

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Для службового користування

Прим. № \_\_\_\_

**ШКАЛОВА Алла Володимирівна**

УДК 621.7.044

**ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ  
ДЛЯ ІМПУЛЬСНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

**Автореферат**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата технічних наук**

Харків – 2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є.Жуковського  
“Харківський авіаційний інститут” Міністерства освіти і науки України, м.Харків

Науковий керівник      Заслужений винахідник України, лауреат Державної премії України і Премії РМ СРСР, доктор технічних наук, професор, Борисевич Володимир Карпович,  
Міжнародний інститут нових технологій і матеріалів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", м. Харків, директор

Офіційні опоненти:      Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України, доктор технічних наук, професор, Мовшович Олександр Якович,  
Харківський науково-дослідний інститут технології машинобудування Міністерства промислової політики України, заступник директора

доктор технічних наук, доцент  
Драгобецький Володимир В'ячеславович,  
Кременчуцький Державний політехнічний університет  
Міністерства освіти і науки України, м. Кременчук,  
професор кафедри технології машинобудування

Провідна установа      Державне підприємство "Завод ім. В.О. Малишева" Міністерства промислової політики України, м. Харків

Захист відбудеться “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2004 р. у \_\_\_ годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.10 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Україна, 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2004 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої  
Бортовой В.В.

вченої

ради

Д64.050.10



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Рівень науково-технічного розвитку будь-якої країни, конкурент–ноздатність продукції, що випускається, і добробут трудящих залежать, у першу чергу, від наявності високих промислових технологій.

До таких високих промислових технологій відносяться і технології імпульсної металообробки, за допомогою яких можна здійснювати листове й об'ємне штампування, покриття виробів різноманітними захисними та зміцнюючими матеріалами, одержувати багат шарові метали, у тому числі труби, нові матеріали, у тому числі з заздалегідь заданими спеціальними властивостями, а також здійснювати ряд інших оригінальних технологічних процесів так необхідних у даний час сучасній аерокосмічній промисловості і машинобудуванню, і які неможливо виконати іншими способами. При цьому особливо важливим є те, що ці технології здійснюються за допомогою дешевих енергоносіїв на простому устаткуванні замість унікальних дорогих і вже, здебільшого, зношених пресах, молотах і іншому устаткуванні, яке необхідно купувати за кордоном.

Переваги імпульсної металообробки в більшості випадків, особливо при виробництві складних, великогабаритних деталей з листових високоміцних труднодеформуємих матеріалів, що, в основному, застосовуються в авіаційній промисловості, очевидні.

Доцільність застосування в машинобудуванні імпульсних методів металообробки підтверджена багаторічними дослідженнями у Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є.Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Науково–дослідному інституті елек–трозварювання ім.Є.О.Патона НАН України, у Науково–дослідному інституті авіаційних технологій, Науково–дослідному інституті технології двигунобудування Мінавіапрому, Сибірському відділенні АН Росії та в інших вітчизняних і закордонних організаціях.

Застосування імпульсного об'ємного штампування в машинобудуванні могло б звільнити частину ще існуючого на підприємствах України унікального парку ковальсько-пресового устаткування для здійснення інших видів обробки металів тиском, наприклад, для холодного і гарячого об'ємного штампування. Однак для того щоб вийти на передовий конкурентноздатний рубіж виробництва цих виробів і завоювати хоч малу частку ринку машинобудівної продукції, так необхідній Україні, потрібно придбати ще велику кількість нового й унікального устаткування. Це, звичайно, для нашої країни на сучасному етапі неможливо. Тому потрібно знаходити нові шляхи і технології для виробництва об'ємних заготовок. Таким шляхом може бути застосування імпульсних технологій для об'ємного штампування. Тому поставлена в роботі задача про необхідність розробки процесів і устаткування для імпульсного об'ємного штампування є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є.Жуковського "Харківський авіаційний інститут" і відповідає науковому напрямку в рамках Програм робіт "Теоретичні дослідження в галузі створення нових аерокосмічних технологій з використанням високих енергій і тисків" (координаційні плани Міністерства освіти і науки України, № ДР 0100U002189); а також д/теми "Наукові основи математичного моделювання та експериментальне дослідження нових імпульсних технологій для створення аерокосмічних виробів" (наказ № 633 від 5.11.2001, № ДР 01U004037); Державної науково-технічної програми 2003р. з пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки № 5.5.4/0000821 "Розробка технологічних процесів вибухового штампування деталей складної конфігурації, які забезпечать підвищення надійності та ресурсу виробів на основі інформаційних технологій, та впровадження їх у виробництво" МОН України (наказ №197 від 1.04.2003, № ДР 0103U004831), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка технологічних процесів ім–пульсного (вибухового) об'ємного штампування деталей літальних апаратів і двигунів, ви–значення параметрів цих процесів, забезпечення скорочення ресурсовживання при вироб–

ництві, підвищення якості виробів, скорочення термінів технологічної підготовки виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. На основі класифікації деталей літальних апаратів, виконаних з об'ємних заготовок, визначення особливостей їхніх конструкцій і технологій виготовлення, зробити висновок про можливість їх більш економічного і якісного виготовлення. Довести, що для значної кількості таких деталей найбільш доцільною технологією їхнього виготовлення на ряді підприємств авіаційної промисловості є штампування вибухом, не потребує застосування дорогого, а дуже часто унікального устаткування.

2. Визначити характер і параметри навантаження, необхідного для формоутворення обраної номенклатури деталей, а також вихідні параметри цього навантаження при різних схемах формоутворення.

3. Розробити математичні моделі процесу навантаження і деформування об'ємних заготовок.

4. Експериментально довести можливість і доцільність одержання деталей з об'ємних заготовок вибухом і дати відповідні рекомендації виробництву.

5. Розробити раціональні схеми устаткування для об'ємного штампування вибухом деталей літальних апаратів і двигунів і визначити області їхнього застосування.

6. Оцінити техніко-економічну ефективність розроблених технологічних процесів і дати рекомендації для їхнього промислового використання.

*Об'єктом досліджень* є технологічні процеси об'ємного штампування деталей літальних апаратів, в основному, з ребрами жорсткості.

*Предметом досліджень* є методи розрахунку технологічних параметрів, розробка технологічних процесів об'ємного штампування (у т.ч. витиску) і визначення можливостей пропонуваного вибухового устаткування.

*Методи дослідження* базуються на фізичних закономірностях явищ, що мають місце при імпульсному навантаженні в установках, пристосованих для цих цілей. Експериментальні дослідження базуються на теоретичному визначенні параметрів ударних хвиль і газового пузиря, що розширюється при вибуху в обмеженому об'ємі рідини і його практичній перевірці.

Для узагальнення результатів експериментальних досліджень використовуються сучасні методи математичного моделювання, подоби і розмірностей.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

– Вперше розглянуте питання вибухового формоутворення об'ємних заготовок і отримані теоретико-експериментальні залежності для визначення основних параметрів технологічного процесу об'ємного штампування вибухом.

– Вперше проведено математичне моделювання процесу навантаження об'ємної заготовки із передачею енергії для її деформування через тверді й інші проміжні тіла.

– Вперше дані рекомендації з використання існуючих установок для вибухового штампування (з деякими змінами, запропонованими автором) об'ємних заготовок і дані пропозиції по шляху їхнього удосконалювання.

**Практичне значення отриманих результатів.** На підставі отриманих наукових результатів створені і розроблені технологічні процеси виготовлення ряду деталей з об'ємних заготовок (зокрема, рифлені панелі, тіла обертання з короткими ребрами і т.д.)

