

В. В. Третьак , О. В. Третьак, С. М. Нижник

**МЕТОДИ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В САПР.
БЕЗПРОТОТИПНЕ ПРОЄКТУВАННЯ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

В. В. Третяк, О. В. Третяк, С. М. Нижник

**МЕТОДИ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В САПР.
БЕЗПРОТОТИПНЕ ПРОЄКТУВАННЯ**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2025

УДК 004.942:621.044(075.8)
Т66

Рецензенти: канд. техн. наук, доц. В. М. Дьоміна,
канд. техн. наук, доц. М. Ф. Савченко

Третяк, В. В.

Т66 Методи проєктування технологічних процесів в САПР.
Безпрототипне проєктування [Електронний ресурс] : навч. посіб.
/ В. В. Третяк, О. В. Третяк, С. М. Нижник – Харків : Нац. аеро-
косм. ун-т «Харків. авіац. ін-т», 2025. – 54 с.

ISBN 978-966-996-045-0

Описано структуру і методи проєктування технологічних процесів методами структурного і параметричного синтезу. Наведено структуру, схему і алгоритм безпрототипного проєктування. Подано розроблений на кафедрі технологій двигунобудування програмний комплекс для безпрототипного проєктування технологічних процесів для імпульсних технологій методом переборного алгоритму. Розглянуто приклад розв'язання задачі для алгоритму безпрототипного проєктування.

Для здобувачів освіти усіх спеціальностей, що вивчають курси «САПР технологічних процесів», «Системи автоматизованого проєктування двигунів і енергетичних установок», «Технологічні системи роботизованого виробництва», «Математичне моделювання об'єктів АКТ», «Фізико-хімічні основи технологічних процесів», «Методи і параметри формоутворювальної обробки», «Проєктування роботизованих виробництв», «Автоматизований супровід сучасних технологій».

Іл. 37. Табл. 2. Бібліогр.: 6 назв

УДК 004.942:621.044(075.8)

ISBN 978-966-996-045-0

© Третяк В. В., Третяк О. В., Нижник С. М., 2025
© Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», 2025

ВСТУП

Основною причиною, що зумовила потребу в розробленні нових інтелектуальних систем для проведення робіт з автоматизації проєктування нових об'єктів, зокрема в аерокосмічній області, є низька продуктивність інженерної праці у сфері оброблення інформації порівняно з продуктивністю праці робітників у матеріальному виробництві.

За останні 25 років було розроблено і вдосконалено CAD-системи для конструкторського проєктування з геометричним моделюванням.

Розроблені середовища значно удосконалилися, але конструктори, як і раніше, використовували лише геометричні елементи низького рівня (точка, прямі, дуги, поверхні тощо) при описі своїх виробів.

Ці удосконалення стосувалися лише внутрішніх проблем.

Пізніше з'явилися програми з середовищем 3D-поверхневого і твердотільного моделювання, параметричне конструювання, був значно поліпшений інтерфейс.

Незважаючи на всі вдосконалення, що стосуються в основному геометричних функцій, такі системи надають конструктору незначну допомогу саме в процесі конструювання.

Вони забезпечують опис лише геометричних виробів і виконання рутинних операцій, таких як оброзмірювання, генерація специфікацій і т. п.

Ці обмеження і чисто геометричний інтерфейс залишають методологію конструкторської роботи по суті такою, якою вона була при використанні креслярської дошки.

Для роботи технологів з'явилися програмні засоби, які дають змогу проєктувати технологічні процеси як методом синтезу, так і методом адресації, а також будувати технологічні описи різноманітних процесів.

Нині існує стійка тенденція інтелектуалізації програмного забезпечення для технологічного проєктування.

Основні функції нових систем — розв'язання задач все більшою мірою необчислювального характеру, у тому числі задач логічних висловлювань, управління базами знань, забезпечення інтелектуальних інтерфейсів та ін.

У посібнику подано алгоритми і програмний комплекс для розв'язання складних задач проєктування на ранніх стадіях з використанням методу безпрототипного проєктування, а також фрагмент бази знань для розрахунків параметрів технологічних процесів для імпульсних технологій.

1. СУТЬ МЕТОДУ БЕЗПРОТОТИПНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

Системний підхід до методів проєктування ТП найбільш повно розроблено для механічного оброблення.

Так, у роботах Д. В. Чарнка зазначалося, що рівень розвитку технології визначають як методи оброблення, так і структура ТП. В ній виділено три складові: часова, функціональна і просторова.

Часова визначає склад і послідовність установлення елементів ТП на кожному етапі виготовлення деталі; функціональна – порядок перетворення виробу з одного стану на інший; просторова – розмірні й точнісні зв'язки між базовими і робочою поверхнею.

Для задання структури ТП уведено ще одну складову – його структурну організацію.

Вона описує набір елементів ТП і спосіб їх з'єднання у систему, забезпечує реалізацію функцій з виготовлення деталей.

Організаційна структура є ієрархічною і задає спосіб декомпозиції.

При проєктуванні ТП вирішуються дві основні проблеми: формування його структурної моделі та визначення параметрів елементів.

У запропонованій С. П. Митрофановим та інших класифікаціях методів проєктування ТП використовують процедури:

а) вибору рішень, якщо можливі рішення в системі подано відповідними алгоритмами;

б) синтезу; можливі рішення komponуються з елементів шляхом побудови зв'язків між ними за сукупністю правил.

1.1. Класифікація методів проєктування в інтелектуальних системах

Класифікація методів проєктування ТП, виконана С. П. Митрофановим, передбачає розвиток двох напрямків у проєктуванні методів і адресації і синтезу (рис. 1.1).

Методи адресації базуються на принципі уніфікації.

Склад і структура ТП визначається відповідно до стану і структури уніфікованого ТП послідовним уточненням формованих рішень при суворому дотриманні порядку переходу з більш високих рівнів декомпозиції на нижчі.

У цьому випадку ТП-аналог повинен мати всі елементи, дикористовуються у робочому ТП.

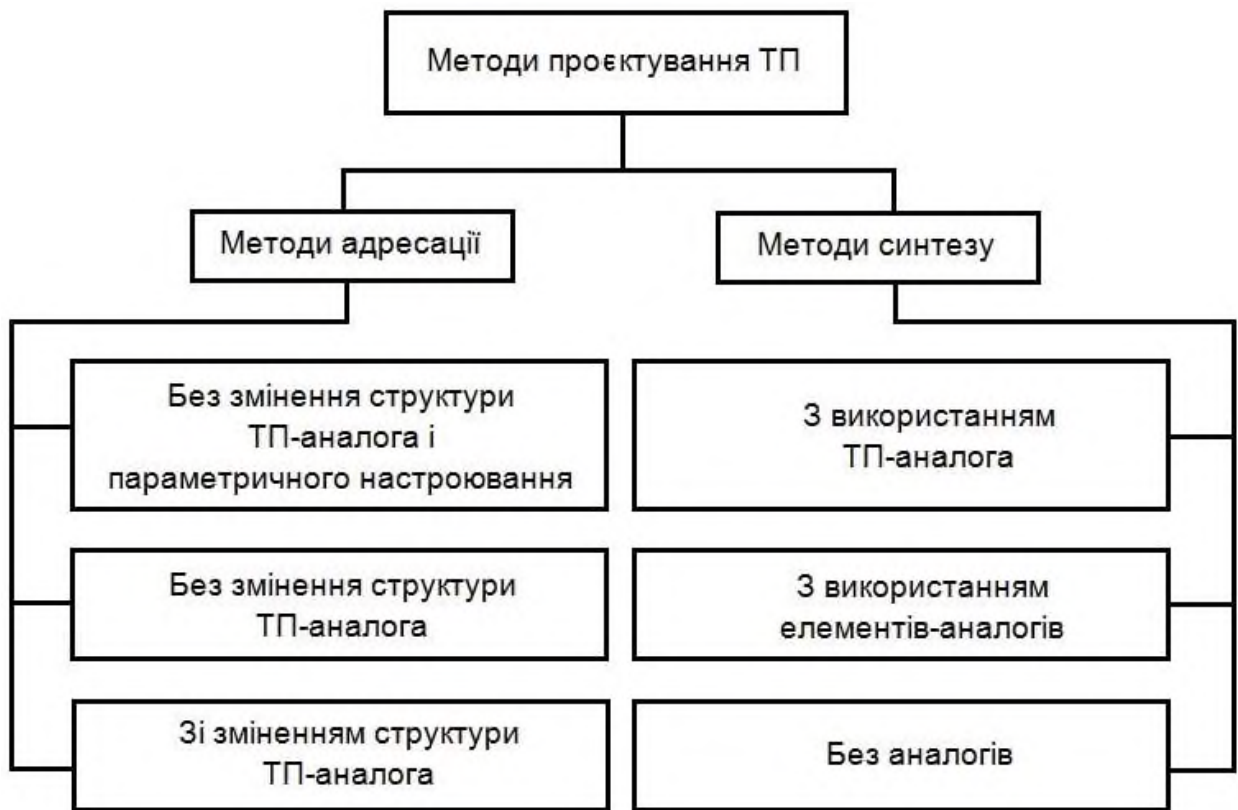


Рис. 1.1. Класифікація методів проєктування ТП
за С. П. Митрофановим

Формально кожна складова ТП на будь-якому рівні декомпозиції реалізується однією і тією ж процедурою адресації: вибір за принципом незакінченого рішення; уточнення складу і зв'язків, прийнятих раніше для ТП-аналога і параметричне настроювання.

За методами синтезу формують (хоча б один раз) зовнішні зв'язки між елементами для створення з них елементів більш високого рівня.

Метод містить: визначення складу елементів; побудову нових зв'язків, перевірку їх достовірності; параметричне настроювання.

Проєктування можна виконувати як з використанням аналогів, так і без них. При використанні аналогів до нього включають нові елементи або істотно змінюють їх послідовність.

Метод синтезу з використанням ТП-аналогів оснований на формуванні структури нового ТП із структурних фрагментів ТП-аналогів.

Аналіз ТП і виділення фрагментів проводять на першому рівні декомпозиції. Фрагмент, який було вибрано в ТП, розглядають із зовнішніми зв'язками, які розірвані при обчисленні.

При з'єднанні фрагментів різних ТП розірвані зв'язки відновлюють при збігу властивостей цих напівзв'язків.

Метод синтезу з використанням елементів-аналогів базується на тому, що елементи, з яких синтезуються ТП, отримано на етапі уніфікації ТП і зберігаються у відповідній базі даних.

При з'єднанні елементів-аналогів зв'язки між ними не відновлюються, а знову будуються.

Елементами-аналогами можна користуватися на різних рівнях декомпозиції. У кожній процедурі синтезу при з'єднанні елементів використовують уніфіковану схему.

Для визначення системних характеристик ТП і його елементів процес проектування подають як послідовність синтезу деяких його моделей, кожна з яких визначається попередньою.

Це приводить до ієрархії моделей: концептуальна – інформаційно-логічна – алгоритмічна.

Перша модель визначає основні принципи організації процесу проектування, друга – організацію процесу проектування, третя – організацію його на рівні елементарних розв'язувальних процедур.

Таким чином, процес системного проектування – процес послідовного цілеспрямованого перетворення інформації, що зводиться до формування і деталізації інформаційної моделі проектування і забезпечує визначення необхідних параметрів об'єкта.

Прогресивні методи проектування технології, розглянуті вище, розроблено для тих методів оброблення, які базуються на результатах моделювання як процесу оброблення, так і структурного моделювання для прийняття рішення щодо складу елементів ТП: функціональним, просторовим, часовим.

Методи проектування без аналогів складні, слабо формалізовані і не забезпечують достатню достовірність результатів проектування, вона невелика навіть при використанні обмеженої безлічі ТП.

Технолог при проектуванні змушений приймати рішення за ними апріорно: за загальними рекомендаціями, накопиченим досвідом.

Неправильні рішення на рівні структури ТП, перш за все схеми штампування, як показує практика штампування, призводить до ситуацій, коли на виготовленому штампі для прийнятої технологічної схеми не можна виготовити деталь і необхідно заново проектувати і виготовляти штамп.

При проектуванні технології на оригінальні деталі, аналогів для яких немає, частка неправильних рішень досягає 20 %. Збільшуються не тільки терміни підготовки виробництва, обсяг проектування, але й матеріальні витрати.

Нерідко для таких деталей вибрана схема штампування є прийнятною, але вибраний склад елементів ТП і їх структура є нераціональними. Тому стан відштампованого напівфабрикату близький до готової деталі, але щоб він відповідав повністю, необхідно

розробляти спеціальні технологічні прийоми для інтенсифікації або блокування переміщень на тих чи інших ділянках заготовки.

Різке скорочення термінів підготовки виробництва, широке використання інформаційних технологій для всього життєвого циклу виробу обумовлюють необхідність комп'ютеризації технологічного проектування для всіх використовуваних методів оброблення.

Без створення основ для реалізації автоматизованого проектування технологія вибухового штампування не зможе розширити свою технологічну нішу і закріпитися в уже існуючій.

Водночас на цьому етапі розвитку інших методів оброблення прогресивні методи їх технологічного проектування дають змогу знизити трудомісткість і терміни підготовки виробництва на кілька порядків.

При такому розвитку теорії імпульсних процесів виникає необхідність використовувати у виробництві сучасні і водночас прості методи розрахунків з використанням сучасних САПР систем, оснащених базами даних і знань імпульсної технології.

1.2. Суть безпрототипного проектування

Методи розв'язання задач проектування нової, у тому числі авіаційної, техніки, які не мають аналогів, прийнято вважати безпрототипними.

Метод безпрототипного проектування є однією з найскладніших задач, зважаючи на її складну формалізацію.

Нині існує багато способів розв'язання подібних задач. Одним з надійних і реалізовуваних на практиці можна вважати комбінаторний метод з використанням методу синтезу без аналогів.

Метод синтезу без аналогів характеризується тим, що всі установлювані об'єкти конструкції або технологічного процесу на всіх рівнях декомпозиції, окрім базового, синтезуються з елементів базового (елементарного) рівня декомпозиції.

У літературі зустрічається декілька схем реалізації методу синтезу без аналогів, для кожної з яких використовуються свої поняття і рівні проектування.

Загальний механізм формування математичної моделі для використання методу синтезу без аналогів має вигляд, зображений на рис. 1.2.

Використання цього методу потребує хорошої формалізації знань і використання ефективних описаних нижче комп'ютерних методів роботи.

Слід також зазначити, що цей метод ефективно може бути використаний лише на верхньому початковому рівні проектування.

Формально схема формування моделі має такий вигляд

$$\begin{aligned} LKNS_1 \dots S_{n-1} S_n \bigcup_{i=1}^m \Gamma_{ai} d &= t; \\ \Gamma_{ai} d &= \{E_n\}; \\ S_j(\{E_j\}, \{M\}) &= \{E_n\}; \\ S_1(\{E_1\}, \{M\}) &= T, T = \{E_0\}, t \in T, \end{aligned}$$

де m – число незалежних задач проектування, які можна розглядати як початкові;

Γ_{ai} – алгоритми переходу від понять, які задають виріб і середовище, до елементарних понять;

E_n – множина елементів базового рівня декомпозиції, яке використовується для виготовлення виробу d ;

E_j – множина елементів ТП j базового рівня декомпозиції;

$\{M\}$ – множина моделей.

Оцінювання рішень виконується у декілька етапів: оцінювання вибору елементів базового рівня декомпозиції за критеріями K_{ki} ; оцінювання структури рішень після їх синтезу на j -му рівні декомпозиції за критеріями K_{cj} і оцінювання варіантів за критерієм K_n :

$$ZK_n NK_a S_1 K_{cn-1} S_{n-1} K_{cn} S_n \bigcup_{i=1}^m K_{ki} \Gamma_{aj} d = t.$$

У наведених алгоритмах використовують об'єктні моделі і метод ітераційності рішень, які приймаються.

Один из варіантів схеми проектування імпульсних технологічних процесів наведено на рис. 1.2.

Найскладнішим у цій схемі є алгоритм безаналогового синтезу.

У цьому випадку процес проектування має складніший характер.

При цьому використовується також блоковий принцип ієрархічності та блокового опису.

