

**Український науково-дослідний інститут
авіаційної технології**

На правах рукопису
УДК 621.7.044

Кривцов Володимир Станіславович

**КОНЦЕПЦІЯ СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА ДЕТАЛЕЙ
ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
ІМПУЛЬСНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ**

Спеціальність 05.07.04 - Технологія виробництва літальних
апаратів

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук

Київ - 1997

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00750984 (X)

**Український науково-дослідний інститут
авіаційної технології**

На правах рукопису
УДК 621.7.044

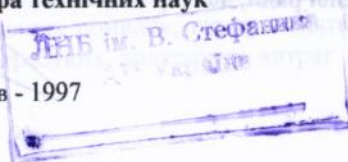
Кривцов Володимир Станіславович

**КОНЦЕПЦІЯ СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА ДЕТАЛЕЙ
ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
ІМПУЛЬСНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ**

Спеціальність 05.07.04 - Технологія виробництва літальних
апаратів

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук

Київ - 1997



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському авіаційному інституті
ім. М.Є. Жуковського

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бичков С.А.
доктор технічних наук
Божко В.П.
доктор технічних наук, професор
Мовшович А.Я.

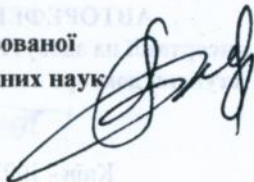
Провідна установа - Дніпропетровський державний університет

Захист дисертації відбудеться «25» вересня 1997 р.
о 15 год. 00 хвил. на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д.01.16.01 в Українському науково-дослідному інституті
авіаційної технології (УкрНДІАТ) за адресою: 254080, м. Київ, вул.
Фрунзе, 19/21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотечі УкрНДІАТ.

Автореферат розісланий «15» серпня 1997 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, доктор технічних наук



В.А. ТИТОВ

Актуальність теми. Вдосконалення технічного рівня авіаційної техніки, як і всієї продукції машинобудування, в багатьох випадках пов'язане з рівнем технологічного забезпечення реалізації прогресивних проектних рішень. В свою чергу розробка і створення нових технологій, як і багато інших видів інженерно-технічної діяльності, вимагає вдосконалення методології інтелектуальної творчості. Це обумовлює необхідність наукової і методичної розробки загальних теоретичних основ створення складних технологічних систем.

В силу специфіки авіаційних конструкцій, в яких листові деталі точної форми складають значну частину всієї номенклатури деталей (біля 20 відс. загальної трудомісткості виготовлення виробу), застосування найбільш ефективних технологій в заготівельно-штампувальному виробництві становиться однією з актуальних задач виробництва літальних апаратів.

Серед цих технологій особливий інтерес являють собою технологічні процеси, які базуються на імпульсних методах обробки металів.

Теоретичні і практичні проблеми використання імпульсних джерел енергії при обробці металів досліджувались та відображені в працях вчених Піхтовнікова Р.В., Кононенка В.Г., Алексєєва Ю.М., Попова О.В., Анучина О.Д., Ісаченкова Є.І., Борисевича В.К., Галієва Ш.У., Григолюка Е.І., Бичкова С.А., Мовшовича О.Я., Сабелькіна В.П. В цих, а також багатьох інших роботах викладені переваги імпульсних технологій, дано обґрунтування їх використання для вирішення конкретних наукових та практичних задач отримання високоточних і складних деталей, у тому числі авіаційного призначення.

При розробці конкретних технологій виготовлення деталей літальних апаратів важливо мати цілісну технологічну систему. На початкових етапах розробки складних технологічних систем часто немає достатньо повних даних щодо структури самої системи, функціонування елементів, які входять до неї, їх взаємозв'язків і взаємовпливів одне на одного. Крім того, при проектуванні в системи вводять нові елементи, взаємодію між якими на етапі освоєння нового виробу оцінити кількісно і якісно вкрай важко.

Нерідко в умовах нестатку інформації при прийнятті рішень про створення технологічних систем для реалізації конкретних технологій виникає велика ймовірність суб'єктивних помилок, що приводять до серйозних технічних наслідків і потребують додаткових витрат при реалізації технологій.

В дисертаційній роботі запропоновано концепцію створення технологічних систем, реалізація яких дозволяє значно знизити суб'єктивні помилки, здійснити факторний контроль в процесі реалізації технології, автоматизувати проєктування технологічних систем і головне - скоротити витрати, підвищити якість кінцевої продукції.

Робота проводилась у відповідності до виконання таких програм:

- Комплексна програма робіт з Міністерством машинобудування, ВПК і конверсії України «Імпульсні ресурсозберігаючі технології та обладнання для підвищення характеристик виробів машинобудування та військово-промислового комплексу України» на 1992-1996 р.р.;
- Програма робіт «Створення високоефективних антенних конструкцій» Національного космічного агентства України в інтересах ракетно-космічної промисловості України на 1993-1995 р.р.;
- Програма робіт «Розробка високоефективних технологій обробки тиском» (4.2.2.) Державного комітету України з питань науки і технологій на 1993-1995 р.р.;
- Програма робіт «Розробка технологічних процесів та обладнання для імпульсного штампування складних деталей і одержання нових матеріалів» Міністерства освіти України на 1992-1997 р.р.

В дисертації також узагальнені окремі результати робіт автора в галузі авіаційної технології і механіки деформівного твердого тіла за 25-річний період.

Мета роботи. В галузі науковій - розробка загальної концепції створення технологічної системи для виробництва деталей літальних апаратів, яка дозволяє охопити існуючі та створюємі технологічні процеси з врахуванням факторів взаємного впливу об'єктів, які складають технологічну систему заготівельно-штампувального виробництва на базі імпульсних джерел енергії.

В галузі практичній - створення нових теоретико-експериментальних методів та обчислювальних алгоритмів для визначення параметрів технологічних процесів і технологічного обладнання, які дозволяють формулювати рекомендації для забезпечення технологічності вибраної номенклатури виробів. Розробка нових засобів виготовлення виробів авіаційної техніки, елементів обладнання і оснастки для реалізації запропонованих технологій, які дозволяють отримати деталі складної конфігурації, високої якості при мінімальних витратах.

В роботі поставлені і вирішені такі основні *завдання*:

- визначено конфігурацію технологічної системи - склад її об'єктів і характеристик кожного об'єкту з врахуванням факторів взаємного впливу;
- проведено синтез складу технологічної системи і параметрів об'єктів на макрорівні на основі інтуїтивно-логічних підходів у сполученні з якісно-кількісними методами обробки експертних даних для опису і керування процесами аналізу і синтезу прийняття технологічних рішень;
- розроблені науково-обґрунтовані рекомендації синтезу технологічної системи на рівні маршрутних і операційних технологій для виробництва авіаційних деталей імпульсними методами обробки;
- створено методику і алгоритми вирішення задач динамічного пружно-пластичного деформування імпульсно навантажених листових заготовок у процесі їх перетворення в великогабаритні, високоточні оболонкові деталі з врахуванням факторів зовнішнього навантаження, пружнього розвантаження, контактної взаємодії та залишкових явищ;
- розроблено теоретико-експериментальний метод аналізу поведінки типового штампувального обладнання для моделювання динамічних процесів машин імпульсної дії типу «прес-пушка», який дозволяє досліджувати технологічні, експлуатаційні та міцнісні характеристики обладнання і оснастки; на основі цих досліджень дано технологічні рекомендації по вдосконаленню проектування та експлуатації машин імпульсної металообробки;
- для створення математичної моделі технологічного обладнання і чисельного дослідження його технологічних та експлуатаційних характеристик запропоновано, теоретично та експериментально обґрунтовано нову модель зв'язку силових елементів технологічного обладнання, яка враховує пружні, демпфуючі та інерційні властивості зв'язку;
- експериментально досліджено вплив різних технологічних факторів на параметри деформування і кінцевий стан штампованих напівфабрикатів, оснастки та обладнання;
- проведено аналіз і порівняння теоретичних і експериментальних результатів, на основі запропонованої концепції спроектовані технологічні процеси виготовлення типових деталей літальних апаратів;
- розроблені і впроваджені на підприємствах галузі рекомендації по створенню технологічних систем, а також конкретні технологічні

процеси виробництва складних деталей імпульсними методами обробки.

Методи досліджень. Виконані в роботі дослідження базуються на методах системного аналізу і синтезу, системотехніки, експертного аналізу та оцінок, теорії тонких пластин і оболонок, їх пружно-пластичного деформування.

Для побудови концепції запропоновано новий підхід, який базується на експертній процедурі аналізу технологічних факторів і їх впливу на характеристики елементів технологічної системи та отримуваних виробів в рамках функціонування розглянутої системи.

Для аналізу динамічної поведінки деформуємих в процесі формоутворення заготовок і імпульсного обладнання, а також наступного синтезу його основних вузлів під дією імпульсних силових і термічних навантажень використані рівняння теплопровідності та механіки деформівних суцільних середовищ, динаміки і міцності машин, розв'язання яких проводилось із застосуванням скінченно-елементних та скінченно-різницевих методів із залученням нових скінченних елементів зв'язку, які відображають реальні взаємодії вузлів технологічного обладнання.

Експериментальні дослідження проводились на розроблених дослідних і дослідно-промислових установках з застосуванням високошвидкісної стандартної та спеціально спроектованої вимірювальної та реєструючої апаратури.

Рекомендації для виробництва деталей літальних апаратів і вдосконалення технологічного обладнання базуються на результатах чисельного моделювання, експериментальних досліджень та розроблених технологічних процесах.

Розв'язання завдань, розглянутих у роботі, реалізовано на персональних ЕОМ з використанням розробленого автором і існуючого математичного забезпечення.

Наукова новизна.

- Вперше запропоновано і розроблено науково обгрунтовану концепцію створення технологічної системи, яка базується на експертно-аналітичних процедурах із врахуванням факторів взаємного впливу об'єктів, що входять до неї.
- Запропоновано і обгрунтовано новий підхід до вибору найбільш важливих факторів взаємного впливу об'єктів технологічної системи, який дозволяє в результаті її функціонування більш ефективно

через керування і контроль, якісні і кількісні оцінки факторів забезпечити досягнення потрібних характеристик кінцевої продукції. Даний підхід адаптовано і показані принципи його функціонування на прикладі системи імпульсного формоутворення листових деталей літальних апаратів.