Розроблені загальні практичні рекомендації виробництву по ефективному використанню різних схем установок для об'ємного штампування вибухом у холодному і гарячому стані. Дані мотивовані пропозиції по необхідності впровадження об'ємного штампування вибухом на авіа-, двигуно- та суднобудівних підприємствах.

**Особистий внесок здобувача.** Основна частина наукових і технологічних розробок, теоретичних і експериментальних досліджень належать особисто здобувачу. До них відносяться, насамперед: визначення теоретико-експериментальних залежностей, визначення полів навантаження на дно басейну і, природно, на інструмент, а також визначення коефіцієнта корисної дії процесу.

Здобувач безпосередньо брав участь у плануванні й у проведенні експериментів, а також

у побудові математичної моделі передачі енергії від заряду БВР до деформуємої заготовки.

Постановка задач і обговорення наукових результатів виконані разом з науковим керівником і частково зі співавторами публікацій.

**Апробація результатів роботи.** Основні наукові і практичні результати роботи були повідомлені й обговорювалися на об'єднаних науково-технічних семінарах кафедри технології металів і авіаційного матеріалознавства у 1991–1998 р.р. і в Міжнародному НДІ нових технологій і матеріалів (МІНТ "ХАІ") у 1998–2004 р.р.;

– на Міжнародних науково-технічних конференціях "Перспективні технології та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії" (квітень 2000 р., лютий 2002 р., м. Краматорськ);

– на Міжнародних науково-технічних конференціях Національного аерокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського "ХАІ" у 2000–2003 р.р.;

– на науково-технічній конференції "Проблеми створення нових машин і технологій" 12–14 травня 2004 р. у Кременчуцькому державному політехнічному університеті;

– на 2-ій науково-технічній конференції "Нові розробки і технології в газотурбобудуванні" м. Кривий Ріг 23–25 червня 2004 р.;

Крім того, у повідомленнях і стендових доповідях інформація з роботи була зроблена на Міжнародних конференціях:

"Машиностроительные технологии" – Варна (Болгарія) – червень 1991 р.; Powder Metallurgy World Congress & Exhibition Пьештяни (Словаччина) – жовтень 1991 р.; "Машиностроительные технологии" – Белград-Нові-Сад (Югославія) – вересень 1992 р.; Powder Metallurgy World Congress & Exhibition – Париж (Франція) – липень 1994 р.; The 8<sup>th</sup> International Conference SheMet – Бірмінгем (Англія) – квітень 2000 р.

**Публікації.** За результатами досліджень, що наведено у дисертації, опубліковано 13 наукових праць, з яких 5 статей за переліком ВАК України, 1 авторське свідоцтво, 4 статті у збірниках наукових праць і 3 тези доповідей.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатку. Дисертація має загальний обсяг 183 сторінки машинописного тексту, включаючи 70 ілюстрацій, 13 таблиць і список літературних джерел з 60 найменувань на 6 сторінках. У додатку маються копії актів і інших документів на 3 сторінках, що підтверджують застосування розроблених технологічних процесів і їхню техніко-економічну ефективність.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульована мета роботи і визначені основні задачі, які необхідно вирішити для її досягнення. Описані об'єкти, предмет і методи дослідження, відзначені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів із вказівкою особистого внеску автора, а також представлені данні по їхній апробації.

У першому розділі приведені огляд і аналіз відомих теоретичних представлень і результатів експериментальних досліджень процесів об'ємного штампування вибухом. У зв'язку з тим, що питання вибухового навантаження об'ємних заготовок не відображені в існуючій літературі, нами були проведені попередні експерименти, що дали можливість визначити доцільність деформування об'ємних заготовок вибухом бризантних вибухових речовин (БВР).

На рис.1 приведена діаграма функцій дисипації енергії для різних значень імпульсності навантаження, що характеризуються коефіцієнтом  $m$  (для статичних процесів  $m=1$ ).

Приведені діаграми показують, що вже при значенні  $m = 2$  три чверті енергії переданої заготовці локалізується у верхній половині зразка. Зі збільшенням коефіцієнту  $m$  локалізація виявляється ще більш інтенсивно. Це говорить про те, що цей характер локалізації області пластичної деформації при імпульсному деформуванні може бути використаний у ряді важко штампуємих статичними методами об'ємних заготовок (наприклад, оребрені панелі і подібні їм деталі).

Вибух БВР супроводжується виникненням високих тисків, що діють протягом малого проміжку часу, а потім швидко падають. Теоретичний аналіз показав, що зусилля на інструмент при такому характері прикладення навантаження повинні виявитися дуже великими. Природно,

Рис. 1. Діаграма функцій дисипації енергії для різних значень коефіцієнта  $m$   
 $m$  – характеристика імпульсності навантаження ( для статичних процесів  $m = 1$ )

це миттєве збільшення тиску (так ще і супроводжуємо виникненням в інструменті хвильових явищ) є недоліком імпульсного навантаження.

За участю здобувача проведені попередні експерименти на установках 2-х типів (коли енергія вибуху перетворювалася в кінетичну енергію рухливих частин установки і коли продукти вибухового розкладання БВР, що володіють великими тисками і швидкістю, впливають безпосередньо на інструмент чи на заготовку і виконують роботу деформації). Вони показали, що

- ККД використання БВР в обох випадках дуже низький;
- течія металу при пластичній деформації йде до периферійних частин і приводить до перерізання крайніх елементів штампування (наприклад, ребер при штампуванні панелей);
- надзвичайно низька стійкість інструменту через імпульсний характер навантаження і високу швидкість деформування заготовки, що приводять до концентрації напруг у гравюрі штамп, вигину і розколу інструменту, що відбувається ще і від нерівномірного навантаження по всій поверхні, а це, у свою чергу, приводить до розвитку тріщин.

На рис. 2 представлений приклад розвитку тріщини в інструменті товщиною 100 мм.

Застосування розрізного інструменту (один з радикальних способів боротьби з концентрацією напруг) виключає розвиток тріщин в інструменті, але дуже небажаний з технологічної точки зору. Крім того, у розрізному інструменті відбувається викришування кромки, їхня роздача і розклеп, що представляє найбільш істотну небезпеку.

Рис. 2. Розвиток тріщини в інструменті

Рішення проблеми стійкості інструменту про-водилося по різних напрямках:

- вибору марки сталі і режимів термообробки;
- штампуванню виробів з нагрітими заготовками;
- використанням різних передаючих середовищ (води, пластиліну, поліуретану, гуми і т.д.);
- розташуванням заряду навколо оснащення;
- застосуванням дешевого разового інструменту (з деревини, текстоліту, свинцю, олова, різних смол і т.д.).

Однак істотного збільшення стійкості іструменту і необхідних для промисловості рекомендацій з економічної доцільності впровадження таких процесів у виробництво не отримано. Тут же, у цьому розділі показано, що варто шукати інші шляхи прикладання навантаження від БВР до деформуємої заготовки і вирішувати питання проектування таких пристроїв за допомогою яких можна здійснити цей технологічний процес і бажано було б застосувати вже існуючі установки, пристосовавши їх до нового технологічного процесу. Т.ч. єдиним способом ліквідації недоліків приведених в розділі схем об'ємного штампування є збільшення тривалості імпульсу з деяким зниженням його амплітуди. Такими установками могли б стати вже частково досліджені басейни, а також вибухові преси з інерційним замиканням мас.

Надалі в розділі визначається енергія, яка підходить до заготовки (зовнішнє навантаження), яку можна одержати в обмежених об'ємах при різних розташуваннях зарядів БВР. Приведені можливості точного рішення задачі та визначення гідродинамічних полів тиску, імпульсів і



швидкості часток на будь-якій відстані границь газового пузиря в будь-який момент часу.

