

doi: 10.32620/oikit.2025.105.08

УДК 539.374+621.7.044.4

М. Є. Тараненко, О. Г. Нарижний, В. Дзесінь

Цільова послідовність локального електрогідравлічного штампування крупних листових деталей

Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”

У дані статті розглядається необхідна для різноманітних технічних вимог послідовність локального навантаження при електрогідравлічному штампуванні великогабаритних листових днищ. Широко відомі технології електрогідравлічного штампування відносно невеликих листових деталей. В таких технологія виділення енергії створюється на одній електродній парі, що дозволяє деформувати невеликі деталі. Розроблено оригінальні електрогідравлічне преси з великою енергією, що запасається (до 500 кДж), яка дозволяє виділяти енергію одночасно у багатьох зонах робочого простору над заготовкою. А це, у свою чергу, дозволяє навантажувати заготовку лише у визначених зонах.

До крупних листових деталей (днищ) можуть бути пред'явлені різні технічні вимоги – обмеження деформації стоншення у певних зонах, мінімальне пружне жолоблення деталі або особливо висока точність її поверхні.

Проведено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану на початковому та наступних етапах формоутворення круглих великогабаритних днищ при різних варіантах послідовності імпульсного навантаження. При імпульсному навантаженні, яке є рівномірним за всією поверхнею заготовки виникають зони стискання у прифланцевих зонах, що призводить до виникнення зморшок. А також до накоплення деформацій стоншення у центрі деталі. Ці шкідливі особливості процесу обмежують технологічні можливості електрогідравлічного штампування. При імпульсному локальному навантаженні прифланцевої частини заготовки на перших етапах формоутворення заготовка вигинається саму у цієї частини, що робить її форму більш жорсткішою та частково призводить до зміцнення матеріалу у цій частині. При цьому знижується вірогідність виникнення зморшок. На наступних етапах деформування навантаження здійснюється у центральній зоні, що забезпечує зниження деформацій стоншення у небезпечній зоні. Така технологія штампування днищ діаметром більш метру була перевірена експериментально та позитивні результати цих експериментів приведено у роботі.

Запропонована технологія дозволяє виготовляти крупні листові деталі не дуже високої точності, але при використанні одного формоутворювального елемента оснащення на одному робочому місці.

Для виготовлення особливо точних днищ, наприклад, дзеркал антен космічного зв'язку запропонована двоперехідна технологія виготовлення. Зв такою технологією заготовка попередньо вільно формується до певного прогину у центрі під дією локального електрогідравлічного навантаження на простому технологічному оснащенні. На другому етапі формоутворюються периферійні зони заготовки на частково випуклій оснастці. Показано результати відпрацювання процесу штампування дзеркал антен діаметром 250 та 900 мм. Відхилення від параболічної поверхні матриці склало 0,03...0,05 мм. Приведено інші позитивні властивості такого технологічного процесу.

У результаті досліджень запропоновано раціональну послідовність локального навантаження для деяких варіантів вимог. Деякі варіанти розробки підтверджено експериментально. Запропоновано напрямок математичного моделювання процесу.

Метою роботи є встановлення раціональної послідовності локального навантаження для виконання висунутих технічних вимог у часі однієї технологічної операції.

Ключові слова: електрогідравлічне штампування (формування), крупні листові деталі, послідовність локального навантаження, багатеелектродний розрядний блок.

Вступ

Крупні тонколистові деталі з сучасних матеріалів широко

використовуються при виготовленні авіаційної, ракетної техніки та космічних апаратів. На основі багатьох досліджень та практичного досвіду можливо вважати, що однією з найбільш прийнятних технологій для їх формоутворення є електрогідравлічне штампування (ЕГШ). Цей висновок базується на декількох наступних факторах. При імпульсному навантаженні та високих швидкостях деформування помітно підвищуються припустимі межі стійкої пластичної течії матеріалу. Це явище розглядається у низці сучасних наукових робіт [1-5]. Підвищення пластичних можливостей матеріалу заготовки особливо помітно для сучасних матеріалів: високоміцних та жорстких Al-сплавів, деформаційне зміцнених сталей та сплавів на основі Ti, Nb, W та інших.

Наступна особливість ЕГ-технології обумовлена низьким екологічним впливом на навколишнє середовище, малим ступенем витрат ресурсів.

ЕГ-технології відрізняються короткими строками та витратами на технологічну підготовку виробництва завдяки використанню лише одного елемента формоутворювального оснащення (інструменту), а роль пуансону виконує вода.

Також важливою особливістю ЕГ-технології є розроблена в останні роки можливість керування енергопотоками, які прикладаються до заготовки. Це особливо важливо при штампуванні крупних листових деталей, які складаються з ділянок, форму яких важко отримати, та ділянок, які практично не потребують прикладання енергії для придання їм необхідної форми.

Для одержання максимального позитивного ефекту від використання вказаних вище особливостей, у першу чергу, необхідно розглянути два компоненти технології послідовного формоутворення заготовки – конструкцію енерговиділяючого компонента (розрядну камеру або розрядний блок) та раціональну послідовність формоутворення різних ділянок деталі. Саме ці компоненти будуть розглянуті у роботі.

Методи досліджень

В роботі використані експериментальні методи ЕГ-формоутворення крупних листових днів, методи системного та функціонального аналізу.

Огляд літератури

Дослідженню процесів імпульсного штампування присвячено велика кількість наукових праць. Їх частковий огляд приведено у роботі [1]. У теперішній роботі основна увага приділяється огляду статей, які відповідають актуальним особливостям електрогідравлічного штампування.

Про підвищення пластичності матеріалу заготовки, яка піддана високошвидкісному навантаженню, писали у середині 60-х років попереднього століття такі дослідники як Рейнхарт Д. та Пірсон Д. Серед сучасних авторів необхідно відзначити огляд Avrilland G. та інші [2]. У цій статті описуються декілька механізмів пояснення цього явища. Підкреслюється, що у силу різних режимів деформування заготовки, на початковому етапі реалізується квазістатичний режим, а на етапі калібрування – режим з високими швидкостями деформування при ударі о поверхню матриці. Тому різні дослідники відзначають як малу так і велику пластичність матеріалу. У висновках цієї роботи відзначено, що підвищена пластичність металів, яка реалізується при ЕГШ, є однією з важливих конкурентних переваг. Також заявлено, що моделювання процесу

високошвидкісного деформування є практично єдиним доступним методом дослідження. У статті приведено декілька прикладів практичного використання методу ЕГШ у мало- та крупносерійному виробництві, яке реалізується фірмою ВМАХ. Але це приклади штампування листових деталей малого розміру. Дано посилання на роботи С.Ф. Головащенко [6, 7], у яких описано використання ЕГШ для штампування автокузовних панелей (деталей) середнього розміру зі сталей та алюмінієвих заготовок.