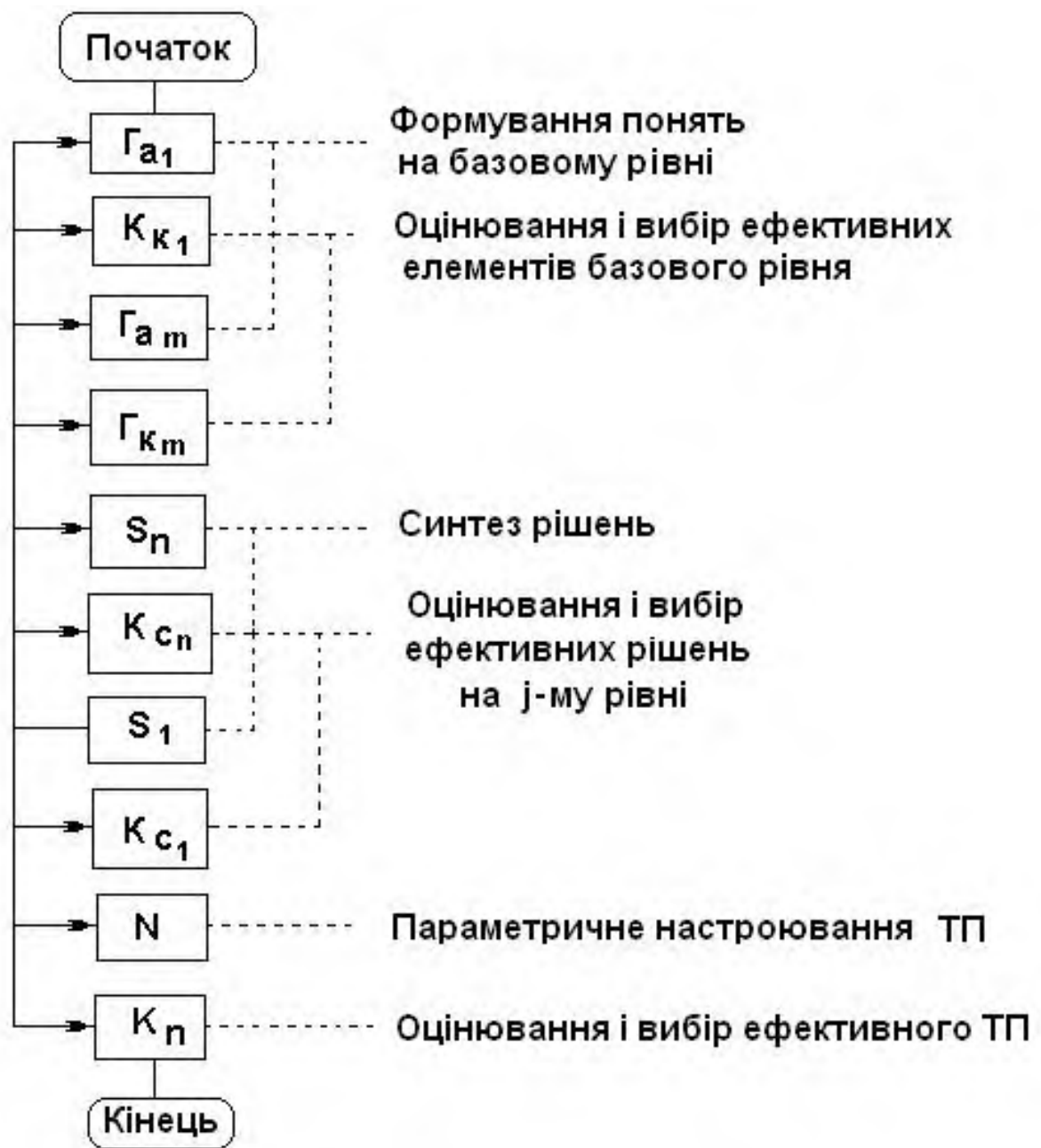


Рис. 1.2. Варіант схеми проектування імпульсних технологічних процесів методом синтезу без аналогів

Можна виділити декілька проміжних ієрархічних рівнів. Окрім розчленовування описів за ступенем віддзеркалення властивостей об'єкта, що породжує ієрархічні рівні, можна використовувати декомпозицію описів за характером властивостей, що відображаються.

На рис. 1.3 подано структурну схему формування математичної моделі для використання методу синтезу без аналогів.

Для розв'язання поставленої задачі використовують алгоритм комбінаторного методу, який дає змогу достатньо просто і ефективно розв'язувати задачу.

Суть методу зводиться до формалізованого опису ефектів як взаємозв'язків двох явищ і процесів, які реалізуються у певних умовах.

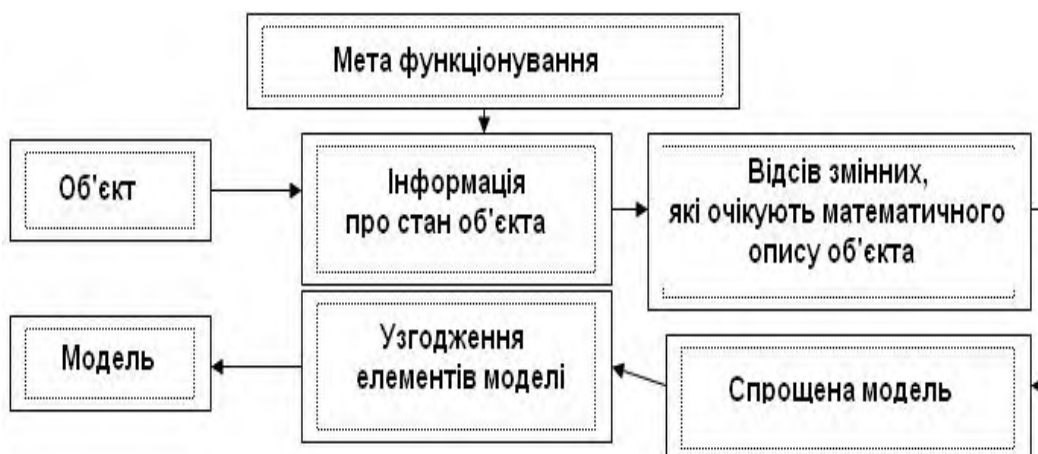


Рис. 1.3. Структурна схема формування математичної моделі для використання методу синтезу без аналогів

Зазвичай використовують дві схеми розв'язання задач – пряму і обернену.

На рис. 1.4 зображено пряму схему розв'язання задачі.

Тут C_K – крок розв'язання задачі формування принципів дії; якщо $K = 1$, то C_K – компонента «середовище функціонування проєктованої системи», якщо $K > 1$, то це наслідки ефектів, знайдених на кроці $(K - 1)$; D – дерево ефектів; i – максимально допустима кількість рівнів у дереві ефектів; $\zeta, \mathcal{Z}$ – відповідно мета і середовище функціонування проєктованої системи – варіанти принципу дії проєктованої системи.

За цим алгоритмом розроблено базу знань і метод вибору і параметризації спеціальних прийомів для імпульсних методів технології при виготовленні листових вісесиметричних деталей для авіаційної техніки з використанням комбінаторного методу.

Описану розробку доцільно використовувати у таких випадках: у навчальному програмному комплексі для демонстрації можливостей алгоритмів беспрототипного проєктування, при розробленні принципів

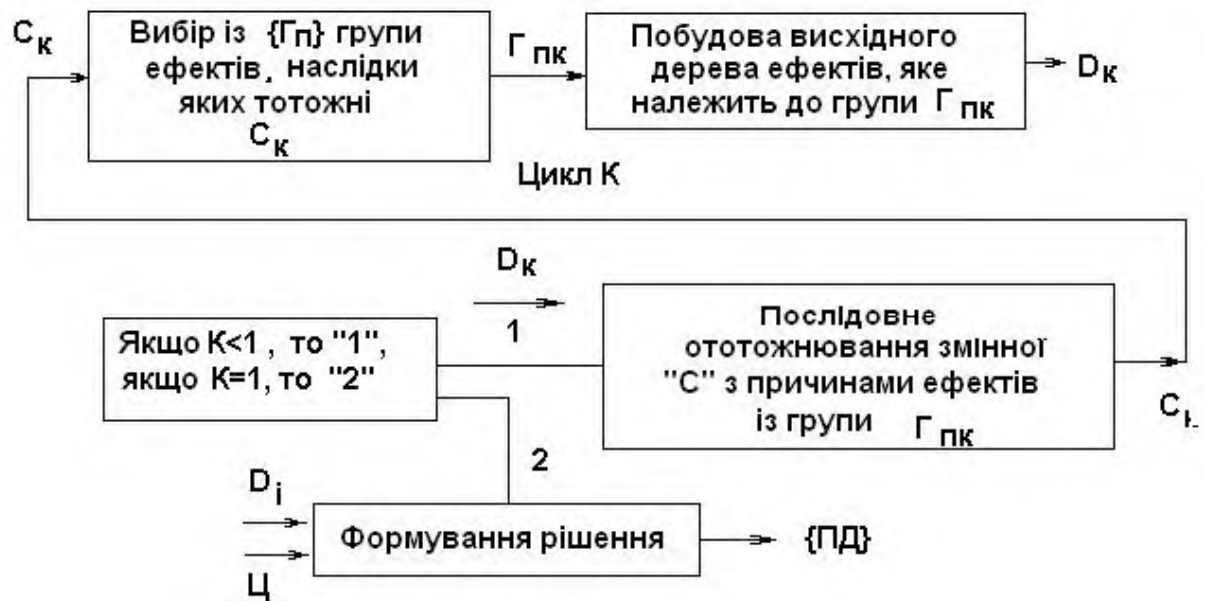


Рис. 1.4. Прямая схема безпрототипного проектирования

дії і конструктивних особливостей нових пристроїв і приладів, при прогнозуванні і розробленні принципів використання нових технологій, при аналізі процесів функціонування перспективних технічних систем, при складанні технічного завдання на проектування нових об'єктів для їх подальшого використання у нових проектах.

Метою роботи є розроблення програмного комплексу, який дає змогу автоматизувати складний процес пошуку ефективних рішень при розробленні нових патентоспроможних технологій і конструкцій пристроїв і приладів авіаційної техніки, у тому числі для імпульсних технологій. Програмний комплекс призначено для розроблення принципів дії нових пристроїв і технологій, у тому числі для розроблення нових об'єктів авіаційної техніки з наявною базою знань для проектування об'єктів імпульсних технологій [1].

2. НАВЧАЛЬНИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ БЕЗПРОТОТИПНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

2.1. Формування бази знань для використання комбінаторного методу

В основі комбінаторного методу лежить формування дерева ефектів.

У науковій літературі існує безліч визначень ефектів, але більшість дослідників одностайні у тому, що ефект – це взаємозв'язок двох явищ (процесів), які реалізуються у певних умовах.

При цьому першу частину можна вважати умовою, а другу – наслідком. Використання цього визначення дає змогу запропонувати загальну форму опису ефектів:

$$A1 \rightarrow A2(U1.2),$$

де $A1$, $A2$, $U1.2$ – відповідно причина, наслідок і умова реалізації ефекту; $A1 \Rightarrow A2$ означає: « $A1$ приводить до $A2$ »; $U1.2$ – «за умови, що... $U1.2$...»

Уточнення змісту перших двох понять не викликає труднощів, оскільки будь-яке явище можна розглядати як зміну з плином часу того або іншого параметра матеріального об'єкта.

При цьому всю безліч явищ залежно від напрямку зміни параметра можна поділити на п'ять типів:

1. Збільшення параметра об'єкта.
2. Зменшення параметра об'єкта.
3. Наявність ненульового стану параметра об'єкта.
4. Довільна зміна параметра об'єкта.
5. Збільшення або наявність ненульового постійного значення параметра.

Наприклад, «збільшення температури газу», «наявність швидкості твердого тіла» та інших елементів.

У базі знань використовується номенклатура різних речовин, металів, хімічних виробів та ін. і в кожного з них можуть бути використані різні параметри, наприклад температура, вага, теплопровідність і т. п.

Стандартизувати ці величини і тіла можна за допомогою літер-ідентифікаторів. У поданій програмі використано вже існуючі стандарти, що дало змогу використати базу даних, наведену в літературі.

Цей стандарт запропоновано в книзі В. М. Глазунова «Пошук принципів дії технічних систем».

Усі об'єкти системи та їх елементи занесено до таблиць, що полегшує використання, збереження і доповнення ефектів і їх параметрів.

Для зручності використання параметрів їх поділено за розділами:

1. Параметри, що використовуються в механіці.
2. Параметри, що використовуються в електротехніці.
3. Параметри, що використовуються в теплотехніці.

Усі параметри об'єктів зашифровано різними ідентифікаторами, інакше один параметр матиме декілька значень.

На рис. 2.1 подано фрагмент таблиці об'єктів системи та їх ідентифікаторів.

Струмopровідне тверде тіло	x9
Феромагнетик	x2
Феромагнітна рідина	y2
Електроліт	y3
Електромагнітне випромінювання	u6
Електричне поле	u
Електричне неоднорідне поле	u1
Дросельний пристрій	s4
Джерело електричного струму	s5
Капілярний пристрій	s6
Конденсатор	s1
Соленоїд	s2
Циліндр-поршень (сільфон)	s3

Рис. 2.1. Таблиця об'єктів та їх ідентифікаторів

На рис. 2.2 показано графічні фрагменти об'єктів та їх елементи.

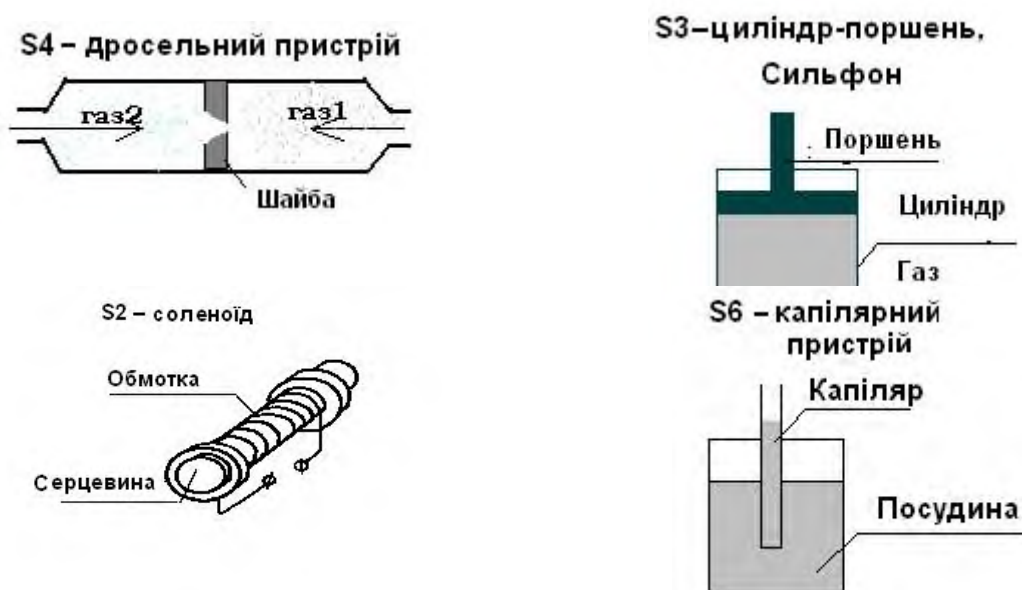


Рис. 2.2. Графічний опис об'єктів системи та їх елементи

На рис. 2.3 зображено фрагмент таблиці механічних параметрів.

Густина	кг/м³	ρ
Положення	-----	p7
Розмір лінійний	м	l
Витрата (масова)	кг/с	g
Сила	н	n
Сила тертя	н	m4
Швидкість лінійна	м/с	w
Швидкість кутова	рад/с	w1
Форма	-----	f

Рис. 2.3. Таблиця вибору механічних параметрів

На рис. 2.4 зображено фрагмент таблиці електротехнічних параметрів.

Name	Si	S_name
Гradient напруженості магнітного поля	A/м³	g7
Gradient напруженості електричного поля	B/м³	g6
Діелектрична проникність	-----	c3
Магнітна проникність електроліту	кг/л	c7
Магнітна проникність	-----	d2
Напруженість магнітного поля	A/м	h
Напруженість електричного поля	B/м	e
Залишкова намагніченість	A/м	a
Сила змінного електричного струму	A	j4
Сила електричного струму	A	i
Питомий електричний опір	Ом*м	r
Електрична ємність	Ф	c
Електричний заряд	Кл	q3
Електрична напруга	B	k

Рис. 2.4. Таблиця вибору електротехнічних параметрів

На рис. 2.5 зображено фрагмент таблиці теплотехнічних параметрів.

Name	Si	S_name
► Тиск	н/м*м	p
Кількість тепла, що відводиться	дж	q1
Кількість тепла, що підводиться	дж	q2
Температура	к	t
Температура плавлення	к	t2
Температура кипіння або конденсації	к	t3
Температура відведення	к	t6
Температура точки Кюрі	к	t4
Теплопровідність	вт/м·град	l1

Рис. 2.5. Таблиця вибору теплотехнічних параметрів

Для опису взаємодії ефектів подано таблицю даних з ефектами (рис. 2.6).