- Розроблено, теоретично і експериментально обґрунтовано метод моделювання процесу штампування великогабаритної високоточної деталі типу оболонки, який дозволяє враховувати фізичну і геометричну нелінійність, податливість матеріалу заготовки з-під прижимів, пружне розвантаження, контакт заготовки з матрицею, нормувати зовнішнє нестационарне навантаження в процесі штампування, аналізувати рівень залишкових напружень в деталі.
- Розроблена, теоретично та експериментально досліджена нова математична модель типової конструкції машини імпульсної дії в умовах динамічного навантаження. Відмінною властивістю моделі є її універсальність і новий підхід до врахування параметрів зв'язку конструктивних елементів.
- Проведена теоретична оцінка і показана можливість використання поряд з вибуховими речовинами робочого тіла «вологий пар води» для прискорення поршню в машинах імпульсної дії.

Практична цінність роботи та її реалізація.

1. Розроблені на базі запропонованої концепції процедури дозволяють автоматизувати не лише вирішення конкретних технологічних завдань, а і процес прийняття обґрунтованих рішень на початкових етапах розробки технологічної системи.
2. Розроблені математичні моделі та програмне забезпечення по дослідженню поведінки листових заготовок і технологічного обладнання в умовах імпульсного навантаження дозволяють провести вибір раціональної технології виготовлення деталей.
3. Розроблені математичні моделі і алгоритми в рамках загального підходу дозволяють з високою ефективністю здійснювати перехід від фізичних технологічних експериментів до чисельних, враховувати при цьому реальний характер зв'язків в елементах обладнання і технологічного оснащення.
4. Запропоновано принципово новий енергопривід, що базується на ефекті розширення робочого тіла «вологий пар води», який може бути використаний не лише в машинах імпульсної обробки (як показано у роботі), але і в інших пристроях.

5. Отримані в даній роботі технологічні рішення використані при створенні технології серійного виробництва великогабаритних (до 2,5 м) оболонкових конструкцій.
6. Результати виконаних автором і за його участю досліджень одержали практичне втілення у впровадженні в виробництво технологічних рішень, що стосуються вдосконалення проектування технологічного обладнання та оснастки для імпульсної металообробки, зокрема на підприємстві АО «Мотор Січ» (м. Запоріжжя) і АНТК «Антонов» (м. Київ), а також увійшли складовою частиною в укладену Харківським авіаційним інститутом міжнародну угоду з UNAM (Національний автономний університет м. Мехіко), програми Міністерства промислової політики та департаменту критичних технологій Міннауки України.

Апробація роботи. Окремі розділи і положення роботи доповідались та обговорювались на галузевих та міжнародних конференціях, симпозіумах і семінарах:

I - V міжнародних конференціях по новим технологіям в машинобудуванні в с. Рибаче, Крим (1992 - 1996 р.р.); II конференції нових технологій фірми «РЕМЕХ» в м. Мехіко (1994 г.); IV Україно-Російсько-Китайському симпозіумі по космічній науці і технології в м. Києві (1996 р.); II Українській конференції по горінню, балістиці і механіці співударянь в м. Одесі (1996 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми машинобудування» в м. Гомелі (1996 р.); міжнародному науково-технічному семінарі - виставці «Проблеми і напрямки утилізації звичайних видів боєприпасів» в УкрНДІАТ, м. Київ (1996 р.); міжнародній виставці-ярмарці «Обладнання і технології металообробки» «FAMETA» в Нюрнберзі, ФРН (1992 р.); міжнародних виставках-ярмарках у м. Гавані, Р. Куба (1989, 1990, 1991 р.р.); науково-технічному семінарі інституту металознавства Університету Отто-фон-Геріке м. Магдебург, ФРН (1995 р.); науково-технічних семінарах Харківського авіаційного інституту (1991-1997 р.р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 34 наукових праці, у тому числі 1 навчальний посібник (без співавторів, обсягом 204 с.), 1 монографія, крім того 12 звітів НДР, які не увійшли в список праць, що додається.

Структура і обсяг роботи. Дисертація загальним обсягом 312 сторінок складається із вступу, 6 розділів і висновків, викладених на

300 сторінках машинописного тексту, містить 86 ілюстрацій, 11 таблиць і список літератури на 12 сторінках з 114 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ.

Вступ. У вступі формулюється актуальність теми, підкреслюється важливість значного підвищення рівня створення нових ресурсозберігаючих технологій, зокрема таких, що базуються на надвисоких тисках, що генеруються імпульсними джерелами енергії. Відмічаються сучасні тенденції розвитку авіаційно-космічної техніки, застосування нових підходів у створенні авіаконструкцій.

1. Стан теорії і практики розробки технологічних процесів і обладнання для імпульсної обробки металів тиском.

У першому розділі дано аналіз конструктивних особливостей деталей літальних апаратів. Вказується, що в конструкціях сучасних літальних апаратів і двигунів листові деталі складних і точних форм складають значну частину від загальної кількості деталей, які входять у складальні одиниці. При цьому зростання кількості листових деталей спостерігається не лише в силових або забезпечуючих аеродинамічні обводи літальних апаратів агрегатах, але і в системах життєзабезпечення, енергетичній та інших.

Проблема виготовлення таких деталей ускладнюється також в зв'язку з більш широким застосуванням в конструкціях літальних апаратів матеріалів, які мають більш високі міцнісні властивості, що у більшості випадків поєднується з погіршенням їх технологічних характеристик. Це потребує постійного вдосконалення технологій, розробки нових способів обробки матеріалів.

Показано, що імпульсні технології найбільш ефективні при одиничному та дрібносерійному виробництві виробів великих габаритів з високою точністю профілю робочої поверхні з високоміцних матеріалів. Останні особливості є найбільш характерними для виробництва авіаційної техніки. Більше того, в цьому випадку одним з найбільш важливих факторів є часта зміна об'єктів виробництва, що вимагає використання універсальних технологічних процесів, до яких відносяться імпульсні технології.

Дано аналіз існуючих підходів до побудови технологічної системи виготовлення авіаційних деталей. Одним з них є підхід, що базується на побудові розрахункових моделей зв'язків різних технологічних па-

раметрів. Він сформульований як проблема оптимального проектування у широкому спектрі керуючих функцій, а саме: імпульсне навантаження, дія температури, характеристики межових умов для заготовки та інші. При цьому підходить заздалегідь, без достатнього аналізу та обґрунтування, виключається з розгляду основна кількість взаємопов'язаних об'єктів технологічної системи і фіксуються лише ті, що піддаються формалізованому опису за допомогою математичних моделей. Це приводить до зниження обсягу вихідної інформації, збільшує ступінь необґрунтованого ризику при прийнятті технологом рішення про можливість використання конкретної технології.

Існує також підхід, побудований на створенні структурно-системних моделей технологічно орієнтованого класифікатора об'єктів виробництва. Система класифікації і кодування тут є основою змістовного і формалізованого описів об'єктних складових технологічних систем. Цей підхід базується на трьох аспектах: геометричному, конструктивно-функціональному і власне технологічному. Систему підрозділено на два рівні: вищих і глибоких класифікаційних угруповань (таксонів). Вищі класифікаційні угруповання встановлюють об'єктну галузь, яка відповідає технологічним можливостям виробництва, а далі на основі деформаційних моделей будуються структурно-технологічні моделі об'єктів. Головним недоліком такого підходу є високий рівень суб'єктивності при побудові вищих класифікаційних угруповань, врахування часто несуттєвих ознак і можлива втрата визначальних.

Далі у розділі розглянуті існуючі моделі для розрахунків параметрів технологічних процесів (переважно на рівні операційних технологій), динамічної поведінки і кінцевого стану листових і оболонкових деталей. В цих моделях не завжди враховуються в повній мірі межові та початкові умови, характерні для імпульсних методів обробки.

Проведено аналіз існуючих підходів до проектування технологічного обладнання для імпульсного формоутворення та оцінки його напружено-деформованого стану. Показано, що окремі розрахункові методики потребують вдосконалення, особливо щодо моделювання зв'язків реальних конструктивних елементів.

На підставі проведеного аналізу стану сформульовані мета і завдання дослідження.

2. Концепція побудови технологічної системи і взаємозв'язку технологічних процесів, застосовуемого обладнання і деталей.

У другому розділі викладені основні принципи запропонованого підходу, що включають:

1. Системність.
2. Комплексне врахування конструктивно-технологічних параметрів.
3. Врахування статичних і динамічних характеристик.
4. Використання неформалізованих процедур (експертних оцінок) і формальних математичних підходів і моделей.
5. Виділення суттєвих факторів для синтезу технологічної системи.
6. Універсальність підходу до задач проектування різного класу технологічних процесів і технологічної оснастки.
7. Проектування технологічної системи за принципом «зверху вниз» - від загальних положень(класифікації) до окремих рішень.
8. Використання групових оцінок на початкових етапах проектування технологічної системи.
9. Аналіз взаємного впливу суттєвих факторів для синтезу технологічної системи.
10. Прогнозування характеристик майбутніх технологічних систем.
11. Вибір різних варіантів з численності можливих шляхом перебору.

Показано, що суттєвий вплив на хід технологічних процесів виготовлення деталей літальних апаратів має динамічна поведінка імпульсного обладнання та технологічного оснащення. З іншого боку, спостерігається вплив характеру технологічного процесу на динаміку обладнання і технологічного оснащення, що суттєво визначає його ресурс і експлуатаційні характеристики. Разом з тим, технологічність виготовлення виробу впливає на конструкцію останнього. Таким чином, всі складові технологічної системи знаходяться у діалектичній єдності та взаємовпливі. При цьому існують визначальні зв'язки і дургорядні, однак у більшості випадків апіорі важко проглядаються першочергові визначальні фактори, що при проектуванні нових технологічних процесів в системі технологічної підготовки виробництва приводить до необхідності врахування максимально можливої кількості факторів. Це різко ускладнює можливість аналізу їх взаємозв'язків, синтезу правильних рішень і зрештою знижує ефективність виробництва в цілому.