Дещо інший опис механізму підвищення пластичності при статичному режимі деформування представлений у роботах Р. Дидика та Є. Кузнецова [8]. Вони стверджують, що при створенні у заготовці вібро-пластичного резонансу різко підвищується пластичність металу. Резонанс виникає при співпадінні частот коливань пластичного деформування з частотами імпульсного деформування. Адекватність опису цього механізму підвищення пластичності авторами підтверджено на прикладі волочіння тонкого дроту з важкодеформованих матеріалів. Деформування заготовки у стані вібро-пластичного резонансу до моменту повного дотику заготовки до матриці (інструменту) дозволяє різко знизити рівень остаточних пружних напружень у матеріалі деталі та знизити її жолоблення.

До теперішнього часу мало відомі кількісні значення частот власних коливань пластичної деформації для більшості промислово використовуваних матеріалів. Тому для настройки процесу деформування у стані вібро-пластичного резонансу необхідно вміти керувати частотними характеристиками навантажувальних імпульсів.

Деякі можливості керування параметрами часу навантаження запропоновано у роботах М. Є. Тараненко, О. Г. Наріжного [9, 10]. Ці методи є частиною концепції просторово-часового навантаження при ЕГШ крупних тонколистових деталей. Перший патент цієї концепції отримано у 1991 р. [11]. Часткове викладання методів концепції описано у докторській дисертації М. Тараненко (1996 р.) та монографії [9]. Суть концепції складається у тому, що багатогабаритні листові деталі необхідно штампувати послідовно, за ділянками. Навантажувати заготовку на перших етапах треба таким чином, щоб надати їх проміжну форму, яка є сприятливою для досягнення визначеної цілі (форми, точності, розподілу деформації, стоншення та інші). При цьому слід не допускати появи ділянок з напруженнями стискування для виключення втрати стійкості форми (виникнення зморшок).

Позитивні результати використання цієї концепції при штампуванні крупних листових автокузовних панелей, високоточних параболічних дзеркал антен космічного зв'язку та інших деталей викладено у роботі [9].

Значно пізніше, після сумісних робіт, С. Ф. Головащенко було проведено дослідницькі роботи та запатентовано у США метод та пристрої для попереднього формування металевих листів шляхом набору металу у карманах, які прилеглі до зон з надмірними напруженнями [12]. Судячи за останніми публікаціями ця концепція дає позитивні результати [13].

Інструментальне забезпечення способу послідовного штампування [11] запатентовано в Україні [14] та виконано у вигляді багателектродного розрядного блоку (БРБ) з 46 розрядними порожнинами для 28-контурного ЕГ-пресу ПЕГ-ХАІ-500 [9]. Багатоконтурний генератор цього пресу дозволяє запасати до 500 кДж енергії. Робочий простір пресу 1130×1680 мм. На пресі ПЕГ-ХАІ-500 доступні широкі діапазони просторово-часового керування

навантаженням заготовок. Саме ці можливості керування дають значні переваги методу ЕГШ перед іншими імпульсними методами (вибуховим та магнітно-імпульсною обробки металів).

Широкі технологічні можливості ЕГШ за останні роки представлено у роботах Мамутова В. С., Головащенко С. Ф. та Мамутова А. В. [6, 7, 13], співробітників фірми BMAX [2], Lu X. [16], Ahmed M. [17], Cheng J. [18]. У перерахованих роботах розглядаються різні аспекти формоутворення листових деталей малого та середнього габаритного розмірів, яке можливо реалізувати при виділенні енергії на одній електродній парі у розрядних камерах середнього та великого розмірів.

Формоутворенню методом ЕГШ крупних деталей присвячено цикл робіт М. Є. Тараненко та О. Г. Наріжного [9, 10, 19].

Звернемо увагу, що у більшості наукових статей та докладів підкреслено, що без попереднього моделювання процесів виділення енергії та взаємодії високоенергетичних потоків енергії з заготовкою, що деформується пластично, отримання позитивних результатів техпроцесів штампування практично неможливо.

Питанням вибору та раціонального використання різних методів та комп'ютерних програм присвячено також велика кількість наукових праць. Серед них, за нашою думкою, можна виділити М. Woo [20-23], В. С. Мамутов та А. В. Мамутов [13, 15] та О. Г. Наріжний у співавторстві з М. Є. Тараненко. У цих перерахованих роботах та у багатьох інших авторів визнається найбільш успішним програмний комплекс LS-DYNA разом з методом ALE.

На основі виконаного огляду можна зробити висновок, що процес послідовного локального формоутворення крупних листових деталей залишається менш дослідженим. Більш того, раціональна послідовність штампування, наприклад днищ, залежить від встановлених технічних вимог до деталі або цілі її виготовлення.

Розробити раціональні (оптимальні) техпроцеси штампування можливо за допомогою комп'ютерного моделювання. Для цього можна використовувати програмний комплекс LS-DYNA разом з методом ALE та рівнянням стану `LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK` [26, 27].

Варіанти послідовного формоутворення днищ

Послідовне локальне формоутворення тонколистових багатогабаритних днищ необхідне для виконання різних технічних вимог (ТВ) до їх якості. Саме при штампуванні таких деталей складно виконати ТВ із-за дуже малих значень відношення товщини стінки деталі до діаметру заготовки або діаметру її частини, що провисає. Мала відносна товщина сприяє інтенсивному виникненню зморшок на фланцевій та купольній частинах напівфабрикату та пониженій точності поверхні деталі.

При рівномірному імпульсному навантаженні тиском частини заготовки, що провисає, у силу особливостей пластичної течії матеріалу максимальні деформації стоншення зосереджуються у центрі деталі та можуть перевищувати критичні значення (рис. 1). На початковому етапі деформування I внаслідок дії стискальних напружень на периферійній частині куполу та фланці утворюються зморшки (рис. 1, в). Ці дві системи зморшок не залежать одна від іншої, але вони викликані однією причиною – дією стискальних напружень.

На другому етапі деформування II, після доторкання заготовки до поверхні

матриці можливість збільшення кількості купольних зморшок зменшується. Але інтенсифікуються деформації стоншення у центральній частині деталі внаслідок обмеження можливості підтягування матеріалу з периферійних зон.