	Number	First	Second	Picture	Text
►	1	3j4x1	3u5	1	(MEMO)
	2	3u5	1q1x2	2	(MEMO)
	3	1q1x2	1q1v	3	(MEMO)
	4	1q1v	1q2v	4	(MEMO)
	5	1q2v	1q1v	5	(MEMO)
	6	1q1v	1q1x	6	(MEMO)
	7	1q1x	2mx	7	(MEMO)
	8	2mx	2p2x	8	(MEMO)

Рис. 2.6. Фрагмент таблиці взаємодії ефектів

де First – початкове значення ефекту;
Second – кінцеве значення ефекту;
Text – текстовий опис ефекту.

На рис. 2.7 подано текстову колонку.

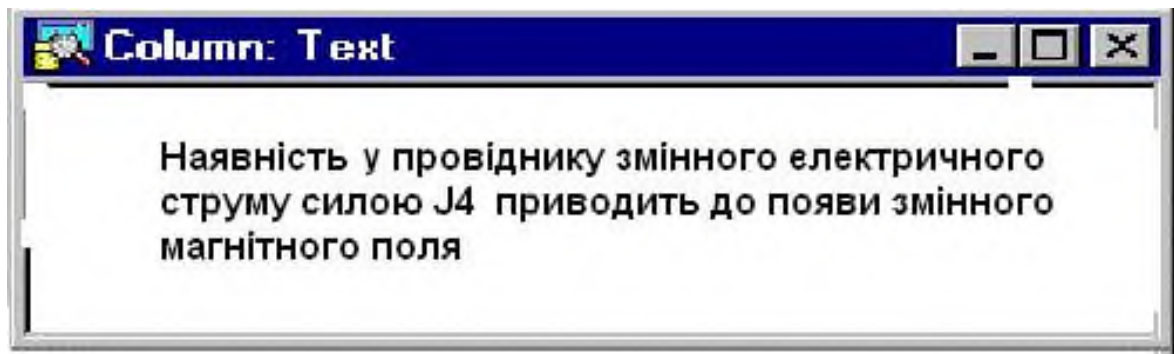


Рис. 2.7. Текстова колонка

2.2. Режими роботи програмного комплексу

Після запуску програмного комплексу система переходить у початкову позицію – «Головне меню», в якому є такі основні режими роботи: «Об'єкти імпульсних технологій», «Робота з деревами», «Створення ефектів», «Розв'язання задачі» і «Перегляд результатів» (рис. 2.8).

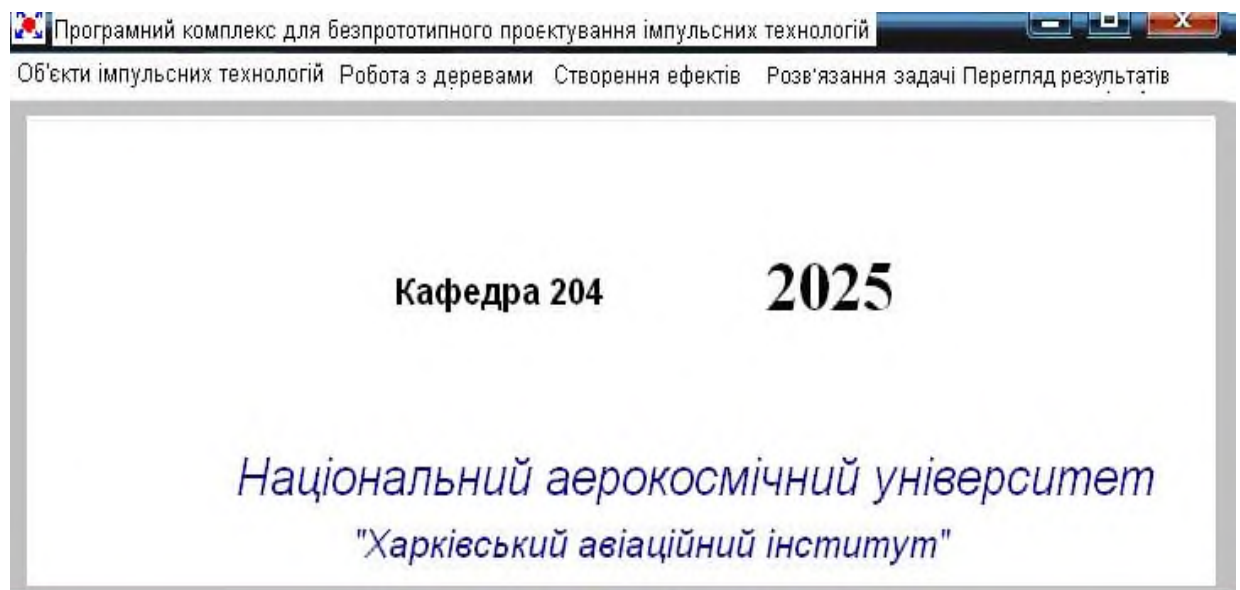


Рис. 2.8. Вигляд головного меню програмного комплексу

Режим «Об'єкти імпульсних технологій» (рис. 2.9) містить наступні режими: методи, устаткування, схема штампування, маршрутна технологія і оснащення.

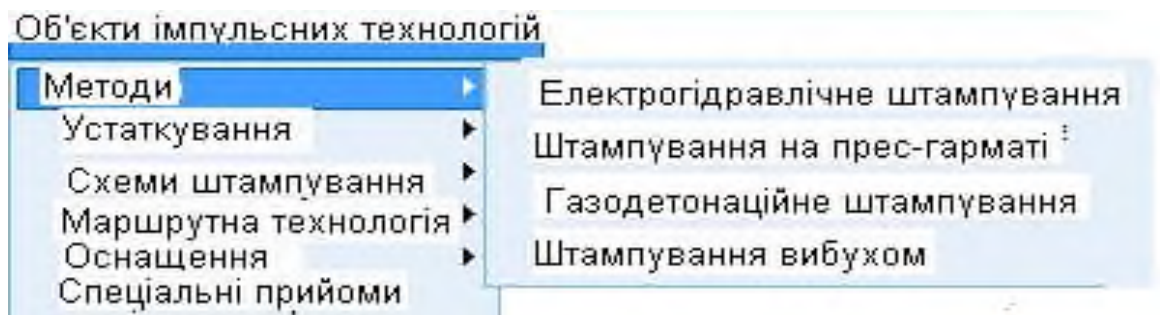


Рис. 2.9. Меню для режиму «Об'єкти імпульсних технологій»

У режимі «Робота з деревами» відкривається меню з такими пунктами (рис. 2.10): «Завантажити», «Тестування» і «Рекомендації».

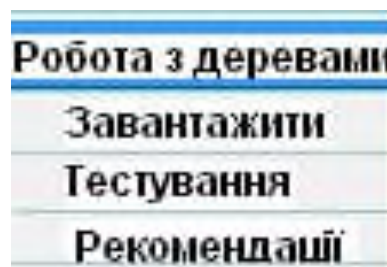


Рис. 2.10. Меню для режиму «Робота з деревами»

Після вибору пункту «Розв'язання задачі» з'являється вікно «Постановка задачі» (рис. 2.11), в якому розміщено декілька пунктів роботи:

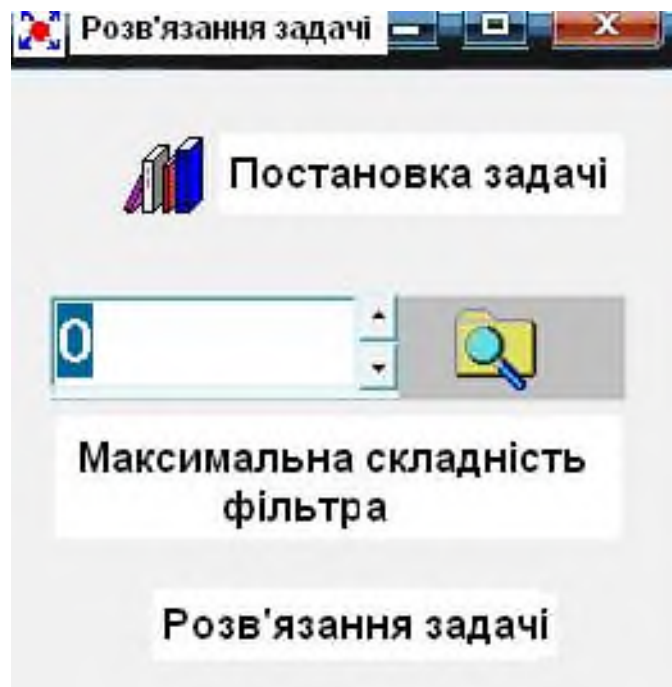


Рис. 2.11. Вікно «Розв'язання задачі»

- «Постановка задачі»;
- «Установлення максимальної складності фільтра»;
- «Розв'язання задачі».

У розділі «Постановка задачі» задаються початкові і кінцеві характеристики системи. У вікні, що з'явилося, демонструється приклад задачі.

У першій частині «Початкові значення системи» необхідно вказати початкові характеристики об'єкта.

У другій частині «Кінцеві значення системи» необхідно вказати властивості об'єкта в кінцевому стані, тобто те, що необхідно отримати (рис. 2.12).



Початкові значення системи	
Зміна параметрів	Збільшення
Параметр об'єкта	Вага
Об'єкт	Тверде тіло

Кінцеві значення системи	
Зміна параметра	Зменшення
Параметр об'єкта	Об'єм
Об'єкт	Рідина

Зберегти Відмінити Допомога

Рис. 2.12. Меню для режиму «Постановка задачі»

Редагування значень об'єктів, параметрів і функцій відбувається тільки при натисненні на кнопку «Зберегти» зліва внизу.

Складові частини меню «Постановка задачі»:

1) початкові значення системи:

- «Зміна параметра»;
- «Параметр об'єкта»;
- «Об'єкт»;

2) кінцеві значення системи:

- «Зміна параметра»;
- «Параметр об'єкта»;
- «Об'єкт».

Як видно з прикладу, параметри можуть мати схожі значення в обох випадках.

При натисненні на кнопку «Зміна параметра» з'являється наступне меню (рис. 2.13).

У вікні «Зміна параметра» закладена функція, за якою змінюється параметр об'єкта.

Значення функції можна відстежувати або зліва на картинці, або в текстовому редакторі.

Для змінення значень використовуємо клавіші «Вгору» і «Вниз».

Після вибору необхідного значення потрібно натиснути кнопку «Зберегти».



Рис. 2.13. Меню для режиму «Зміна параметра»

3. ПРИКЛАД ВИКОРИСТАННЯ У ПРОГРАМІ МЕТОДУ ГРАФІВ

У програмному комплексі використано метод графів, який забезпечує повний перебір з аналізом усіх існуючих рішень.

На рис. 3.1 подано алгоритм з деревоподібною структурою пошуку рішення.

Хай у програмі задано обмеження на використання ефектів при $K = 3$.

A1 – початкове положення пошуку.

На першому рівні методом перебору програма працює з групою ефектів з початковим значенням A1. Знайдено позитивний розв'язок.

Це ефект A1-A2.

Далі програма знаходить усі ефекти з початковим значенням A2, це ефекти A2-A5, A2-A6, A2-A7.

Далі перевіримо використання початкового значення ефекту A5.

Знову виконується пошук – A5-A9, A5-A8.

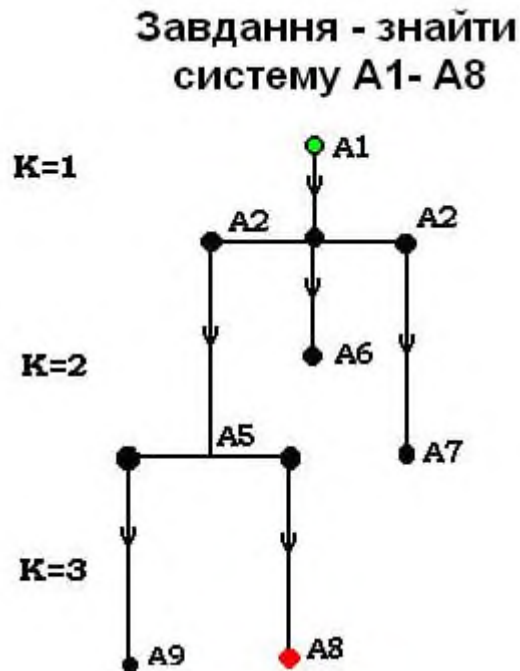


Рис. 3.1. Деревоподібна структура пошуку розв'язання

Тепер початкове значення дорівнює A9, але K дорівнює 3 (це максимальна кількість використаних ефектів), тому необхідно піднятися на одну сходинку вище до початкового значення A5. Наступний ефект A5-A8, який задовольняє розв'язок задачі.

Далі алгоритм змушує піднятися на дві сходинки вище (оскільки ефектів з початковим значенням A5 більше не існує) і знову продовжується пошук, тільки з новими значеннями початкового значення ефекту, і так доти, доки не вичерпаються всі варіанти розв'язання задачі.

Пошук зупиняється тоді, коли всі варіанти розв'язання будуть вичерпані. Таким чином, отримано алгоритм для нового патентоспроможного розв'язання задачі.

Алгоритми програмного комплексу використовувались при отриманні патентів на корисні моделі [2–6].

Програмний комплекс також використовувався як програмне середовище для отримання математичних моделей у курсі «Математичне моделювання об'єктів АКТ».

4. СКЛАДОВІ КОМПОНЕНТИ БАЗИ ЗНАНЬ ІМПУЛЬСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Система вважається інтелектуальною, якщо в ній реалізовано такі три базові функції:

1. Функція уявлення і оброблення знань.
2. Функція міркування.
3. Функція спілкування.

Основним елементом такої системи є база знань, яка має реалізувати наведені вище функції у програмному засобі.

На рис. 4.1 подано загальну схему бази знань у вигляді модулів інженерних знань (МІЗ).

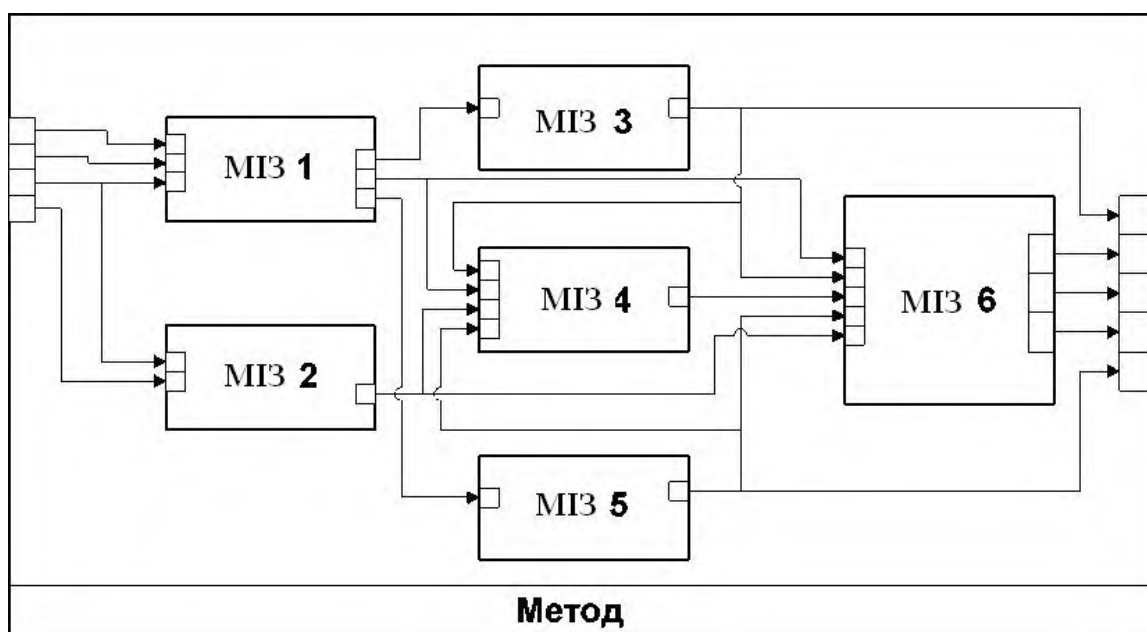


Рис. 4.1. Структурна схема бази знань

Кожний МІЗ являє собою чорний ящик для реалізації якої-небудь функції, він має свій механізм, свої входи і виходи. Кожна база також має свої загальні входи і виходи. Сукупність МІЗ, загальні входи і виходи бази знань об'єднуються в метод.

У базі знань системи подано елементи для формування методів бази знань імпульсної технології при безпрототипному проектуванні, схеми оброблення і форми програмних модулів для виконання розрахунків операційної технології.

Для кожного методу наведено матеріали, які характеризують суть кожного методу імпульсної технології. Також подано технологічні схеми, формули і форми для виконання розрахунків операційної технології за кожним методом.