Однак необхідно цю задачу вирішити з урахуванням усіх явищ, що відбуваються в обмеженому об'ємі, а головне, з урахуванням впливу на заготівку усіх відбитих хвиль, гідропотоку, зхлопування газових пупирів, виникнувшої кавітації і т.д.

Таким чином, необхідно визначити, які навантаження передаються від вибуху БВР у воді, з обліком приведених вище особливостей, на тверді стінки, що обмежують визначений обсяг рідини, а потім визначити, як це навантаження передати на деформуємий об'єкт.

Приведені вихідні дані для визначення необхідного навантаження для імпульсного деформування об'ємної заготівки і визначені особливості його підрахунку. При цьому розглянуте питання впливу хвиль напруги в деформуємому металі на необхідне навантаження.

Приведені механічні характеристики динамічно деформуємих матеріалів при різних деформаціях і їхні апроксимуючі залежності.

**У другому розділі** розглянута коротко класифікація деталей з об'ємних заготівок, що могли б виготовлятися імпульсними способами, розглянуті питання розробки методик розрахунку технологічних параметрів процесу і вибухового штампування, приведені схеми установок на яких доцільно здійснювати цей процес, приведені приклади розрахунку ККД і деяких технологічних параметрів.

У розділі приведені рекомендації з вибору номенклатури деталей, що доцільно виготовляти методами високошвидкісного штампування. При цьому відзначається, що для ряду деталей можна застосовувати й існуючі високошвидкісні молоти (ВШМ). Відзначається також перевага вибухового формоутворення (у порівнянні зі штампуванням на ВШМ).

В основному при доборі цієї номенклатури деталей враховувалося, що при високошвидкісному деформуванні верхній струмок у штампі заповнюється металом при однакових умовах деформування в 1,5...2 рази більше, ніж при статичних навантаженнях. Це також необхідно враховувати при проектуванні технологічних процесів виготовлення таких деталей. Ці й інші закономірності (це відзначено в розділі) необхідно враховувати при проектуванні штампів для високошвидкісної обробки, наприклад виступаючі частини кувань (ребра і подібні їм елементи) оформляють у верхньому штампі. При цьому відзначається, що всі технологічні процеси імпульсної металообробки більш ефективні в тому випадку, коли процес реалізується за один робочий цикл. Безумовно, такий підхід вимагає дуже точного розрахунку всіх параметрів технологічного процесу й устаткування.

У розділі показані чіткі відмінні риси технології вибухового об'ємного штампування в порівнянні з традиційними технологіями на ковальсько-пресовому устаткуванні і те, що можна домогтися, виготовляючи об'ємні деталі на устаткуванні, схеми якого запропоновані в розділі. Це дає можливість виробництву виконувати кування з різних матеріалів (труднодеформуємих високоміцних сталей і титанових сплавів, зміцнюючихся, навіть при статиці, алюмінієвих сплавів типу АМГ6), кування складної форми з тонкими стінками і ребрами, малими заокругленнями в кутах, внутрішніми штампувальними кутами, з даним відношенням площі поверхні до обсягу (внаслідок зниженої втрати тепла за короткий час контакту з більш холодним штампом), істотно зменшити припуски на механічну обробку, підвищити стійкість штампів за рахунок зниження теплопередачі від гарячого кування і коефіцієнта тертя між куванням та інструментом і т.д.

Найбільш відповідальним етапом при розробці технологічного процесу є розрахунок енергії і зусилля деформування. У розділі представлений принциповий підхід до визначення енергетичних параметрів, необхідних для деформування заготівки, видані основні параметри режимів нагрівання заготівки при високошвидкісному штампуванні. За основу розрахунку параметрів взяте використання експериментальних залежностей величин питомих енергій і зусиль від ступеня деформації і температури при осаді і витисненні. Ця орієнтована методика дозволяє зробити наближену оцінку необхідної роботи деформування при високошвидкісному об'ємному штампуванні і вибрати необхідне устаткування. Підрахунок необхідної енергії ведеться по залежності

$$E = \kappa E^{\circ} V \frac{1}{\eta_{\text{уд}}}, \quad (1)$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт, враховуючий складність конфігурації кування (до = 1,05...1,3);

$E^{\circ}$  - питома енергія деформування для двох основних схем формозміни (осади і витиснення) у розділі представлені графіки залежності питомих енергій від температури і ступеня деформації при осаді і витисненні;

$V$  - повний об'єм при деформуванні осіданням або об'єм деформованої частини заготівки;

$\eta_{\text{уд}}$  - ККД удару, що змінюється (цей висновок зроблений у розділі) у межах 0,65...0,95.

По знайденій величині енергії вибирають установку з врахуванням нормальної її роботи при енергії відповідній 1,2...1,4 від розрахункової.

Враховуючи наближеність розрахунку, спробне штампування варто починати з енергії, що запасасться, на 15÷25% менше розрахункової при подальшому її збільшенні для наступних кувань.

У розділі представлені також схеми пропонуємих автором установок для штампування об'ємних заготовок вибухом.

На установці, виконаній за схемою рис. 3 проводилися всі експериментальні роботи і роботи по виготовленню дослідних партій виробів.

У розділі показані також ряд інших схем установок для об'ємного штампування різного типу деталей.

Нарешті в розділі представлені дослідження з визначення повного ККД (теоретичні й експериментальні, які проведені на установці по рис. 3) і інших параметрів об'ємного штампування. ККД визначалося шляхом деформування (осадки) циліндричних зразків на зазначеній установці при різних умовах розташування заряду. Повний ККД процесу досягає величини 0,4.

Оскільки всі пропоновані установки базується на джерелах передачі енергії деформуемій заготівці від вибуху БВР в обмежених об'ємах не-обхідно було провести ретельний аналіз (тео-ретико-експериментальний і експериментальний), на жаль, що ще не існує, по визначенню енергії, що підходить до інструменту (пуансону, матриці) для об'ємного деформування деталей.

**У третьому розділі** теоретико-експериментальними методами вирішується досить складна задача визначення величини навантаження, переданого на інструмент в установках для об'ємного штампування.

Модель навантаження донної частини установка виглядає так.

На донну частину басейну (наприклад, рис.3), або на донну частину і бокові стінки (рис. 4) діє ударна хвиля, вплив якої послабляється хвилями розвантаження виникаючими при відбитті ударних хвиль від вільної поверхні води з деяким запізнюванням. При розширенні продуктів детонації ВР на дно установки діє сила, значення якої залежить від величини заглиблення заряду. Ця сила спочатку позитивна, а при перерозширенні газового пузиря стає негативною в результаті поступового зниження тиску в пузирі до його мінімальних значень.

Далі відбувається зхлопування пузиря. В результаті цього виникає інтенсивна хвиля тиску, а потім відбувається повторне розширення пузиря. Цей процес може повторюватися багато-

Рис. 3. Схема ВШМ на базі басейну для вибухового штампування енергією БВР: 1-басейн, 2-колони, 3-втулки, 4-траверса, 5-фіксатор (чека), 6-пуансонодержач, 7-пуансон, 8-підстава, 9-стіл рухливий, 10-матриця, 11-заготівка, 12-циліндри по-вернення, 13-заряд БВР, 14-вода

разово.

Відповідно такій складній дії внутрішніх сил здійснюється і переміщення басейну в осьовому напрямку. Під дією ударних хвиль у тому числі і відбитих від стінок басейну, і позитивної фази тиску в пазурі басейн переміщається вниз. Цей тиск гальмується хвилею розвантаження і негативним тиском у пазурі. Оскільки останнє довгостроково за часом, його дія приводить до зворотного руху басейну. При зхлопуванні пазура результуючий вектор сил спрямований у бік дна, що викликає переміщення басейну вниз і, оскільки він має значну масу, його кінетична енергія може досягати великої величини.