Сутність концептуального підходу побудови технологічної системи складає:

1. На основі структурного аналізу конструкцій літального апарату

(компоновочні схеми, схеми членування і т.д.), класифікації технологічних процесів виробництва, з врахуванням критеріальних оцінок і обмежень (конструктивних і технологічних) формується численність можливих альтернативних варіантів взаємозв'язків і взаємовпливів об'єктів складної технологічної системи і створюється її структурний вигляд. Зокрема, для заготівельно-штампувального виробництва з використанням імпульсних методів обробки деталей структуру технологічної системи представлено на рис. 1.

2. З метою пониження розмірності численності взаємозв'язків, врахування найбільш суттєвих технологічних і конструктивних факторів, в умовах неможливості вибору раціональних або оптимальних варіантів на основі прямих аналітичних рішень, проводиться експертна оцінка і вибір раціональної технологічної системи.
3. На основі логіко-аналітичних і статистичних методів проводиться обґрунтування і вибір найбільш суттєвих факторів взаємного впливу об'єктів технологічної системи.
4. З використанням розроблених автором методів (для великогабаритної високоточної тонкостінної оболонки і обладнання для імпульсної обробки), а також існуючих методів механіки суцільних середовищ, прикладної математики та ін. формуються математичні моделі якісної та кількісної оцінки найбільш суттєвих факторів (технологічних параметрів).
5. На основі отриманої структури технологічної системи з врахуванням наявних моделей якісної та кількісної оцінки найбільш суттєвих технологічних факторів, з метою реалізації вимог, що ставляться до деталі (класу деталей), проводиться розробка методик проектування об'єктів технологічної системи: заготовки, оснастки, обладнання і безпосередньо технологічного поцесу.
6. З метою перевірки вірогідності розроблених математичних моделей технологічної системи та її елементів проводяться експериментальні дослідження на дослідних зразках.
7. На основі наявних теоретичних та дослідно-експериментальних даних розробляється технологічний процес виробництва конкретних деталей.

Далі у другому розділі роботи приводиться опис методів отримання експертних оцінок, визначення найбільш суттєвих факторів взаємного впливу характеристик об'єктів технологічної системи і параметрів виготовляємих деталей. Схема процедури обробки експертних оцінок на рівні вибору параметрів технологічних процесів приведена на рис. 2.

На основі проведеної класифікації деталей типу оболонки за конструктивно-технологічними ознаками викладені принципи реалізації загального підходу, проаналізовані фактори впливу на рух і кінцевий стан листової заготовки (фактори зовнішнього навантаження та деформованого стану). Вивчені фактори реакції формують елементів (оснастка). Зокрема, поряд з найбільш розповсюдженим підходом, коли в розрахункових схемах оснастка приймається абсолютно жорсткою, розглянуто схеми з пружним формують елементом. Показано перевагу цих схем в плані розвитку безматричного штампування, коли до точності поверхні деталі високі вимоги не ставляться, або при безматричному штампуванні на перших технологічних переходах, коли після нього виконується калібровочне штампування в жорстку матрицю.

На основі приведеного аналізу сформована структура технологічної системи виготовлення типової деталі типу великогабаритної ($\varnothing 1,8$ м), тонкостінної ($\delta = 0,002$ м) оболонки.

Виділено декілька рівней проектування: розробка принципової схеми взаємодії елементів технологічної системи, проектування технологічного маршруту обробки деталі і, нарешті, проектування технологічних переходів і операцій з визначенням їх основних технологічних параметрів.

Формування *маршрутної технології* здійснено в залежності від конструктивно-технологічних особливостей деталі і вимог точності, що ставляться до основних, найбільш відповідальних поверхонь, у нашому випадку - внутрішніх. Для формування основних поверхонь з врахуванням точності та конфігурації заготовки, досяжних коефіцієнтів витяжки сформовані схеми штампування, призначені можлива кількість та послідовність виконуваних переходів, визначені склад переходів і операцій, які представлені в табличному вигляді.

Операційна технологія розроблена з врахуванням місця кожної операції в маршрутній технології. При проектуванні операцій визначені: їх структура, схеми формують, розрахунок отримуваних розмірів, параметри і режими обробки.

Представлені результати експертних оцінок по визначенню впливу окремих елементів технологічної системи на виготовлюємий виріб. Деталь характеризується сукупністю з 40 ознак (матриця-вектор розмірністю 1×40). Основні елементи технологічної системи, такі як: заготовка (матриця-вектор розмірністю 1×30), технологічний процес (матриця - вектор розмірністю 1×30), оснастка (матриця - вектор

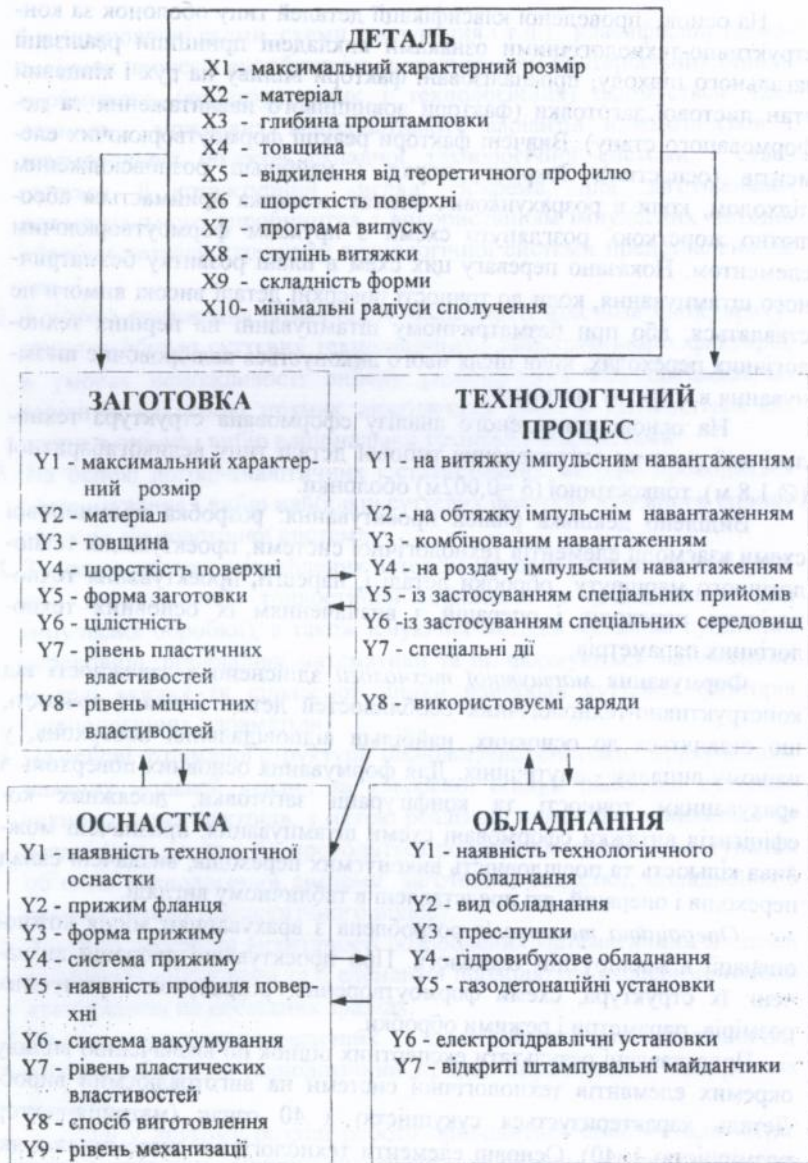


Рис.1 Основні об'єкти технологічної системи

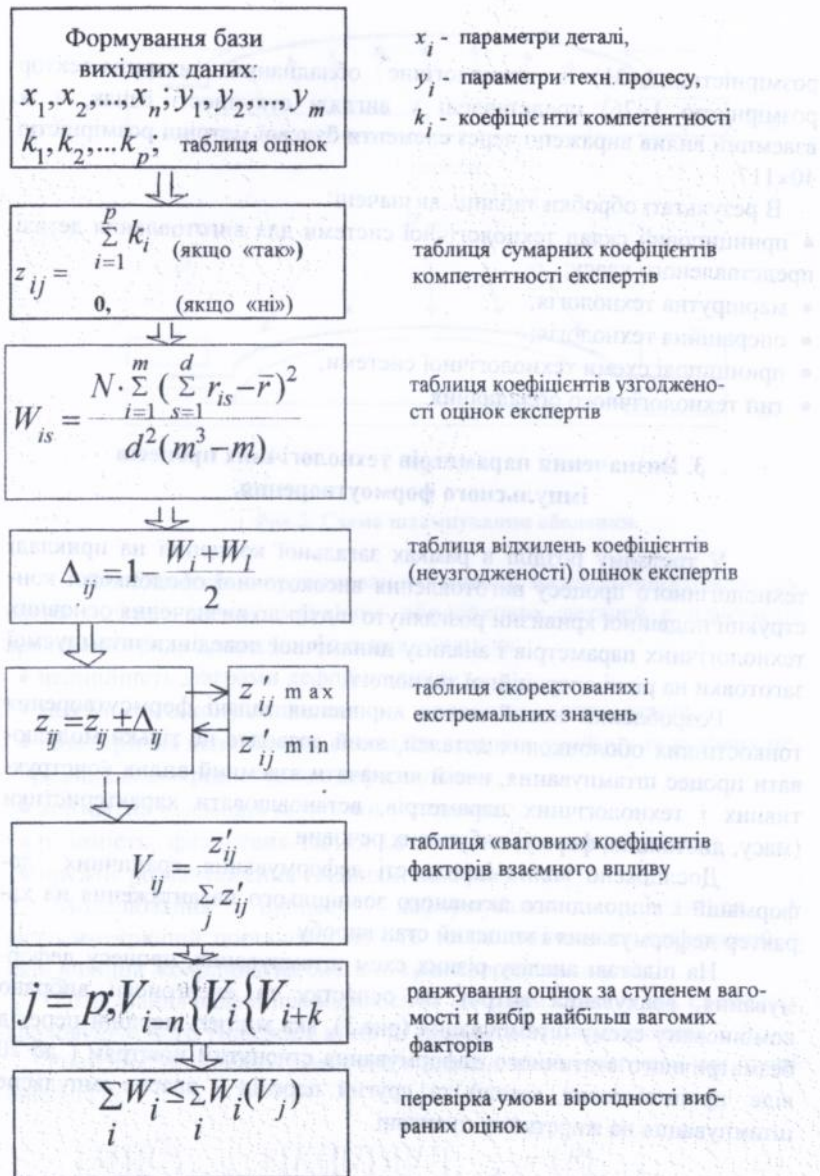


Рис. 2. Схема загальної процедури експертних оцінок та вибору найбільш вагомих факторів взаємного впливу об'єктів технологічної системи.

