

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**Ю. В. Ключников**  
**О. Т. Сердітов**  
**В. Л. Дубнюк**

# **АВІАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ТА ЇХ ТЕХНОЛОГІЇ КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

**Навчальний посібник**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня освіти  
за освітньою програмою «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»  
спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Електронне мережне навчальне видання

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Рецензент *Малафєєв Юрій Михайлович*, канд. техн. наук, доцент,  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Бондаренко Олександр Миколайович*, канд. техн. наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 6 від 24.06.2022 р.)  
за поданням Вченої ради Навчально-наукового інституту аерокосмічних технологій  
(протокол № 5/22 від 31.05.2022 р.)*

Навчальний посібник з кредитного модулю «Авіаційні матеріали та їх технології» містить стислий виклад курсу і розроблений для студентів очної або дистанційної форми навчання спеціальності авіаційна та ракетно-космічна техніка КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Викладено основні способи обробки металів і сплавів, композиційних та порошкових матеріалів, пластмас, технологій виготовлення з них заготовок та деталей необхідних форм, розмірів та якості, які застосовуються в авіабудуванні, з використанням сучасного обладнання.

Описані технології ливарного виробництва, виготовлення заготовок обробкою тиском та різальними інструментами, зварювання. Особливу увагу приділено сучасним технологіям: електрофізичним, електрохімічним та адитивним, технологіям композиційних матеріалів, а також, покриттям і методам їх нанесення.

Містить після кожної теми контрольні запитання для самоперевірки та тести.

Реєстр. № НП 21/22-605. Обсяг 5,7 авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© Ю. В. Ключников, О. Т. Сердітов, В. Л. Дубнюк  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

# ЗМІСТ

## ПЕРЕДМОВА

Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання.....	6
Технологічні методи обробки авіаційних матеріалів.....	8
Заготовки для деталей літальних апаратів.....	9

## ЛИВАРНЕ ВИРОБНИЦТВО..... 11

Лиття в піщано-глинисті форми.....	12
Лиття в оболонкові форми.....	13
Лиття в кокіль.....	13
Лиття під тиском.....	13
Лиття за витоплюваними моделями.....	14
Адитивні технології у ливарному виробництві.....	16
Приклади литих деталей.....	20
Питання для самоперевірки.....	22
Тестові питання.....	23

## ОБРОБКА ТИСКОМ..... 25

Гаряче об'ємне штампування.....	26
Листове штампування.....	27
Роздільні операції листового штампування.....	29
Згинання.....	30
Витяжка.....	32
Формовка.....	33
Обтяжка.....	34
Віброударне зміцнення і обробка дробом.....	38
Дробоударне формоутворення.....	39
Формоутворення великогабаритних обшивок і панелей літаків комбінованим методом формоутворення.....	40
Накатка різьби. Нарізані та накатані різьби.....	41
Питання для самоперевірки.....	44

<b>ОБРОБКА РІЗАННЯМ</b> .....	45
Точіння.....	48
Фрезерування.....	49
Обробка отворів.....	52
Обробка отворів для заклепок в деталях ЛА.....	55
Стругання, довбання, протягання.....	56
Шліфування.....	56
Чистові методи обробки.....	57
Питання для самоперевірки.....	59
Тестові питання.....	59
Хімічне фрезерування (розмірне контурне травлення) монолітних панелей.....	60
<b>ЗВАРЮВАННЯ</b> .....	62
Тестові питання.....	68
<b>ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ</b> .....	71
Електроерозійна обробка сплавів.....	73
Електрохімічна обробка.....	75
Ультразвукова обробка.....	76
Лазерна обробка.....	77
Гідроабразивна обробка.....	79
Питання для самоперевірки.....	80
Тестові питання.....	81
<b>АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ</b> .....	81
Питання для самоперевірки	
<b>ТЕХНОЛОГІЇ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ</b> .....	87
Технології виробництва продукції та деталей з композитів.....	91
Армовані деталі.....	92
Препреги.....	92
Контактне формування.....	95
Вакуумна інфузія.....	95

Формування препрегів.....	96
Пултрузія.....	97
Технологічні особливості обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) .....	100
Питання для самоперевірки.....	106
<b>ПОКРИТТЯ.....</b>	<b>106</b>
Класифікація покриттів за призначенням.....	106
Захисні покриття деталей і конструкцій літаків.....	108
Лакофарбові покриття.....	110
Питання для самоперевірки.....	112
<b>ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>113</b>

## ПЕРЕДМОВА

### Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Технологічні шляхи досягнення необхідної якості літаків і забезпечення високої економічної ефективності технологічних процесів літакобудівного виробництва мають істотні відмінності по відношенню до загального машинобудування через характерні особливості об'єкту виробництва. Точність і взаємозамінність деталей, вузлів і агрегатів літального апарату забезпечується особливими методами і засобами, які враховують складність теоретичних контурів планера, не жорсткість деталей і вузлів і великі їх розміри.

Такі особливості літакобудування, як забезпечення високих надійності і довговічності літаків та забезпечення економічної ефективності технологічних процесів виготовлення літаків в умовах невеликого обсягу виробництва, зумовили застосування на заводах специфічних технологічних процесів і знарядь виробництва, які є предметом вивчення даної дисципліни.

*Метою навчальної дисципліни є формування здатностей визначати способи виготовлення деталей машин і конструкцій з використанням технологій ливарного виробництва, порошкової металургії, обробки металів тиском, зварювального виробництва, обробки різальними та абразивними інструментами, обробки електрофізичними і електрохімічними методами, та поверхневим пластичним деформуванням, нанесення покриттів, що включає таку послідовність дій для стандартних виробничих ситуацій:*

попередня порівняльна оцінка можливостей існуючих методів обробки, а також механічної обробки різанням, що стосується розмірних, якісних, показників продуктивності та собівартості, для обґрунтування вибору методу;

аналіз придатних технологічних схем обробки з цією ж метою;

режимне забезпечення обраної схеми обробки з урахуванням вимог технічного завдання (ТЗ) та можливостей технологічного обладнання взагалі або до якого є доступ.

*Предмет навчальної дисципліни:* вивчення основних способів обробки металів і сплавів, композиційних та порошкових матеріалів, пластмас, технологій виготовлення з них заготовок та деталей необхідних форм, розмірів та шорсткості поверхні, які застосовуються в точному ракетно-космічному та авіабудуванні, з використанням сучасного обладнання.

Таким чином, предметом дисципліни є технологічне забезпечення обраного процесу формоутворення заданих елементів заготовки.

Ця **мета** може бути досягнута в разі закріплення у студентів **компетентностей** згідно із освітньою програмою:

ЗК 7. Здатність приймати обґрунтовані рішення.

ЗК 8. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

ФК 3. Здатність призначати оптимальні матеріали для елементів конструкції авіаційної та ракетно-космічної техніки.

ФК 6. Здатність розробляти і реалізовувати технологічні процеси виробництва елементів та об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі **результати навчання**, зазначені в освітній програмі:

ПР 4. Пояснювати свої рішення і підгрунття їх прийняття фахівцям і нефахівцям в ясній і однозначній формі.

ПР 5. Володіти навичками самостійного навчання та автономної роботи для підвищення професійної кваліфікації та вирішення проблем в новому або незнайомому середовищі.

ПР 12. Описувати будову металів та неметалів та знати методи модифікації їх властивостей. Призначати оптимальні матеріали для елементів та систем авіаційної та ракетно-космічної техніки з урахуванням їх структури, фізичних, механічних, хімічних та експлуатаційних властивостей, а також економічних факторів.