Рішення такої задачі в літературі цілком відсутнє. Якщо і були спроби вирішити цю задачу, то тільки її окремих фрагментів на що звертається увага в розділі.

Ми ж розглядаємо рішення задачі в цілому. При цьому ми розглядаємо вплив гідропотоку й ударної хвилі, як складової єдиної хвилі тиску, що справедливо в акустичному наближенні.

Отже, на першому етапі переважає дія ударних хвиль (рис. 5).

Методи розрахунку сили, яка діє на дно, можуть бути різними: через імпульс сили та через тиск, при цьому розрахункові залежності для прямої хвилі тиску і для відбитої від стінок обладнання будуть відрізнятися.

В розділі, як приклад, приведена методика приблизного розрахунку імпульсу сили через імпульс. Сила, яка діє на дно, визначається із залежності

$$F = \frac{I}{\tau}, \quad (2)$$

Рис. 5. Розрахункова схема навантаження при прямій хвилі

де  $I$  – імпульс сили, діючий на відрізок часу  $\tau$ .

Час дії тиску  $\tau$  для експоненційного імпульсу тиску приймається на практиці від 5 до 10  $\theta$ , де  $\theta$  – постійна часу.

Формула для обчислення імпульсу має вигляд

$$I = 4\pi \int_{R_3}^{R_4} i dr, \quad (3)$$

де  $R_4$  – координата в площині дна фронту хвилі тиску;

$R_3$  – положення "хвоста" хвилі, відповідно  $\tau = 10 \theta$ ;

$i$  – питомий імпульс тиску.

При новій реалізації тиску при  $\tau = 10 \theta$

$$i = 1,48 P_m \theta, \quad (4)$$

де  $P_m$  – максимальний тиск.

Для бризантних ВР  $P_m$  визначається з залежності

$$P_m = A \left( \frac{G^{1/3}}{R_\phi} \right)^\alpha, \quad (5)$$

де  $G$  – маса заряду;

$R_\phi$  – відстань до заряду в воді;

Рис. 4. Установка для штампування рельєфів на зовнішніх поверхнях труб: 1-підстава, 2-басейн кільцевий, 3-вода, 4-трубчаста діафрагма, 5-корпус діафрагми, 6-кільце, 7-пуансони, 8-заряд ВР, 9-розрізний пуансонодержач, 10-заготівка, 11-конус підтримуючий, 12-корпус опорний

$A, \alpha$  - константи заряду;  
 $\theta$  - постійна часу імпульсу тиску

$$\theta = B_1 \cdot R_{\phi}^{\frac{\beta}{2}} \cdot 0,62^{1-\beta} G^{\frac{1-\beta}{3}} \rho_3^{\frac{\beta-1}{3}-1} C_0^{-1},$$

(6)

де  $\rho_3$  - щільність заряду;  
 $C_0$  - швидкість звуку в воді;  
 $B_1, \beta$  - константи заряду.

Тоді повний імпульс, діючий на дно, визначається залежністю одержаною здобувачем

$$I = 18,6 \cdot 0,62^{1-\beta} \cdot A \cdot B_1 \cdot G^{\frac{1+\alpha-\beta}{3}} \cdot \rho_3^{\frac{\beta-1}{3}} \cdot C_0^{-1} \cdot \frac{1}{\beta - \alpha + 2} \left[ (R^2 + h^2)^{\frac{\beta-\alpha+2}{2}} - h^{\beta-\alpha+2} \right],$$

(7)

де  $h$  – висота підвіски заряду.

З моменту приходу ударної хвилі на дно і до повної її реалізації на дні, для розрахунку імпульсу вводиться часова функція, яка визначає долю імпульсу, яка діє на дно по мірі приходу імпульсу тиску.

В цьому випадку імпульс тиску визначається за класичною залежністю гідродинаміки вибуху

$$i = P_m \cdot \theta \begin{cases} 1 - e^{-\frac{\tau_1}{\theta}} \text{ при } \tau_1 < \theta \\ 0,632 + 0,368 \ln \frac{\tau_1}{\theta} \text{ при } \theta < \tau_1 \leq 10\theta \end{cases},$$

(8)

де  $\tau_1$  – час дії хвилі на дно на початковій ділянці;

$$\tau_1 = \frac{\sqrt{R_4 + h^2}}{C_0} - t_0;$$

а  $t_0 = \frac{h}{C_0}$  – час від моменту вибуху до приходу ударної хвилі на дно.

Результати розрахунку тимчасової залежності імпульсу сили та сили по залежностям, які мають місце в розділі для прямої хвиді показані на рис. 6 (а та б) при  $G = 0,001 \text{ кГ ТЭН'у}$ ,  $R_{\max} = R_6 = 0,35 \text{ м}$ .

а

б

Рис. 6. Залежності імпульсу сили (а), та сили (б) від часу, діючих на дно обладнання

Методика, яка приведена, дозволяє виконати приблизний розрахунок імпульсу та сили, бо передбачає миттєву реалізацію тиску в розглядаємій точці на дні. Методику можна викорис-

товувати лише для прямої хвилі. При відносно великому діаметрі басейну, доля дії прямої хвилі збільшується і з деяким приближенням може бути використана для розрахунку значень сили та імпульсу.

Далі досліджується дія хвилі тиску на дно обладнання з урахуванням її відбиття від стінок. Особливості розповсюдження ударної хвилі, яка виникла при вибуху сферичного заряду,

а

б

Рис. 7. Схема та поле тиску відбитих хвиль

який знаходиться на вісі ємкості, є то, що спочатку хвиля тиску має сферичну симетрію, а після відбиття від стінки на неї накладається циліндрична симетрія.

Розрахункова схема для відбитих хвиль показана на рис. 7 "а".

Тут сферичний заряд  $G$ , з метою облегчення аналізу впливу відбитої хвилі, замінено умовним лінійним кільцевим зарядом  $G'$ , який розміщено симетрично стінкам басейну, що дало можливість приміняти закони розповсюдження циліндричної хвилі і ефект фокусування хвилі тиску після відбиття. Відбита хвиля починає діяти з моменту приходу прямої хвилі в кут басейну. Вона концентрично проходить через центр і знову досягає стінки. Це перша відбита хвиля. В подальшому цей процес повторяється багаторазово.

При переміщенні хвилі від стінки до центру залежність для  $P_m$  в точці  $R_B$  приймає вигляд

$$P_{B_{n_1;m}} = \sum_{i=1}^n P_{B_{i;m}}$$

$$P_{B_{n_1;m}} = 2 \sum_{i=1}^n K \cdot (2i \cdot R_{\sigma} - R_B)^{-\alpha_1} \cdot R_B^{-1} \cdot \cos^{\alpha} \gamma_{i_1} \cdot f_{i_1}(t) +$$

$$+ 2 \sum_{i=1}^n K \cdot (2i \cdot R_{\sigma} + R_B)^{-\alpha_1} \cdot R_B^{-1} \cdot \cos^{\alpha} \gamma_{i_2} \cdot f_{i_2}(t) + P_{B_{0;m}} \cdot f_{i_0}(t) \quad (9)$$

Тут перша складова виразу визначає суму тиску від проходження відбитих хвиль на ділянці від стінки до центру; друга складова визначається проходженням попередніх хвиль по ділянці від центру до стінки, а третя складова показує дію прямої хвилі на дно обладнання.

Поле тиску в момент, коли фронт ударної хвилі знаходиться в точці  $R_{B_n}$  може бути визначено обчисленням тиску шляхом помноження моментального тиску в даній точці на тимчасову функцію, яка враховує різницю часу між часом приходу хвилі в точку  $R_B$  та в точку, яка розглядається

$$P_{B_{n_1}} = P_{B_{n_1;m}} \cdot f_{n_1}(t). \quad (10)$$

При переміщенні хвилі від центру до стінки величина максимального тиску описується залежністю (9).