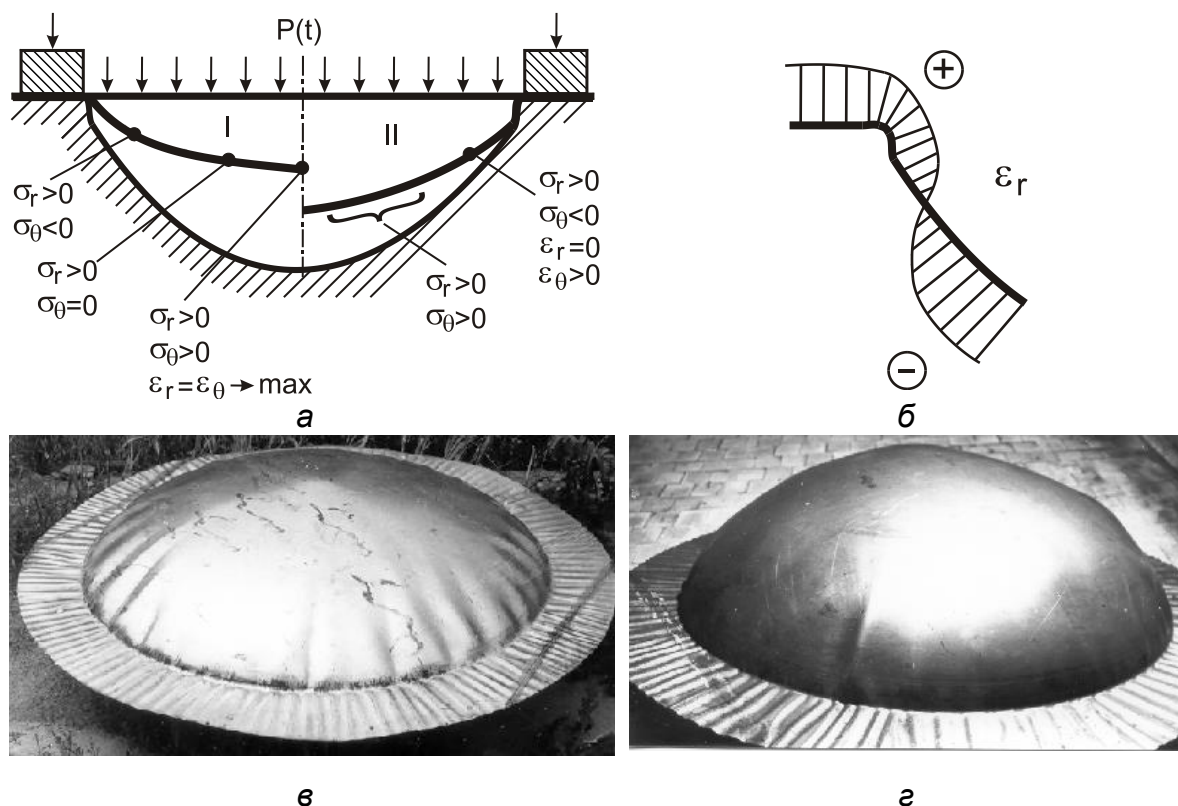


Рис. 1 – Принципіальна схема штампування-витягування великогабаритного днища імпульсним тиском за всією поверхнею заготовки:
 а – розподіл за етапами I та II напружень та деформацій; б – епюра радіальних деформацій ϵ_r на фланцевій ділянці та зоні куполу, що наближена до фланцю; в – форма заготовки після центрального навантаження. Діаметр витягувального ребра матриці – 1050 мм, матеріал – Х18Н9Т товщиною 1,6 мм. Можна бачити два зварювальних шва на фланцях. Початковий $\varnothing$ заготовки – 1480 мм;
 г – проміжна форма заготовки перед калібруванням після послідовного локального навантаження в районі центральної лінії. Початковий $\varnothing$ заготовки – 1540 мм; товста лінія – заготовка. На наступних етапах деформування розтягнути купольні зморшки достатньо складно (рис. 1, г).

Наступною складністю штампування-витягування є нерівномірне витягування фланцю заготовки із зони притискання вздовж периметру заготовки. Це призводить до браку (рис. 2).

Практично єдиним методом боротьби з браком є локальне навантаження заготовки у зонах мінімального витягування фланцю при постійному контролі цього параметру. Деякі засоби контролю цього параметру розглянуто у роботі [9].

При імпульсному локальному навантаженні у центральній зоні крупної тонколистової заготовки



Рис. 2 – Приклад браку при нерівномірному витягуванні фланцю [9]

спочатку починає деформуватися зона, яка знаходиться у епіцентрі зони навантаження (рис. 3, а, зона I). Хвиля згину розповсюджується у напрямку периферії заготовки. У прифланцевій зоні, на практичне не зігнуту заготовку починають діяти широтні стискальні напруження, які подібні випадку статичного штампування (рис. 1, в). Ці напруження виникають саме у зонах віддалених від жорстких опор (перетягальних ребр матриці), а необперті зони заготовки мають малу жорсткість. Для підвищення жорсткості таких ділянок заготовку потрібно викривити та зміцнити деформаційно. Для цього на першому етапі заготовку необхідно сформувати вздовж всього периметру прифланцевої зони (рис. 3, б). При цьому центральна частина залишається практично плоскою (II). Моделювання процесу імпульсного локального навантаження та формозміни заготовки описано у роботах [25, 26, 27]. Симуляція процесу розповсюдження деформацій при центральному локальному навантаженні показана на рис. 3, в.

На ньому видно як головні деформації розповсюджуються у вигляді хвиль від епіцентру навантаження до периферії. Моделювання проведено з використанням програмного продукту LS DYNA та методу ALE.