5. ГІДРОВИБУХОВЕ ШТАМПУВАННЯ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ЕЛАСТИЧНИХ ДНИЩ

5.1. Суть методу

Штамування енергією вибухових речовин застосовується в літакобудуванні, авіадвигунобудуванні для виготовлення різних листових деталей: днищ, жорсткостей, обтічників, обичайок.

Переваги методу полягають у можливості формоутворення великогабаритних виробів, підвищенні точності штампування деталей, скороченні витрат на виготовлення технологічного оснащення і устаткування.

Процес листового штампування енергією вибухових речовин (ВР) полягає у такому.

На матрицю 1 (рис. 5.1) укладається заготовка 2.

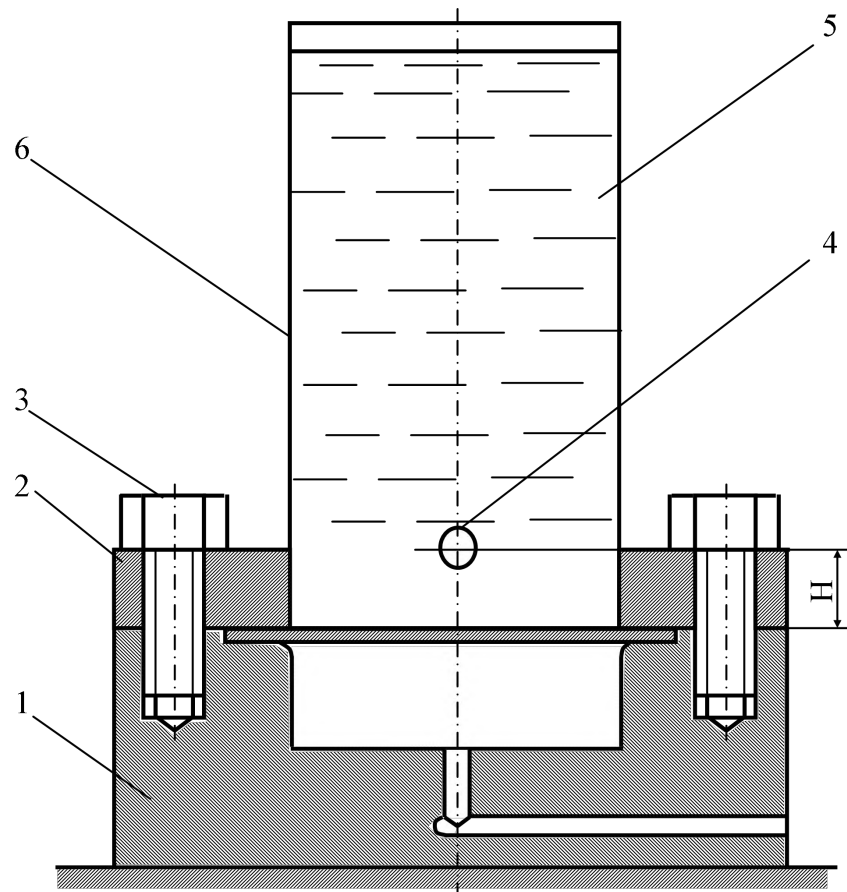


Рис. 5.1. Схема листового штампування енергією ВР:
1 – матриця; 2 – заготовка; 3 – притискне кільце; 4 – заряд ВР

Для запобігання утворенню гофрів при витяжці фланець заготовки притискається до матриці за допомогою притискного кільця 3.

Над заготовкою вмонтовується заряд ВР 4, що поміщається у передавальне середовище (рідина 5), укладене в руйнований басейн 6, установлений на притискному кільці 3.

Порожнина матриці герметизується за допомогою пластичної маси, спеціальних манжет або гумових кілець ущільнювачів.

При вибуху заряду ВР утворюються ударна хвиля і гідропоток, що виникає при розширенні газового пузиря.

Частина енергії, що трансформується в механічну роботу, витрачається на деформацію заготовки.

Остання, поглинаючи цю енергію, розганяється і рухається з великою швидкістю в порожнині матриці, витісняючи повітря, що там є.

Для запобігання появи дефектів, пов'язаних із стисненням повітря, їх (у більшості випадків) перед штампуванням на порожнині матриці за допомогою вакуумування видаляють.

Найчастіше процес штампування здійснюється в стаціонарних гідровибухових басейнах (басейнове штампування) або в руйнованих разових басейнах (безбасейнове штампування).

Експериментальна частина роботи (штампування еліптичного днища за безбасейною схемою) здійснюється в бронекамері коробчастого типу, яка є силовим каркасом, обшитим металевим листом завтовшки 3 мм і встановлений на чотирьох погумованих катках для горизонтального переміщення.

Для штампування використовують комплект оснащення, який містить матрицю, притискне кільце, стягнуті болти.

Передавальне середовище і заряд вибухової речовини поміщають у руйнований басейн, виготовлений з картону, або в металевий мікробасейн.

5.2. Розрахунок роботи для деформування заготовки ВР

Повна робота деформації заготовки

$$A = A_{\phi} + A_{\text{сф}}, \quad (5.1)$$

де A_{ϕ} – енергія деформації фланця, Дж; $A_{\text{сф}}$ – енергія деформації сферичного сегмента, що приблизно описує еліптичну донну частину напівфабрикату, Дж.

Енергія деформації фланця

$$A_{\phi} = \frac{K_r K_T \pi B}{1 + \alpha} \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{K_o K_{\phi}}{K_o - 1} \ln K_o^{1+\alpha} D^2 / 4 (K_o^2 - 1) \delta, \quad (5.2)$$

де K_r – коефіцієнт, що враховує додаткову енергію, затрачувану на вигин матеріалу навкруги ребра перетяжки матриці ; $K_r = (1,1 \dots 1,15)$; $K_r = 1,15$ при $\rho/\delta = 2 \dots 4$; $K_r = 1,10$ при $\rho/\delta > 4$; ρ – радіус закруглення ребра перетяжки матриці, мм; K_T – коефіцієнт, який враховує енергію, необхідну для подолання сил тертя; $K_T = 1,1 \dots 1,3$; β і α – коефіцієнти степеневі апроксимації кривої зміцнення штампованого матеріалу; D_o – діаметр заготовки, м (рис. 5.2); D – діаметр отвору матриці, м;

$$K_\Phi = D_{\Phi л} / D; \quad (5.3)$$

$$K_o = D_o / D. \quad (5.4)$$

Енергію формоутворення сферичного сегмента обчислюють за залежністю

$$A_{cp} = \frac{B}{1 + \alpha} \frac{4f^2}{3D^2}^{1+\alpha} \pi D, \quad (5.4)$$

де f – кінцеве прогинання заготовки, м.

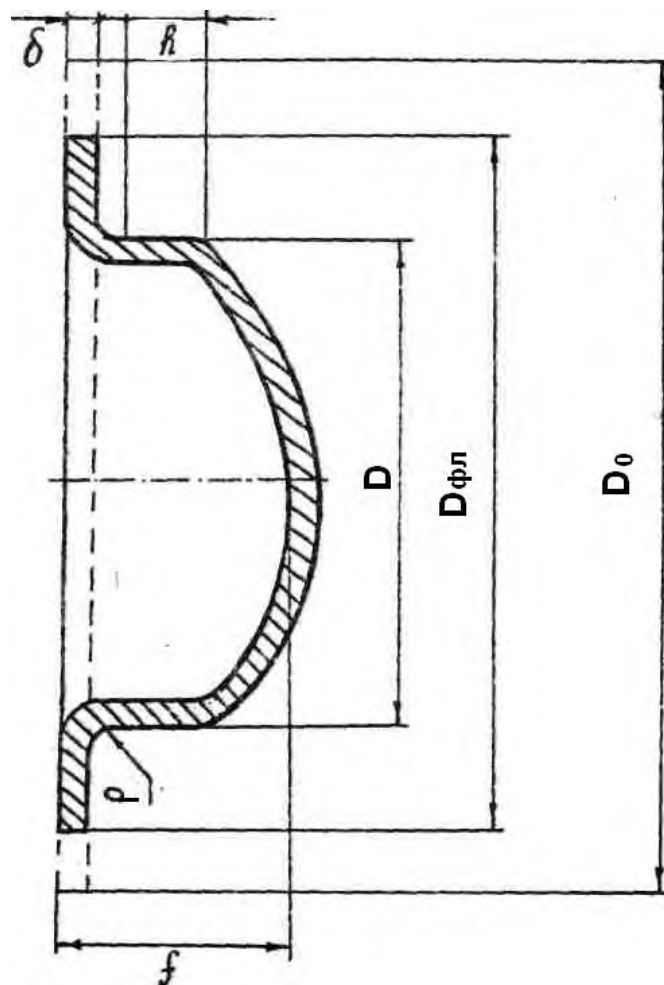


Рис. 5.2. Геометричні характеристики листової деталі

5.3. Розрахунок коефіцієнта корисної дії процесу

Енергію, закладену в заряді вибухової речовини, визначають за формулою

$$W = Qm, \quad (5.6)$$

де Q – теплотворна здатність БВР, Дж/кг; m – маса заряду БВР, кг.

Коефіцієнт корисної дії вибухового формоутворення

$$\eta = \frac{A}{W} 100 \%. \quad (5.7)$$

Тут A – повна робота деформації заготовки, $A = A_{\text{сф}} + A_{\text{ф}}$, де $A_{\text{сф}}$ – робота пластичного формозмінення донної частини заготовки; $A_{\text{ф}}$ – робота пластичного формозмінення фланця заготовки.

На рис. 5.3 подано форму з результатами розрахунків роботи деформування і коефіцієнта корисної дії для процесу деформування ВР.

Штапування БВР

Розрахунок роботи для деформування заготовки

Вхідні параметри

- Коефіцієнт для енергії на вигін по перетяжному ребрі - K_t : 1,15
- Радіус закруглення перетяжного ребра - r_0 , мм: 4
- Коефіцієнт протидії тертю - K_t : 1,3
- Коефіцієнт першої ступінної апроксимації кривої зміцнення матеріала - β : 327000000
- Коефіцієнт другої ступінної апроксимації кривої зміцнення матеріала - α : 0,24
- Діаметр заготовки D_0 , м: 0,208
- Діаметр фланця $D_{\text{фл}}$, м: 0,201
- Діаметр отвору матриці - D , м: 0,150
- Товщина заготовки - δ , м: 0,001
- Кінцевий прогиб заготовки - f , м: 0,027

Вихідні параметри

- Енергія деформування сферичного сегмента - $A_{\text{сф}}$, Дж: 379
- Енергія деформування фланця - $A_{\text{фл}}$, Дж: 18
- Повна робота деформування заготовки - A , Дж: 397

Формули:

$$A = A_{\text{сф}} + A_{\text{фл}}$$

$$A_{\text{сф}} = \frac{B}{1 + \alpha} \left(\frac{4F^2}{3D^2} \right)^{1+\alpha} \pi D_0$$

$$A_{\text{фл}} = \frac{K_t K_f \pi B}{1 + \alpha} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{K_0 K_f}{K_0 - 1} \ln K_0 \right)^{1+\alpha} D^2 / 4 (K_0^2 - 1) \delta$$

Розрахунок **Видалити**

Розрахунок коефіцієнта корисної дії процесу деформування

Вхідні параметри

- Повна робота деформування заготовки - A , Дж: 397
- Теплотворна здатність БВР - Q , Дж/кг: 4290000
- Маса заряду БВР - m , кг: 0,004

Вихідні параметри

- Енергія заряду БВР - W , Дж: 17160
- Коефіцієнт корисної дії - η : 2,3

Формули:

$$W = Qm$$

$$\eta = \frac{A}{W} \cdot 100\%$$

Графічна інтерпретація

Кількість точок: 10

Мінімальне значення: 0,001

Максимальне значення: 0,01

Розрахунок цикла **Графік** **Показати** **Розрахунок** **Видалити**

Рис. 5.3. Форма для розрахунків параметрів штапування ВР

6. ШТАМПУВАННЯ ВИБУХОМ ОБОЛОНКОВИХ ДЕТАЛЕЙ З НАГРІВАННЯМ ЗАГОТОВОК

У конструкціях сучасних авіаційних двигунів деталі замкнутого контуру типу обичайок становлять найчисленнішу групу в загальній номенклатурі виробу.

Такі деталі використовуються у вузлах компресора, камери згоряння і соплового апарата. Технологічні процеси виготовлення указаної групи деталей, які використовуються нині час на виробництві, належать до одних з найскладніших і трудомістких.

Особливі труднощі при формоутворенні виникають при виготовленні деталей з малопластичних високоміцних сплавів типу ВТ20, ВТ5-І, ВТ6.

Ці титанові сплави дуже важко обробляти в холодному стані. Для підвищення пластичних характеристик застосовують нагрівання заготовок.

У практиці авіагунобудування при виготовленні деталей з важко-деформівних сплавів знайшли широке використання як традиційні, так і спеціальні способи нагрівання.

До традиційних способів належать такі способи нагрівання: в печах, радіаційний, електроконтакт, індукційний, газовими пальниками, за допомогою штампувального інструменту, в розплавах, до спеціальних – нагрівання піротехнічними складами і за допомогою передавального середовища.

У зв'язку з відсутністю втрат температури при перенесенні товстостінної заготовки вона нагрівається достатньо просто одним з відомих способів.

Проте при формоутворенні тонкостінних (0,8...2,0 мм товщиною) заготовок процес штампування з нагріванням має певні труднощі: по-перше, заготовки при високих температурах мають низьку жорсткість, по-друге, швидко охолоджуються після припинення нагрівання.

При виборі способу нагрівання необхідно враховувати технологічну схему штампування і специфічні властивості оброблюваного матеріалу.

Так, наприклад, титанові сплави при високих температурах активно взаємодіють з киснем, азотом, воднем та іншими газами, створюючи сполуки на поверхні і проникаючи в кристалічні решітки. Внаслідок цього можуть змінюватися їх механічні властивості.

Тривала витримка титанових сплавів при температурі вище за точку фазового перетворення приводить до росту зерна і одночасного збільшення газонасичення поверхні заготовки.

Для збереження дрібнодисперсної структури і високих механічних властивостей деталей при нагріванні заготовок необхідно забезпечувати мінімальний час перебування їх при температурі вище за температуру фазового перетворення, а для запобігання окисненню використовувати захисні середовища або спеціальні обмазки.

Радіаційне нагрівання є одним з прогресивних способів. Залежно від вживаного джерела енергії промислові пристрої для його реалізації поділяються на газові та електричні.

Переваги газового радіаційного нагрівання – висока швидкість нагрівання, універсальність, можливість нагрівання заготовок великих габаритів, в технологічній зоні, а також створення диференційованого нагрівання.

Недоліки: складність контролю температури, нерівномірність температурного поля при складній конфігурації заготовок, можливість перегрівання металу в локальних зонах.

На рис. 6.1 подано схему установки для штампування вибухом деталей з нагрітих оболонкових заготовок, основні технічні характеристики яких наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Показники імпульсного навантаження

Найменування показників	Одиниці вимірювання	Значення
Енергоносій імпульсного навантаження - заряд ВР	кг	0,1
Максимальний тиск імпульсного навантаження в гідросередовищі	МПа	100
Передавальне середовище	-	Рідина
Спосіб штампування	-	Метанням передавального середовища
Спосіб нагрівання заготовки	-	Радіаційний
Енергоносій нагрівача: - пропан	%	20
- повітря	%	80
Максимальна температура нагрівання заготовки	К	1473
Максимальна теплова потужність нагрівача	ккал/с	10
Габаритні розміри оснащення: - діаметр	м	1.5
- висота	м	0.8
Габаритні розміри установки: - висота не більше	м	3
- в плані не більше	м	3,5x2,5
Максимальна вага установки	кг	1500

Штамування деталей типу оболонок з циліндричних тонколистових заготовок з нагріванням на звичайному пресовому устаткуванні є неможливим у зв'язку зі швидким зменшенням температури при перенесенні її із зони нагрівання в технологічну зону, застосуванням жорсткого інструменту, який приводить до значного тепловідведення, а також у зв'язку з низькими швидкостями деформації.

При імпульсному формоутворенні час деформації триває мілісекунди, що є у такому випадку позитивним чинником, оскільки заготовка не встигає остигнути до моменту закінчення деформації.

Формоутворення в установці здійснюється за матрицею, що відображає форму деталі.

Імпульсне навантаження створюється в гідросередовищі при підриванні заряду бризантної вибухової речовини.