Поле тиску на цій ділянці визначається формулою 10 з відповідними індексами.

Приклад зміни тиску на дні обладнання при вибуху ТЕН'а,  $G = 0,001 \text{кГ}$ ,  $h = 0,1 \text{м}$ ,  $R_{\sigma} = 0,35 \text{м}$  показаний на рис. 7б.

Для розрахунку параметрів, які визначають силу і повний імпульс виведені формули є складними і незручними. З метою спрощення розрахунків процес навантаження відбитими хвилями ми розглядаємо в площині відображення за границями басейну (рис. 7а).

Стінка циліндричної ємкості розглядується як джерело повторного випромінювання. Критерієм правомочності цієї моделі є закон збереження кількості руху (імпульсу сили). Тобто імпульси відбитої хвилі, які розраховані всередині басейну, за басейном, а також при відсутності стінок басейну повинні бути рівними.

Зрівняння відповідних графіків, одержаних по виведеним залежностям, показує, що вони ідентичні. Це підтверджує правильність вибраної методики розрахунку сил та імпульсів в площині відображення, що значно спрощує розрахунки.

Сила, діюча на дно, визначалась із одержаного виразу

$$F(R) = 2 \int_S P(t) \cdot dS, \quad (11)$$

$$\text{де } P(t) = P_m f(t_2, t);$$

$$f(t_2, t) = \begin{cases} e^{-\frac{t_2-t}{\theta}}, & t_2 - t < \theta \\ \frac{0,368\theta}{t_2 - t}, & t_2 - t > \theta \end{cases}.$$

При розповсюдженні ударної хвилі в середині басейну після багатьох відбивань частина хвиль зустрічається з поверхнею газового пузиря і не досягає дна. В роботі визначений час  $t_{2\max}$ , після якого нові хвилі дна не досягають.

Поряд з цим тиск в хвилях, які досягли дна, падає до нуля при часі  $t_{3\max} = t_{2\max} + t^+$ , який визначається часом падіння тиску в газовому пузирі до нуля  $t^+$ .

В завершенні, при врахуванні всіх прийнятих обмежень і допущень, загальна залежність для розрахунку сили, яка діє на дно басейну, має вигляд

$$F_4(t) = \begin{cases} F_1(t), & \text{коли } t < t_0 \\ F_2(t), & \text{коли } t > t_0, t < t_{2\max} \\ F_3(t), & \text{коли } t > t_{2\max} \end{cases}, \quad (12)$$

де значення

$F_1(t), F_2(t), F_3(t)$ , визначені в роботі.

Загальні залежності для визначення імпульсу мають вигляд

$$I(R) = \begin{cases} I_1(R), & \text{коли } (R < R_0), (R < R_{2\max}) \\ I_2(R), & \text{коли } (R > R_0), (R < R_{2\max}) \end{cases}, \quad (13)$$

де  $I_1(R)$  та  $I_2(R)$  визначені в роботі.

Як приклад на рис. 8"а" та 8 "б" показані результати розрахунку сили та імпульсу, викона-ні по проведеній методиці при вибуху заряду ТЕН'у масою 0,001 кг при  $h = 0,1$  м і  $R_6 < 0,35$  м.

Далі розглянутий вплив вільної поверхні рідини на поля тисків. Розглянуто силу утво-рення кавітаційних розривів і хвилі розвантаження, визначений тиск на дно басейну, створю-ваний хвилею розрідження. У роботі представлені графіки тиску в приповерхневому шарі, в останньому кавітаційному шарі, графіки тиску і сили діючої на дно. Зроблено висновок про те, що в порівняно короткочасних технологічних процесах штампування вибухом, враховуючи ве-лику затримку за часом і малу амплітуду значень тиску і сили, вплив негативних хвиль у нава-нтаженні заготовки можна не враховувати.

Тепер про вплив пузиря. Експерименти показали, що в ньому міститься значна частка енергії. Ці експерименти також показали, що при наявності близько розташованих дна і вільної поверхні на протязі першого періоду розширення пузир трохи спливає, а потім швидко пере-міщується нижче початкового значення. Основний вплив стінок і дна складається в збільшенні періоду коливаний пузиря.

У розглянутих у роботі процесах апіорно можна сказати, що стовп води над зарядом повинний бути значним у порівнянні з відстанню до дна, щоб уникнути викид води і втрат ене-ргії.

Визначаємо час розвитку пузиря

$$t = \left( \frac{3\rho}{2P_0} \right)^{1/2} \int_{a_{оп}}^a \frac{da}{\left[ \left( \frac{a_{max}}{a} \right)^3 - 1 \right]^{1/2}}, \quad (14)$$

де  $a_{оп}$  – початковий радіус пузиря в момент часу.

При розширенні пузиря радіус міняється від початкового  $a_0$  до максимального  $a_{max}$ , який визначається як

$$a_{max} = \sqrt[3]{\frac{E_{гп} \cdot 3}{4\pi \cdot P_0}}, \quad (15)$$

де  $E_{гп} = \eta E$  - енергія, що міститься в пузирі.

Для кожної пульсації газового пузиря ця частка цілком конкретна. Для першої пульсації вона дорівнює  $(0,4 \dots 0,45)E_{гп}$ . Теоретично, якщо зневажити вертикальним рухом пузиря і впли-вом заглиблення заряду, рішення рівняння руху дає співвідношення між  $a_{оп}$  і  $a_{max}$  –  $a_{оп} = 0,63 a_{max}$ .

На рис. 9 представлений графік залежності тиску від часу для ударної хвилі і пульсації пузиря, одержаний по розробленій в роботі залежності.

б

а

Рис. 8. Графіки сили і імпульса сили, діючих на донну частину установки

Рис. 10. Графік залежності переміщення установки при пружній взаємодії з заготівкою

$$P = P_0 + \frac{\rho}{R_\phi} \cdot \frac{d}{dt} \left( a^2 \cdot \frac{da}{dt} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{a^4}{R_\phi^4} \cdot \frac{da}{dt} \right). \quad (16)$$

Результати розрахунків практично співпадають з даними осцилограми, отриманої при вибуху в установці заряду ТЕН'у  $G = 10^{-3}$  кг;  $\gamma = 1,25$ ;  $\kappa = 7,83 \cdot 10^9$ ;  $Q = 1060$  ккал/кг (4240 Дж/кг). На цьому ж рисунку (ліворуч) приведена залежність  $P = f(t)$  для початку процесу (тиск в ударній хвилі).

Рис. 9. Графік залежності тиску від часу для ударної хвилі і пульсації пузиря

У розділі розглянуті також розрахункові моделі руху гідровибухової ємкості при об'ємному штампуванні. Графік зале-

Рис. 11. Загальний вид експериментальної установки

жності переміщення заготівки при пружній взаємодії з заготівкою представлений

на рис. 10.

Як видно з графіка при взаємодії з пружною заготівкою установка робить складні коливальні рухи, які демпфіруються рідиною. Багаторазовість навантаження пояснюється пружним відскоком від заготівки і процесами, що відбуваються в рідині при її взаємодії з ємкістю. Далі приведені результати експериментальних досліджень, що були проведені з метою перевірки правильності прийнятих припущень і підтвердження теоретичних розрахунків.

Досліджувалося поведіння газового пузиря при різних граничних умовах, визна-чався тиск, викликаний зхлопуванням пузиря, замірялися силові параметри установки, загальний вид якої показаний на рис. 11.