розмірністю 1×31) і технологічне обладнання (матриця-вектор розмірністю 1×26) представлені у вигляді сукупності ознак, а їх взаємний вплив виражено через елементи булської матриці розмірністю 40×117 .

В результаті обробки таблиць визначені:

- принципний склад технологічної системи для виготовлення деталі представленого класу;
- маршрутна технологія;
- операційна технологія;
- принципіві схеми технологічної системи;
- тип технологічного обладнання.

3. Визначення параметрів технологічних процесів імпульсного формоутворення.

У третьому розділі в рамках загальної концепції на прикладі технологічного процесу виготовлення високоточної оболонкової конструкції подвійної кривизни розглянуто підхід до визначення основних технологічних параметрів і аналізу динамічної поведінки штампуємої заготовки на рівні операційної технології.

Розроблений новий метод вирішення задачі формоутворення тонкостінних оболонкових деталей, який дозволяє не тільки моделювати процес штампування, але й визначати взаємний вплив конструктивних і технологічних параметрів, встановлювати характеристики (масу, дистанцію, форму) вибухових речовин.

Досліджено вплив швидкості деформування, граничних деформацій і відповідного активного зовнішнього навантаження на характер деформування і кінцевий стан виробу.

На підставі аналізу різних схем штампування, процесу деформування, врахування витрат на оснастку та енергоносії вибрано комбіновану схему штампування (рис.3), яка містить перший перехід безматричного статичного деформування стиснутим повітрям (до 70 відс. проштамповки деталі) та другий перехід - власне імпульсне штампування на жорсткому пуансоні.

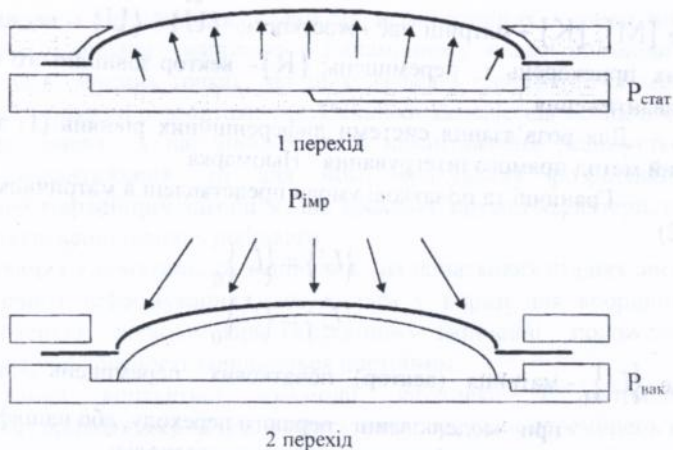


Рис.3. Схема штампування оболонки

Особливістю запропонованого методу математичного моделювання імпульсного штампування оболонкових деталей є одночасне врахування ряду важливих факторів, таких як:

- нелінійність діаграми деформування;
- залежність закону зміцнення від швидкості навантаження;
- геометрична нелінійність внаслідок великих лінійних та кутових переміщень в окремих зонах деформування;
- контактна взаємодія заготовки з матрицею;
- рухомість фланцевих частин заготовки або напівфабрикату;
- пружне розвантаження та динамічні ефекти.

Моделювання процесу деформування проводиться у вісьосиметричній постановці на базі теорії скінченних деформацій, в якій вихідна координатна система трансформується у часі.

Розв'язання задачі проводилось за методом скінченних елементів, враховуючи його універсальність та широке розповсюдження.

Рівняння динамічної рівноваги в довільний момент часу має такий вигляд (1):

$$[M]\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} + [K(\{U\})]\{U\}_{t+\Delta t} = \{R\}_{t+\Delta t}, \quad (1)$$

де $[M]$, $[K]$ - матриці мас і жорсткості; $\{\ddot{U}\}$ і $\{U\}$ - вектори вузлових прискорень і переміщень; $\{R\}$ - вектор зовнішнього вузлового навантаження.

Для розв'язання системи диференціальних рівнянь (1) застосований метод прямого інтегрування - Ньюмарка.

Граничні та початкові умови представлені в матричному вигляді (2):

$$\begin{aligned} \{U\} &= \{U\}_0 \\ \{\dot{U}\} &= \{\dot{U}\}_0 \end{aligned} \quad (2)$$

де $\{U\}_0$ - матриця (вектор) початкових переміщень заготовки при моделюванні першого переходу, або напівфабрикату - при моделюванні наступних переходів;

$\{\dot{U}\}_0$ - матриця (вектор) початкових швидкостей вузлів заготовки.

$\{U\}_{\phi_{1,0}}$ - матриця (вектор) граничних умов на фланцевій частині заготовки або в зоні торкання напівфабрикату з поверхнею оснастки.

Весь процес навантаження було розбито на m - інтервалів з рівними відрізками часу Δt і відповідними прирідстами навантаження.

Для врахування пружньо-пластичного динамічного деформування твердого тіла запропонований узагальнений метод, який полягає в тому, що деформаційне зміцнення та нелінійність враховуються введенням математичної моделі поверхні текучості, що описується поверхнею Мізеса (3):

$$F(\sigma_{ij}) = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} - \sigma_T^2 = 0, \quad (3)$$

де S_{ij} - девіаторні напруження;

σ_T - миттєва межа текучості.

Геометрична нелінійність, наявність немонотонних і інерційних навантажень довільного напрямку в динамічному аналізі призводить до того, що в окремих точках, які знаходяться в пластичній області, відбувається пружне розвантаження. Оскільки заздалегідь невідомо, в яких саме точках на наступному етапі навантаження реалізується пружне розвантаження, то для його врахування розроблений спеціальний ітераційний алгоритм, що враховує пружні характеристики при інтегруванні рівнянь рівноваги.

Врахування кінематичного зміцнення на початкових стадіях високошвидкісного деформування здійснюється у виразі для координат центру поверхні текучості. При ізотропному зміцненні положення центру поверхні текучості залишається постійним.

Врахування контактної взаємодії заготовки з матрицею (пуансоном) проводилось шляхом повузлової перевірки переміщень на кожному етапі навантаження і подальшого коректування обчислювального алгоритму для цих точок.

Компоненти швидкостей дівіаторів деформацій ($\dot{\epsilon}_{ij}$) виражені через поточні компоненти дівіатора напружень (S_{ij}) та їх швидкостей (\dot{S}_{ij}) таким чином (4):

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \begin{cases} \frac{1+\nu}{2E} \dot{S}_{ij} + \frac{3}{2} f(\sigma_e) \cdot S'_{ij} \cdot \dot{\sigma}_e & \dot{\sigma}_e > 0 \\ \frac{1+\nu}{2E} \dot{S}_{ij} & \dot{\sigma}_e < 0 \end{cases} \quad (4)$$

де $S'_{ij} = S_{ij} - a_{ij}$ компоненти дівіатора напружень, вимірені відносно центру поверхні текучості;

$$\sigma_e = \left(\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ ефективні напруження.}$$

Функція $f(\sigma_e)$ у виразі (4) знаходиться з умов еквівалентного одновісного навантаження (5):

$$f(\sigma_e) = \frac{\dot{\epsilon}_p}{\sigma_e \cdot \dot{\sigma}_e} \quad (5)$$

Для представлення діаграми напруження-деформації при одновісному навантаженні використовується апроксимація Рамберга-Осгуда (6):

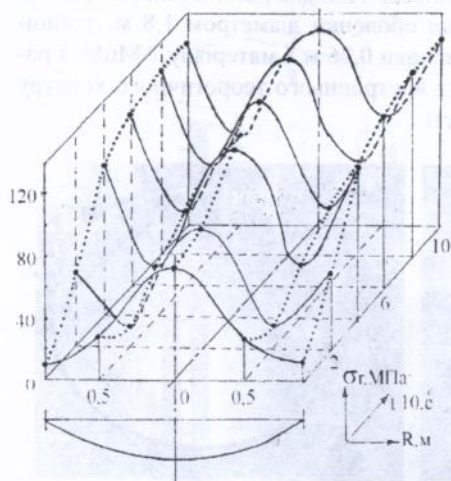
$$\varepsilon = \begin{cases} \sigma/E & \text{при } \sigma \leq \sigma_T \\ \sigma/E + \alpha \left[\sigma/E \cdot (\sigma/\sigma_T)^{n-1} - \sigma_T/E \right] & \text{при } \sigma > \sigma_T \end{cases} \quad (6)$$

В основі алгоритму чисельного розв'язання нелінійної системи (1) лежить метод дотичної жорсткості.

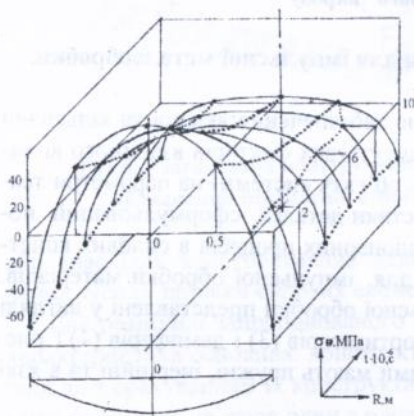
Представлений метод аналізу динамічного деформування листової заготовки реалізовано у вигляді пакету прикладних програм, який дозволяє оцінити: фактори впливу характеристик імпульсного навантаження на форму проміжного напівфабрикату і кінцевого виробу на рівень і розподіл залишкових напружень; вплив зусиль прижиму і тертя на фланцевій частині напівфабрикату; характер взаємодії (швидкість співударяння) заготовки з поверхнею матриці, і в результаті чого визначити найбільш суттєві фактори. Так, наприклад, встановлено, що визначальним фактором для зниження рівня гофроутворення в купольній частині деталі і підвищення точності робочого профілю виробу більш ефективним є вибір величини (ширини) фланцевої частини в порівнянні з величиною (зусиллям) прижиму. Причому, це важливо врахувати на етапі проектування технологічної оснастки, тобто ще до здійснення технологічного процесу штампування. Оцінка рівня залишкових напружень дозволила визначити досяжну величину точності профілю і в наступному - раціональну кількість переходів та додаткових технологічних операцій.