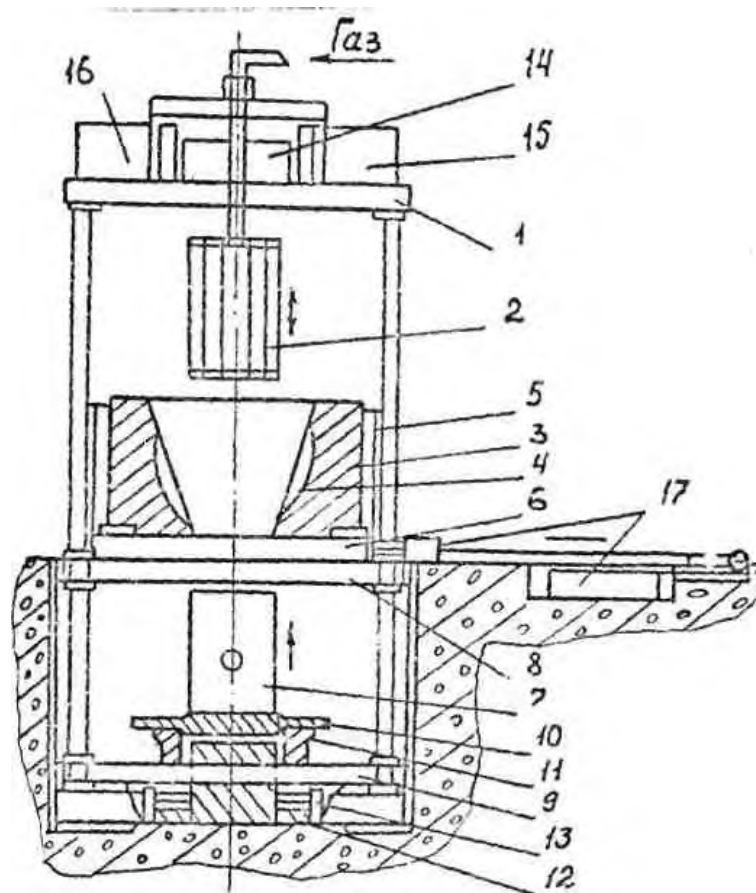


Рис. 6.1. Схема установки ВУГШ-3-1500 РН:

- 1 – силова рама; 2 – нагрівач; 3 – матриця; 4 – заготовка;
- 5 – кришка бронею; 6 – каретка; 7 – басейн із зарядом; 8 – рама матриці;
- 9 – рама басейну; 10 – основа басейну; 11 – кільце;
- 12 – основа; 13 – амортизація; 14 – привід нагрівача; 15 – привід вертикального переміщення басейну;
- 16 – привід вертикального переміщення матриці; 17 – привід горизонтального переміщення матриці

Схема установки дає змогу нагрівати заготовку безпосередньо в оснащенні, що в сукупності з механізацією операцій подачі-виведення нагрівача і уведення басейну приводить до скорочення часу контакту нагрітої заготовки із зовнішнім середовищем до 5 с і збереження штампувальної температури заготовки без значного попереднього її перегрівання (рис.6.2).

Вхідні параметри

- Теплота спогляння газу - $Q_{гн}$, ккал/м³: 23000
- Перепад тиску газу на сопло, дФ, кгс/м²: 200
- Плотность газа - ρ_0 , кг/м³: 2
- Висота заготовки - H_0 , мм: 17
- Коефіцієнт корисної площини, який враховує наявність швів і зазорів η_1 ; плиткам, η_2 : 0,95
- Найменший діаметр заготовки $D_{мін}$, мм: 8
- Найбільший діаметр заготовки $D_{мак}$, мм: 12
- Зазор між найменшим діаметром заготовки і откотою екрана - $\delta_{екр}$ (10, 15) мм: 13
- Зазор між сеткой-экраном і излучающей насадкой - $\delta_{екр}$ (5, 8) мм: 7
- Теплове навантаження на одну керамічну плитку - $Q_{пл}$, ккал/с: 1000
- Коефіцієнт висоти випроїнювача - η_2 : 1,1
- Коефіцієнт діаметра вихідного з'єднання діффузора - b : 2,5
- Коефіцієнт довжини камери сніщення - c : 3,5
- Коефіцієнт довжини конфузора - e : 1,5
- Коефіцієнт висоти відзеркаленого кільця - n : 0,5

Вихідні параметри

- Діаметр сітки екрана - d_0 , мм
- Діаметр випроїнювача - d_1 , мм
- Висота випроїнювача - H_1 , мм
- Повна площа випроїнювача - $S_{вип}$, мм²
- Кількість плиток в випроїнювачі, n
- Повне теплове навантаження нагрівача - Q , ккал/с
- Витрати газу - V , м³/ч
- Витрати повітря для нагрівача - $V_{возд}$, м³/ч
- Площина поперечного перетину сопла - f_0 , мм²
- Діаметр сопла - d_0 , мм
- Діаметр камери сніщення - d_1 , мм
- Діаметр вихідного перетину діффузора - $d_{вх}$, мм
- Довжина камери сніщення - l_1 , мм
- Довжина діффузора - l_2 , мм
- Довжина конфузора - l_3 , мм
- Зазор між діффузором і основою излучателя - $\delta_{дд}$, мм
- Діаметр відзеркаленого кільця - d_0 , мм
- Висота відзеркаленого кільця - H_0 , мм

Формули:

- $\Delta_0 = (d_1 - d_0) / 2 \approx (10 \dots 15) \text{ мм}$
- $\Delta_1 = (d_2 - d_1) / 2 \approx (5 \dots 8) \text{ мм}$
- $H = (1 \dots 1,2) H_0$
- $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2$
- $Q = 3,6 Q_{пл} n$
- $V = Q / Q_{гн}$
- $V_{возд} = V \cdot \alpha V_0$
- $f_0 = V \cdot 10^{-5} / (3600 \mu (19,8 \Delta P / p)^{0,5})$
- $d_0 = (4 f_0 / \pi)^{0,5}$
- $d_1 = 19,5 d_0$
- $d_2 = (2 \dots 2,5) d_1$
- $l_1 = (3 \dots 5) d_1$
- $l_2 = (1,5 \dots 2,2) d_1$
- $l_3 = (d_2 - d_1) / (2 \lg \frac{p}{2}) = 7,15 (d_2 - d_1)$
- $\Delta d = (0,1 \dots 0,12) H$
- $d_0 = \sqrt{2} d_1$
- $H_0 = (0,5 \dots 0,7) H$

Розрахунок цикла

- Кількість точок: 10
- Мінімальні значення: 10
- Максимальні значення: 20

Таблиця даних

Рис. 6.2. Форма для розрахунків параметрів штампування вибухом оболонкових деталей з нагріванням заготовок

7. ІМПУЛЬСНЕ ШТАМПУВАННЯ-ВИТЯГУВАННЯ РІДИНОЮ НА ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ ПРЕСАХ

7.1. Суть методу

Фізична суть методу штампування-витягування рідиною на електрогідрравлічних пресах (ЕГШ-витягування) полягає у формоутворенні тонкостінного виробу витягування заготовки за допомогою імпульсного навантаження високої інтенсивності, яка створюється в рідкому передавальному середовищі.

Листова заготовка може бути плоскою або попередньо зігнутою. Короткочасне навантаження, яке створюється підводним високовольтним електророзрядом, впливає на заготовку безпосередньо або через гумову діафрагму.

Електрогідрравлічне штампування-витягування відрізняється від витягування в інструментальних штампах на традиційному пресовому устаткуванні двома принциповими особливостями:

1. Сприймаючи розподілене деформувальне зусилля ділянки, заготовки не стикаються з твердими формоутворювальними (або іншими)

поверхнями штампа і при цьому створюються реактивні сили тертя, які перешкоджають розвитку пластичних деформацій на цій ділянці.

2. Робоче зусилля має імпульсний характер, унаслідок чого деформація відбувається короткочасно, при цьому великі прискорення і швидкості деформацій обумовлюють розвиток значних інерційних напружень.

Ці чинники визначають напружено-деформований стан заготовки при витягуванні і характер процесу формоутворення виробу.

Принципову схему ЕГШ-витягування показано на рис. 7.1.

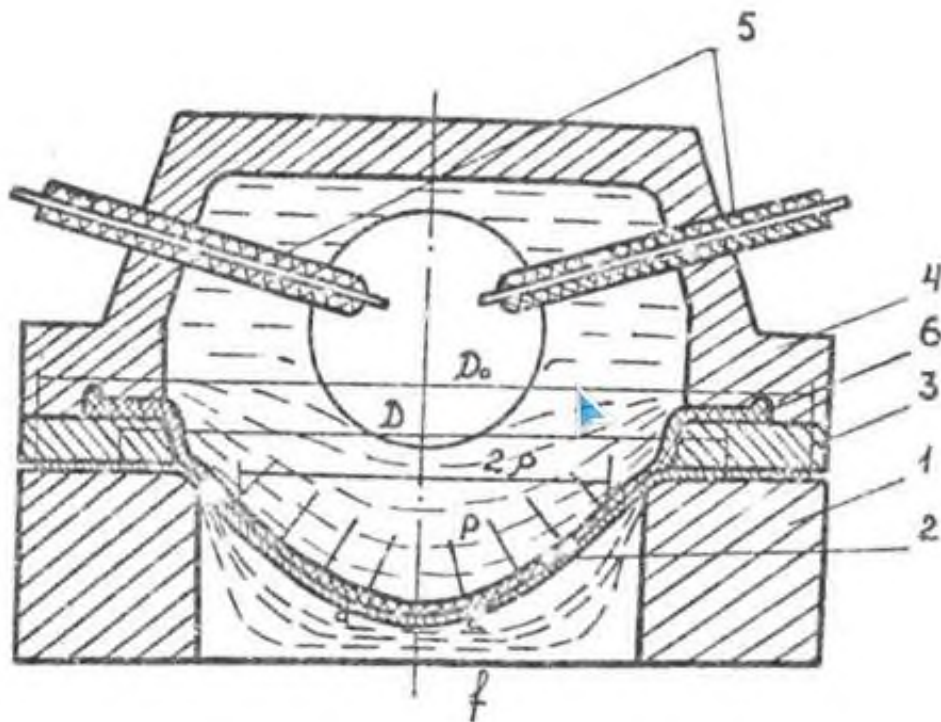


Рис. 7.1. Схема ЕГШ-витягування: 1 – матриця-кільце; 2 – кругла заготовка; 3 – притисна плита; 4 – розрядна камера; 5 – електроди; 6 – діафрагма

У матриці-кільці 1 витягується кругла заготовка 2 з поточним діаметром D (у початковому стані плоска, діаметром D_0). Її фланці притиснуті притисною плитою 3.

Витягування обумовлене дією імпульсного певного зусилля P , яке створюється рідким передавальним середовищем (водою), що знаходиться в розрядній камері 4 технологічного блока, при високовольтному електричному розряді між електродами 5. Навантаження заготовки здійснюється через еластичну (гумову або поліуретанову) діафрагму 6, що виключає розбризкування рідини і попадання її в порожнину матриці.

Застосування високовольтного розряду для технічного використання було запропоновано Л. А. Юткіним у 1950 році і отримало назву електрогідравлічного ефекту (ЕГШ).

7.2. Механізм електродідравлічного штампування

При іскровому високовольтному розряді в рідині між електродами утворюється канал крізної провідності – область, що є плазмовим шнуром діаметром в декілька міліметрів з температурою до 10000 К і тиском до 10 ГПа і більше.

Чим інтенсивніше розряд (більше потужність розрядного струму, крутіше фронт його збільшення), тим вище початкові параметри шнура, який розширюється спочатку з надзвуковими швидкостями – вибухоподібно, утворюючи газопарову порожнину (умовно показано на рис. 7.1 як заштрихована область).

Розширення порожнини супроводжується всіма механічними чинниками вибуху – ударною хвилею, потоком рідини, що розходить, (супутними струменями), високим статичним тиском, що впливає на зустрічні об'єкти, у нашому випадку і на відкриту поверхню заготовки, на якій розвиваються імпульсні механічні навантаження, що здійснюють роботу пластичної деформації заготовки.

Таким чином, енергія електричного струму розряду перетвориться (з деяким невисоким ККД) на роботу пластичної деформації.

Перша з зазначених раніше особливостей електродідравлічного штампування-витягування характеризується появою додаткового (до основного на фланці) вогнища деформації на вільній ділянці заготовки, на яке впливає робоче навантаження.

Матеріал заготовки знаходиться у плоскому напруженому стані двостороннього розтягування, на відміну від основного вогнища (що розглядається при вивченні штампування-витягування в інструментальних штампах), де схема напруженого стану – різнойменне розтягування-стиснення.

Між основним вогнищем деформації на фланці діють стискальні тангенціальні (колові) напруження і додаткові (розтягувальні тангенціальні напруження) (рис. 7.2).

У цьому перерізі діють тільки радіальні напруження і матеріал знаходиться в лінійному напруженому стані розтягування.

У разі витягування заготовки рідиною деформація на всіх її ділянках відбувається нерівномірно.

Біля області, де може знаходитися межа між вогнищем деформації, переріз заготовки спочатку зазнає стиснення в колових перерізах основного вогнища (фланця) – $\sigma_0' < \sigma_0$, а потім у додатковому вогнищі – розтягування $\sigma_0 > \sigma_0'$ (див. рис. 7.2).

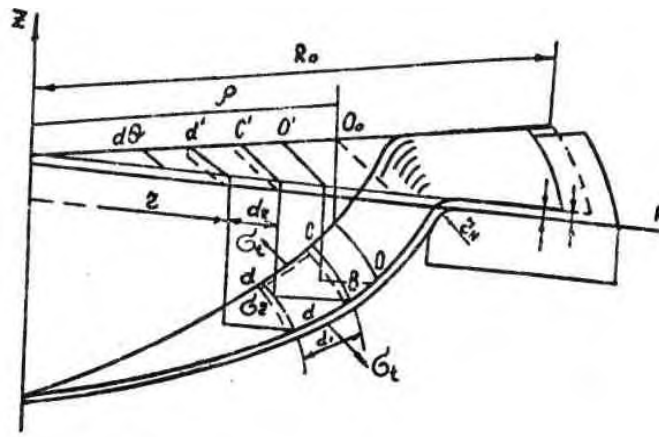


Рис. 7.2. Схема напруженого стану купола заготовки

Невеликі розтягувальні напруження спостерігаються в центрі заготовки, де вплив іншого виду напружено-деформованого стану в нейтральному перерізі і на фланці є найменшим.

Тут рівняння рівноваги набуває відомої форми Лапласа для безмоментної оболонки подвійної кривизни, навантаженої внутрішнім тиском:

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{P}{S}, \quad (7.1)$$

де R_1 і R_2 – радіуси кривизни оболонки; σ_1 , і σ_2 – розтягувальні напруження у відповідних перерізах; P – питоме навантаження на поверхню оболонки; S – товщина оболонки.

У разі вісесиметричної оболонки, що деформується за границею текучості $R_1 = R_2 = R_u$; $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_t = \sigma_s$, рівняння (7.1) набуває вигляду

$$\frac{2\sigma_s}{R_u} = \frac{P}{S}, \quad (7.2)$$

де R_u – радіус кривизни центральної частини заготовки; σ_s – опір матеріалу пластичним деформаціям.

Якщо матеріал заготовки пластичний і слабо зміцнюється, тобто якщо приблизно можна вважати

$$\sigma_s \approx \sigma_B \text{ const}, \quad (7.3)$$

де σ_B – границя міцності при розтягуванні, то за залежністю (7.2) можна оцінити величину еквівалентного тиску – статичного тиску, еквівалентного імпульсному, тобто

$$P_e = \frac{2\sigma_B S}{R_u}. \quad (7.4)$$

Деформований стан заготовки у додатковому вогнищі визначається напруженим станом, оскільки ε_z – негативна, а дві інші деформації ε_r і ε_t – позитивні.

У разі вісесиметричного штампування у центрі купола ($\sigma_r = \sigma_t$) має місце просте розтягування.

Тут стоншування матеріалу найбільше, тому можливе його руйнування при значному опорі фланця деформаціям при витягуванні.

При обмеженому витягуванні після зіткнення центральної та інших частин заготовки з формоутворювальною поверхнею штампа (як це показано на рис. 7.2 пунктирними лініями) на них створюються реактивні сили тертя f_T , які уповільнюють або зовсім гальмують їх пластичну деформацію.

Зона додаткового вогнища скорочується. У цьому випадку – це кільцева ділянка, обмежена коловими перерізами Q-Q', C-C'.

При продовженні процесу штампування найбільш стоншуватися будуть центральні області цієї частини заготовки.

Як і при інших імпульсних процесах штампування, при електрогідравлічному штампуванні-витягуванні робоче зусилля не є постійним ($P \neq \text{const}$), а суттєво змінюється (у нашому випадку час навантаження заготовки $t_H = 10^{-5} \dots 10^{-2}$ с).