## Технологічні методи обробки авіаційних матеріалів

Методи та засоби виробництва, загальні за своєю сутністю для різних галузей машинобудування, мають у літакобудуванні свою специфіку, яка обумовлюється, по-перше, характерними особливостями літаків. а по-друге, малим масштабом виробництва. Сучасний літак має дуже складні зовнішні форми, великі розміри, складне та різноманітне бортове обладнання. Літаки з польотною масою 150 т і більше містять близько 100 тис. деталей, сотні тисяч нормалізованих кріпильних деталей (заклепок, болтів, гайок, шайб): довжина їх фюзеляжів сягає 60 м при діаметрі 6.0...6,5 м. розмах крил - до 50 м. Вони будуються з якісних конструкційних матеріалів; високоміцних алюмінієвих сплавів (Д16, В95, АМг6, 1420, 1469) високоміцних хромонікелевих сталей, титанових сплавів. композиційних матеріалів, складних у технологічному відношенні.

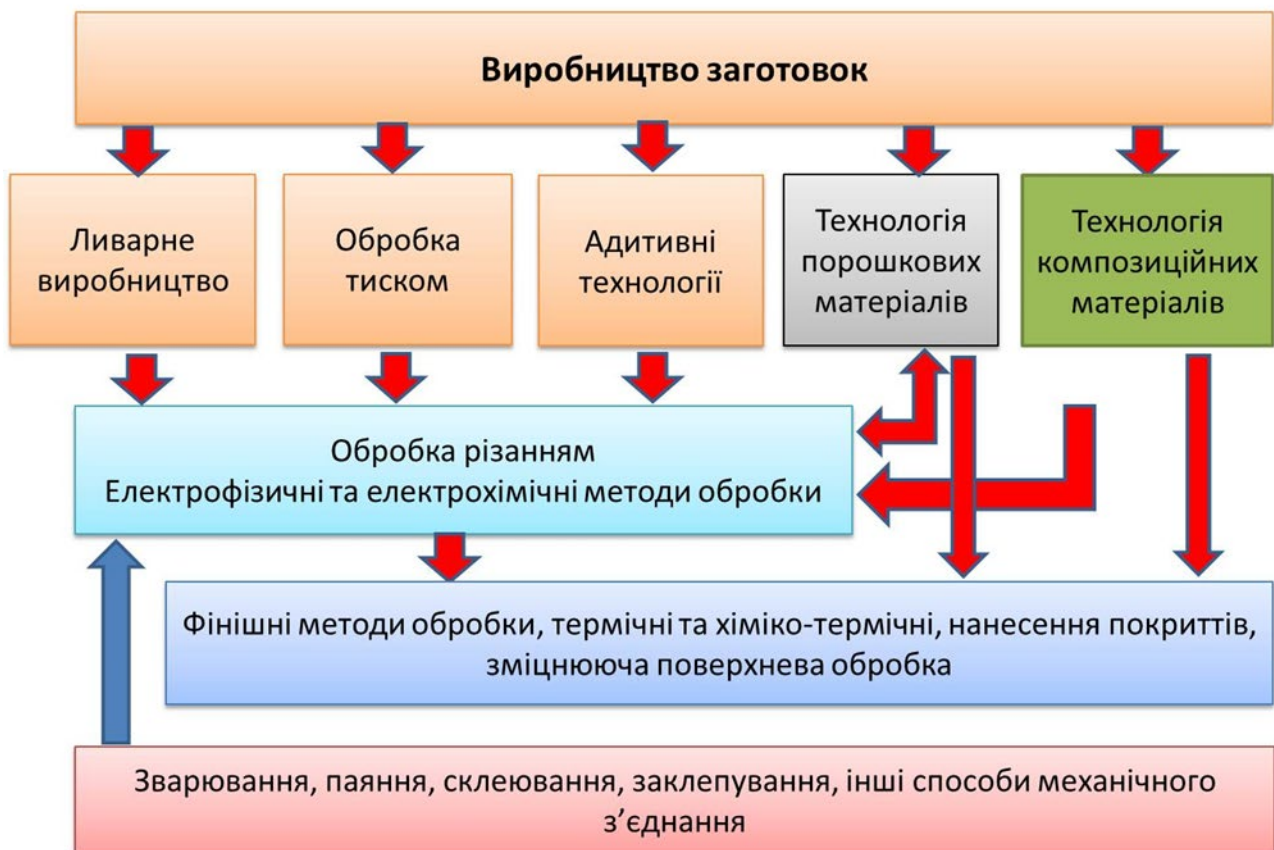


Рис.1 Структурна основних технологічних методів обробки

Для технологічного забезпечення створення та серійного виробництва нової авіаційної техніки сучасна технологія авіаційних матеріалів має у своєму



розпорядженні сукупність процесів, методів, способів і технічних засобів виготовлення різних видів заготовок, деталей, вузлів і агрегатів на всіх етапах виробництва від заготівельного до оздоблювальної обробки та складання, з використанням технологій ливарного виробництва, порошкової металургії, обробки металів тиском, зварювального виробництва, обробки різальними та абразивними інструментами, обробки електрофізичними і електрохімічними методами, та поверхневим пластичним деформуванням, нанесення покриттів.

На рис. 1 показана структурна схема технологічних методів обробки.

У заготівельному виробництві застосовуються технології, що забезпечують виготовлення заготовок з високими і стабільними властивостями міцності, з мінімальними припусками на механічну обробку і мінімальною додатковою розмірною обробкою поверхонь.

### **Заготовки для деталей літальних апаратів**

Сучасні ЛА складаються з численних та різноманітних за призначенням та властивостями деталей. Методи отримання заготовок для подальшого виготовлення їх деталей, загальні за своєю сутністю для різних галузей машинобудування, мають у виробництві ЛА свою специфіку, обумовлену їх характерними особливостями. При проектуванні технологічних процесів виготовлення деталей завдання вибору виду і способу отримання заготовки вирішується однією з перших. При вирішенні цієї задачі можливі багато варіантів. Питання про вибір способу отримання заготовки та методу перетворення її на готову деталь вирішується на основі порівняння собівартості готової продукції деталі при різних варіантах її виготовлення та заданої річної програми. Оскільки подальша обробка заготовки, як правило, має відносно високу собівартість, необхідно використовувати способи одержання заготовок, що забезпечують максимальний рівень наближення якісних показників заготовки і готової деталі. В табл.1, 2 наведені технологічні властивості різних сплавів та умовна вартість сплавів і пластмас порівняно з вуглецевою сталлю.