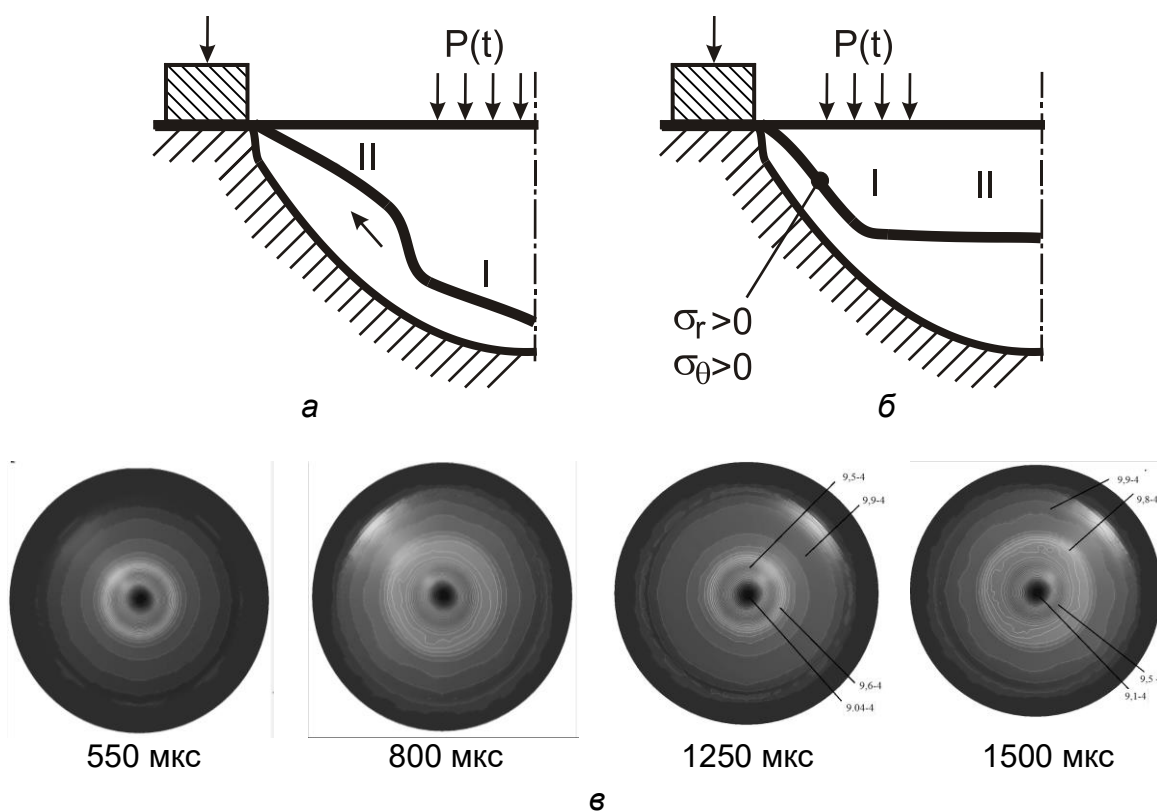


Рис. 3 – Принципова схема формоутворення заготовки для виготовлення багатогабаритного днища при локальному імпульсному навантаженні: а – у центрі заготовки; б – у локальній зоні у периферії заготовки; в – характер зміни деформацій стоншення при імпульсному навантаженні заготовки на дистанції $h=20$ мм ($0,5d_k$). Цифрами при виносках показано значення відносних логарифмічних деформацій стоншення

Далі, повторюючи цю послідовність навантаження за 2-3 етапи (в залежності від співвідношень розмірів зони навантаження та діаметру заготовки),

деформують заготовку до практично повного доторкання до твердої поверхні матриці. Заключним етапом є калібрування, при якому заготовка навантажується за всією поверхнею.

Приклад відштампованого за описаної послідовністю напівеліптичного днища діаметром 1350 мм показано на рис. 4.

Характерний приклад розподілу логарифмічної деформації стінки днища, яка одержана при формоутворенні деталі $\varnothing 1070$ мм та глибиною 415 мм зі сталі 08кп на етапі деформування перед калібруванням показаний на рис. 5. На діаметральному перерізі видно, що при позацентровому навантаженні різко знижується стоншення у центрі при більш рівномірному розподілі стоншення вздовж радіусу. На широтному перерізі (діаметр позацентрового навантаження $\sim 0,6$ діаметру деталі) можна спостерігати нерівномірність деформацій у залежності від кроку локальних навантажень.



Рис. 4 – Напівеліптичне днище $\varnothing 1350$ мм, глибина 170 мм, товщина 1,6...2,0 мм. Матеріал – сталь 30. Енергія: 50 розрядів $\times 36$ кДж; $U_0 = 36$ кВ

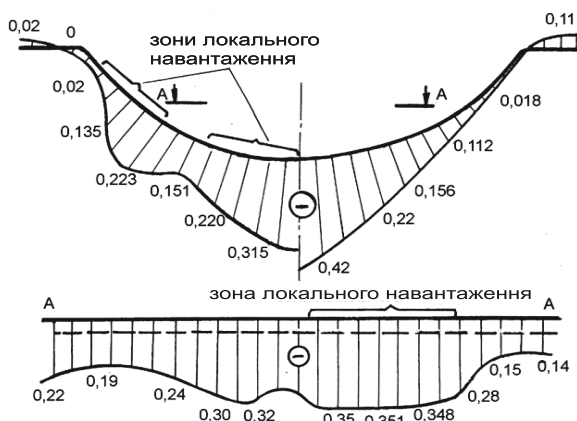


Рис. 5 – Розподіл логарифмічних деформацій стоншення при локальному послідовному навантаженні за всією поверхнею (зліва) та центральному навантаженні (справа) днища діаметром 1070 мм, глибиною 415 мм зі сталі 08кп товщиною 1,6 мм. Діаметральний переріз – зверху, широтний переріз – знизу. Жирна лінія – профіль деталі,

пунктирна лінія – розподіл ε_s у широтному напрямку при позацентровому навантаженні. Показана частина периметру

Ця нерівномірність одержана експериментально та обумовлена технічними можливостями керування кроком.

З показаного результату експерименту виходить, що:

- позацентрове навантаження заготовки при штампуванні відносно тонкого крупного днища дозволяє знизити деформації у небезпечній зоні у 1,3 рази;
- проявилася можливість керування рівномірністю деформацій стоншення шляхом зміни кроку локального навантаження вздовж периметру, а також розмірами зони локального навантаження;
- експериментальна обробка подібних техпроцесів штампування є достатньо складною та ресурсовитратною. Її можна використовувати тільки лише

після адекватного комп'ютерного моделювання.

Розглянемо декілька варіантів послідовності локального навантаження для виконання різних технічних вимог, які висуваються до деталей.

Варіант 1. Виготовлення днища з рівномірним за шириною фланцем та мінімальною за розмірами заготовкою. Необхідна послідовність штампування за зонами: 1 – 2 – 3. В залежності від глибини деталі можливо повторення послідовності (рис. 6).

Навантаження зони 1 – центрування заготовки відносно матриці. Результат: невеликий прогин центральної частини практично без витягування фланцю.

Навантаження зони 2 – інтенсифікація витягування фланцю з контролем переміщення вздовж периметру, огинанням перетягального ребра матриці та її вхідної частини. При цьому периферія заготовки стає більш жорсткою.

Навантаження зони 3 – основна частина формоутворення деталі. При необхідності слід повторити цю послідовність.

Описана схема формоутворення днищ може бути використана для виготовлення деталей зниженої та середньої точності за діаметром, глибиною та перерізом з допуском 0,5...1,2 мм в залежності від габаритів. Для виготовлення днищ високої та надвисокої точності з допуском 0,01...0,005 мм необхідно використовувати іншу схему штампування – двоперехідну з використанням двох комплектів оснащення.

Варіант 2. При виготовленні параболічних дзеркал антен космічного зв'язку, які являють собою днища з такими технічними умовами, та надвисокої точності, необхідно враховувати вплив на розміри увігнутої або випуклої поверхонь деталі. Крім того, до таких деталей висувають вимоги мінімізації області фокусу поверхні (саме області, а не точки). Ця вимога виконується при мінімальному жолобленні штампованого днища. З цього випливає, що поверхня, яка задає форму заготовки повинна бути випуклою. Ця вимога може бути виконана рідко двома схемами.

Першій схемі – обтяжка увігнутої частини деталі за опуклою оснасткою та отримання необхідного профілю деталі шляхом витяжки фланцевої частини заготовки (рис. 7, а). У цьому варіанті плоска заготовка укладається на матрицю, притискається до неї за фланцевою частиною і деформується імпульсним навантаженням, що створюється груповими ЕГ-розрядами над зоною, що провисає. Шляхом витяжки матеріалу з-під притискного оснащення відбувається формоутворення борту деталі та зони його переходу до купольної частини. Висота ділянки зчленування борту і купола щодо центральної точки останнього для дзеркал діаметром 900...2800 мм становить $H=180\ldots290$ мм, що досить багато і для деяких малопластичних матеріалів та може виявитися більшою за граничну. Операція проводиться на одній оснастці.