Характер розподілу напружень в процесі імпульсного штампування оболонки представлений на рис. 4.

Відмічається зростання радіальних напружень σ_r (рис. 4,а) у часі для всіх точок перерізу оболонки, достатньо високий рівень залишкових напружень біля куполу та їх значне зростання біля прижимного кільця по контуру оболонки.



а



в

Рис.4. Залежності $\sigma_r(t), \sigma_\theta(t)$ при імпульсному штампуванні оболонки.

Всі напруження $\sigma_r > 0$. Падіння σ_r і σ_θ на ділянці між купольною частиною і прижимним кільцем обумовлено переміщенням в процесі штампування точки контакту від центру до периферії.

Окружні напруження σ_θ (рис. 4,в) при $t = 0$, тобто на початку імпульсного навантаження (після статичної витяжки) є стискаючими поблизу кільця і розтягуючими на іншому просторі, досягаючи максимуму біля куполу.

Встановлено суттєвий вплив відносної товщини заготовки (0,001) на якість деталей внаслідок можливого виникнення хвилястості на робочому профілі виробу і різкого зниження при цьому точності.

На основі викладеного підходу та чисельного моделювання розроблені типовий і конкретні технологічні

процеси виготовлення оболонок діаметром від 0,9 до 2,5 м. На рис.5 приведений зовнішній вигляд типової технологічної оснастки (а) та готового виробу (в)- параболічної оболонки діаметром 1,8 м, товщиною 0,002 м, глибиною проштамповки 0,26 м з матеріалу АМцМ. Гранично припустимі відхилення від внутрішнього теоретичного контуру відповідають 12 квалітету точності.

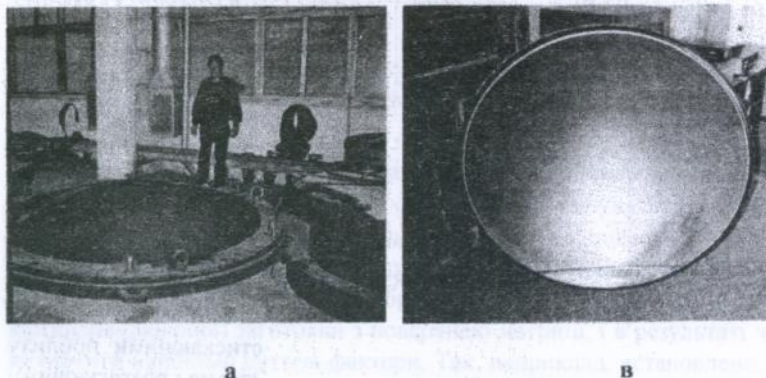


Рис. 5. Зовнішній вигляд технологічної оснастки і готового виробу

4. Проектування обладнання для імпульсної металообробки.

В четвертому розділі з метою забезпечення якісної та кількісної оцінки виявлених раніше найбільш суттєвих факторів взаємного впливу технологічного обладнання (як об'єкту системи) на параметри технологічного процесу та характеристики деталей сформульований новий підхід до дослідження нестационарних процесів в силових конструкціях технологічних установок для імпульсної обробки матеріалів. Типові конструкції машин імпульсної обробки представлені у вигляді сукупності плит (1), колон (2), амортизаторів (3) і демпферів (4) (рис. 6). Зв'язки між окремими елементами мають пружні, інерційні та в'язкі властивості.

Описані відмітні особливості машин для імпульсної обробки металів (прес-пушок, машин для імпульсної різки і брикетування та інших).

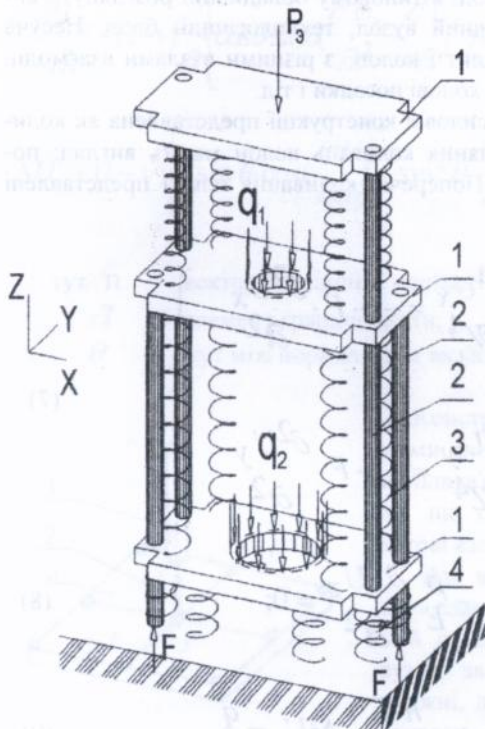


Рис.6. Узагальнена конструктивна схема обладнання імпульсної обробки

або внаслідок конструктивних недосконалостей, наприклад, послаблення зусиль затяжки силових елементів.

Для реалізації запропонованого підходу розроблені класифікаційні характеристики основних конструктивних елементів машин імпульсної дії з врахуванням їх конструктивно - технологічного призначення, умов роботи та зв'язків один з одним; створені динамічні математичні моделі елементів і конструкції в цілому; розроблені алгоритм і програмне забезпечення, які дозволяють реалізувати створені моделі; проведено дослідження та аналіз механічного і теплового стану конструкцій та вироблені рекомендації по проектуванню і експлуатації машин імпульсної дії.

Запропоновано і реалізовано підхід, який дозволяє на базі чисельного моделювання динамічних процесів машин імпульсної дії досліджувати теплові, механічні і міцнісні характеристики створюемого обладнання з метою виявлення якісних і кількісних характеристик факторів взаємного впливу конструктивних елементів обладнання на технологічне оснащення та реалізує параметри технологічного процесу у ході виконання операцій обробки матеріалу. Зокрема, на жорсткість конструкції та граничні технологічні можливості пристроїв, несиметричність дії, що виникає в процесі експлуатації

В запропонованому підході в типовому обладнанні розглянуті: силова конструкція, енергетичний вузол, технологічний блок. Несуча конструкція складається з плит і колон з різними вузлами взаємодії: різьбові з'єднання, ковзні та ходові посадки і т.д.

Математична модель силової конструкції представлена як коливальна система, в якій рівняння коливань колон мають вигляд: подовжні (8), поперечні (7). Поперечні коливання плити представлені залежністю (9).

$$\left. \begin{aligned} EJ_y \frac{\partial^4 U_x}{\partial z^4} &= -\rho \cdot F \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} \\ EJ_x \frac{\partial^4 U_y}{\partial z^4} &= -\rho \cdot F \cdot \frac{\partial^2 U_y}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} - \rho \cdot \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} = 0; \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} + \frac{h^2 E}{12(1-\nu^2)} \Delta^2 U_z = \frac{q}{h} \quad (9)$$

де I_y, I_x - моменти інерції перерізів колон;

ρ - густина матеріалу колон;

F - площа поперечного перерізу колон;

h - товщина плити;

Δ^2 - Лапласіан;

q - розподілене навантаження від робочих зусиль в технологічній зоні;

ν - коефіцієнт Пуасона.

Граничні умови задані у вигляді:

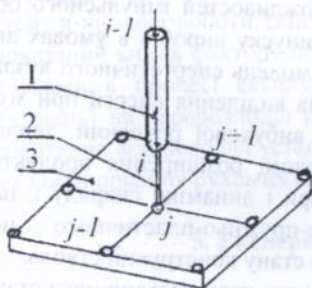
$$-\frac{\partial U_z}{\partial t} + (1-\nu) \frac{\partial}{\partial a} \left\{ \cos\theta \sin\theta \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} \right) + (\sin^2\theta - \cos^2\theta) \frac{\partial^2 U_z}{\partial x \partial y} \right\} = 0 \quad (10)$$

$$\Delta U_z + (1-\nu) \left\{ 2 \sin\theta \cos\theta \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial x \partial y} - \sin^2\theta \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} - \cos^2\theta \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} \right) \right\} = 0 \quad (11)$$

тут Π - вектор зовнішньої нормалі до границі;

a - елемент границі плити;

θ - кут між нормаллю та віссю X .



Конструктивні зв'язки між окремими елементами (наприклад, колона-плита) виступають для них як умови, що обмежують певні лінійні та кутові взаємні переміщення.

Для врахування реального характеру взаємодії колон і плит розроблений спеціальний скінченний елемент вузла зв'язку (рис. 7), який має пружні, демпфуючі та інерційні властивості.

Скінченні елементи (СЕ):

1 - колони; 2 - вузла зв'язку;

3 - плити.

Рис. 7 Модель вузла зв'язку.

Рівняння рівноваги у матричному вигляді для вузла зв'язку має вигляд (12):

$$[M_c] \{\ddot{U}_c\} + [C_c] \{\dot{U}_c\} + [K_c] \{U_c\} - \{Q_c(t)\} = \{R\}, \quad (12)$$

де $\{U_c(t)\}$, $\{Q_c(t)\}$ - вектори-стовпці узагальнених переміщень і зусиль СЕ зв'язку;

$\{R\}$ - вектор реакції; $[M_c]$, $[C_c]$, $[K_c]$ - матриці мас, демпфування та жорсткості СЕ зв'язку.

Коефіцієнти матриць $[M_c]$, $[C_c]$, $[K_c]$ скінченного елемента зв'язку визначено при статичному (K_c) і динамічному навантаженні (C_c, M_c) на експериментальній моделі "колона-плита", а згодом використані через рівняння (12) для побудови узагальненої математичної моделі динамічного стану машини імпульсної металообробки.