Таблиця 1

## Технологічні властивості сплавів

Сплав	Лиття	Обробка тиском	Зварювання	Обробка різанням
Алюміній	5	5	3	4.5
Мідь	3.5	5	3	3.5
Сірий чавун	5	-	2	5
Білий чавун	4	-	1	1
Титан	3	4.5	3	3
Нікель	3	4	3	3
Сталь	3	5	5	3
Цинк	5	4(100...150°C)	2	5

Таблиця 2

Умовна вартість сплавів і пластмас порівняно з вуглецевою сталлю  
(Витрати значно відрізняються залежно від кількості закупівлі, попиту та пропозиції,  
розміру та форми та різних інших факторів)

<b>Золото</b>	<b>60000</b>
<b>Срібло</b>	<b>600</b>
<b>Молібденові сплави</b>	<b>200...250</b>
<b>Нікель</b>	<b>35</b>
<b>Титанові сплави</b>	<b>20...40</b>
<b>Мідні сплави</b>	<b>5...6</b>
<b>Цинкові сплави</b>	<b>1.5...3.5</b>
<b>Леговані сталі</b>	<b>2...9</b>
<b>Магнієві та алюмінієві сплави</b>	<b>2...4</b>
<b>Нейлон, ацеталь і силіконова гума</b>	<b>1.1...2</b>
<b>Інші пластмаси та еластомери</b>	<b>0.2...1</b>

Заготовки деталей отримують литтям, обробкою тиском, використанням прокату та листового матеріалу, з використанням адитивних технологій. Широке застосування у виробництві ЛА знаходять заготовки з неметалевих матеріалів, композиційних та порошкових.

## ЛИВАРНЕ ВИРОБНИЦТВО

Сутність ливарного виробництва полягає у приготуванні розплавленого металу необхідної якості та заливанні його у спеціальну ливарну форму. При охолодженні залитий метал твердне і у твердому стані зберігає конфігурацію тієї порожнини, у яку він був залитий. У процесі кристалізації формуються механічні та експлуатаційні властивості литих заготовок, що визначаються макро- та

мікроструктурами сплаву, його щільністю, наявністю та розташуванням у ньому неметалічних включень, розвитком у виливку внутрішніх напружень, що викликаються неоднорідним охолодженням її частин. Литі заготовки та деталі економічні з точки зору забезпечення максимальної точності виготовлення, мінімальних витрат матеріалу та витрат праці. Вироби авіаційної техніки містять значну кількість литих деталей, що тривало працюють при високих температурі (більше 1000°C) і тиску (до 100 МПа), в корозійних середовищах при статичних і динамічних (у тому числі знакозмінних) навантаженнях. Основний напрямок розвитку ливарного виробництва в технології авіабудування - вдосконалення та впровадження способів лиття, що дозволяють отримувати тонкостінні великогабаритні виливки, що відповідають міцним та ваговим вимогам ЛА, за конфігурацією та розмірами максимально наближені до готових деталей.

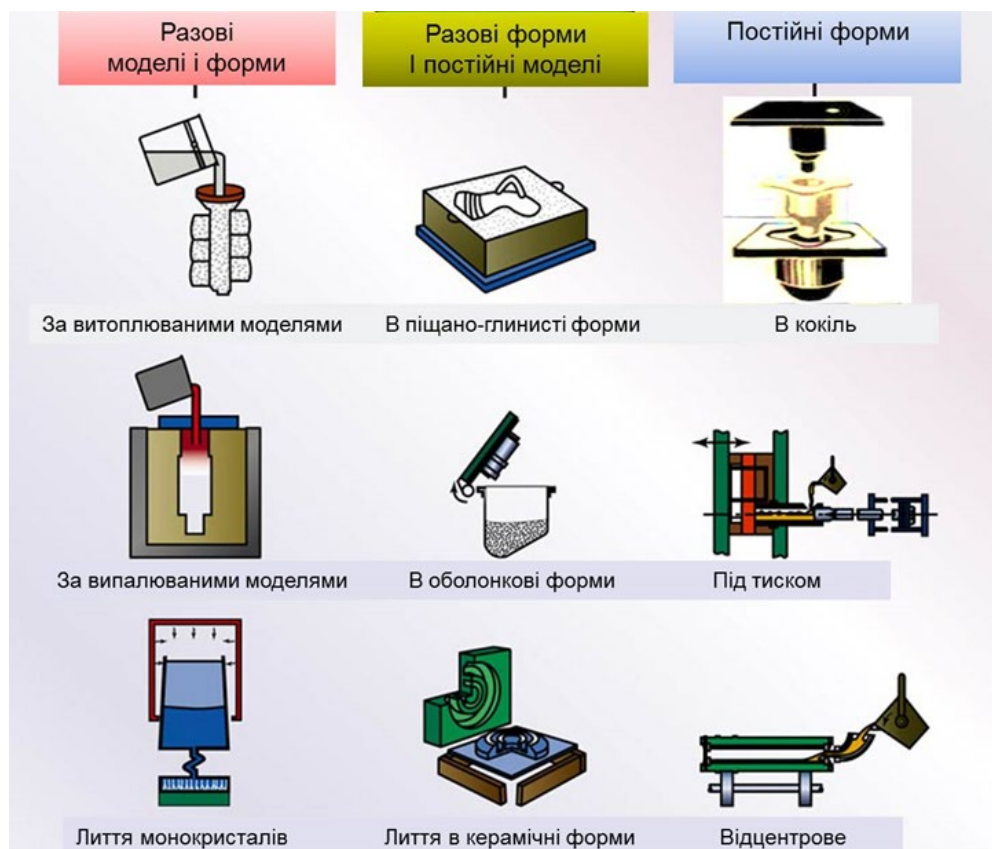


Рис. 2 Основні способи лиття

Manufacturing, Engineering & Technology, Fifth Edition, by Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid.  
ISBN 0-13-148965-8. © 2006 Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ. All rights reserved.

Вибір способу лиття визначається конфігурацією, габаритними розмірами та товщиною стінок деталей, характером виробництва, а також вимогами до

механічних властивостей, точності обробки та якості поверхні деталей. Найбільше застосування в авіабудуванні знайшли способи точного лиття: лиття за витоплюваними моделями, в кокіль, під тиском та ін. (рис. 2). Крім того в ливарному виробництві широко застосовуються адитивні технології для друку майстер-моделей, воскових моделей та для друку піщано-полімерних ливарних форм.

**Лиття в піщано-глинисті форми.** Застосовується для отримання виливків з різних матеріалів (чавун, сталь, кольорові та спеціальні сплави) з широким діапазоном розміру та маси. У одиничному та дрібносерійному виробництві застосовується ручне формування за дерев'яними моделями, у серійному виробництві застосовують машинне формування, як за дерев'яними, так і за металевими моделями. Одержання заготовок при машинному формуванні за металевими моделями зі складанням стрижнів у кондукторах характерно для умов умов великосерійного та масового виробництва. Лиття в піщані форми забезпечує отримання заготовок з коефіцієнтом використання матеріалу, рівним 0.7 при низькій точності розмірів.

**Лиття в оболонкові форми.** Застосовується для отримання заготовок обмеженої складності з різних матеріалів та забезпечує підвищену в порівнянні з попереднім способом точність розмірів. Одержання заготовок цим способом доцільно в умовах серійного та масового виробництва. Коефіцієнт використання матеріалу при цьому становить 0,8...0,9.

**Лиття в кокіль.** Цей спосіб полягає у використанні багаторазових металевих форм. Застосовується в умовах серійного та масового виробництва та забезпечує отримання заготовок простої форми з щільною структурою металу, підвищеними механічними властивостями та точністю розмірів. Коефіцієнт використання металу - 0,7 ... 0,8.

**Лиття під тиском.** Застосовується для отримання невеликих за розміром заготовок складної форми з кольорових металів. Цей спосіб забезпечує високу точність розмірів та чистоту поверхні заготовок, які у багатьох випадках не потребують додаткової механічної обробки. Собівартість обладнання для лиття

під тиском висока, що робить рентабельним застосування їх у великосерійному та масовому виробництві. Коефіцієнт використання матеріалу високий та досягає величини 0.95.