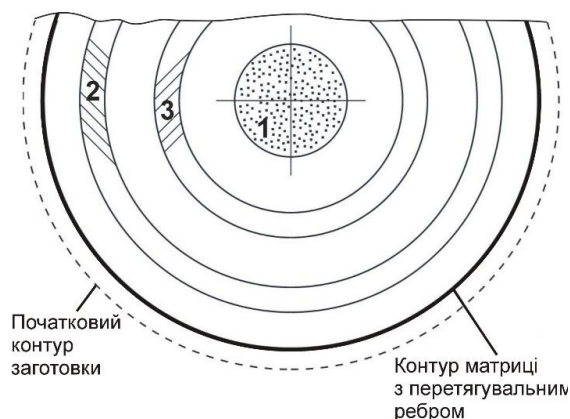


Рис. 6 – Графічна інтерпретація послідовності навантаження округлої заготовки при ЕГ-штампуванні. Цифри позначають номери зон навантаження

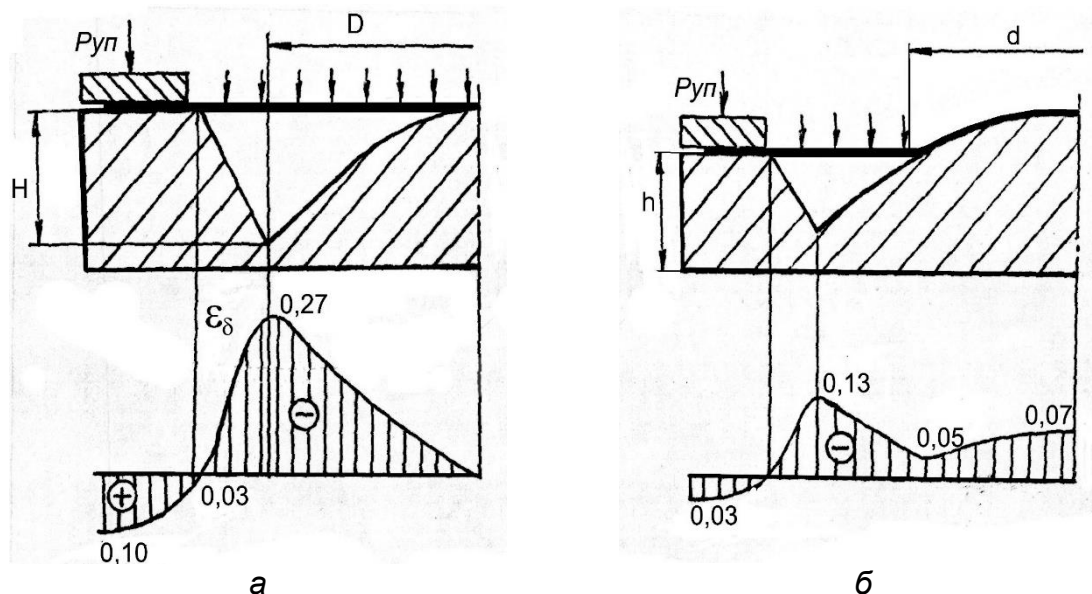


Рис. 7 – Варіанти штампування параболічних дзеркал (ε_δ – експериментальні значення деформацій стоншення для дзеркал $\varnothing 900$ мм та товщиною 2,0 мм з матеріалу Д16АМ):

а – витягування з плоскої заготовки; б – витягування з попередньо деформованого напівфабрикату

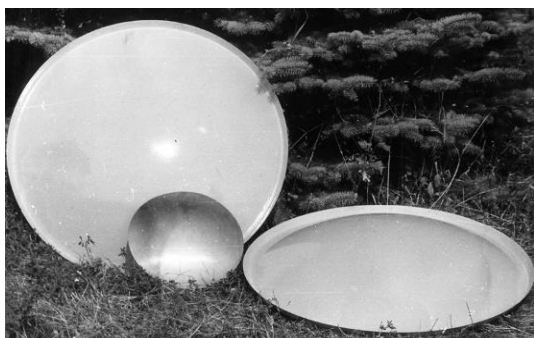
У другій схемі (рис. 7, б) на першому переході в центральній частині заготовки формується купол діаметром d і глибиною, що дорівнює різниці глибини деталі H і величини h . Формування купола проводиться в найпростіше матричне кільце за прямою схемою навантаження. Потім штампований напівфабрикат перевертають, на другому переході встановлюють куполом на виступаючу частину матриці, притискають фланцеву частину і натягують імпульсним навантаженням на всю поверхню опуклої частини матриці, формуючи борт і зону його зчленування з куполом деталі. У цьому випадку необхідне найпростіше додаткове оснащення (матричне кільце) для здійснення першого переходу.

Порівняльні розрахунки параметрів деформування для деталі 900 мм за другим варіантом показують:

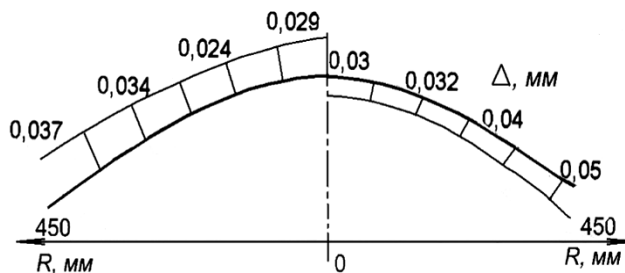
- робота деформації на етапі надання остаточної форми в 4,15 рази менше, ніж у першому варіанті, а повна робота деформації з урахуванням попереднього деформування купола – менше в 2,7 рази, що суттєво позначається на витраті енергії для штампування деталі та тривалості циклу штампування;

- необхідний діаметр заготовки та потрібне зусилля притискання фланцю менше, ніж у першій схемі, на 8...12 % та 25...28 % відповідно (для різних товщин та матеріалів).

Експериментальне відпрацювання техпроцесу проводилося у Національному аерокосмічному університеті на пресі ПЕГ-ХАІ-500 з використанням 28-електродного розрядного блоку кільцевої архітектури. Параболічні дзеркала $\varnothing 250$ мм виготовлялися на пресі ПЕГ-25 (рис. 8).



а



б

Рис. 8 – Приклад виготовлених параболічних дзеркал методом ЕГШ:
 а – зовнішній вигляд відштампованих параболічних дзеркал $\varnothing 900$ мм та 270 мм;
 б, зліва – розподіл відносних деформацій стоншення вздовж радіусу; б, справа – значення відхилення профілю деталі від профілю матриці Δ

Якість виготовлених деталей $\varnothing 900$ мм дослідної партії задовольняли висунутим вимогам:

- відхилення увігнутої поверхні від профілю матриці були у межах 0,03...0,05 мм, а відносні значення стоншення – у діапазоні 0,029...0,04;
- радіотехнічні вимірювання якості таких дзеркал показали, що вони мають середній коефіцієнт посилення $39,7 \pm 1,2$ дБ для робочої частоти 12,2 ГГц (при ширині діаграми спрямованості за рівнем 3 дБ – 1,8 градуса).