Врахування реальних зв'язків в технологічних установках дозволило оцінити дійсний характер переміщень в технологічній зоні і підвищити таким чином точність виготовлення виробів при штампуванні в оснастці з горизонтальними полощинами роз'йому матриць, а також попередити просічку тонких заготовок в щілину при розкритті стику матриць з вертикальними площинами роз'йому.

В плані дослідження енергетичних можливостей імпульсного обладнання та оцінки мінімального такту випуску виробів в умовах автоматизованого виробництва розроблено модель енергетичного вузла, яка включає: математичний опис процесів виділення енергії при згоранні заряду (газового або порохового) вибухової речовини, теплообміну між продуктами згорання і стволом, розширення продуктів згорання з врахуванням втрат через зазори і динаміки снаряду і, нарешті, термопружного або термо-пружно-пластичного нестационарного напружено-деформованого стану конструкції ствола.

Розв'язання системи нелінійних рівнянь термомеханічного стану ствола енерговузла виконано методом скінченних різниць і скінченних елементів. Запропоновані залежності дискретизації рівнянь теплообміну та термопружності. При цьому задача про енерговиділення дискретизується на сітці з постійним шагом у часі, задача теплопровідності - на двомірній просторовій сітці за методом змінних напрямків з послідовною одночасною дискретизацією у радіальному та вісьовому напрямках. Задача динаміки вирішувалась за методом Уілкінса в просторі швидкостей переміщень і напружень. Дискретизацію вісьосиметричної задачі термопружності проведено з використанням чотирикутних, восьмивузлових ізопараметричних скінченних елементів. Інтегрування виконано чисельно за дев'ятиточечною схемою Гауса.

У результаті проведеного чисельного моделювання процесів в енерговузлі показано, що врахування теплових факторів доцільно проводити при тактах випуску виробів рівних або менших за 5 хвилин при максимальних енергетичних режимах роботи обладнання (50-100 кДж).

Для поліпшення економічних та екологічних характеристик існуючого гідродинамічного обладнання, в якому використовуються вибухові речовини, які дорого коштують, небезпечні в експлуатації та створюють шум, запропонований принципово новий енерговузол з робочим тілом "вологий пар води". Показано можливість ефективного використання цього робочого тіла для прискорення важкого поршня (снаряду) у стволі прес-пушки. Для прискорення поршню масою 20 кг до швидкості 100 м/с необхідні такі параметри робочого тіла і ступені розширення: початкова температура 340°C, тиск - 15 Мпа, початковий об'ємний паровміст - 0,5; маса робочого тіла (пар-вода) - 0,7 кг; ступінь розширення - 10.

На основі розробленої моделі несучої конструкції імпульсного обладнання і відповідного програмного забезпечення проведений числовий аналіз можливих технологічних і експлуатаційних недосконалостей в процесі роботи типової технологічної "прес-пушки". Зокрема, показаний вплив фактору порушення симетрії зв'язків між колонами і плитами в процесі експлуатації (ослаблення одного з різьбових з'єднань) на перерозподіл полів переміщень плити, що спричинює її обертання відносно осі установки і додаткової депланції і призводить до заклинювання рухомих елементів конструкції, розкриття стиків.

5. Експериментальні дослідження.

У п'ятому розділі сформульовані завдання експериментальних досліджень, описана методика їх проведення та аналізу результатів, викладений їх зміст. Відмічається, що основними цілями експериментальних досліджень є: одержання необхідної інформації для побудови теоретичних моделей, перевірки прийнятих допусків, підтвердження правильності отриманих результатів, практичне відпрацювання технологічних процесів в умовах дослідного виробництва, отримання напівемпіричних інженерних залежностей для оцінки окремих параметрів досліджуємих технологічних процесів.

Проведено дослідження деформованого стану високоточної параболічної оболонки подвійної кривизни по технологічних переходах. Встановлений вплив жорсткості елементів технологічного оснащення на процес деформування і кінцевий стан виробу. Проведено порівняння експериментальних результатів з отриманими у третьому розділі розрахунковими даними. Відмічається їх задовільна відповідність.

На натурній технологічній прес-пушці проведено експериментальні дослідження впливу конструктивних дефектів на характеристи-

ки обладнання. Зокрема досліджувався вплив рівня активного зовнішнього навантаження на переміщення плити, яка забезпечує закриття стику робочої зони в момент гідродинамічного штампування. Чисельне моделювання цього режиму роботи обладнання з використанням розробленої в розділі 4 методики дало результати, близькі до експериментальних з точністю 1,5 - 2 відсотки. При цьому в розрахунках модель вузла зв'язку «колона-плита» вважалась неідеальною. У випадку ідеальних (абсолютно жорстких) зв'язків розрахункові дані на порядок менші в порівнянні з експериментальними. Тому в розрахунках аналогічного обладнання слід завжди враховувати неідеальність зв'язків конструктивних елементів.

Досліджені випадки порушення окремих зв'язків (ослаблення різьбових з'єднань «колона-плита») і вплив цього фактору на експлуатаційні характеристики обладнання. Зокрема показано, що з-за різниці жорсткостей зв'язків спостерігається обертання плити в своїй площині із зміщенням її центру. В експлуатації цей дефект приводить до заклинання пересувної траверси. У випадку порушення характеристик зв'язку однієї з колон в плитах виникає напружено-деформований стан, симетричний діагонал, що проходить через центр плити і колону з «дефектом». Визначені залежності між характеристиками зв'язку колони і переміщеннями плити, які задовільно відповідають розрахунковим (до 2,5 - 3 відсотків).

Виконані експериментальні дослідження і розроблений технологічний процес безпуансонної гідродинамічної перфорації отворів в трубках фільтроелементів. Було розроблено та виготовлено три варіанти конструктивних схем штампової оснастки з навантаженням заготовки зсередини. Відмітною особливістю гідродинамічної пробивки отворів є відсутність пуансона, значне спрощення штампової оснастки, використання універсального обладнання типу «прес-пушка», можливість пробивки отворів на криволінійних поверхнях, а також значне зниження собівартості кінцевої продукції. Були встановлені розрахунково-експериментальні залежності для тисків пробивки і швидкостей співудару заготовки з матрицею при різних співвідношеннях діаметру отвору (d) і товщини заготовки (S) і різних матеріалах заготовки (рис. 8).

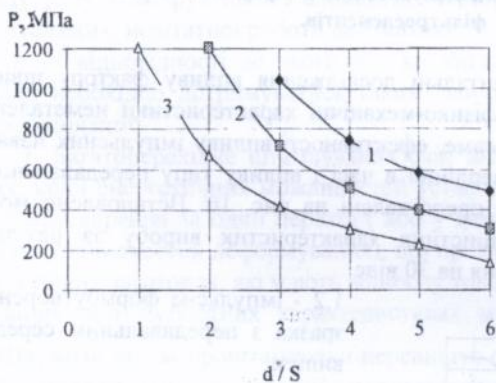
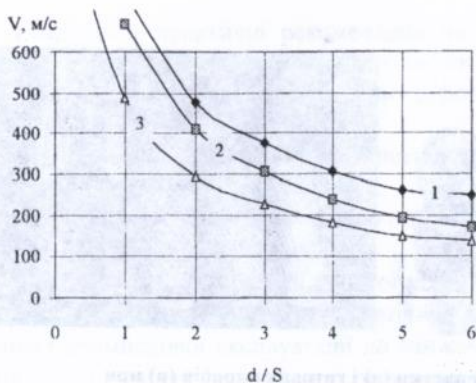


Рис.8 Залежності тиску пробивки і шквидкості руху заготовки від параметрів отворів.

1 - сталь 20 (нагартрована); 2 - сталь 20 (відпалена); 3 - латунь Л1 62

камері біля 500 МПа і швидкостях співударяння заготовки з матрицею до 400 м/с. Зазор між заготовкою і матрицею складав 0,15 S. На рис.9 приведені зразки оснастки (9,а) і готових виробів фільтроелементів (9,в).

На підставі проведених розрахунків, експериментальних досліджень, контролю якості отриманих деталей і стану оснастки вироблені практичні рекомендації і типовий технологічний процес гідродинамічної перфорації отворів в трубчатих заготовках малих діаметрів (16-25 мм) і співвідношень d/S (1-1,5). Серед рекомендуємих матеріалів матриць вибрані сталі: X6BФ, X12Ф1, ШХ 15 з твердістю 56 ...60 HRC. Силві деталі оснастки виготовлялись із сталей 30ХГСА, 40Х, 40Х2НМА з твердістю 50...55 HRC. Оснастка з вказаних матеріалів витримала понад 150 навантажень без руйнування під тиском у

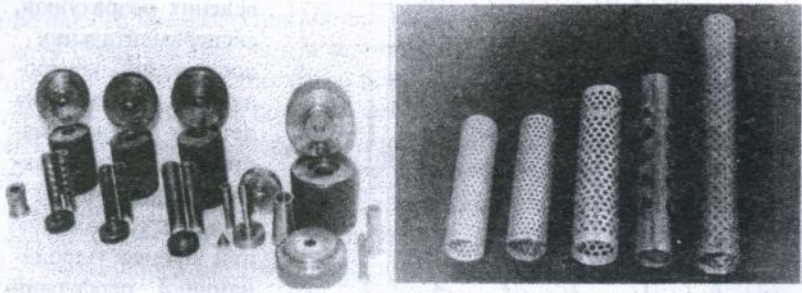


Рис.9. Зразки оснастки (а) і готових виробів (в) при гідродинамічній безпунсонній перфорації отворів фільтроелементів.

Проведені експериментальні дослідження впливу фактору швидкості навантаження на фізико-механічні характеристики неметалевої підіммерної оболонки, а саме, ефективності впливу імпульсних навантажень на кінетику затвердіння в часі і впливу типу передавального середовища. Результати представлені на рис. 10. Встановлено можливість підвищення міцнісних характеристик виробу за рахунок імпульсного навантаження на 30 відс.

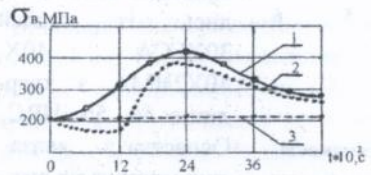


Рис. 10. Вплив імпульсного навантаження і передавального середовища на фізико-механічні властивості полімерного багатшарового композита.