Рис. 3. Отримані литтям під тиском виливки: радіатор охолодження, 12-циліндровий алюмінієвий блок двигуна і опора для Mercedes S-Class Coupe

За цим способом розплавлений метал упорскується у форму (рис. 4) і застигає під тиском від 20 до 1000 атм, що забезпечує отримання низької пористості. Однак стінки форми піддаються надзвичайно високим тепловим навантаженням, тому у пресформах із сталей відливають таким методом сплави на основі алюмінію, цинку, магнію. Зазвичай, це металеві деталі побутової техніки (замки, ручки дверей та вікон, деталі автомобілів, радіоелектронної апаратури тощо). Лиття сталі таким методом можливе лише у форми, виконані з жароміцних сплавів на основі молібдену.

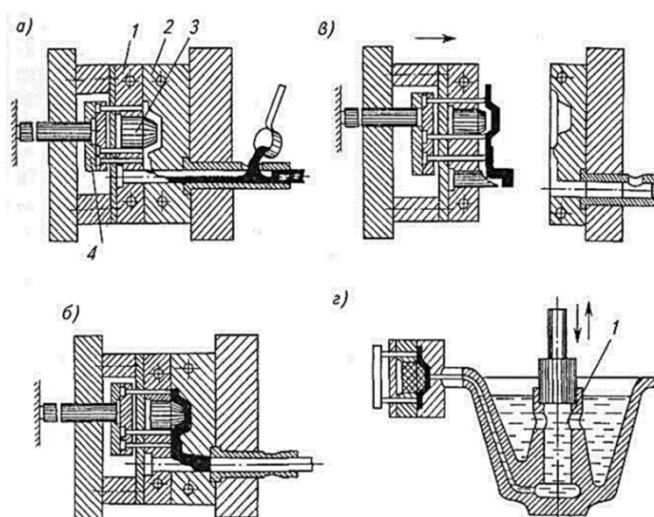


Рис. 4. Схема роботи машин лиття під тиском: а), б), в) – холодна камера стиску; г) – гаряча камера стиску

**Лиття за витоплюваними моделями.** Цей спосіб застосовується для отримання виливків складної форми з сплавів, що важко обробляються. Забезпечує високу точність розмірів. Спосіб отримання заготовок доцільно застосовувати в умовах серійного та масового виробництва. Коефіцієнт використання металу - 0,9. Різновидом цього способу є отримання відливок по заморожуваним ртутним моделям і сольовим моделям, що покращує точність і чистоту поверхні одержуваних виливків. При литті за витоплюваними моделями форма є нероз'ємною керамічною вогнетривкою оболонкою, яка формується з рідких формувальних сумішей навколо разових нерознімних моделей. Потім моделі видаляють із форми: виплавляють, розчиняють або випалюють. Видалення залишків модельного складу та зміцнення оболонки досягається прожарюванням форми при високій температурі. Заповненню тонких і складних за конфігурацією порожнин форми сприяє її нагрівання перед заливкою. Моделі отримують з матеріалів, що легко розплавляються, згорають або розчиняються. Найбільш часто застосовують модельні склади на основі парафіну та стеарину, а також церезину, воску та інших компонентів, які відносно легкоплавкі ( $T_{пл} = 50...100^{\circ}C$ ). Виготовлення легкоплавких моделей (восківок) здійснюється виливанням у спеціальній металевій формі (1) (рис. 4), яка виконується з високою точністю і з поліруванням її поверхні.

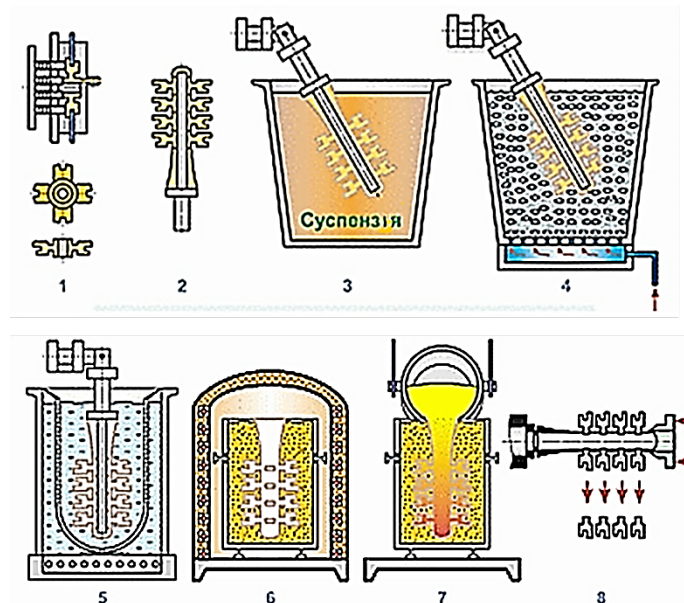


Рис. 4. Схема процесу виготовлення виливків за витоплюваними моделями

Отримані моделі (1 - внизу) збираються у куцц на модель ливникової системи (2) також виконаної з легкоплавкої суміші парафінів. Складання їх дуже просте, оскільки вони легко з'єднуються місцевим розплавленням контактних зон. Отримана групова модель (ялинка) занурюється в суспензію сполучного (етилсилікату), а потім - у завись кварцового дрібномолотого піску (3) і (4). На поверхні моделі багаторазовим зануренням у суспензію та завись піску з висушуванням кожного шару створюється товста (4-8мм) керамічна кірка. Вилучення моделі з кірки здійснюють виплавленням (5) у гарячій воді (або у термошафі), а залишки парафіну видаляються при подальшому прожарюванні форми. Перед заливкою металу форма встановлюється в ящик та засипається піском (6).

Перевагою даного виду лиття є можливість отримання виливків надзвичайно складних форм (наприклад, турбінних лопаток). Так як форма може бути отримана з будь-якої жароміцної кераміки, то немає обмежень за температурою плавлення металу, що заливається. Висока точність і низька шорсткість поверхні виробів забезпечується застосуванням тонкодисперсних матеріалів для виготовлення керамічної форми. В основному застосовується для відливання виробів із сталі, жароміцних сплавів (деталі двигунів, турбін тощо). Метод не дозволяє отримувати великогабаритні вироби, хоча у художньому литті можливості методу створення унікальних виробів необмежені. І тут модель (восковку) виготовляє художник вручну.

### **Адитивні технології у ливарному виробництві**

Застосування адитивних технологій у ливарному виробництві дозволяє суттєво скоротити час виготовлення виливка. З огляду на існуючі адитивні технології для ливарного виробництва використовуються такі, як друк майстер моделей, друк воскових моделей для лиття за витоплюваними моделями та безпосередній друк піщано-полімерних форм.

Друк **майстер-моделей** для подальшого виготовлення ливарних форм здійснюється за технологіями лазерної стереолітографії - Stereolithography (SLA), вибіркового лазерного спікання - Selective Laser Sintering (SLS) або методом пошарового наплавлення термопластичного матеріалу - Fused Deposition Modeling (FDM). В результаті отримуємо модель (рис. 5, *a*), що замінює традиційну з деревини, металу або пластмаси безпосередньо за кресленням.