Такі високі показники якості визначаються низькими значеннями деформацій стоншення та їх високою рівномірністю за поверхнею деталі. Це з саме визначає мінімальне жолоблення деталі.

Недоліком другої схеми техпроцесу є необхідність виготовлення другого комплекту технологічного оснащення для вільного формування напівфабрикату, яке рекомендується виконувати на ЕГ-пресі.

Висновки

1. Аналіз процесу формоутворення при рівномірному навантаженні за поверхнею тонколистових крупних днищ показав особливості виникнення та зміни напружено-деформованого стану заготовки, які призводять до виникнення браку та обмежують більш повне використання пластичних можливостей матеріалу заготовки.

Показано, що локальне послідовне імпульсне ЕГ-навантаження дозволяє у значній мірі усунути вплив шкідливих особливостей процесу формозміни круглих днищ.

2. Запропоновано варіанти послідовного локального ЕГ-навантаження, які задовольняють різним висунутим вимогам, а саме – мінімальному стонщенню у центрі, точності різних поверхонь, мінімальним витратам ресурсів.

3. Технологічна складність процесу локального послідовного формоутворення потребує комп'ютерного моделювання багатоімпульсного навантаження та пластичного деформування заготовки для оптимізації ряду технологічних параметрів (кроку та енергії локальних імпульсів, розмірів та інше).

Напрямки подальшого дослідження та недоліки роботи

1. У роботі не приведено та при експериментальному відпрацюванні не

досліджувались механічні характеристики матеріалів, які штампуються.

2. У роботі не приведена статистична обробка експериментальних даних. Це може бути прояснено обмеженими ресурсами часу виконавців та супутніми матеріальними витратами.

Напрямок подальших досліджень автори вважають розробку обчислювального процесу при комп'ютерному моделюванні для оптимізації технологічних параметрів послідовного локального ЕГ-навантаження з урахуванням висунутих вимог до якості виробів.

Другою задачею автори вважають створення методики оцінки точності та адекватності синтезованих моделей.

Список літератури

1. Високошвидкісні методи обробки металів тиском [Текст] : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / В. А. Тітов [та ін.] ; за заг. ред. проф., д-ра техн. наук Тітова В. А. - К. : КВІЦ, 2010. - 304 с. : табл., рис. - Бібліогр.: с. 294-299. - 300 прим. - ISBN 978-966-2003-59-8.

2. Avriilaud, G., Mazars, G., Cantergiani, E., Beguet, F., Cuq-Lelandais, J.-P., Deroy, J. Examples of How Increased Formability through High Strain Rates Can Be Used in Electro-Hydraulic Forming and Electromagnetic Forming Industrial Applications. J. Manuf. Mater. Process. 2021, 5, 96. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030096>.

3. Daehn, G.; Vohnout, V.J.; Datta, S. Hyperplastic forming: Process potential and factors affecting formability. MRS Online Proc. Libr. 1999, 601. <https://link.springer.com/article/10.1557/PROC-601-247>.

4. Jenab, A., Green, D. E., Alpas, A. T., Golovashchenko, S. F. Experimental and numerical analyses of formability improvement of AA5182-O sheet during electro-hydraulic forming. J. Mater. Process. Technol. 2018, V. 255, 914–926. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013617306283?via%3Dihub>.

5. Demir, K., Goyal, S., Hahn, M., Tekkaya, E. Novel approach and interpretation for the determination of electromagnetic forming limits. Materials 2020, 13, 4175. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/18/4175> <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32961805/>.

6. Golovashchenko, S. Hydromechanical Drawing Process and Machine, Ford Global Technologies. Patent US 9,375,775, 28 June 2016.

7. Avriilaud, G., Mercier, R. Method for Electrohydraulic Forming and Associated Device. Patent WO2018091481, 24 May 2018.

8. Дідик, Р. П. Фізичні основи міцності : підручник [Текст] / Р. П. Дідик, Є. В. Кузнецов і В. М. Забара. // Д. : Наука та освіта, 2005. - 608 с. ISBN 966-7191-95-8.

9. Электрогидравлическая штамповка : теория, оборудование, техпроцессы [Текст] : монография в 2 ч. / М. Е. Тараненко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 272 с.

10. M. Taranenko and O. Naryzhnyi. Modelling of the process of interaction of multi-impulse local loading at electrohydraulic forming of large-dimensional bottoms // Mech. Adv. Technol., Vol. 9, No. 1(104), pp. 22–31, Mar. 2025, doi:10.20535/2521-1943.2025.9.1(104).314726.

11. Патент 4700 Україна. М. кл B21D26/06. Спосіб штамповки днищ. заявл. 08.06.90; опубл. 28.12.94. Бюл. № 7-1.

12. Golovashchenko, S. F. Method and Apparatus for Making a Part by First

Forming an Intermediate Part that Has Donor Pockets in Predicted Low Strain Areas Adjacent to Predicted High Strain Areas. U.S. Patent 9, 522, 419B2, 20, December 2016.

13. Mamutov, A. V., Golovashchenko, S. F., Bessonov, N. M., Mamutov, V. S. Electrohydraulic Forming of Low Volume and Prototype Parts: Process Design and Practical Examples. J. Manuf. Mater. Process. 2021, 5, 47. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020047>.

14. Патент 4701 Україна. М.кл. B21D26/12. Устройство для ЭГШ; заявл. 29.03.91, опубл. 28.12.94. Бюл. № 1.

15. Viacheslav S. Mamutov, Xenia S. Arsentyeva, Ivan V. Kalatozishvili. Pressure on Thin Sheet Blank in Discharge Chamber During Electrohydropulsed Stamping / 2023, Lecture Notes in Mechanical Engineering Advances in Mechanical Engineering, p. 49-56. DOI: 10.1007/978-3-031-30027-1_7.

16. Xin Lua, Hong Jinb. Combined process of hydroforming and electrohydraulic precision reshaping for aluminium alloy / 17th International Conference on Metal Forming, Metal Forming 2018, 16-19 September 2018, Toyohashi, Japan // Procedia Manufacturing, 15 (2018), 907–914. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.406.

17. Meraj Ahmed, Archit Shrivastava, D. Ravi Kumar, Mashuq un Nabi. Optimization of process parameters for energy-efficient electro-hydraulic forming of Al-Mg alloy sheets / February 2020 // Advances in Materials and Processing Technologies 6(3):1-17. DOI:10.1080/2374068X.2020.1731228.

18. Jia Cheng, Daniel E. Green, Sergey F. Golovashchenko, Formability enhancement of DP600 steel sheets in electro-hydraulic die forming / Journal of Materials Processing Technology // Volume 244, 2017, Pages 178-189, ISSN 0924-0136. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.027>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013617300274>.

19. M. Taranenko and O. Naryzhnyi. Modelling of the process of interaction of multi-impulse local loading at electrohydraulic forming of large-dimensional bottoms // Mech. Adv. Technol., Vol. 9, No. 1(104), pp. 22–31, Mar. 2025, doi:10.20535/2521-1943.2025.9.1(104).314726.