Тому розрахунковим параметром навантаження є енергія імпульсу сил, що навантажують заготовку A_H .

Ця енергія має бути не менше роботи пластичного формозмінення A_H заготовки, яке необхідно забезпечити цим навантаженням.

Енергія ж, що накопичується в батареї A_3 , має визначатися з урахуванням інтегральних втрат і при її перетворенні з початкової форми на роботу пластичної деформації, тобто з урахуванням загального коефіцієнта корисної дії розряду в штамповому блоці $\eta_{ш}$ становить

$$A_3 = \frac{A_H}{\eta_{ш}}. \quad (7.5)$$

Кількість накопиченої в конденсаторах генератора імпульсного струму (ГІС) електричної енергії розраховують за відомим співвідношенням

$$A_3 = \frac{C U^2}{2}, \quad (7.6)$$

де C – ємність конденсаторної батареї, Ф; U – напруга заряду, В.

У реалізованих описаних умовах електрогідравлічного штампування-витягування $\eta_{ш} = 0,25 \dots 0,5$.

Принципову електричну схему енергетичного блока генератора імпульсного струму установки показана на рис. 7.3.

Накопичувальну батарею утворюють паралельно сполучені конденсатори $C_1, C_2, \dots, C_i$. Величина A_3 прямо пропорційна квадрату напруги заряду, тому батарею заряджають до напруги $U_3 = 10^3 \dots 10^5$ В.

Зарядний контур (ЗК) (на рис. 7.3 зображено тонкими лініями) містить високовольтний трансформатор (ВТР), що підвищує напругу промислової електромережі до необхідної величини, і випрямляч Вп, який перетворює змінний струм промислової мережі на постійний струм зарядження конденсаторів.

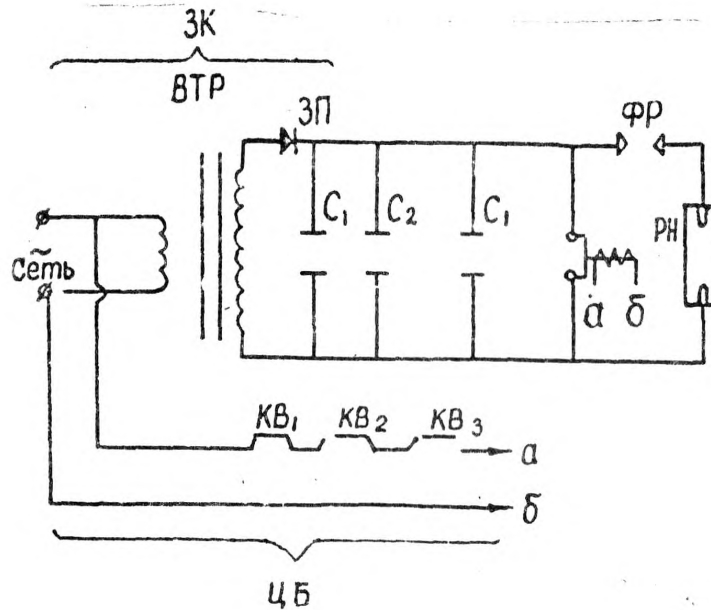


Рис. 7.3. Електрична схема установки

Робочий імпульс електричного струму високої потужності і сили $I_p = 10 \dots 50$ кА генерується в розрядному контурі при замиканні формувального розрядника (ФР).

На рис. 7.4 подано форму для виконання розрахунків.

Рис. 7.4. Форма для виконання розрахунків параметрів ЕГШ

8. МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНЕ ШТАМПУВАННЯ ЛИСТОВОГО МЕТАЛУ

8.1. Суть методу

Магнітно-імпульсне штампування (МІШ) належить до електричних способів імпульсного листового штампування.

Суть його полягає в тому, що механічна робота пластичної деформації матеріалу заготовки формується електромагнітними силами, які діють на металеву заготовку, в якій проходить імпульсний струм, індукований струмом індуктора при його взаємодії з імпульсним електромагнітним полем цього індуктора.

Принципову схему електромеханічного перетворення електричної енергії на роботу пластичної деформації заготовки показано на рис. 8.1 на прикладі двоконтурної електроімпульсної системи.

Процес магнітно-імпульсного штампування описується сукупністю диференціальних рівнянь, що характеризують електромагнітні, теплові і механічні явища.

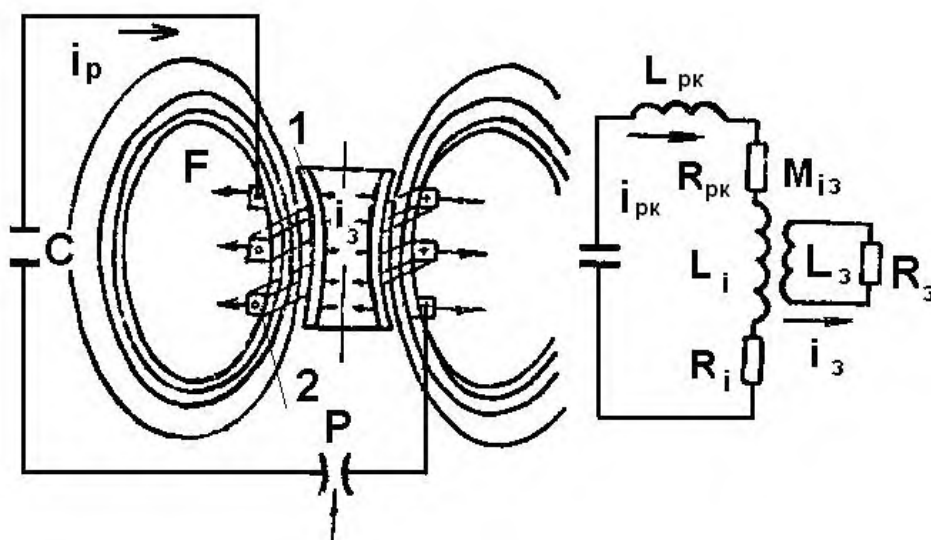


Рис. 8.1. Принципова схема процесу МІШ:

1 – заготовка, 2 – індуктор; i_p – розрядний струм;

C – накопичувальна конденсаторна батарея; P – розрядник;

F – механічні сили електромагнітної взаємодії; L_{pk} – індуктивність розрядного контуру; R_{pk} – опір (активний) розрядного контуру;

L_i – індуктивність індуктора; R_i – активний опір індуктора;

i_3 – індукований струм у заготовці; L_3 , R_3 – індуктивність і активний опір заготовки; M_{13} – коефіцієнт взаємоіндукції індуктора і заготовки

Рівняння, що описують електромагнітні явища:

$$\text{rot } \bar{E} = \mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \mu [\bar{V}, \bar{H}] ; \quad (8.1)$$

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{\sigma}; \quad (8.2)$$

$$\bar{\sigma} = \gamma \bar{E}; \quad (8.3)$$

$$\text{div } \bar{E} = 0; \quad (8.4)$$

$$\text{div } \bar{H} = 0, \quad (8.5)$$

де $\bar{E}$ – напруженість електричного поля; μ – магнітна проникність металу; $\bar{H}$ – напруженість магнітного поля; γ – електропровідність металу; $\bar{\sigma}$ – густина струму (табл.8.1); $\bar{V}$ – швидкість переміщення провідника.

Якщо врахувати, що $\gamma = \gamma(\theta)$, тобто γ залежить від температури, то рівняння (8.3) набуває вигляду

$$\bar{\sigma} = \frac{\gamma_0}{1 + \beta_T C_n \theta} \bar{E}, \quad (8.6)$$

де γ_0 – електропровідність при нульовій температурі; β_T – тепловий коефіцієнт; C_n – питома теплоємність матеріалу; θ – температура провідника.

Механічні ефекти описуються таким чином.

На одиницю об'єму провідника, що знаходиться в магнітному полі з напруженістю H , діє сила

$$\bar{F} = \mu [\bar{\sigma} \bar{H}] \quad (8.7)$$

З урахуванням формули (8.2) рівняння (8.7) набуває вигляду

$$\bar{F} = \bar{H} \Delta \bar{H} - \frac{1}{2} H^2 \mu. \quad (8.8)$$

Необхідно також брати до уваги залежність, що характеризує пластичну деформацію заготовки. У загальному випадку така залежність має вигляд рівняння руху заготовки:

$$D_1(\bar{V}) + P_m \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} - \bar{F}_c = 0, \quad (8.9)$$

де $\bar{V}$ – вектор швидкості переміщення заготовки; $\bar{F}_c$ – сумарна сила, яка діє на елементи заготовки; P_m – масова густина металу; D_1 , – оператор, що

описує пластичну деформацію, вид якої визначається формою заготовки і схемою навантаження.

Отже, при розв'язанні рівнянь (8.6) і (8.9) необхідно враховувати крайові умови.

Розрядний струм конденсатора (накопичувальної батареї) в ланцюзі, електричну схему якого показано на рис. 8.1, має коливальний характер з великим декрементом загасання.

Розв'язуючи рівняння, що описують електромагнітні процеси в двоконтурній схемі при коливальному розряді, знаходимо складову (первинного контуре) розрядного струму

$$I_c = \frac{U_0}{W L_3} e^{-\delta t} \sin \omega t \quad (8.10)$$

і складову струму в заготовці

$$I_3 = -\frac{U_0}{W L_3} \frac{M_{из}}{L_3} e^{-\delta t} \sin \omega t. \quad (8.11)$$

У цих виразах U_0 – початкова розрядна напруга; W – колова частота двоконтурної схеми, δ – декремент загасання.

При взятих припущеннях

$$\delta = \frac{R_e}{2 L_3}. \quad (8.12)$$

Тут R_e – еквівалентний опір двоконтурної схеми:

$$R_e = R_c + R_i + R_3(1 - \psi), \quad (8.13)$$

де L_3 – еквівалентна індуктивність системи «індуктор – заготовка»:

$$L_3 = \psi L_1; \quad (8.14)$$

ψ – коефіцієнт розсіювання.

Важливими особливостями взаємодії імпульсних струмів і електромагнітних полів є неоднаковість поширення імпульсних полів у повітряному середовищі і в металах, а також пов'язаний з цим явищем скін-ефект.

Проникнення магнітного потоку в метал має хвильовий характер, і залежно від частоти розрядного струму і параметрів заготовки магнітне поле може зосередитися між індуктором і заготовкою або його максимум знаходиться за заготовкою.

Від цього залежить напрям індукованих струмів, а отже, і механічних сил, що створюються в заготовці.

Варіюючи електричні параметри розряду, можна змінювати напрям деформації заготовки.

Зазвичай в умовах магнітно-імпульсного штампування частота розрядного струму має величину у декілька десятків кілогерц.

При таких частотах магнітне поле зовні металу можна вважати квазі-стаціонарним, зосередженим між заготовкою та індуктором.

Поширення поля в металі має хвильовий характер, і за один період воно не може проникнути на всю глибину заготовки.

Глибину проникнення поля оцінюємо величиною D – товщиною шару, в якому індукований струм мав би рівномірно розподілену густину

$$i_e = \sigma_m / \sqrt{2}. \quad (8.15)$$

8.2. Схема установки

Ознайомившись з описом установки, можна виконати розрахунки – вплив геометричних параметрів системи «індуктор – заготовка і електричних властивостей заготовки на ефективність перетворення електричної енергії на механічну роботу.

Механічну роботу можна визначити за висотою підкидання плоскої заготовки-диска 1 (рис. 8.2) плоским багатогвинтовим індуктором 2.

Висота підкидання h фіксується легким дротяним затискачем 3, який переміщується по вимірювальній штанзі 4 диском, що метається (заготовкою).

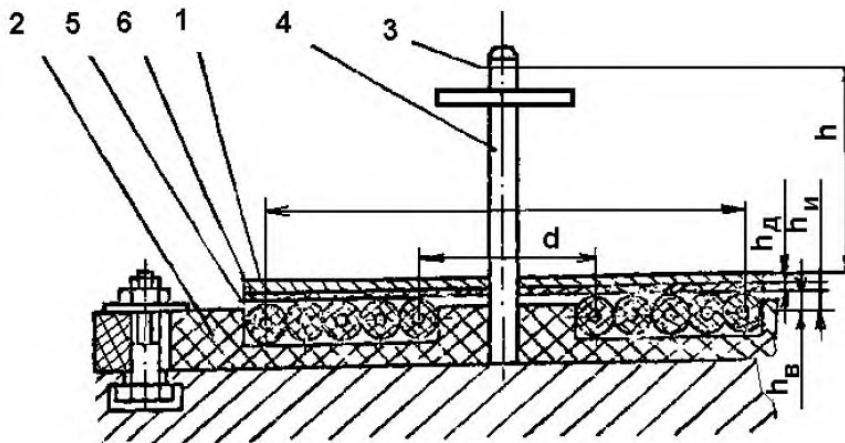


Рис. 8.2. Схема установки:

- 1 – заготовка; 2 – плоский індуктор; 3 – затискач-відмітник;
 4 – напрямна штанга; 5 – виток обмотки індуктора; 6 – ізоляційний диск-прокладка; h – висота підкидання (кидання) заготовки; h_i – товщина ізоляції дроту індуктора; h_d – товщина ізоляційного диска-прокладки;
 h_z – повний зазор між витками індуктора і заготовкою

Роботу, що витрачається на підкидання заготовки (нехтуючи опором повітря і тертям), можна оцінити за формулою

$$W = m q h \quad [\text{Дж}], \quad (8.16)$$

де m – маса заготовки, кг; q – прискорення вільного падіння, м/с^2 ;
 h – висота підкидання, м.

Величину електромеханічного ККД плоского індуктора при підкиданні дисків-вразків можна оцінити за залежністю

$$\eta = \frac{4 W_k^2}{2 C U^2}. \quad (8.17)$$

Величину зазору h_b можна змінювати установленням дисків-ізоляторів різної товщини h_d .

Таблиця 8.1

Залежність питомого опору і густини від матеріалу заготовки

Матеріал	Питомий опір σ , Ом·м	Густина ρ , кг/м ³
Латунь Л62	$0,7 \cdot 10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^3$
Сталь 08КП	$0,9 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^3$
Сталь 12Х18Н9Т	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^3$
Сплав титану 0Т 4-1	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^3$
Сплав алюмінію АМ	$0,32 \cdot 10^{-7}$	$2,65 \cdot 10^3$

Дані індуктора:

- зовнішній діаметр $D_3 = 142$ мм;
- внутрішній діаметр $d_b = 48$ мм;
- кількість витків $W = 5$;
- товщина зовнішньої ізоляції $h_3 = 3.6$ мм.

Дані заготовок (дисків-сразків):

- зовнішній діаметр $D_3 = 150$ мм;
- внутрішній діаметр $d_b = 8$ мм.

На рис. 8.3 подано екранну форму для виконання розрахунків параметрів технологічного процесу.

Принципова схема МІШ

Рівняння, які описують електромагнітні уявлення

$$\text{rot } \vec{E} = \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu [\vec{V}, \vec{H}]$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{\sigma}, \quad \text{div } \vec{E} = 0,$$

$$\vec{\sigma} = \gamma \vec{E}, \quad \text{div } \vec{H} = 0,$$

$$\vec{\sigma} = \frac{\gamma_0}{1 + \beta_1 C_n \theta} \vec{E},$$

$$F = \mu [\vec{\sigma}, \vec{H}]$$

$$F = \left[H \left(\Delta H - \frac{1}{2} V H^2 \right) \right] \mu$$

$$D_1 (\vec{V}) + P_m \frac{\partial V}{\partial t} - \vec{F}_c = 0,$$

Для циліндричного індуктора

$$L_{\text{ци}} = \frac{\pi \mu_0 (d - h_3) W_n^2}{\ell} \left(h_b + \frac{\Delta_n + \Delta_s}{2} \right),$$

Для дисків індуктора

$$L_{\text{дн}} = \frac{\pi \mu_0 W_n^2 (D + d)}{(D - d)},$$

ККД

$$\eta_n = \frac{W_n + W_{\text{н}}}{W_{\text{н}}}, \quad \eta_{\text{м}} = \frac{mV}{CU^2} + \frac{2K, B^{1+\alpha}}{(1 + \alpha) CU^2}, \quad \eta_{\text{лн}} = \frac{m W_n^2 h_b^2}{CU^2} (\beta_1^2 e^{-\alpha \alpha})$$

$$\beta_1 = \frac{\mu_0 H_n^2}{4 \alpha_1 h_3 W_n^2 \rho_n}, \quad m W_n^2 h_b^2 (\beta_1^2 \pi) = CU^2, \quad (\eta_{\text{лн}})_{\text{max}} = e^{-2 \alpha \alpha}$$

Графічне уявлення

Кількість точок: 10

Мінімальні значення:

Максимальні значення:

Розрахунок цикла:

Графік:

Показати:

Вхідні параметри

Маса заготовки - m, кг: 5

Висота підскока - h, м: 1

Зарядна ємність - C, Ф: 1

Зарядна напруга - U, В: 220

Вихідні параметри

Робота, яка витрачена на підскок заготовки - W, Дж:

ККД плоского індуктора - n:

Розрахунок:

Видальти:

Рис. 8.3. Екранна форма для виконання технологічних розрахунків

9. ГІДРОДИНАМІЧНЕ ШТАМПУВАННЯ НА ПРЕС-ГАРМАТАХ

9.1. Суть методу

Прес-гармата є поєднанням гармати (енергетичного вузла) з пресовим оснащенням (енергетичним вузлом).