Експериментально вимірялася деформація вимірювальної вставки за допомогою тензостанції. Запуск протяжного механізму світопроменевого осцилографа синхронізувався з вибухом заряду. Тензостанція фіксувала залежність деформації силовимірювальної вставки в

Рис. 12. Осцилограма залежності деформації від часу

часі. Після розшифровки осцилограми визна-чалася сила, що діє на вставку по формулі

$$F = \varepsilon E \cdot S, \quad (17)$$

де  $\varepsilon$  - відносна деформація;

$E$  - модуль пружності;

$S$  - площа перетину вставки.

Отримана сила діє на об'єкт навантаження. При відомій сумарній жорсткості піддонної конструкції не складає праці визначити графік переміщення установки за часом із залежності

$$W = \varepsilon \frac{E}{C_\Sigma}, \quad (18)$$

де  $W$  - переміщення дна, рівне зміні довжини піддонної конструкції  $\Delta \ell$ . Типова осцилограма залежності деформації від часу зображена на рис. 12. Тут видна хвиля розвантаження, а вторинне навантаження через зхлопування пузиря порівняно з першим. (Полярність хвилі навантаження негативна з технічних причин). З таких осцилограм отримані й інші важливі данні: імпульс сили добре корелюється з розрахунковим імпульсом, хвиля розвантаження, що йде за імпульсом навантаження дорівнює по амплітуді  $125 \cdot 10^3$  Н, що відповідає при площі  $0,4 \text{ м}^2$  негативному тиску кавітаційній міцності рідини  $3,1 \cdot 10^5$  Па, при тривалості хвилі  $6 \cdot 10^{-3}$  с. Імпульс сили цієї хвилі складає  $375 \text{ Н} \cdot \text{с}$  і практично збігається з підрахованим (рис. 10). Порівнюючи експериментальне і теоретичне значення періоду пульсації в реальних умовах, можна зробити ви-



сновок, що теоретичні пере–думови об'єктивно відбивають реальність.

**Четвертий розділ** роботи присвячений до–слідженням, що підтверджують деякі перед–умови тео–ретичних розрахунків по визначенню окремих пара–метрів зовнішнього навантаження, що діє на заготовку що деформується.

В ньому показані СФРограми поширення ударних хвиль в обмежених об'ємах, також характер розширення газового пузиря, інтерференційні явища, що виникають при досягненні останніми вільної поверхні і дна ємкості, час і характер виникнення і проходження кавітаційних явищ і т.д. Доведено, що розрахункові дані практично (у межах 5...18%) збігаються з експериментальними, а прийнята модель впливу сил, що навантажують заготовку відповідає дійсності. З рис. 13 ясно видно поширення ударної хвилі, утворення кумулятивної виїмки, перед газовим пузирем, що розширюється яке сприяє утворенню султана, кавітаційні явища біля поверхні рідини і, із запізнюванням, на дні ємкості. Останнє, природно, залежить від розташування заряду щодо вільної поверхні і дна ємкості. У розділі представлені також СФРограми якісних картин взаємодії ударних хвиль зі стінками басейну, з газовим пузирем, що розширюється, і т.д. Робляться висновки про можливе використання явищ, що спостерігаються, у практиці вибухового об'ємного штампування і в інших технологічних процесах. Далі представлені приклади виконання технологічних процесів виготовлення деталей з об'ємних заготовок конкретно для різних підприємств (в основному літако– й авіадвигунобудівного профілів).

Рис. 13. СФР підводного вибуху

Рис. 14. Деталі, виготовлені вибуховим об'ємним штампуванням

Фото ряду деталей ви–готовлених вибуховим об'єм–ним штампуванням представ–лені на рис.14.У розділі при–ділена увага роботі перспек–тивних установок, описаних в розділі II, для об'ємного штам–пування вибу–хом, ККД роботи яких може досягати 45% при можливості установки їх без–посередньо в цеху.

Приділено увагу також економічній ефективності за–пропонованого технологічного процесу.

Техніко–економічна оцінка процесів об'ємного вибухового штампування приве–

деної в ро–боті номенклатури виробів ви–конується на підставі методики розрахунку комплексного показника якості, що особливо ак–туально для цього часу.

Аналіз рівня якості варіантів технологічних процесів ви–готовлення деталей ведеться для різних способів одержання об'ємних деталей. Крім того, для виявлення складу основних по–казників якості розглядалася думка незалежних експертів, що виділили характерні для різних умов виробництва й експлуатації аналізованої номенклатури виробів ряд показників, на які було узятю орієнтування при розрахунку.

Нами був прийнятий індивідуальний метод опитування, який найбільш просто організувати.

Визначення узагальнених показників якості для всіх розглянутих варіантів вироблявся по формулі

$$u_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot q_i, \quad (19)$$

де  $u_j$  – узагальнений показник якості  $j$ -го варіанта;

$k_{ij}$  – відносні значення  $i$ -го показника якості  $j$ -го варіанта;

$q_i$  - коефіцієнт вагомості  $i$ -го показника якості;

$n$  - число аналізованих показників якості.

Проведені розрахунки показали, що аналізований варіант перевершує по комплексному показнику рівня якості в умовах дрібносерійного і середньосерійного виробництва варіант традиційного штампування на механічних пресах у 1,4 рази і варіант штампування на падаючих молотах у 1,5 рази.

Передбачуваний і дійсний економічний ефект тільки на 3-х підприємствах (при переході на пропонуваній технологічний процес 10-30% об'ємних деталей) складає за даними замовників біля 200 т.гр. на рік.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена рішенням науково-практичної задачі дослідження технологічних процесів імпульсного (вибухового) штампування деталей із об'ємних заготовок з метою скорочення ресурсовживання і використання унікального ковальсько-пресового обладнання та підвищення якості виробів. При її рішенні отримані наступні висновки.

1. На підставі попередньо проведених експериментів і літературних даних визначено, що всі технологічні процеси імпульсної металообробки більш ефективні в тому випадку, особливо це стосується об'ємного штампування, коли процес виготовлення заготовки реалізується за один цикл.

2. Відмінними рисами вибухового об'ємного штампування в порівнянні з традиційними технологіями на ковальсько-пресовому устаткуванні є:

- високі швидкості деформацій (до  $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  і більш), що приводить до короткочасності всього процесу деформування, зниженню тертя, зменшенню теплообміну, кращому формоутворенню кування, зниженню енерговитрат;

- високі абсолютні і питомі тиски на оброблювані матеріали ( $5 \cdot 10^4$  МПа і вище) протягом короткого (регульованого) проміжку часу ( $10^{-3} \dots 10^{-2} \text{ с}$ ), що дає можливість виготовити виріб з малими радіусами кромки і внутрішніх переходів і одержувати заготовки високої точності;

- мала витрата традиційних джерел енергії при практично необмеженому обсязі використання енергії БВР.

3. Запропоновано класифікацію деталей літальних апаратів і двигунів, що дає можливість вибирати деталі для їхнього раціонального виготовлення високошвидкісним деформуванням.

4. Запропоновано схеми конструкцій устаткування для об'ємного штампування, що раніше не існувало, і, частково, що базується на працюючих установках для здійснення технологічних процесів листового штампування вибухом, що є доказом їхньої працездатності.

5. Проведено розрахунки ККД процесу, що довели доцільність застосування розроблюваної технології з погляду раціонального використання енерговитрат і економії у використанні традиційних джерел енергії. Загальний ККД процесу значно вище існуючого при використанні традиційного ковальсько-пресового устаткування і досягає величин порядку 0,38...0,42.