1,2 - імпульсне формоутворення зразка з передавальним середовищем:
 1 - вода,
 2 - повітря,
 3 - контрольний зразок під дією постійного тиску.

6. Впровадження у виробництво.

У шостому розділі представлені результати дослідно-промислового і промислового впровадження виконаних розробок у вигляді технологічних процесів і обладнання для імпульсного формоутворення.

Розроблені практичні рекомендації по вдосконаленню проектування і експлуатації обладнання імпульсної дії у відповідності з встановленими особливостями напружено-деформованого стану найбільш навантажених вузлів.

На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень описані особливості конструктивно-силових схем гідродинамічних установок і причини виходу з ладу найбільш відповідальних вузлів обладнання.

Показано, що наявність великої кількості механізмів і різьбових елементів у зоні інтенсивних динамічних навантажень приводить в процесі промислової експлуатації до зниження рівней попередніх налягів у з'єднаннях, порушенню регулювань, руйнуванню і виходу з ладу ряду конструктивних елементів, нерозрахункового режиму навантаження, нештатної роботи автоматики.

У відповідності до цього для запобігання вказаних негативних явищ необхідно дотримуватись таких конструктивно-технологічних рекомендацій:

1. Багатоперехідне штампування слід застосовувати у тих випадках, коли енергетичних можливостей установки стає недостатньо для формоутворення за один перехід (або у випадках виникнення закритичних швидкостей деформування), що проявляється при обробці товстостінних заготовок, які мають відносну товщину у межах 0,010-0,025 і вище при міцністних характеристиках матеріалу $\sigma_{\text{в}}=1000\text{...}1200$ МПа; коли об'єм проштамповки перевищує об'єм перехідника ствола або максимальні деформації заготовки перевищують допустимі значення. В останньому випадку між переходами необхідно передбачити проведення проміжних відпалів.

2. При штамповці деталей з конічних заготовок виникає складність внаслідок можливої втрати стійкої форми з-за наявності вертикальної складової від тиску рідини на заготовку. Хвильовий характер розповсюдження тиску у рідині при гідродинамічній штамповці дозволяє керувати навантаженням і за рахунок цього підвищити критичні кути конусності в порівнянні із статичними методами обробки. Для цього навантаження заготовки необхідно проводити з боку меншого її діаметру.

3. Для збільшення тривалості навантаження заготовки і зниження швидкості деформування необхідно застосовувати снаряди більшої маси. Це виявляється кращим при формоутворенні деталей малої жорсткості (з відносною товщиною в межах 0,001-0,002), які мають великі об'єми проштамповки (близько 0,8 - 1,0 від об'єму перехідника). При виконанні калібрувальних операцій або рельєфної

формовки, коли потрібні високі тиски і високі швидкості переміщення заготовки, слід надавати перевагу легким снарядам.

4. У випадках штамповки деталей типу різного роду закінцівок, коли необхідно забезпечити суттєвий рівень нерівномірності тиску по осі заготовки, доцільно застосування формуючих камер змінного поперечного перерізу. При цьому у випадку необхідності підвищеного тиску в донній частині необхідно використовувати канали, що звужуються, в інших випадках - що розширюються. Однак, тривалість дії зовнішнього навантаження при цьому у першому випадку зменшується, а у другому, навпаки - збільшується.

5. Наявність у гідравлічній камері неуцілених зазорів приводить до незначного зменшення як об'єму передаючого середовища, так і до деякої втрати тиску. Тому при штампуванні деталей з високімісних матеріалів з невеликими радіусами слід підтримувати величину зазорів мінімально можливою на верхньому рівні допустимих відхилень. Зразки відштампованих на прес-пушках деталей з врахуванням вказаних вище рекомендацій приведені на рис. 11.



Рис. 11. Зразки деталей складної форми

Поряд з процесами гідродинамічного формоутворення в роботі представлені технологічні процеси гідровибухового штампування, при реалізації яких не спостерігається такого суттєвого впливу технологічного обладнання на процес деформування. Однак для них більш

суттєвим є вплив технологічного оснащення і взаємовплив різних елементів штампуємих виробів один на одного, що в цілому приводить або до необхідності замикання контуру виробу (умовного або дійсного), або - до необхідності розмикання контуру заготовки чи то напівфабрикату.

Приведені приклади технологічних процесів штампування деталей замкнутого контуру типу патрубків, ресиверів і відкритого контуру типу великогабаритних особливо тонкостінних оболонок подвійної кривизни.

Показано, що при штампуванні деталей типу товстостінних перехідників внаслідок несуттєвого впливу формозадаючого контуру на характер деформування у ряді випадків можна взагалі відмовитись від технологічної оснастки і перейти до так званого безматричного штампування (при $\delta = 0,03 \dots 0,05$). При цьому необхідний профіль виробу можна отримати варіюванням параметрами зовнішнього імпульсного навантаження.

Приведені рекомендації по вибору технологічної оснастки. Описані особливості штампів для гідрударних установок. Зокрема, конструктивне оформлення штампових блоків, способи їх встановлення в технологічних зонах гідрударних установок, особливості матриць для технологічних процесів витяжки, розділювальних операцій, застосуємі матеріали і способи обробки.

Вказані особливості матриць для вибухового штампування деталей замкнутого контуру, раціонального вибору геометричних параметрів основних елементів. Виділені особливості матриць для штампування замкнутих деталей з складним поверхневим рельєфом у вигляді окружних каналів змінного перерізу. Приведені особливості конструкцій матриць для штампування деталей відкритого контуру, де до профілю штампуємих виробів особливі вимоги не ставляться.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ.

1. В результаті виконаного комплексу теоретичних, експериментальних і прикладних досліджень вирішено важливу народногосподарську проблему, що полягає в скороченні строків і витрат на технологічну підставку заготівельно-штампувального авіаційного виробництва і підвищенні якості випускаємої продукції на основі нового підходу до проектування і створення технологічних систем.

2. Розроблена нова концепція створення технологічних систем виробництва авіаційних деталей з використанням імпульсних джерел енергії на основі визначення і врахування факторів взаємного впливу об'єктів системи, їх якісного і кількісного аналізу.

Поряд із спільністю постановки запропонований підхід має глибоке охоплення відмітних властивостей на самому високому рівні визначення об'єктів технологічної системи, їх характеристичних параметрів, принципів взаємодії і взаємовпливу і більш високий рівень об'єктивності, оскільки базується на методології аналізу складних систем з використанням інтуїтивно-логічних і якісно-кількісних методів обробки, необхідних для прийняття обґрунтованих рішень.

3. На основі запропонованого підходу розроблена математична модель динамічної поведінки установок імпульсного типу, яка дозволяє визначити параметри стану елементів конструкції в процесі імпульсного формоутворення деталей і впливу на них технологічного оснащення, прогнозувати і попереджувати експлуатаційні відкази устаткування. Використання створеної моделі при проектуванні обладнання дозволяє підвищити його продуктивність і ресурс, знизити матеріаломісткість та енерговитрати.
4. Розроблено нову модель вузла зв'язку типових конструктивних елементів обладнання імпульсної обробки, яка враховує реальні (пружні, демпфуючі і інерційні) умови взаємодії та дозволяє з високою ступіню точності моделювати динамічні процеси в технологічному обладнанні.
5. Показано, що в гідрударних установках при формоутворенні деталей малої жорсткості (з відносною товщиною в межах 0,001-0,002), що мають великі об'єми проштамповки (близько 0,8-0,95 від об'єму перехідника) необхідно прикладати імпульси зовнішньої дії підвищеної тривалості.

Для створення імпульсів тиску підвищеної тривалості і зниження за рахунок цього швидкості деформування необхідно застосовувати снаряди підвищеної маси, дотримуючись при виборі маси снаряду принципу пропорційності. На протилежність цьому при проведенні калібровочних операцій або операцій формування жорстких елементів рельєфу з радіусами, в межах 1,5-3,0 товщини обробляємих заготовок, слід застосовувати більш легкі снаряди.

При штампуванні на роздачу деталей типу закінцівок для забезпечення існуючого рівня нерівномірності вздовж осі заготовки необхідно застосовувати формуючі камери змінного поперечного перетину. При цьому для підвищення рівня зовнішнього тиску у дон-

них частинах слід застосовувати канали, що звужуються по довжині, а для зниження рівня цього тиску - що розширюються.

6. Для підвищення надійності гідроударного обладнання необхідно:
 - максимально уникати застосування консольних виступів на жорстко затискуємих елементах вузлів, розташованих в горизонтальній площині;
 - забезпечити розвантаження рам лафетів від осьових розпираючих зусиль за рахунок автономних пристроїв зажиму штампових блоків;
 - забезпечити збільшення натягу різьбових з'єднань з одночасним зменшенням жорсткості останніх за рахунок застосування спеціальних конструкцій з'єднань;
 - в конструкціях клинових зажимів застосовувати короткоходові гідроциліндри для забезпечення розклинювання механізмів зажиму штампових блоків.
7. Розроблено метод моделювання технологічних процесів імпульсного формоутворення великогабаритних, високоточних, тонкостінних оболонкових конструкцій, що враховує найбільш суттєві фактори взаємного впливу імпульсного навантаження, технологічної оснастки і характеристик заготовки, який дозволяє на основі чисельного моделювання значно скоротити час на проєктування оснастки та дослідно-експериментальне відпрацювання технологічних процесів.
8. Встановлено, що при гідровибуховому штампуванні особливо тонкостінних (с відносною товщиною 0,0009-0,0010) великогабаритних оболонкових деталей подвійної кривизни з відносною глибиною менш 0,15 слід застосовувати комбіновану схему одночасної витяжки з обжимом.

При відносній глибині проштамповки більш 0,15-0,16 формоутворення слід проводити комбінованим статико-динамічним методом, отримуючи на першому переході пологий напівфабрикат з відносною глибиною в межах 0,09-0,12 з наступним імпульсним деформуванням.

9. Наукові і практичні результати роботи впроваджені на авіаційних підприємствах (АО «Мотор Січ», м. Запоріжжя, АНТК «Антонов», м. Київ), міністерстві металургії р. Куба, увійшли складовою частиною в укладену міжнародну угоду з UNAM, м. Мехіко.