Процес гідродинамічного штампування ґрунтується на таких принципах:

- явищі гідродинамічного удару, що створюється в рідині при передачі їй кінетичної енергії твердого тіла (снаряда), що має швидкість 50...250 м/с;
- ефекті самовільного замикання зазорів при імпульсному підвищенні тиску в неущільненій формувальній камері.

На рис. 9.1 показано принципову схему пристрою. Характерними особливостями цього пристрою є:

- наявність між оброблювальним інструментом (снарядом) і оброблюваною деталлю пружного передавального середовища (рідини);
- відсутність у формувальній камері будь-яких ущільнень взагалі або наявність тільки ущільнень, що утримують рідину від перетікання у порожнину між заготовкою і матрицею (до пострілу).

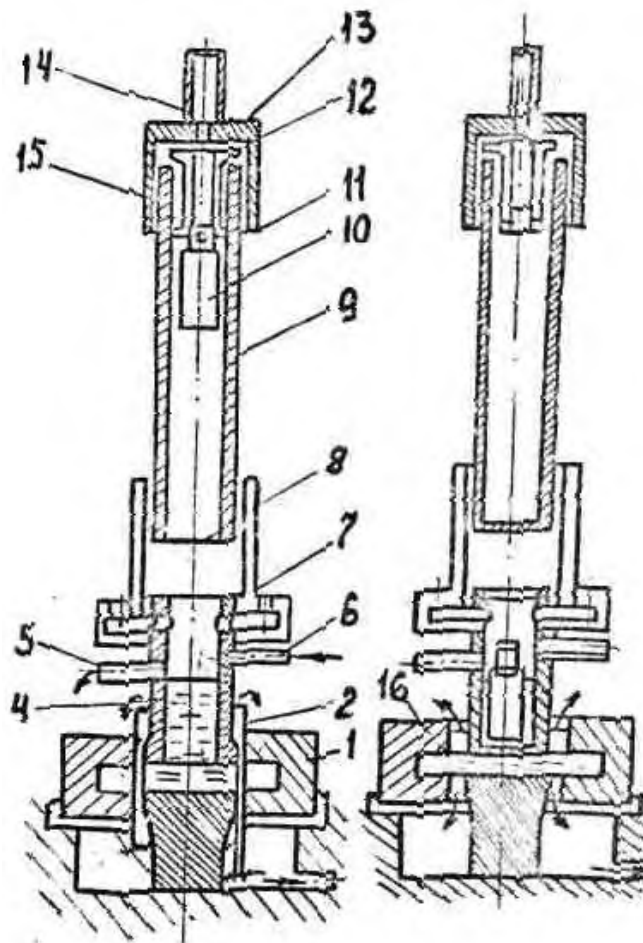


Рис. 9.1. Схема прес-гармати

Основні елементи конструкції прес-гармати: матриця – 1, заготовка – 2, обмежувач процесу формування труб – 3, передавальне середовище – 4, перехідник ствола – 7 із зливним 5 і наповнюючими 6 штуцерами.

Ця група елементів утворює технологічну зону установки. Енергетичний вузол складається із ствола – 9, снаряда – 10, патронника – 12 і фіксувального елемента – 11 (на схемі показано у вигляді штифта, що зрізається при пострілі), заряду пороху – 13 і пускового механізму – 14, змонтованого на затворі 15.

Технологічний процес штампування полягає у такому.

У матрицю 1 встановлюють заготовку 2, порожнину заготовки і перехідник ствола 7 наповнюють рідиною 4 через штуцер 6.

За відсутності ущільнень рідина у формувальну камеру подається безперервно, що забезпечує живлення зазорів і підтримку її рівня, що визначається положенням зливного штуцера 5.

При пострілі тиском порохових газів снаряд 10 зривається з форсувального елемента 11 і розганяється в каналі ствола.

Снаряд, що має запас кінетичної енергії, входить у перехідник ствола 7 і завдає удару по рідині 4.

У рідині виникає тиск, що впливає на заготовку 2, яка деформується і набуває форми готової деталі 16.

Прес-гармата ПП7-М є напівавтоматичною установкою, оскільки до її комплексу входять системи керування – гідравлічна і електрична, які, взаємодіючи, забезпечують роботу прес-гармати в ручному і напівавтоматичному режимах за певним наперед заданим циклом.

Усі агрегати і елементи систем керування розташовані в пульті, за винятком виконавчих гідроциліндрів і кінцевих вимикачів, що входять до конструкції прес-гармати.

Подача рідини у формувальну камеру здійснюється за допомогою спеціальної системи.

Рідина нагнітається помпою з бака, розташованого в нижній частині підстави.

Технічні характеристики прес-гармати ПП7-М:

калібр свола	– 35 мм;
граничний заряд пороху в патроні	– 5 кг;
кінетична енергія снаряда	– 8 кДж;
тиск у формувальній камері об'ємом в 1 дм ³	
при калібруванні	– 220 МПа;
габарити прес-гармати	– 930x900x2000 мм;
маса прес-гармати	– 650 кг;
розміри простору під штампувальне оснащення:	
діаметр	– 250 мм;
висота	– 250 мм;
кількість патронів у патронній коробці	– 10 шт.

В конструкції прес-гармати ПП7-М передбачено використання зарядів до 15...18 г, що відповідає кінетичній енергії снаряда 2,3...2,7 кДж. Її споживана енергія – 2 кВт, напруга в мережі – 380 В, тиск в гідросистемі – 3,5...6,0 МПа.

9.2. Розрахунок заряду пороху

Заряд пороху витрачається на надання снаряду кінетичної енергії, достатньої для здійснення процесу штампування, тобто вона має дорівнювати сумі всіх робіт, які виконуються в камері прес-гармати:

$$E_{\text{кін}} = A. \quad (9.1)$$

Якщо нехтувати втратами енергії, то роботу, яка відбувається в технологічній зоні установки, можна подати двома складовими:

$$A = A_{\text{пл}} + A_{\text{р}}, \quad (9.2)$$

де $A_{\text{пл}}$ – робота пластичної деформації заготовки;

$A_{\text{р}}$ – робота стисненої рідини.

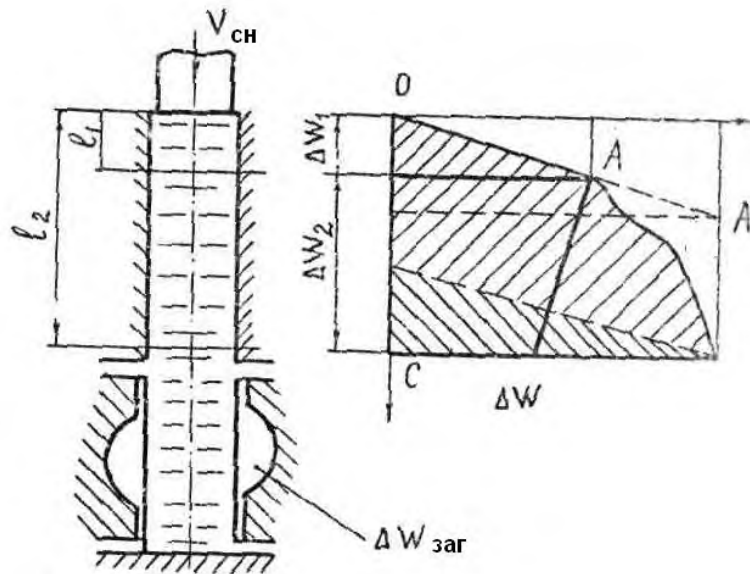


Рис. 9.2. Схема енергообміну

Розглянемо процес обміну енергіями у перехіднику ствола.

Снаряд зі швидкістю $V_{\text{сн}} = V_{\text{д}}$ завдає удару по поверхні рідини і створює в ній тиск D .

При цьому рідина рухається за заготовкою, що деформується, заповнюючи додатковий об'єм, що утворився, в гідравлічній камері. Крім того, її об'єм зменшується унаслідок стиснення, тому межа рідини в перехіднику ствола зміщується від початкового положення.

Робота, яка виконується снарядом при зсуві рідини:

$$A = P \Delta W_n, \quad (9.3)$$

де ΔW_n – об'єм перехідника, що звільняється від рідини.

Хай P_1 і P_2 – тиск у рідині відповідно на початку і в кінці процесу пластичної деформації заготовки.

Спочатку снаряд стискає рідину (робота ΔW_1) до тиску P_1 , при цьому

$$A_1 = \frac{P_1 \Delta W_1}{2} = \frac{P_1^2 W_0}{2 E_p}, \quad (9.4)$$

що відповідає площі трикутника OAE на діаграмі.

При досягненні тиску P_1 починає деформуватися заготовка.

Залежно від процесу деформації потрібний тиск в рідині може зростати або знижуватися (формули (9.2) і (9.3)).

Відповідно до цього крива зміни тиску займатиме положення AB або AB₁.

На етапі деформації заготовки снаряд звільняє від рідини об'єм

$$\Delta W = \Delta W_{zag} \pm \Delta W_p, \quad (9.5)$$

де ΔW_{zag} – первинний об'єм порожнини між заготовкою і матрицею;

ΔW_p – величина зміни об'єму рідини при переході від тиску P_1 до тиску P_2 .

При цьому витрачається робота

$$A = \frac{P_1 + P_2}{2} \Delta W_{zag} \pm \Delta A_p. \quad (9.6)$$

Тут ΔA_p – змінна потенціальної енергії рідини при стисненні її на величину ΔA_p .

Сумарна робота, виконана снарядом з початку процесу:

$$A = \frac{P_1 \Delta W}{2} \pm \Delta A_p \frac{P_1 + P_2}{2} + \Delta W_{zag}. \quad (9.7)$$

У цій формулі перші два члени є роботою рідини A_p , яка витрачається на створення в рідині тиску P_2 , згідно з виразом

$$A_p = \frac{P^2 W}{2 E_p} \quad \text{при } P = P_2.$$

Тоді залежність (9.7) набуває вигляду

$$A = \frac{P_2^2 W_0}{2 E_p} + \frac{P_1 + P_2}{2} \Delta W_{zag}. \quad (9.8)$$

Далі

$$V_{\text{сн}} = \sqrt{\frac{2}{m_{\text{сн}}} \left(\frac{P_2^2 W_0}{2 E_p} + \frac{P_1 + P_2}{2} \Delta W_{\text{заг}} \right)}, \quad (9.9)$$

де $V_{\text{сн}}$ – швидкість снаряда на виході зі ствола (дульна швидкість);

$m_{\text{сн}}$ – маса снаряда.

Заряд пороху, що визначається через ККД ствольної системи і сили пороху f , становить

$$\omega = \frac{A}{\eta f}, \quad (9.10)$$

а за наявності балістичної характеристики прес-гармати – за відомими $m_{\text{сн}}$ і $V_{\text{д}}$.

9.3. Розрахунок параметрів технологічного процесу

Для здійснення процесу штампування необхідно розрахувати заряд пороху на першому і другому переходах за спрощеною методикою, що дає змогу знайти розрахункову величину заряду, яка потім коректується експериментально за допомогою одного-двох пострілів.

На рис. 9.3 зображено форму для виконання технологічних розрахунків.

Рис. 9.3. Форма для виконання технологічних розрахунків

Потрібний тиск визначається при виведенні залежності, що зв'язує зовнішні сили з головними напруженнями і деформаціями для утворення найхарактерніших геометричних форм.

Ця залежність визначається на підставі положень теорії пружно-пластичної деформації тонкостінних оболонок при таких припущеннях:

- тиск з боку передавального середовища на заготовку рівномірно розподілений;

- напружений стан можна вважати безмоментним площинно-напруженим у зв'язку з тим, що заготовка достатньо тонка;

- матеріал заготовки однорідний, нестискуваний, має однакові механічні властивості по товщині і площі.

Крім того, вважаємо як додаткове припущення відсутність сил тертя між матрицею і заготовкою.

10. ГАЗОВИБУХОВЕ ЛИСТОВЕ ШТАМПУВАННЯ

10.1. Суть методу

Процес газовибухового штампування базується на перетворенні хімічної енергії палива на роботу пластичної деформації матеріалу оброблюваної заготовки завдяки тому, що вивільняється хімічна енергія палива при екзотермічній реакції окиснення пального окислювачем.

Екзотермічні реакції окиснення горючих газів залежно від характеристик пального, окиснювача, умов ініціації реакції, геометричних характеристик можуть відбуватися з різною швидкістю і істотно відрізнятися за своїм характером.

Між горінням і вибухом (детонацією) існує строга кількісна межа: швидкість горіння завжди менше, а швидкість детонації завжди більше, ніж швидкість звуку в початковій (що не прореагувала) суміші.

Горіння за відомих критичних умов може стрибкоподібно переходити в детонацію.

Згідно з гідродинамічною теорією структура детонаційної хвилі має будову, показану на рис. 10.1.



Рис. 10.1. Структура детонаційної хвилі

10.2. Розрахунок технологічних параметрів

Тиск P_1 , температура T , питомий об'єм V , швидкість продуктів U_1 за хвилиною і швидкість детонаційної хвилі D є тим набором параметрів, які однозначно характеризують процес стаціонарної детонації.

Для визначення цих параметрів скористаємося основним рівнянням збереження маси

$$\rho_0 (D - U_0) = \rho_1 (D - U_1); \quad (10.1)$$

імпульсу

$$P_1 - P_0 = \rho_0 (D - U_0) (U_1 - U_0) \quad (10.2)$$

і енергії

$$V_1 = V_0 - 1/2 (P_1 + P_0) (V_0 - V_1) + Q, \quad (10.3)$$

де P_0 , U_0 , V_0 , Q – відповідно тиск, масова швидкість, питомий об'єм і внутрішня енергія незбуреної газової суміші.

Додавши до рівнянь (10.1) – (10.3) рівняння стану

$$P = f(S, T) \quad (10.4)$$

і співвідношення з першого принципу термодинаміки

$$D = U + C, \quad (10.5)$$

де S – ентропія, а C – місцева швидкість звуку в продуктах реакції, отримаємо систему рівнянь для визначення параметрів детонаційної хвилі.

Результатом розв'язання системи щодо D для рівняння стану ідеального газу є такі залежності:

$$P_1 = P_0 + \frac{\rho_0 D^2}{R+1} \left(1 - \frac{C_0^2}{D^2} \right); \quad (10.6)$$

$$V_1 = V_0 - \frac{V_0}{R+1} \left(1 - \frac{C_0^2}{D^2} \right); \quad (10.7)$$

$$U_1 = \frac{D}{R+1} \left(1 - \frac{C_0^2}{D^2} \right); \quad (10.8)$$

$$T_1 = \frac{\mu_1 \rho_1 V_1}{R}, \quad (10.9)$$

де C_0 – швидкість звуку в початковому газі.

Знаючи швидкість детонаційної хвилі D , можна обчислити всі параметри детонаційної хвилі.

Газовибухове штампування відрізняється від інших процесів імпульсного формоутворення характером додавання навантаження, кінематикою перебігу металу, а також конструкцією використовуваного технологічного оснащення.

Газовибухове штампування, іншими словами – детонаційно-газове штампування (ДГШ), як і інші способи безпресового штампування, має істотні переваги порівняно зі штампуванням на пресах:

1) можливість створення ефективної технології без великих унікальних пресів і скорочення термінів підготовки виробництва;

2) висока економічність технології внаслідок спрощення оснащення і дешевизни енергоносія;

3) можливість розміщення технологічних установок у звичайних виробничих будовах і діючих цехах;

4) відносна простота устаткування і низькі амортизаційні витрати;

5) широкий діапазон керування параметрами штампування унаслідок варіювання початкового тиску у складі газової суміші;

6) можливість повної автоматизації технологічного процесу;

7) вірогідність створення принципово нових комбінованих технологічних процесів, які поєднують, наприклад, формоутворення з термообробкою виробів.