20. Mina Woo, Woo-Jin Song, Beom-Soo Kang, Jeong Kim. Acquisition and Evaluation of Theoretical Forming Limit Diagram of Al 6061-T6 in Electrohydraulic Forming Process, Metals, 2019, 9, 401; doi:10.3390/met9040401.

21. Mina Woo, Young-Hoon Moon, Woo-Jin Song, Beom-Soo Kang, Jeong Kim. Acquisition of Dynamic Material Properties in the Electrohydraulic Forming Process Using Artificial Neural Network, Materials, 2019, 12, 3544; doi:10.3390/ma12213544.

22. Woo, MA., Song, WJ., Kang, BS. et al. Evaluation of formability enhancement of aluminum alloy sheet in electrohydraulic forming process with free-bulge die. Int J Adv Manuf Technol 101, 1085–1093 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2989-3>.

23. Mina Woo, Kyunghoon Lee, Woojin Song, Beomsoo Kang, and Jeong Kim. Numerical Estimation of Material Properties in the Electrohydraulic Forming Process Based on a Kriging Surrogate Model / Hindawi, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2020, Article ID 3219829, 12 pages, <https://doi.org/10.1155/2020/3219829>.

24. Тараненко, М. Є. Підтримка точності значень керуючих параметрів електрогідравлічного навантаження при штамповці з просторово-часовим керуванням / М. Є. Тараненко, Н.В. Кобріна // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2023. – № 99, С. 32-48.

<https://doi.org/10.32620/oikit.2023.99.07>.

25. M. Taranenko. Operational Experience of Electrohydraulic presses for stamping large-dimensional sheet parts / Taranenko Mykhaylo, Naryzhniy Olexandr, Zastela Olexandr, Wang Zhexin // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2025. – № 103, С. 70-84, doi:10.32620/oikit.2025.103.06.

26. Тараненко М. Є., Наріжний 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:10.37142/2076-2151/2022-1(51)98.

27. Mykhaylo Taranenko, Oleksandr Naryzhniy. Modelling the Process of Interaction of a Pulsed Jet with a Workpiece by Electrohydraulic Forming // ICTM 2021: Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021, First Online: 21 February 2022, Vol. 367, pp 484–496, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-94259-5_41.

References

1. Visokoshvidkisni metodi obrobki metaliv tiskom [Tekst] : pidruch. dlya stud. vish. navch. zakl. / V. A. Titov [ta in.] ; za zag. red. prof., d-ra tehn. nauk Titova V. A. - K. : KVIC, 2010. - 304 s. : tabl., ris. - Bibliogr.: s. 294-299. - 300 prim. - ISBN 978-966-2003-59-8.

2. Avriilaud, G.; Mazars, G.; Cantergiani, E.; Beguet, F.; Cuq-Lelandais, J.-P.; Deroy, J. Examples of How Increased Formability through High Strain Rates Can Be Used in Electro-Hydraulic Forming and Electromagnetic Forming Industrial Applications. J. Manuf. Mater. Process. 2021, 5, 96. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030096>.

3. Daehn, G., Vohnout, V. J., Datta, S. Hyperplastic forming: Process potential and factors affecting formability. MRS Online Proc. Libr. 1999, 601. <https://link.springer.com/article/10.1557/PROC-601-247>.

4. Jenab, A., Green, D. E., Alpas, A. T., Golovashchenko, S. F. Experimental and numerical analyses of formability improvement of AA5182-O sheet during electrohydraulic forming. J. Mater. Process. Technol. 2018, V.255, 914–926. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013617306283?via%3Dihub>.

5. Demir, K.; Goyal, S.; Hahn, M.; Tekkaya, E. Novel approach and interpretation for the determination of electromagnetic forming limits. Materials 2020, 13, 4175. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/18/4175>. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32961805/>.

6. Golovashchenko, S. Hydromechanical Drawing Process and Machine, Ford Global Technologies. Patent US 9,375,775, 28 June 2016.

7. Avriilaud, G.; Mercier, R. Method for Electrohydraulic Forming and Associated Device. Patent WO2018091481, 24 May 2018.

8. Didik, R. P.. Fizichni osnovi micnosti : pidruchnik [Tekst] / R. P. Didik, Ye. V. Kuznecov i V. M. Zabara. // D.: Nauka ta osvita, 2005. - 608 s. ISBN 966-7191-95-8.

9. Elektrogidravlicheskaya shtampovka : teoriya, oborudovanie, tehprocessy [Tekst] : monografiya v 2 ch. / M. E. Taranenko. // H. : Nac. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «Hark. aviac. in-t», 2011. – 272 s.

10. M. Taranenko and O. Naryzhniy. Modelling of the process of interaction of multi-impulse local loading at electrohydraulic forming of large-dimensional bottoms // Mech. Adv. Technol., Vol. 9, No. 1(104), pp. 22–31, Mar. 2025, doi:10.20535/2521-

1943.2025.9.1(104).314726.

11. Patent 4700 Ukraina. M.kl V21D26/06. Sposob shtampovki dnish. zayavl. 08.06.90; opubl. 28.12.94. Byul. № 7-1.

12. Golovashchenko, S. F. Method and Apparatus for Making a Part by First Forming an Intermediate Part that Has Donor Pockets in Predicted Low Strain Areas Adjacent to Predicted High Strain Areas. U.S. Patent 9, 522, 419B2, 20, December 2016.

13. Mamutov, A. V., Golovashchenko, S. F., Bessonov, N. M., Mamutov, V. S. Electrohydraulic Forming of Low Volume and Prototype Parts: Process Design and Practical Examples. J. Manuf. Mater. Process. 2021, 5, 47. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020047>.

14. Patent 4701 Ukraina. M.kl. V21D26/12. Ustrojstvo dlya EGSh; zayavl. 29.03.91, opubl. 28.12.94. Byul. № 1.

15. Viacheslav S. Mamutov, Xenia S. Arsenyeva, Ivan V. Kalatozishvili. Pressure on Thin Sheet Blank in Discharge Chamber During Electrohydropulsed Stamping / 2023, Lecture Notes in Mechanical Engineering Advances in Mechanical Engineering, p. 49-56. DOI: 10.1007/978-3-031-30027-1_7.

16. Xin Lua, Hong Jinb. Combined process of hydroforming and electro hydraulic precision reshaping for aluminium alloy / 17th International Conference on Metal Forming, Metal Forming 2018, 16-19 September 2018, Toyohashi, Japan // Procedia Manufacturing, 15 (2018), 907–914. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.406.

17. Meraj Ahmed, Archit Shrivastava, D. Ravi Kumar, Mashuq un Nabi. Optimization of process parameters for energy-efficient electro-hydraulic forming of Al-Mg alloy sheets / February 2020 // Advances in Materials and Processing Technologies 6(3):1-17. DOI:10.1080/2374068X.2020.1731228.