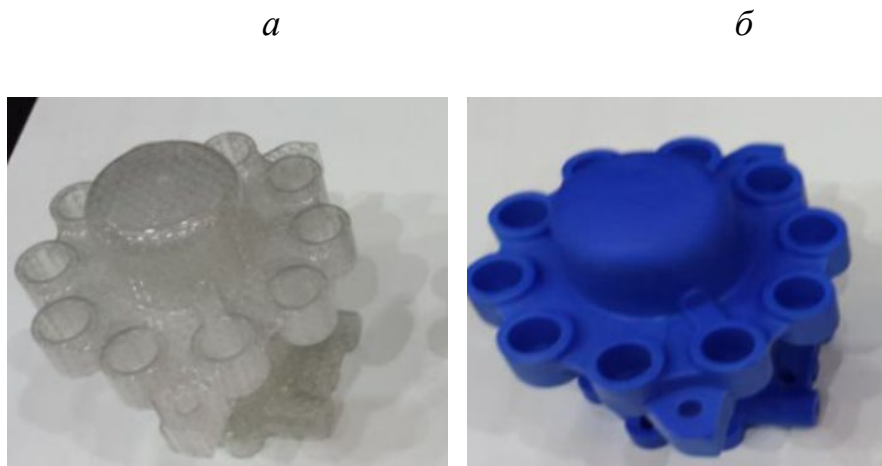


Рис. 5. Фотополімерна модель виливка надрукована за технологією стереолітографії (*a*) і воскова модель (*б*) для способу лиття за витоплюваними моделями (струменевий друк)

Друк **воскових моделей** для способу лиття за витоплюваними моделями здійснюється за технологіями струменевого або багатоструменевого друку (рис. 6), наприклад – MultiJetPrinting (MGP).



Рис. 6. Схема технології 3D-друку воском (*a*), готова воскова модель (*б*), надрукована модель з опорним матеріалом, який треба змити (*в*)



Компанія 3D Systems розробила і запатентувала технологію багатоструменевого друку (MultiJet Printing, MJP) з використанням воску, яка застосовується в професійних 3D-принтерах. MJP працює майже за таким же принципом, як звичайний струменевий друк. Шар наноситься друкуючою голівкою з великою кількістю дрібних сопел, через які на горизонтальну платформу подається модельний матеріал. Особливість технології полягає в тому, що для виступаючих частин моделей потрібні підтримуючі структури - вони легко змиваються після закінчення процесу друку теплою водою.

Ця технологія дозволяє отримувати з воску як поодинокі моделі, так і партії однакових або різних моделей з відмінною деталізацією і високою якістю поверхні. Серійне виробництво 100% воскових моделей з гладкими поверхнями чудової якості, з надзвичайно дрібними деталями і винятковою точністю істотно прискорює виробничий процес, підвищує рентабельність і продуктивність ливарного цеху. Друковані воскові ливарні моделі ідеально підходять для лиття деталей машинобудування, медичних імплантів, електротехнічних деталей, ювелірних виробів і багато чого іншого.

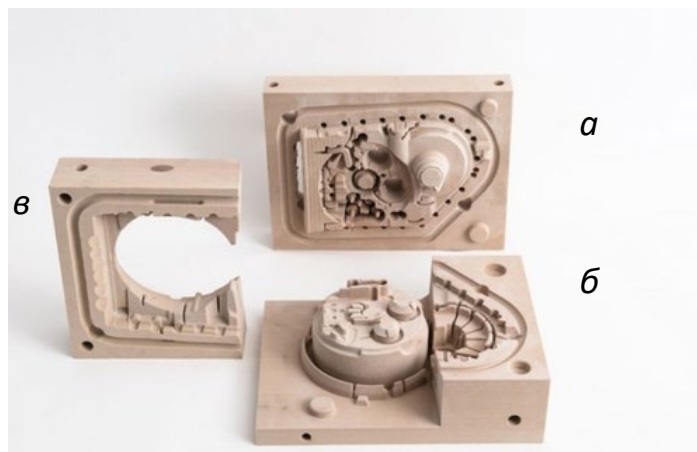


Рис. 7. Піщано-полімерна ливарна форма

**Безпосередній 3D друк піщано-полімерних форм** є найбільш передовою технологією виробництва ливарних форм на сьогоднішній день. Існуючі способи виготовлення ливарних форм або дорогі (SLA і SLS), або займають багато часу (ручна обробка або ЧПУ). Це знижує ефективність виробництва. Метод

безпосереднього друку ливарних форм дозволяє різко скоротити час виходу на ринок нових виробів, знизити собівартість, особливо при дрібносерійному виробництві, зняти технологічні обмеження класичного підходу за складністю внутрішньої конфігурації до виробництва оснастки. Друк піщано-полімерних ливарних форм ґрунтується на використанні порошкових матеріалів (наприклад – ливарного кварцевого піску) та смоли. На рис. 7 показані готові 3D-надруковані ливарні верхня (а) і нижня (б) напівформи з ливарним стрижнем (в) для лиття корпусу коробки передач.

Створення ливарних форм з використанням 3D принтера дозволяє скоротити технологічний ланцюжок відмовившись від таких операцій: виготовлення майстер-моделі з металу або композитних матеріалів, виготовлення ливникової системи і додатків, формування частин форми (установка майстер моделі і ливникової системи в опоку і засипка сумішшю). Це призводить до скорочення часу виробництва і зниження вартості форми на порядок. Це досягається за рахунок того, що 3D принтер створює ливарну форму одразу за цифровою моделлю.

Цифрова модель ливарної форми розбивається на шари, переноситься в 3D принтер, в якому отверджувач, згідно цифрової моделі ливарної форми, наноситься на попередньо підготовлений шар піщаної суміші. В результаті, в зоні побудови створюється затверділа частина піщаної суміші, яка точно повторює цифрову модель. Неотверджена піщана суміш легко видаляється і використовується заново.

Для кожного конкретного випадку спосіб лиття вибирають у залежності від типу виробництва, габаритних розмірів деталі, складності її конфігурації та вимог, що пред'являються до деталі. При цьому враховуються витрати на виготовлення оснастки, які мають бути економічно виправдані (табл. 3).

Ливарні роботи в літакобудівному виробництві займають близько 1,5% загальної трудомісткості виготовлення літака. Основна номенклатура деталей - це окантовки невеликих люків, окантовки ліхтарів, каркаси люків, мало- і середньонавантажени вузли для кріплення внутрішнього обладнання, невеликі

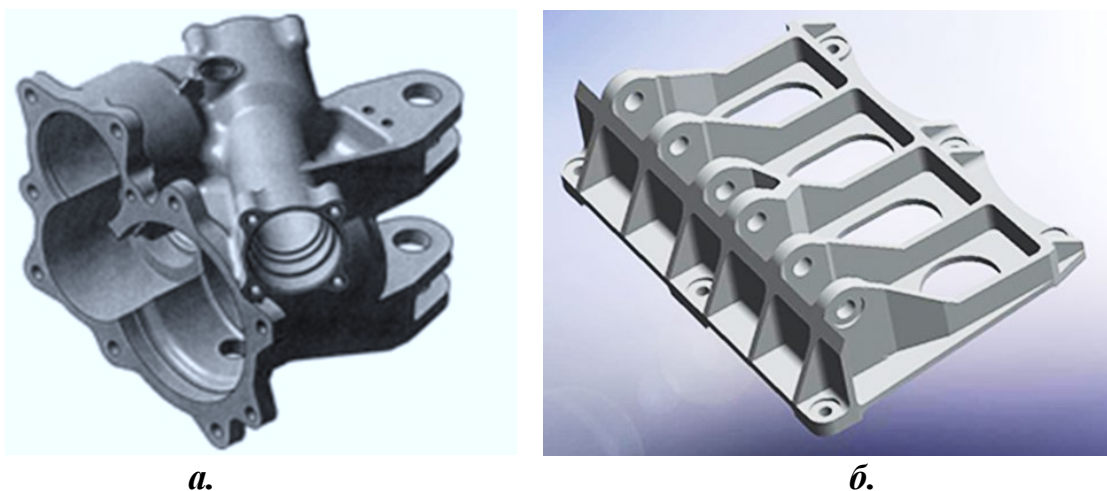
корпусні деталі, різні вузли арматури, панелі підлог та ін. Основними матеріалами для литих деталей є ливарні алюмінієві сплави (АЛ5, АЛ8, АЛ9, ВАЛ1, АЦР1 тощо), магнієві сплави (МЛ5, МЛ9, МЛ 10, МЛ 12); рідше застосовується сталеве лиття та лиття з титанових сплавів (ВТ5Л).