Основні результати роботи подано у таких публікаціях:

1. Кривцов В.С. Расчет на прочность и жесткость бруса при простых и сложных деформациях: Учебное пособие. - К.: Винол, 1996. - 204 с.

2. Изготовление деталей газотурбинных двигателей из титановых сплавов / Богуслаев В.А., Жеманюк П.Д., Долматов А.И., Горбачев А.Ф., Кривцов В.С. - Запорожье: Дека, 1997. - 273 с.

3. Кривцов В.С. Численный анализ напряженного состояния анизотропных оболочек // Теория автоматизированного проектирования. - Харьков: ХАИ, Вып. 3, 1981. - с. 35 - 38.

4. Кривцов В.С. Расчет напряженного состояния цилиндрической оболочки под действием локальных нагрузок методом конечных элементов // Экспериментально-расчетные методы автоматизированного проектирования. - К.: УМК ВО, 1988. - с. 75 - 77.

5. Бакулин В.Н., Кривцов В.С., Рассоха А.А. Алгоритм получения матрицы жесткости конечного элемента анизотропной оболочки // Изв. вузов СССР - "Авиационная техника". - М.: 1983. - № 4. - с. 14 - 18.

6. Гайдачук В.Е., Каледин В.О., Кривцов В.С. Алгоритмизация и автоматизация учета усталости и надежности при проектировании авиаконструкций // Автоматизация исследования несущей способности и длительной прочности летательных аппаратов. - Харьков: ХАИ, 1975. - с. 36 - 39.

7. Кривцов В.С. Динамическая расчетная модель машин импульсной обработки материалов // Матер. I межд. конф. по новым технологиям машиностроения. - Рыбачье: ХАИ, 1992. - с. 168 - 170.

8. Кривцов В.С. Методика исследования технологических параметров и прочности установок импульсного деформирования // Матер. II межд. конф. по новым технологиям машиностроения. - Рыбачье: ХАИ, 1993, с. 309 - 310.

9. Krivtsov V.S. Tecnologias para la industria petrolera // II Conferencia de desarrollo tecnologico. - Mexico: Pemex. - mayo 1994, - 10 p.

10. Кривцов В.С. Экспертные оценки и факторы взаимного влияния при создании авиационных технологических систем // Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ. - 1996, с. 65 - 71.

11. Кривцов В.С. Экспертные оценки и анализ в создании авиационных технологических систем // Матер. V межд. конф. по новым технологиям машиностроения. - Рыбачье: 1996, с. 296 - 298.

12. Кривцов В.С. Методология анализа и синтеза авиационных технологических систем на основе учета факторов взаимного влияния

// *Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ.* - 1997. - с. 61-67.

13. Кривцов В.С. Перспективы использования компьютерных технологий в подготовке научных работников и выполнении научных исследований // *Труды межд. научно-методич. конференции "Подготовка специалистов к работе в условиях открытых информационных и компьютерных интегрированных технологий"*. - Х.: 1996. - с. 34 - 35.

14. Кривцов В.С., Сапрыкин В.Н., Шехов А.В. Математическое моделирование связей конструктивных элементов технологических установок на персональном компьютере // *Матер. III межд. конф. по новым технологиям машиностроения.* - Рыбачье: ХАИ, - 1994. - с. 163 - 166.

15. Кривцов В.С., Мелекесцев А.И. и др. Исследование и анализ механического состояния элементов конструкций и поведения материалов при нестационарном термомеханическом воздействии // *Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ.* - 1994. - с. 35 - 39.

16. Кривцов В.С., Нарыжный А.Г. и др. Математическая модель и методика экспериментальной проверки динамических процессов в типовом оборудовании // *Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ.* - 1995. - с. 39 - 45.

17. Кривцов В.С., Сабелькин В.П. и др. Методика расчета оснастки для штамповки деталей двойной кривизны // *Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ.* - 1995. - с. 150 - 155.

18. Кривцов В.С., Петушков С.А. и др. Экспериментальные исследования механического состояния узла соединения стержня и пластины // *Матер. IV межд. конф. по новым технологиям машиностроения.* - Рыбачье: ХАИ. - 1995. - с. 120 - 122.

19. Кривцов В.С., Грушенко А.М., Фурсов А.П. Термогазо-струйные методы обработки материалов при утилизации боеприпасов // *межд. научно-техн. семинар - выставка "Проблемы и направления развития утилизации обычных видов боеприпасов"*. - К.: УкрНИИАТ. - 1996. - с. 42.

20. Бакулин В.Н., Кривцов В.С., Рассоха А.А. Исследование напряженного состояния слоистых анизотропных оболочек методом конечных элементов // *Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации.* - М.: "Наука". - 1984. - с. 219.

21. Кривцов В.С., Сапрыкин В.Н., Шехов А.В. Моделирование связей конструктивных элементов технологических установок // *Матер. II межд. конф. по новым технологиям машиностроения.* - Рыбачье: ХАИ. - 1993. - с. 232 - 233.

22. Кривцов В.С., Сапрыкин В.Н. Математическое моделирование импульсного формообразования заготовок и конечного состояния деталей // *Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ.* - 1996. - с. 54 - 64.

23. Нарыжный А.Г., Кривцов В.С. Численное моделирование процессов горения и теплообмена в энергоузле машины импульсного деформирования (МИД) материалов // *Проблемы горения, баллистики и механики соударений. Докл. II Украинской научно-практ. конф.* - Одесса: 1996.

24. Кривцов В.С., Сабелькин В.П. Концепция создания технологических процессов изготовления деталей летательных аппаратов с использованием взрыва // *Проблемы горения, баллистики и механики соударений. Докл. II Украинской научно-практ. конф.* - Одесса: 1996.

25. Кривцов В.С., Сабелькин В.П. Моделирование технологических систем для производства деталей летательных аппаратов // *Современные проблемы машиностроения. Материалы межд. научно-техн. конф.* - Гомель: 1996. - с. 101 - 102.

26. Кривцов В.С., Миронов М.Ю. и др. Методика экспериментальных исследований деформаций и напряжений в конструкции пресс-пушки // *Матер. V межд. конф. по новым технологиям машиностроения.* - Рыбачье: 1996. - с. 96 - 97.

27. Vladimir S. Krivtsov, Vladimir P. Sabelkin. Concept of development of technological processes for aerospace equipment parts manufacture with application of impulsive sources of energy // *Proceeding of Fourth Ukraine - Russia - China Symposium on space Science and technology. Vol. II. - Ukraine. - Sept. 1996. - p. 639.*

28. Vladimir S. Krivtsov, Serguei N. Sadovnichii. Unmanned aerial vehicle of short range radius actions as an equipment platform for terrain remote sensing // *Proceeding of Fourth Ukraine - Russia - China Symposium on space science and technology. Vol. 1. - Ukraine. - Sept. 1996. - p. 109 - 111.*

29. Сабелькин В.П., Кривцов В.С., Зайцев В.Е. и др. Проведение научно-исследовательских работ по разработке технологии изготовления оболочек двойной кривизны // *Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ.* - 1997. - с. 68 - 72.

30. Борисевич В.К., Кривцов В.С., Елисеев С.В. Жидкостный энергопривод установки гидроударной обработки // *Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ.* - 1997. - с. 148 - 152.

31. Кривцов В.С., Халилов С.А. Критериальные упругие модели. Теория тонкого прямого бруса // *Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ.* - 1997. - с. 251 - 258.

32. Кривцов В.С., Нарыжный А.Г., Шехов А.В. Влияние характера связей элементов конструкций установки импульсного деформирования на ее деформированное состояние // Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ. - 1997. - с. 319 - 321.

33. Кривцов В.С., Кладова О.Ю., Нарыжный А.Г. Особенности деформированного состояния конструкций установок для импульсного деформирования материалов, состояние которых отличается от проектного // Авиационно-космическая техника и технология. Труды ХАИ. - 1997. - с. 322 - 324.

34. Кривцов В.С., Кладова О.Ю., Нарыжный А.Г., Сапрыкин В.Н., Шехов А.В. Моделирование динамических процессов в технологическом оборудовании импульсной металлообработки // Авиационно-космическая техника и технология. - Труды ХАИ. - 1997. - с. 343 - 352.

АНОТАЦІЯ

Кривцов В.С. Концепція створення технологічних систем виробництва деталей літальних апаратів з використанням імпульсних методів обробки.

Дисертацією є рукопис, представлений на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.07.04 - технологія виробництва літальних апаратів. Український науково-дослідний інститут авіаційної технології, Київ, 1977.

Докладені у дисертації теоретичні, експериментальні та прикладні дослідження, їх результати вирішують важливу народногосподарську проблему, яка складається у скороченні строків і витрат на технологічну підготовку авіаційного заготівельно-штампувального виробництва і підвищені якості випускаємої продукції. Представлені теоретичні і практичні результати щодо функціонування розробленого підходу, проектування імпульсного обладнання і технологічних процесів виготовлення деталей з тонкостінних листових і оболонкових заготовок і напівфабрикатів.

Розробки впроваджені і використовуються на підприємствах аерокосмічної промисловості і військово-промислового комплексу.

SUMMARY

Krivtsov V.S. The Concept of Development of Technological Systems for Manufacture Aircraft Parts with Use Impulsive Methods.

The thesis is a manuscript submitted for a Doctor of Engineering Sciences Degree in the speciality 05.07.04 - Technology of Manufacturing of Flying Apparatuses. Scientific Research Institute of Aviation Technology, Kiev, 1997.

The theoretical, experimental and applied investigations and its results which are presented in the dissertation make it possible to solve the important scientific and economic problem. It consists of the shortening of the terms and expenses of production tooling for aviation casting and quality improvement. Theoretical and practical results of investigations of impulsive equipment and new technological processes of explosive forming of thin walled metal blanks are developed.

The developed technological processes and installations are being applied in the enterprises of aerospace and military industry.

КЛЮЧОВІ СЛОВА

Технологічна система, виробництво, листові деталі, імпульсне обладнання, технологічний процес, математичні моделі, вибухове штампування.



Відповідальний за випуск Кириченко В.В.
Підписано до друку 05.08.97 р. Умов. друк. арк. 2. Замовлення № 35.
Тираж 100 прим.

Друкарня Харківського авіаційного інституту.
310070, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

433774

AB 38.292