18. Jia Cheng, Daniel E. Green, Sergey F. Golovashchenko, Formability enhancement of DP600 steel sheets in electro-hydraulic die forming / Journal of Materials Processing Technology // Volume 244, 2017, Pages 178-189, ISSN 0924-0136. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.027>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013617300274>.

19. M. Taranenko and O. Naryzhniy. Modelling of the process of interaction of multi-impulse local loading at electrohydraulic forming of large-dimensional bottoms // Mech. Adv. Technol., Vol. 9, No. 1(104), pp. 22–31, Mar. 2025, doi:10.20535/2521-1943.2025.9.1(104).314726.

20. Mina Woo, Woo-Jin Song, Beom-Soo Kang, Jeong Kim. Acquisition and Evaluation of Theoretical Forming Limit Diagram of Al 6061-T6 in Electrohydraulic Forming Process, Metals, 2019, 9, 401; doi:10.3390/met9040401.

21. Mina Woo, Young-Hoon Moon, Woo-Jin Song, Beom-Soo Kang, Jeong Kim. Acquisition of Dynamic Material Properties in the Electrohydraulic Forming Process Using Artificial Neural Network, Materials, 2019, 12, 3544; doi:10.3390/ma12213544.

22. Woo, MA., Song, WJ., Kang, BS. et al. Evaluation of formability enhancement of aluminum alloy sheet in electrohydraulic forming process with free-bulge die. Int J Adv Manuf Technol 101, 1085–1093 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2989-3>.

23. Mina Woo, Kyunghoon Lee, Woojin Song, Beomsoo Kang, and Jeong Kim. Numerical Estimation of Material Properties in the Electrohydraulic Forming Process Based on a Kriging Surrogate Model / Hindawi, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2020, Article ID 3219829, 12 pages, <https://doi.org/10.1155/2020/3219829>.

24. Taranenko, M. Ye. Pidtrimka tochnosti znachen keruyuchih parametriv elektrogidrav-lichnogo navantazhennya pri shtampovci z prostорово-chasovim keruvannyam / M. Ye. Taranenko, N.V. Kobrina // Vidkriti informacijni ta komp'yuterni integrovani tehnologiyi. – 2023. – № 99, S. 32-48. <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.99.07>.

25. M. Taranenko. Operational Experience of Electrohydraulic presses for stamping large-dimensional sheet parts / Taranenko Mykhaylo, Naryzhniy Olexandr, Zastela Olexandr, Wang Zhexin // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2025. – № 103, С. 70-84, doi:10.32620/oikit.2025.103.06.

26. Taranenko M. Ye., Narizhnij O. G. Keruvannya parametrami EG-navantazhennya dlya shtampuvannya listovih detalej z minimalnim zholoblennnyam // Obrobka materialiv tiskom. Materials working by pressure, 2022. № 1(51), S. 98-109, doi:10.37142/2076-2151/2022-1(51)98.

27. Mykhaylo Taranenko, Oleksandr Naryzhniy. Modelling the Process of Interaction of a Pulsed Jet with a Workpiece by Electrohydraulic Forming // ICTM 2021: Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021, First Online: 21 February 2022, Vol. 367, pp 484–496, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-94259-5_41.

Надійшла до редакції 21.08.2025, розглянута на редколегії 21.08.2025

Target sequence of local electrohydraulic stamping of large sheet metal parts

This article considers the sequence of local loading required for various technical requirements in electrohydraulic forming of large-sized sheet bottoms. Electrohydraulic forming technologies for relatively small sheet parts are widely known. In such technologies, the energy release technology is created on one electrode pair, which allows for the deformation of small parts. Original electrohydraulic presses with high stored energy (up to 500 kJ) have been developed, which allows for the release of energy simultaneously in many zones of the working space above the workpiece. And this, in turn, allows the workpiece to be loaded only in certain zones.

Various technical requirements may be imposed on large sheet bottoms, i.e. limiting the deformation of thinning in certain zones, minimal elastic grooving of the part or especially high accuracy of its surface.

A comparative analysis of the stress-strain state at the initial and subsequent stages of forming large-sized round bottoms under different variants of the sequence of pulse loading was carried out. With pulse loading, which is uniform over the entire surface of the workpiece, compression zones appear in the flange zones, which leads to the appearance of wrinkles. As well as to the accumulation of thinning deformations in the center of the part. These harmful features of the process limit the technological capabilities of electrohydraulic stamping. With pulsed local loading of the flange part of the workpiece at the first stages of forming, the workpiece bends itself in this part, which makes its shape more rigid and partially leads to strengthening of the material in this part. This reduces the likelihood of wrinkles. At the subsequent stages, the deformation of the load is carried out in the central zone, which ensures a decrease in thinning deformations in the dangerous zone. This technology for forming bottoms with a diameter of more than a meter was tested experimentally and the positive results of these experiments are given in the work.

The proposed technology allows for the manufacture of large sheet metal parts of not very high accuracy, but when using one forming element of the equipment at one workplace.

For the manufacture of especially precise bottoms, for example, mirrors of space communication antennas, a double-stage manufacturing technology is proposed. With this technology, the workpiece is pre-freely formed to a certain deflection in the center under the action of local electro-hydraulic load on simple technological equipment. At the second stage, the peripheral zones of the workpiece are formed on a partially convex tooling. The results of the stamping process of antenna mirrors with a diameter of 250 and 900 mm are shown. The deviation from the parabolic surface of the matrix was 0.03...0.05 mm. Other positive properties of such a technological process are given.

As a result of the research, a rational sequence of local loading was proposed for some variants of the requirements. Some variants of the development were confirmed experimentally. A direction of mathematical modeling of the process was proposed. The purpose of the work is to establish a rational sequence of local loading to fulfill the proposed technical requirements during one technological operation.

Keywords: electrohydraulic forming, large sheet metal parts, sequence of local loading, multi-electrode discharge unit.

Відомості про авторів:

Тараненко Михайло Євгенович – доктор технічних наук, професор, кафедра автомобілей та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, e-mail: m.taranenko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-3819-6948

Нарижний Олександр Георгійович – кандидат технічних наук, доцент каф. 202 теоретичної механіки, механоведення та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, тел. (050)040-297-50, e-mail: o.naryzhniy@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5379-1964.

Дзесінь Ван – аспірант кафедри технології виробництва авіаційних двигунів Національного аерокосмічного «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, ел. пошта: z.v.wang@khai.edu, ORCID 0000-0001-6171-1824.

About the Authors:

Taranenko Mykhaylo – Full Professor of Technical Sciences, Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University “Kharkiv aviation institute”, Kharkiv, tel.: (057) 788-41-70, e-mail: m.taranenko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-3819-6948.

Naryzniy Oleksandr – candidate of engineering sciences, associate professor of Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv aviation institute”, Kharkiv, e-mail: o.naryzhniy@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5379-1964.

Zhexin Wang – assistant department of aircraft engine production technology National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, e-mail: z.v.wang@khai.edu, ORCID 0000-0001-6171-1824.