Таблиця 3

Порівняльні характеристики різних методів лиття.

Спосіб лиття	Матеріал виливків	Форма і розміри	Точність (квалітети), шорсткість (Ra,мкм), мінімальна товщина стінки, мм	Області застосування
Лиття у пісчані форми (машинна формовка)	Чавун, сталь, рідко – кольорові сплави	Великогабаритні, складної форми	Грубіше 14 кв., R <sub>a</sub> = 20...80, (5...25), 3...8 (для різних сплавів)	Усі галузі машинобудування, від масового до одиничного виробництва
Лиття у оболонкові форми	Чавун, сталь, рідко – кольорові сплави	Маса менше 300 кг, розміри та форма обмежені	12...14 кв., R <sub>a</sub> = 2,5...25, сталь 3, алюміній 1	Серійне та масове виробництво
Лиття у кокіль	Алюмінієві, магнієві і мідні сплави, чавун	Маса до 250 кг (рідко – більше), форма обмежена умовами вилучення виливка з кокіля	12...15 кв, R <sub>a</sub> = 2,5...25	Серійне та масове виробництво
Лиття під тиском	Алюмінієві, цинкові, магнієві сплави	Маса до ~30 кг, форма обмежена умовами розкриття пресформи.	8...13 кв., R <sub>a</sub> = 0,5...20	Крупносерійне та масове виробництво
Лиття за витоплюваними моделями	Сталь, спец. сплави, алюмінієві, титанові, мідні сплави	Форма не обмежена, маса до 10 кг, в худ. литті не обмежена	9...10 кв., R <sub>a</sub> = 1,25...25, 0,5	Серійне виробництво складних за формою виробів, зокрема з тугоплавких сплавів. Авіабудування: турбінні лопатки

Приклади литих деталей



а.

б.

Рис. 8. Корпус-кронштейн із сплаву АЛ4МС (а), корпус із сплаву ВАЛ20 (б)

У авіабудуванні знаходять застосування сплави АЛ1, АЛ2, АЛ3, АЛ4, АЛ5, АЛ6, АЛ7, АЛ8, АЛ9, ВІ-11-3, АЛ 19, В300, В14А .

**АЛ4 і АЛ5** застосовують для виготовлення великих і середніх деталей двигунів. схильних до значних навантажень (корпусу масляних форсунок, фланців, ферм, картерів, головок циліндрів). До недоліків сплавів відноситься їх низька жароміцність. Тому вони непридатні для виготовлення деталей, що працюють при температурі вище 200-250 ° С.

**АЛ3 та АЛ6** з хорошими ливарними властивостями, але із середньою механічною міцністю. Застосовують для середніх та дрібних деталей двигунів та обладнання, не схильних до значних навантажень {корпусів приладів, карбюраторів. арматури і т.п.).

АЛ7, АЛ8, АЛ9 використовують для лиття літакових деталей: кронштейнів, качалок, педалей тощо.

**ВІ-11-3** володіє високою корозійною стійкістю, хорошими ливарними властивостями і підвищеною міцністю, зміцнюється режимом Т4, має задовільну зварюваність газовим зварюванням і хорошу оброблюваність різанням, застосовується для виготовлення (литтям у землю, кокіль або під тиском) деталей підвищеної корозійної .

**АЛ 19** має низьку корозійну стійкість, невисокі ливарні властивості, але високі механічні якості та жароміцність. Зміцнююча термічна обробка за режимами Т4 і Т5 Добре зварюється та обробляється різанням, застосовується для виготовлення литтям у землю авіаційних деталей, що працюють при температурах 175-300 ° С

#### Високоміцні ливарні алюмінієві сплави

**ВАЛ12** – високоміцний сплав системи Al–Zn–Mg–Cu, лиття в кокіль і рідка штамповка, робоча температура 250°C (тривала), 300°C (короткочасно),  $\sigma_B \geq 550$  МПа,  $\delta \geq 3\%$ .

**ВАЛ20** – високоміцний сплав системи Al–Cu–Mg, лиття в пісчані форми фасонних виливків складної форми деталей внутрішнього набору (корпуси, качалки, кронштейни), робоча температура 200°C (тривала), 250°C

(короткочасно),  $\sigma_B \geq 420$  МПа,  $\delta \geq 7\%$ ,  $\sigma_{100}^{200^\circ} = 120$  МПа,  $\sigma_{100}^{250^\circ} = 100$  МПа,  $\sigma_{100}^{300^\circ} = 60$  МПа.

**АЛ4МС** – високоміцний високотехнологічний сплав системи Al-Si-Cu-Mg, забезпечує при литті в кокіль  $\sigma_B = 360-400$  МПа,  $\delta \geq 4\%$ , не схильний до утворення тріщин, робоча температура  $250^\circ \text{C}$ , можна відливати деталі будь-якими способами, в тому числі прогресивним способом лиття за газифікованими і випалюваними моделями.

Литі деталі з жароміцних магнієвих сплавів

**МЛ9, МЛ10, МЛ19** – жароміцні сплави, призначені для тривалої експлуатації в умовах нагріву до  $250-300^\circ \text{C}$ . Жароміцні ливарні сплави застосовуються для деталей літаків, вертольотів, двигунів, приладів, маслоагрегатів, редукторів і інших конструкцій, що працюють при підвищених температурах.

Найбільш широко застосовується низьколегований жароміцний сплав МЛ10, що відрізняється високим рівнем механічних властивостей. Жароміцні сплави мало схильні до утворення мікропористості в виливках, мають підвищену герметичність. Хороші ливарні властивості дозволяють отримувати з них складні великогабаритні виливки. Литі деталі з жароміцних сплавів (особливо зі сплаву МЛ10) відрізняються високою стабільністю розмірів.

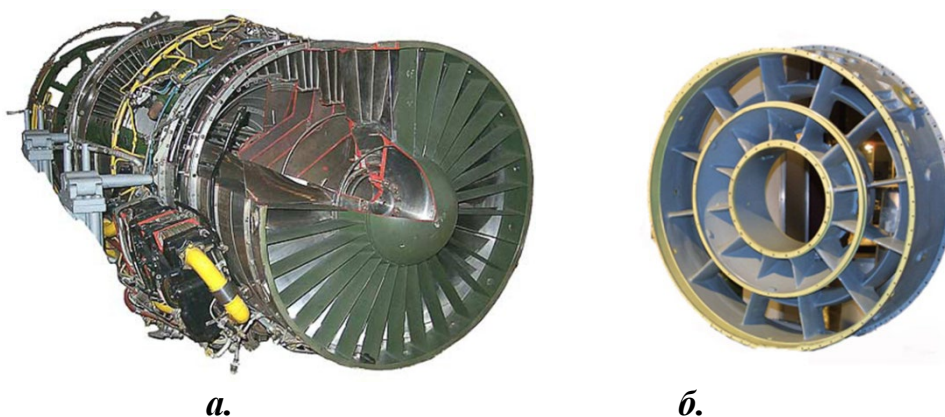


Рис. 9. Корпус передньої опори авіаційного двигуна НК-32 (сплав МЛ19) (а), розподільчий корпус (сплав МЛ10) (б).