6. Для здійснення об'ємного штампування енергією вибуху необхідно збільшити, в порівнянні з листовим штампуванням, тривалість прикладеного до заготовки навантаження. Встановлено, що тривалість навантаження дна установки ударною хвилею значно більше тривалості дії власне ударної хвилі, тобто відбувається "розтяжка" тиску в часі, що приводить до збільшення стійкості оснащення і сприятливого розподілу напруг і деформацій у заготовці.

7. У досліджуваних установках для об'ємного штампування на їхню донну частину, інструмент і заготовку значний вплив роблять відбиті від стінок ємкості хвилі тиску, що залежать від розміру ємкості, а також, характеру розвитку газового пузиря, його зхлопування, кавітаційних явищ і т.д.

8. Програма для складення розрахунку сили й імпульсу сили, що діють на дно установки, визначає також параметри відбитої хвилі і вплив газового пузиря, що практично цілком дає можливість визначити епіюру повного навантаження на деформуєму заготовку. Показано, що

розподіл тиску на дні носить складний інтерференційний характер. Отримані залежності дозволяють визначати розподіл тиску в площині дна в будь-який момент часу. Але в той же час ці залежності, через складність процесів, що відбуваються, незручні для визначення сили й імпульсу, де необхідна операція інтегрування.

9. Розрахунки кавітаційних явищ, що відбуваються біля вільної поверхні, показали, що, чим менше кавітаційна міцність рідини, тим глибше поширюється зона кавітації, що може досягати площини заряду, і тим менше відбита негативна хвиля розвантаження ("швидка" хвиля), що досягає дна.

При загальноприйнятих рівнях кавітаційної міцності  $(2...3) \cdot 10^5$  Па негативна сила, викликана хвилею розвантаження, практично на порядок менше сили, викликаною ударною хвилею і нею можна зневажити. Показано, що в результаті руху кавітаційних шарів виникає друга хвиля розвантаження, що поширюється по двухфазному середовищу, яким є кавітаційна область, зі швидкістю набагато меншою швидкості звуку. "Повільна" хвиля розвантаження досягає дна значно пізніше "швидкої" хвилі, але через малу амплітуду цією хвилею розвантаження можна зневажити.

10. Складено алгоритм розрахунку тиску в газовому пузирі. Розроблена методика і програма розрахунку аналітичних залежностей на ЕОМ. Розрахунками підтверджений істотний вплив на процес навантаження дна зхлопуючимся газовим пузирем.

11. Показано, що при русі ємкості з водою під дією сили вибуху відбувається відрив придонних шарів води від дна ємкості і незалежний їхній рух визначений час, з наступною догрузкою дна водою, що рухається. Розрахункова модель при рішенні задачі руху ємкості дає можливість одержати результати близько співпадаючі з експериментальними.

12. Досліджено характер і величина результуючих сил, що діють на пружну заготовку. Показано, що об'єкт навантаження й установка являють собою єдину коливальну систему, а характер навантаження об'єкта залежить від її частотних характеристик. Збіг осцилограм, отриманих експериментально, з теоретичними розрахунками підтверджують правомочність прийнятих розрахункових моделей.

13. Підрахунок економічного ефекту по комплексному показнику рівня якості в умовах дрібносерійного і середньосерійного виробництва показав, що запропонований у дисертації варіант перевершує традиційний варіант об'ємного штампування деталей на механічних пресах і падаючих молотах і по економічним якісним показникам в середньому в  $1,4 \div 1,5$  рази краще.

14. Впроваджені технологічні процеси об'ємного вибухового штампування на підприємствах "Мотор Січ", АНТК " Антонов", ДКБ "Південне" за даними замовника дали економічний ефект близько 200 тис. гривень при високій якості виготовлення деталей.

## СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шкалова А.В., Борисевич В.К., Коваленко П.И., Соломяный А.У. Применение гидро-взрывного оборудования для объемной штамповки // Технологические системы. – Киев: 2001. – №5(11). – С.68-71.

*Здобувачем запропонована конструкція експериментальної установки для об'ємного штампування.*

2. Шкалова А.В. Использование оборудования для импульсной металлообработки для объемной штамповки // Вісник Кременчуцького Державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2002. – №3(14). – С.144-145.

3. Шкалова А.В. Штамповка взрывом деталей из объемных заготовок // Вісник Кременчуцького Державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ.2004. – №5(16). – С. 15–17.

4. Шкалова А.В. Определение КПД и других параметров штамповки взрывом по новой схеме нагружения // Кузнечно-штамповочное производство: Научно-технический журнал. – Москва: 1999. – №11. – С.23-25.

5. Борисевич В.К., Коваленко П.И., Соломяный А.У., Шкалова А.В. Оценка силового воз-

действия ударной волны на дно гидробассейна в технологических установках для объемной штамповки. // Кузнечно-штамповочное производство: Научно-технический журнал – Москва: 2002. – № 11. – С.3-7.

*Здобувачем здійснено дослідження дії ударної хвилі на дно обладнання для об'ємного штампування визначені повний імпульс і сила.*

6. Устройство для гидровзрывной штамповки // Авторское свидетельство № 1374537, 1986. Соломяный А.У., Панченко В.Е., Борисевич В.К., Молодых С.И. (СССР).- № 4044080; заявлено 27.12.1985; Опубл. 15.10.1987.

*Здобувачем здійснена конструкція установки для гідровзривної штамповки.*

7. Губский А.А., Зорик В.Я., Соломяный А.У., Шкалова А.В. К расчету фундаментов взрывных установок // Импульсная обработка металлов давлением: Сб. научных трудов – Х.: Харьковский авиационный институт, 1984.- Вып.12. – С.87-97.

*Здобувачем запропоновані схеми для розрахунку змушених коливань, устаткування для вибухового штампування, обрана методика проведення експериментів і отримані математичні залежності.*

8. Соломяный А.У., Шкалова А.В., Лесничий В.А., Колодезный А.Т. Анализ воздействия результирующих сил гидровзрыва на дно бассейна // Импульсная обработка металлов давлением: Сб. научных трудов – Х.: Харьковский авиационный институт, 1986.– Вып.13. – С.95-104.

*Здобувачем визначені розрахункові залежності результируючих сил від дії всіх складових гідровибуху на дно устаткування.*

9. Соломяный А.У., Шкалова А.В., Агаркова Е.В., Гузь К.Л. Особенности пульсации газового пузыря при гидровзрывной штамповке // Процессы и оборудование импульсной штамповки: Сб. научных трудов – Х.: Харьковский авиационный институт, 1989. – С.37. – 48.

*Здобувачем здійснене моделювання поведіння газового пузыря, визначені положення його границь при вибуховому штампуванні.*

10. Соломяный А.У., Московец В.И., Шкалова А.В. Экспериментальное исследование результирующих сил взрыва, действующих на дно бассейна // Труды Всесоюзной научно-технической конференции “Использование импульсных источников энергии в промышленности” – Х.: Харьковский авиационный институт, 1985.- С.90.

*Здобувачем запропонована схема експериментальної установки для дослідження пульсації газового пузыря й інших факторів, що діють на дно установки.*

11. Соломяный А.У., Шкалова А.В., Панченко В.Е. Методика определения давлений при взрывной штамповке // Труды Всесоюзной научно-технической конференции “Использование импульсных источников энергии в промышленности” – Х.: Харьковский авиационный институт, 1985.- С.91

*Здобувачем запропонована методика визначення тиску при вибуховому штампуванні.*

12. Соломяный А.У., Шкалова А.В., Агаркова Е.В. Исследование физических процессов при взрыве в ограниченном объеме жидкости // Труды Всесоюзной научно-технической конференции “Использование импульсных источников энергии в промышленности” – Х.: Харьковский авиационный институт, 1990.