Недоліками ДГШ слід вважати: обмежений енергетичний потенціал установок, пов'язаний з об'ємом вибухової камери а труднощами утримання високого початкового тиску горючої газової суміші, а також невисокий ККД процесу.

Фізичний експеримент можна виконати на газодетонаційній дослідно-промисловій установці УДГУ-ОП.

Схему установки показано на рис. 10.2.

Як робочу горючу суміш в установці застосовують стехіометричну суміш метану CH_4 з киснем O_2 .

Компоненти суміші подаються в камеру вибуху по роздільних магістралях, а потім змішуються в спеціальному дозувальному пристрої.

Початковий тиск горючої газової суміші контролюється спеціальним манометром електроконтакта, який при досягненні заданого тиску видає сигнал на автоматику установки.

Схему штампування подано на рис.10.3.

Оператор з пульта здійснює ініціацію детонації за допомогою пристрою підпалювання.

Детонаційна хвиля розширюється по камері вибуху і впливає на заготовку, деформуючи її у відповідному оснащенні.

Довідкові дані:

об'єм камери вибуху установки V , m^3

– 0,0045;

теплота згоряння стехіометричної суміші H_y , Дж/кг
 молекулярна маса кисню M_{O_2}
 молекулярна маса метану M_{CH_4}
 показник адіабати продуктів вибуху K
 показник адіабати початкової суміші K_0

– $1,73 \cdot 10^6$;
 – 32;
 – 16;
 – 1,22;
 – 1,31.

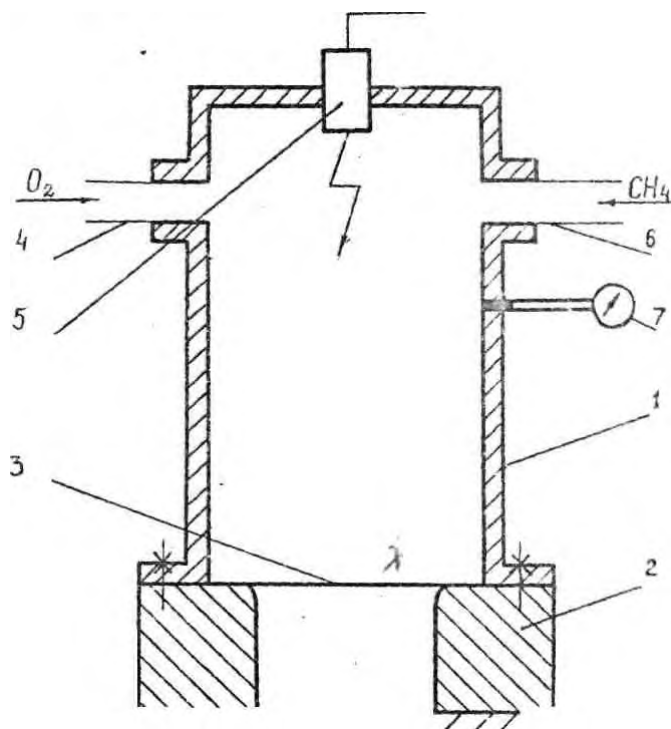


Рис. 10.2. Схема установки:

1 – вибухова камера; 2 – матриця; 3 – заготовка;
 4 – магістраль подачі кисню; 5 – пристрій для підпалювання;
 6 – магістраль подачі пального; 7 – контрольний манометр

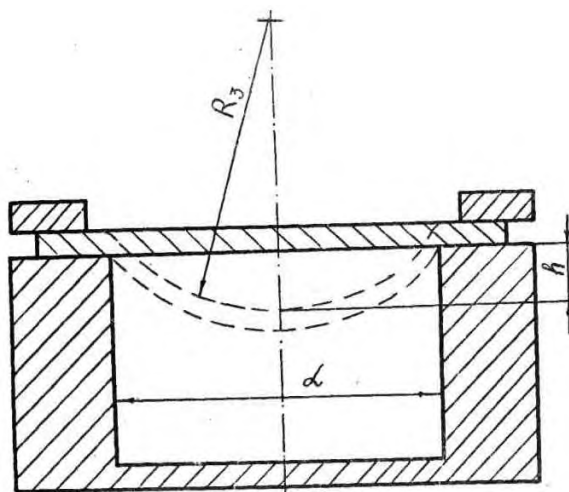


Рис. 10.3. Схема штампування

За заміряним на оснащенні розміром d , заданою товщиною заготовки δ і глибиною штампування h можна розрахувати потрібну роботу деформації і необхідний тиск

$$q = 2\sigma_3\delta/R_3, \quad (10.10)$$

де σ_3 – границя текучості матеріалу заготовки.

Розрахований тиск q є статичним, потрібний тиск в імпульсі P_1 може істотно відрізнятися через вплив швидкості деформації на фізико-механічні властивості матеріалів.

Як перше наближення для оцінного інженерного розрахунку взяти

$$P_1 = q/2K_d, \quad (10.11)$$

де K_d – коефіцієнт динамічності.

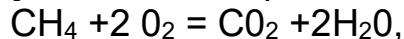
Записавши рівняння стану ідеального газу для початкової суміші як

$$\frac{P_0}{\rho_0} = \frac{RT_0}{\mu_0}, \quad (10.12)$$

розрахувати необхідний початковий тиск горючої газової суміші P_0 з рівняння (10.6) і решту параметрів детонаційної хвилі (10.7) – (10.9) у припущенні, що швидкість детонаційної хвилі майже не залежить від початкового тиску і становить $D = 2540$ м/с.

Розрахунки можна виконувати, використовуючи форму, яка зображена на рис. 10.4.

Молекулярна маса суміші згідно з рівнянням реакції



де

$$\mu = \frac{\mu_{CH_4} + 2\mu_{O_2}}{3}. \quad (10.13)$$

$R_0 = R = 8480$ Дж/кг – універсальна газова постійна.

Температуру початкової суміші можна вважати такою: $T_0 = 293$ К.

За обчисленим значенням P_0 необхідно розрахувати енергію, яка накопичується в установці, за формулою

$$W_{зап} = m_{CH} H_y. \quad (10.14)$$

Якщо густина метану за нормальних умов $\rho_{CH} = 0,67$ кг/м³, то маса метану в початковій суміші:

$$m_{CH_4} = V_{CH_4} \rho_{0CH_4}. \quad (10.15)$$

Густину метану при початковому тиску P_0 можна обчислити за рівнянням

$$\frac{P_0}{\rho_{0CH_4}} = \frac{P_H}{\rho_{CH_4}}, \quad (10.16)$$

де $P_H = 10^5$ Па – атмосферний тиск.

Об'єм метану в стехіометричній суміші

$$V_{CH_4} = V/3, \quad (10.17)$$

де V – об'єм камери установки.

Розрахувати всі інші параметри штампування можна за формою, яку зображено на рис. 10.4.

Вхідні параметри

Коефіцієнт енергії на вигин по ребру перетяжки - K_f	1,1
Радіус закруглос ребра перетяжки - r_0 , мм	3
Коефіцієнт подолання тертя - K_t	1,3
Коефіцієнт першої статичної апроксимації кривої зміцнення матеріалу - β	327000000
Коефіцієнт другої статичної апроксимації кривої зміцнення матеріалу - α	0,24
Діаметр заготовки - D_0 , м	0,8
Діаметр фланця - D_{fl} , м	0,7
Діаметр отвору матриці - D_m , м	0,6
Товщина заготовки - δ , м	0,0001
Кінцеве прогинання - f , м	0,2
Глибина проштамповки - h , м	0,2
Матеріал заготовки	
Межа текучості матеріалу заготовки - σ_{maz} , МПа	220
Коефіцієнт динамічності - K_d	1,2
Густина матеріалу - ρ_0	2700
Універсальна газова постійна - R , Дж/К кг	8480
Температура початкової суміші - T_0 , К	293
Об'єм камери пристрою установки - V	0,0045
Теплота згоряння стехіометричної суміші - H_u , Дж/кг	1130000
Молекулярна маса кисня - M_o	32
Молекулярна маса метану - M_{ch}	16
Показник адіабати продуктів вибуху - K	1,22
Показник початкової суміші - K_0	1,31
Атмосферний тиск - P_n , Па	100000
Радіус заготовки - R_z , м	0,2
Густина метану - ρ_{sch}	0,67
Швидкість детонаційної хвилі - D , м/с	2540

Побудова графіків

Кількість значень	10
Мінімальне значення	0,0001
Максимальне значення	0,001

Вихідні параметри

Необхідний тиск - q , МПа	
Оцінений тиск - p_1 , МПа	
Початковий тиск - p_0 , МПа	
Енергія пристрою, що запасастся - w_z , Дж	
Енергія деформування фланця - A_{fl} , Дж	
Енергія формування сферичного сегмента - A_{sf} , Дж	
Повна робота деформування - A , Дж	
ККД пристрою - η	

Пристрій для газовибувного штампування листових деталей:
1 – нижня матриця, 2 – верхня матриця, 3 – верхня заготовка, 4 – нижня заготовка, 5 – вибухова камера, 6 – манометр, 7 – пристрій для ініціювання

Розрахунок цикла Показати графік

Розрахунок Показати таблицю

Очистити

Очистити все

Рис. 10.4. Форма для розрахунку технологічних параметрів

Контрольні запитання

1. Суть методу гідровибухового штампування.
2. Устаткування для штампування вибухом.
3. Силкові чинники підводного вибуху.
4. Переваги і недоліки гідровибухового штампування.
5. Який характер деформованого стану виробів, відштампованих вибухом?
6. Чому для виготовлення деталей типу обичайок з високоміцних малопластичних сплавів найбільш доцільним є застосування процесу гарячого імпульсного штампування?
7. Опишіть конструкцію і принцип роботи установки в цілому.
8. Опишіть конструкцію і принцип роботи газового радіаційного нагрівача.
9. Які основні переваги і недоліки ЕГШ?
10. Який механізм навантаження заготовки?
11. Який механізм навантаження заготовки деформувальним зусиллям при ЕГШ-витягуванні?

12. Що принципово відрізняє ЕГШ-витягування від витягування в інструментальних штампах?
13. Чи є однорідним напружено-деформований стан заготовки при ЕГШ-витягуванні?
14. Як визначається еквівалентний статичний тиск?
15. Якими основними показниками характеризується установка ЕГШ?
16. З яких основних блоків складаються установки ЕГШ?
17. Як розраховуються режими і склад механічного процесу ЕГШ-витягування?
18. Які сили здійснюють роботу пластичної деформації заготовки при магнітно-імпульсному штампуванні?
19. Який характер розрядного струму в ланцюзі індуктора?
20. Від чого залежить напрям індукованого в заготовці струму, а отже, і механічних сил, прикладених до неї?
21. Для чого при магнітно-імпульсному штампуванні використовуються супутники?
22. Як у загальному вигляді можна подати ККД магнітно-імпульсного штампування?
23. Яким методом пропонується експериментально визначати механічну роботу сил взаємодії індуктора і заготовки?
24. Як і чому електропровідність заготовки впливає на величину ККД при магнітно-імпульсному штампуванні?
25. З яких основних вузлів складається установка для магнітно-імпульсного штампування?
26. Як устатковуються індуктор і заготовка на робочій позиції при штампуванні?
27. Як зняти високу напругу, якщо після натиснення кнопки «Пуск» на установці не відбувся розряд?
28. У чому полягає суть гідродинамічного штампування на прес-гарматі?
29. Для чого потрібна силова рама на прес-гарматі?
30. Як визначається потрібний заряд пороху?
31. На що витрачається кінетична енергія снаряда?
32. Назвіть основні запобіжні засоби при роботі на прес-гарматі.
33. Як впливає зміна швидкості деформацій на фізико-механічні властивості металів?
34. Які переваги і недоліки газовибухового штампування?
35. Яка структура детонаційної хвилі в газі?
36. Який принцип визначення потрібного тиску?
37. Як можна підвищити ККД технологічного процесу?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Комп'ютерна програма «Інтерактивний програмний комплекс для безпрототипного проектування об'єктів імпульсних технологій» / В. В. Третяк, А. І. Долматов, А. В. Онопченко, А. С. Федорова, О. В. Блоха. – № 58590 від 21.07.2014 .
2. Пат. на корисну модель 124031 Україна, МПК (2018.01) B21D 26/00 B21D 26/06 (2006.01). Пристрій для штампування циліндричних листових заготовок з односторонньою деформованою зоною / В. В. Третяк, А. С. Федорова, О. С. Дулов, В. Д. Кубрак ; заявник і власник пат. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – № u 2017 11479; заявл. 23.11.2017 ; опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5.
3. Пат. на корисну модель 126330 Україна, МПК B21D B21D 26/06 (2006.01) B21D 28/14 (2006.01). Пристрій для штампування листових деталей складної рельєфної форми імпульсними джерелами енергії / В. В. Третяк, А. С. Федорова, А. І. Сімакова, В. Д. Сотников ; заявник і власник пат. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – № u 2018 01391 ; заявл. 12.02.2018 ; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16.
4. Пат. на корисну модель 127798 Україна, МПК (2018.01) B21D 26/06 (2006.01) B21D 26/02 (2011.01) B26D 5/00. Пристрій для вальцювання та штампування на прес-гарматі / В. В. Третяк, А. С. Федорова, В. В. Муромський, К. В. Сідько ; заявник і власник пат. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – №u 2018 01632 ; заявл. 19.02.2018 ; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16.
5. Пат. України на корисну модель 144163. Пристрій для штампування об'ємних і листових заготовок імпульсними джерелами енергії / В. В. Третяк, І. В. Скорченко, В. Ф. Сорокін, В. Д. Сотников, С. В. Худяков ; заявник і власник пат. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». 2020 р. – № 144163 від 10.09.2020. – 5 с.
6. Пат. України на корисну модель 150486. Пристрій для штампування листових деталей імпульсними джерелами / В. В. Третяк, В. Д. Сотников, Н. Л. Тавріна, О. І. Давидова, О. Д. Некрасов, В. Ф. Сорокін ; заявник і власник пат. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». 2021 р. – № 150486 від 23.02.2023. – 5 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. СУТЬ МЕТОДУ БЕЗПРОТОТИПНОГО ПРОЄКТУВАННЯ.....	4
1.1. Класифікація методів проєктування в інтелектуальних системах.....	4
1.2. Суть безпрототипного проєктування.....	7
2. НАВЧАЛЬНИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ БЕЗПРОТОТИПНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ.....	11
2.1. Формування бази знань для використання комбінаторного методу.....	11
2.2. Режими роботи програмного комплексу.....	16
3. ПРИКЛАД ВИКОРИСТАННЯ У ПРОГРАМІ МЕТОДУ ГРАФІВ.....	19
4. СКЛАДОВІ КОМПОНЕНТИ БАЗИ ЗНАНЬ ІМПУЛЬСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ.....	21
5. ПІДРОВИБУХОВЕ ШТАМПУВАННЯ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ЕЛАСТИЧНИХ ДНИЩ.....	22
5.1. Суть методу.....	22
5.2. Розрахунок роботи для деформування заготовки.....	23
5.3. Розрахунок коефіцієнта корисної дії процесу.....	25
6. ШТАМПУВАННЯ ВИБУХОМ ОБОЛОНКОВИХ ДЕТАЛЕЙ З НАГРІВАННЯМ ЗАГОТОВОК.....	26
7. ІМПУЛЬСНЕ ШТАМПУВАННЯ-ВИТЯГУВАННЯ РІДИНОЮ НА ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ ПРЕСАХ	29
7.1. Суть методу.....	29
7.2. Механізм електрогідравлічного штампування.....	31
8. МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНЕ ШТАМПУВАННЯ ЛИСТОВОГО МЕТАЛУ.....	35
8.1. Суть методу.....	35
8.2. Схема установки.....	38
9. ГІДРОДИНАМІЧНЕ ШТАМПУВАННЯ НА ПРЕС-ГАРМАТАХ.....	40
9.1. Суть методу.....	40
9.2. Розрахунок заряду пороху.....	42
9.3. Розрахунок параметрів технологічного процесу.....	44
10. ГАЗОВИБУХОВЕ ЛИСТОВЕ ШТАМПУВАННЯ.....	45
10.1. Суть методу.....	45
10.2. Розрахунок технологічних параметрів.....	45
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	52

Навчальне видання

**Третяк Володимир Васильович
Третяк Олексій Володимирович
Нижник Сергій Миколайович**

**МЕТОДИ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В САПР.
БЕЗПРОТОТИПНЕ ПРОЄКТУВАННЯ**

Редактор Н. М. Сікульська

Зв. план, 2025

Підписано до видання 08.09.2025

Ум. друк. арк. 3. Обл.-вид. арк. 3,38. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Вадима Манька, 17
<http://www.khai.edu>

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001