### **Питання для самоперевірки**

1. Яким методом лиття доцільно отримати виливок з силуміну масою 20 кг з
2. Яким методом виготовляють бронзове художнє лиття?
3. В яких методах лиття не застосовуються стрижні?
4. Яким методом лиття неможливо виготовити сталевий виливок масою 200кг?
5. Який метод лиття забезпечує отримання виливків найбільш складної форми?
6. Який метод лиття забезпечує найбільшу точність одержуваного виливка?
7. Які методи лиття не вимагають виготовлення моделей?
8. В чому переваги лиття в порівнянні з іншими методами отримання заготовок деталей машин?
9. Які вироби отримують відцентровим литтям?
10. У чому полягають переваги лиття в кокіль?
11. З яких сплавів виробляють виливки литтям під тиском?
12. Яким методом лиття можна отримати виливок станини верстату довжиною 10 м і масою 10 тонн?
13. Яким методом лиття доцільно відливати турбінну лопатку з жароміцного сплаву?
14. Із яких матеріалів виготовляється форма при литті під тиском?
15. Які адитивні технології застосовують у ливарному виробництві?

### **Тестові питання**

1. З ліквіацією можна боротися
  - а) - гальмуючи охолодження виливків у формі
  - б) - нагріванням форми перед заливкою сплавом
  - в) - прискорюючи охолодження виливків у формі
2. Ливарна усадка
  - а) - залежить виключно від хімічного складу виливка
  - б) - залежить від конфігурації виливка
  - в) - не залежить від конфігурації виливка
3. Додаток для живлення виливка

- а) - запобігає утворенню тріщин
- б) - забруднення сплаву
- в) - запобігає утворенню усадочних раковин у виливку і приймає усі ліквати
- г) - запобігає утворенню тріщин, приймає усі ліквати і забруднення металу
- д) - зменшує витрати металу на виливок

4. Вибрати правильну відповідь. До дефектів литва відносять:

- а) - тріщини, раковини, вибіл, пористість, перегрів виливка
- б) - тріщини, раковини, вибіл, пористість, зменшення лінійних розмірів після остигання
- в) - тріщини, раковини, вибіл, пористість

5. До одноразових форм відносять:

- а) - кокілі
- б) - оболонкові
- в) - для лиття під тиском
- г) - для відцентрового лиття труб

6. Форми на автоматичних лініях формування виготовляють з

- а) - формувальної суміші
- б) - сталі
- в) - жароміцної сталі
- г) - воску
- д) - деревини
- е) - твердого сплаву

7. Спрямована структура лопаток ГТД досягається

- а) - створенням магнітного поля під час кристалізації
- б) - певним температурно-швидкісним режимом під час кристалізації
- в) - певним температурно-механічним режимом під час кристалізації
- г) - відцентровими силами під час кристалізації

8. Литі деталі з жароміцних магнієвих сплавів МЛ9, МЛ10, МЛ19 призначені для експлуатації в умовах нагрівання

- а) - короткочасно до 750–800°C

б) - тривало до 250–300°C

в) - тривало до 750–800°C

9. Найкращі ливарні властивості мають сплави:

а) - Al—Cu

б) - Al—Mg

в) - Al—Si

10. Виливки з алюмінієвих бронз мають значну усадку, тому при їх виготовленні треба:

а) - встановити випори і підводити рідкий метал до тонких перерізів виливка

б) - встановити додатки і підводити рідкий метал до масивних перерізів виливка

в) - встановити додаткові ливарні стержні і забезпечити повільне охолодження форми

г) - забезпечити повільне охолодження форми

11. Сплави магнію мають хороші ливарні властивості з масовою часткою

а) - 8... 10 % Al і 0,2... 1,5 % Zn

б) - 2...7 % Al і 1,5...3 % Zn

в) - 1 ...1,5 % Si

г) - 1...2% Mn

12. Чим складніша деталь з титанового сплаву, тим більша економічність використання

а) - кування і штампування

б) - лиття

в) - не має значення



## ОБРОБКА ТИСКОМ

Обробка тиском охоплює технологічні процеси формозміни за рахунок пластичної деформації внаслідок впливу на заготовку, що деформується під дією зовнішніх сил.

На рис. 10 показані схеми основних видів обробки тиском: прокатка, пресування, волочіння, ковка, об'ємна штамповка і листова штамповка.

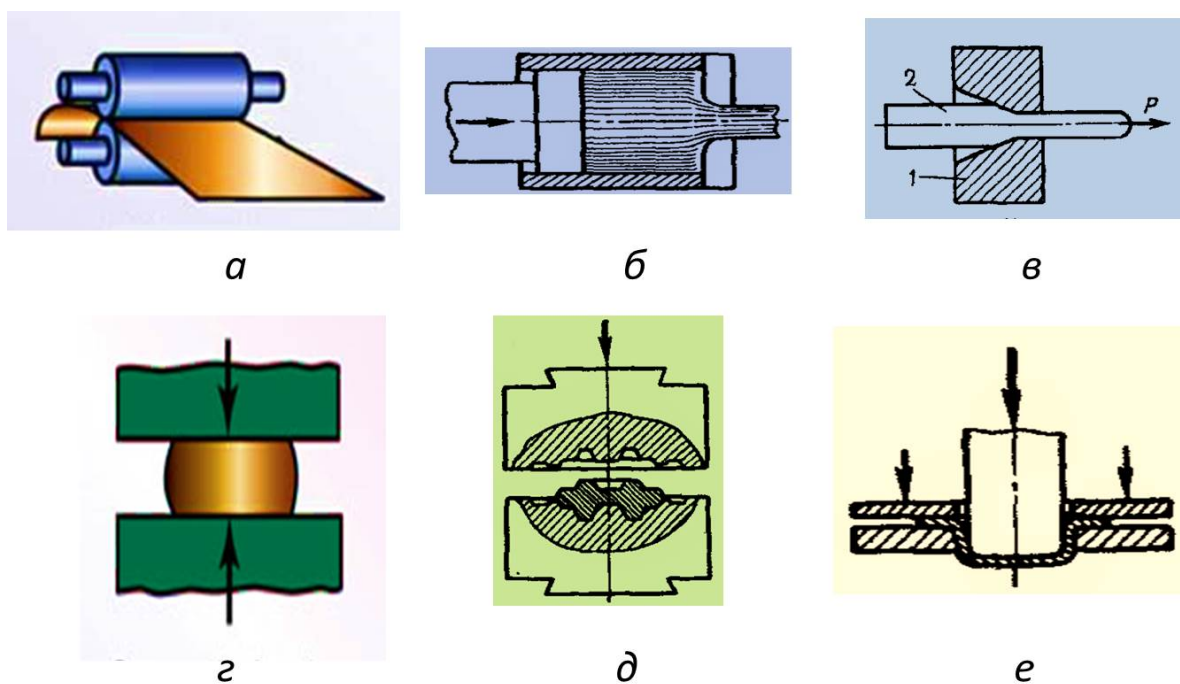


Рис. 10. *а)* - прокатування; *б)* - пресування; *в)* - волочіння; *г)* - кування;  
*д)* - штампування об'ємне та *е)* - листове.

