіант оснащення одного преса двома комплектами БРБ, при якому один блок експлуатується, а другий – ремонтується. В певні моменти часу вони змінюються. Це визначається тим, що трудомісткість зміни комплекту БРБ значно менше трудомісткості зміни електродів.

### ВИСНОВКИ

1. Використання традиційних схем штампування на електрогідравлічних пресах мало ефективно при прототипному виробництві великогабаритних листових деталей. Це пояснюється обмеженим полем навантаження та пониженою жорсткістю технологічної зони обладнання.

Більш ефективно використання багатоелектродних розрядних блоків, які дозволяють навантажувати заготовку одночасно на різних ділянках. Процес передачі енергії від генератора імпульсних струмів до заготовки в таких пристроях має низку особливостей.

2. Математичне моделювання процесу передавання енергії від генератора до об'єкту обробки показало:

– процес передачі енергії має струминний характер. Структура струменя являє собою черговані зони підвищеного та зниженого тиску, різні ділянки струменя можуть мати різні за напрямком та величиною поля швидкості, а також зони кавітації;

– при взаємодії з деформованою заготовкою переріз струменя різко розширюється. При цьому частина енергії, що збережена, витрачається непродуктивно;

– генеруючи створення декількох струменів поряд один з одним, можливо управляти напрямком їх сумарної дії та концентрацією енергії на визначених ділянках заготовки;

3. Показано приклади врахування цих особливостей при формуванні високоточних дзеркал антен космічного зв'язку та вдосконалення деяких вузлів існуючих ЕГ-пресів. Отримано позитивні результати.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. К. : Наукова думка, 1990. 208 с.
2. Мазуровский Б. Я., Сизев А. Н. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. К. : Наук. думка, 1983. 192 с.
3. Тараненко М. Е. Электрогидравлическая штамповка : теория, оборудование, техпроцессы : монография в 2 ч. Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011. 272 с.
4. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Bessonov Nicolas M., Mamutov Viacheslav S. Electrohydraulic Forming of Low Volume and Prototype Parts: Process Design and Practical Examples. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021. 5. 47. 20 p., DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp5020047>.
5. Woo Mina, Lee Kyunghoon, Song Woojin, Kang Beomsoo, Kim Jeong. 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. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3219829>.
6. Woo Mina, Kim Jeong. Inverse parameter estimation to predict material parameters of the Cowper–Symonds constitutive equation in electrohydraulic forming process. *J Eng Math.* 132:8. 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10665-021-10175-7>.
7. 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. J. Eng. Manuf.* 2009. 223. pp. 703–712, DOI: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM1430>.
8. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Mamutov Viacheslav S., Bonnen John J.F. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology.* 219 (2015). pp. 84–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.045>.
9. Тараненко М. С., Нарижний О. Г. Керування параметрами ЕГ-навантаження для штампування листових деталей з мінімальним жолобленням. *Обробка матеріалів тиском. Materials working by pressure.* 2022. № 1(51). С. 98–109. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1\(51\)98](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)98).

### REFERENCES

1. Hulyi G.A. Scientific fundamentals of discharge-impulse technologies. Kyev : Scientific thought. 1990. 208 p. (*in Russian*).
2. Mazurovskii B. Ya., Sizev A.N. Electrohydraulic effect in sheet forming. Kyiv : Scientific thought. 1983. 192 p. (*in Russian*).
3. Taranenko M.Ye. Electrohydraulic forming: theory, equipment and technological processes (monography).

Kharkov. Nat. Aerosp. Univ. 2011. 272 p. (in Russian).

4. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Bessonov Nicolas M., Mamutov Viacheslav S. Electrohydraulic Forming of Low Volume and Prototype Parts: Process Design and Practical Examples. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021. 5. 47. 20 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp5020047>.

5. Woo Mina, Lee Kyunghoon, Song Woojin, Kang Beomsoo, Kim Jeong. 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. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3219829>.

6. Woo Mina, Kim Jeong. Inverse parameter estimation to predict material parameters of the Cowper–Symonds constitutive equation in electrohydraulic forming process. *J Eng Math.* 132:8. 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10665-021-10175-7>.

7. 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. J. Eng. Manuf.* 2009. 223. pp. 703–712, DOI: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM1430>.

8. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Mamutov Viacheslav S., Bonnen John J.F. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology.* 219 (2015). pp. 84–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.045>.

9. Taranenko M. Ye., Narizhnyi O. G. Controlling parameters of electro-hydraulic loading at forming of sheet articles with minimal warping // *Materials working by pressure*, 2022. № 1(51), pp. 98-109. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1\(51\)98](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)98). (in Ukrainian)

**Taranenko M., Naryzhnyi O. Development and distinctions of application of electrohydraulic effect for forming of high-precision large-dimensional sheet articles.**

*Low efficiency of application of conventional schemes of electrohydraulic forming at manufacturing of large-dimensional sheet articles is mentioned. It is suggested to use multi-electrode discharge blocks for manufacturing of mentioned articles at prototype production. Conclusion about their potential efficiency and distinctions of the process that make forming to be more difficult is done. Main reasons of such difficulties are considered. These difficulties are the following: poor controllability of energy flows in space and sharp falling of loading parameters after several hundreds of EH-discharges. Main tasks of the study are grounding of possibility of loading spatial control in frames of technological space and increasing resistance of operational electrodes that withstand high mechanical loading and electric erosion.*

*Experimental perfectioning of elements of technological equipment for electrohydraulic press allowed to increase duration between overhauls up to one month that is quite satisfactory for research manufacturing.*

*At high intensity of equipment maintenance one can use press with two sets of multi-electrode discharge blocks, i.e. the first one is in use, the second one is under repairing*

*It is shown by means of mathematical modelling that the process of energy transfer from electrical current generator to object of processing has jet character. This gives possibility to control energy flow in space of technological block. Possibility of further increasing efficiency of forming and operational characteristics of equipment is shown practically on examples. Results obtained are proved by experimental way.*

**Key words:** *electrical discharge in liquid, control of energy flows, impulse loading, electrodes, sheet blank, forming.*

**Тараненко Михайло Євгенович** – д-р техн. наук, проф. НАУ «ХАІ» ім. Н. С. Жуковського  
**Taranenko Mykhailo** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of NAU “KhAI”  
 E-mail: [m.taranenko@khai.edu](mailto:m.taranenko@khai.edu)  
 ORCID: 0000-0003-4126-0979

**Наризшний Олександр Георгійович** – канд. техн. наук, доц. НАУ «ХАІ» ім. Н. С. Жуковського  
**Naryzhnyi Olexandr** – Candidate of Technical Science, Associate Professor of NAU “KhAI”  
 E-mail: [o.naryzhnyi@khai.edu](mailto:o.naryzhnyi@khai.edu)  
 ORCID: 0000-0002-5379-1964

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» ім. М. С. Жуковського  
 (НАУ «ХАІ» ім. Н. С. Жуковського), м. Харків  
 National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" (NAU “KhAI”), Kharkiv

*Стаття надійшла до редакції 12.08.23 р.*