*Здобувачем проведено дослідження фізичних процесів при вибуху в обмеженому об'ємі.*

13. Соломяный А.У., Шкалова А.В. Использование специальных пьезоэлектрических датчиков для измерения нагрузок при схлопывании газового пузыря в установках гидровзрывной металлообработки // Винахідник і раціоналізатор. – Київ: 2003. – № 5. -С.20-21.

*Здобувачем запропоновано методика виміру навантажень в установках гідровубухової металообробки.*

## АНОТАЦІЇ

Шкалова А.В. Дослідження і розробка технології та обладнання для імпульсного об'ємного штампування деталей. – Рукопис.

Дисертація присвячена об'ємному штампуванню вибухом деталей. При цьому вперше доведена можливість і доцільність застосування енергії вибуху для об'ємного штампування на прикладах одержання деталей складної конфігурації різними методами прикладання навантаження.

Нарешті доведено, що для одержання якісних деталей і досягнення відповідної стійкості оснащення необхідно при декілька менших амплітудах тиску значно збільшити час дії імпульса і створити умови для відповідного розподілу напруги та деформацій у заготівці.

Для цього вперше спроектоване спеціальне обладнання для штампування об'ємних деталей з зовнішніми та внутрішніми деформуємими контурами, а також з прикладенням навантаження, яку виконує осадку, пряме і зворотне витискування і другі процеси обробки тиском.

Вперше визначені параметри зовнішнього навантаження, діючого на заготівку, які визначається в наслідку взаємодії прямих і відбитих хвиль, гідропотоку, зхлопування газового пузиря, врахування кавітаційних явищ, переміщення гідробасейну або частин обладнання, підсилення або ослаблення силових потоків на заготівку із-за екранізації їх газовим пузирем, відображення від вільної поверхні та інших перепон.

Теоретичні рішення (по складеним математичним моделях кожного із цих явищ) підтверджені експериментальними дослідженнями.

Таким чином було визначено зовнішнє навантаження на деформуєму заготівку, яке передається на виріб зі значним коефіцієнтом корисної дії (до 0,4).

Проведені впровадження у виробництво процесів об'ємного деформування на ряді підприємств країни, які дали значний економічний ефект (до 200 т. грн. на рік).

Ключові слова: технологія, обладнання, деформації, обробка, тиск, машини, процеси, штампування, заготівка, модель, вибух, ударні хвилі, імпульс.

Шкалова А.В. Исследование и разработка технологии и оборудования для импульсной объемной штамповки деталей. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – процессы и машины обработки давлением.

Диссертация посвящена объемной штамповке взрывом деталей. При этом впервые доказана возможность и целесообразность применения энергии взрыва для объемной штамповки на примерах получения деталей сложной конфигурации различными методами приложения нагрузки.

В конечном итоге доказано, что для получения качественных деталей и достижения приемлемой стойкости оснастки необходимо при несколько меньших амплитудах давлений значительно увеличить время действия импульса и создать условия для благоприятного распределения напряжений и деформаций в заготовке.

Опыт штамповки взрывом показал, что целый ряд практических и теоретических вопросов, не решенных на сегодняшний день, не играют существенной роли при изготовлении деталей мелкими сериями. Однако при освоении серийного и крупносерийного производства эти вопросы перерастают в серьезную проблему. Таким образом, несмотря на значительные успехи в области теории и практики взрывной штамповки, ряд вопросов связанных с внедрением этого процесса в производство продолжает оставаться серьезной проблемой, требующей дальнейшего решения.

К таким процессам относится в первую очередь объемная штамповка, по которой нет пока серьезных и теоретических и практических исследований, а тем более внедренческих работ.

Для этого впервые предложены специальные установки для штамповки объемных деталей с внешним и внутренним деформируемыми контурами, а также, с приложением нагрузки, осуществляющей осадку, прямое и обратное выдавливание и другие процессы обработки металлов давлением.

Впервые определены параметры внешней нагрузки, действующей на заготовку, которая определяется в результате взаимодействия прямых и отраженных волн, гидротока, схлопывания газового пузыря, учета кавитационных явлений, перемещения гидробасейна или частей

установки, усиления или ослабления силовых потоков на заготовку из-за экранирования их газовым пузырем, отражения от свободной поверхности и других преград. Теоретические предположения (по составленным математическим моделям каждого из этих явлений) подтверждены экспериментальными исследованиями.

Таким образом была определена внешняя нагрузка на деформируемую заготовку, передающаяся на изделие со значительным КПД (до 0,4).

Проведен расчет КПД процесса, доказавший целесообразность применения разрабатываемой технологии с точки зрения рационального использования энергозатрат и экономии в использовании традиционных источников энергии. Общий КПД, определяемый параметрами внешней нагрузки, упомянутыми выше, значительно больше существующих при использовании традиционного кузнечно–прессового оборудования и достигает величин 0,38–0,42.

Проведенные исследования позволили увеличить длительность прилагаемой к заготовке нагрузки, что привело к увеличению стойкости оснастки и благоприятному распределению напряжений и деформаций в заготовке.

Составлены программы для расчета силы и импульса давления, действующих на дно установки. Полученные зависимости позволяют определить распределение давления в плоскости дна в любой момент времени. Проведены и экспериментально проверены расчеты кавитационных явлений происходящих у поверхности и в районе донной части установки и определено их влияние на силовые параметры.

Составлен алгоритм давления в газовом пузыре. Определено влияние на процесс нагружения дна схлопывающейся газовой полостью, а также на деформируемую заготовку при движении емкости под действием силы взрыва.

Представлены примеры процессов изготовления нескольких деталей из объемных заготовок для предприятий страны "Мотор–Січ", АНТК "Антонов", ГКБ "Южное", показывающие целесообразность применения объемной штамповки взрывом на машиностроительном производстве.

Проведены внедренческие работы на ряде предприятий страны, давшие значительный экономический эффект (до 200 тысяч грн. в год).

Ключевые слова: технология, оборудование, деформации, обработка, давление, машины, процессы, штамповка, заготовка, модель, взрыв, ударные волны, импульс.

Alla V. Shkalova. Investigation and Elaboration of Technology and Equipment for the Pulsed 3D Forming of Parts. – Manuscript.

Thesis for a Candidate of Engineering Sciences Degree 05.03.05 – “Processes and machines of Treating by Pressure”.

The thesis is dedicated to the 3D explosive forming of parts. Therewith for the first time was proved the possibility and expediency of explosive energy application for the 3D punching exemplified by the complex configuration parts obtaining by different methods of load action.

It was proved in the final analyses, that for the qualitative parts obtaining and the acceptable resistance of equipment reaching it is necessary to substantially increase the time of pulse action at just lower pressure amplitudes and to create the conditions for favorable distribution of tension and strengths in the half-finished product.

To do this for the first time were proposed special plants for 3D parts forming with outward and internal deformed contours, and also with applying the load which realizes settling, through and reverse squeezing, and other processes of metals treating by pressure.

For the first time were defined the parameters of external load, acting on the half-finished product, which is determined as a result of straight and reflected waves interaction, hydro-flow, removing of gas bubble, taking into account the cavitation phenomena, shift of the hydro-pool or the parts of plant, strengthening or weakening of the force flow on the half-finished product because of shielding them by gas bubble, reflection from the free surface and the other obstacles.

The theoretical premises (in set up mathematical models each of these phenomena) are verified by experimental investigations.

By this means the external load, acting on the deforming half-finished product was determined, transmitting to the article with the considerable efficiency (up to 0,4).

The promoting works at several enterprises of Ukraine are carried out with considerable economic effect about 200 thousand hrn. / year.

Key words: technology, equipment, deformation, treating, pressure, machines, processes, forming, semi-finished product, model, explosion, shock waves, pulse.