У виробництві літальних апаратів обробкою тиском отримують деталі з жароміцних і магнітних сплавів штамповкою на молотах і пресах; отримання обшивок ЛА одинарної і подвійної кривизни згинанням, прокаткою, обтяжкою або обтяжкою з розтягом; листових деталей складних форм витяжкою; безшовні тонкостінні оболонки постійної і перемінної товщини з оребренням розкаткою та пресуванням; корпусні деталі кільцевою обтяжкою розжимними пуансонами, гнуттям або гнуттям з розтягом.

Об'ємне гаряче штампування застосовується для виготовлення відповідальних у силовому відношенні монолітних деталей, у тому числі великих силових елементів, з алюмінієвих сплавів (АК6, АК8, Д16, В95), що деформуються, титанових сплавів (ВТ5, ВТ6), високоміцних сталей тощо.

Типовими деталями є: підмоторні рами, вузли шасі, вузли підвіски шасі та кермів, фітинги, силові стикувальні накладки, окантовки, а для невеликих літаків – силові шпангоути, нервюри, панелі, лонжерони.



Рис. 11. Приклади деталей отриманих обробкою тиском:

- а) - штамповка – окантовка ілюмінатора зі сплавом 1420-ТГ1;
- б) - пресована панель з сплавів 1424 и В-1461; в) - штампована стійка шасі А340 зі сталі V135 (35NCD16) 0.35C-4Ni-1.8Cr-0.5Mo

### **Гаряче об'ємне штампування**

При цій обробці метал заготовки деформується в усьому об'ємі, причому течія його обмежується порожниною штампа. При цьому форма виробу відповідає формі штампу. У порівнянні з вільним куванням процес значно продуктивніший (в 50...100 разів), але вимагає виготовлення складних і дорогих штампів (рис. 12). Тому в основному застосовується у серійному та масовому виробництві. Маса заготовок зазвичай обмежена (менше 100 кг), бо зусилля деформування при штампуванні значно вищі, ніж при куванні. Матеріал при високих ступенях пластичної деформації, як і при куванні ущільнюється, подрібнюється зерно, що призводить до покращення механічних властивостей виробу. Тому процес застосовується при виробництві заготовок дуже відповідальних виробів: валів, зубчастих коліс, турбінних лопаток тощо. Однорідність і точність поковок значно вища, ніж при куванні і досягає 12 квалітету (припуски і допуски в 3...4 рази менші).

Порівняно з вільним куванням об'ємне штампування забезпечує виготовлення поковок складної форми без напусків, більш високу якість поверхні, сприятливе розташування волокон. На одному штампі залежно від матеріалу і типу поковки можна виготовити 10...25 тис. поковок.

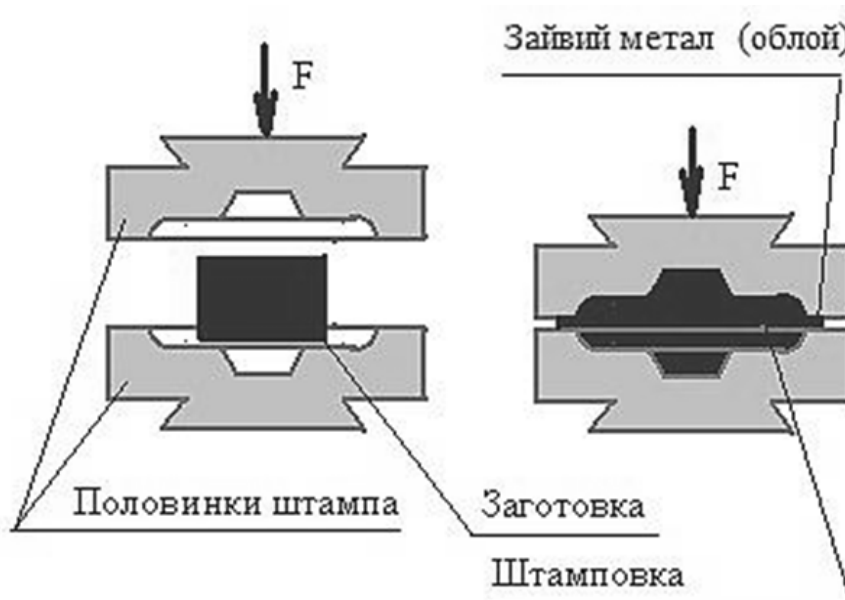


Рис. 12. Схема штамповки у штампах

### Листове штампування

Планери літаків мають до 70% деталей з листів, профілів та труб; їх виготовляють з використанням операції **листового штампування**. Обсяг таких робіт становить нині 10...12 % усієї трудомісткості виготовлення літака. Основними групами деталей є (рис. 13) зовнішні обшивки різної складності форм, одинарної та подвійної кривизни з розмірами до 10×2 м і більше, товщиною до 6...8 мм; монолітні панелі, стрінгери, шпангоути, нервюри та деталі, що входять до них (стілки, профілі жорсткості, окантовки та ін.), трубопроводи різного призначення та ін. Матеріал: алюмінієві сплави Д16, В95, АМг6, сталі Х18Н10Т, титанові сплави. Виготовлення деталей методом штампування полягає у пластичному деформуванні зовнішніми навантаженнями плоских листових та прямолінійних профільних та трубчастих заготовок, у результаті якого забезпечується їх формозміна.

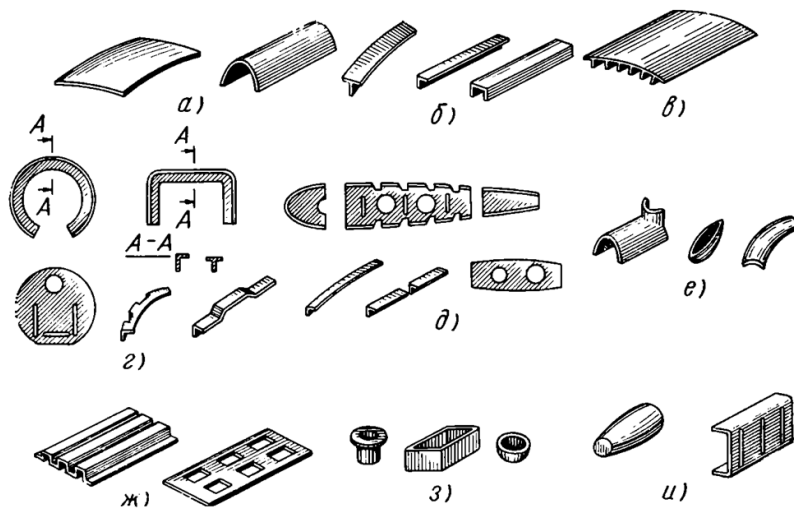


Рис. 13. Типові деталі, що виготовляються штампуванням з листових профільованих та трубчастих напівфабрикатів: а - обшивки; б - стрінгери; в - монолітні панелі; г - деталі шпангоутів; д – деталі нервюр; е - залізи, закінцювання; ж - гофри, панелі; з – деталі внутрішнього набору; і - обичайки та перегородки (А.Л.Абібов / Технологія літакобудування)

Операції листового штампування можна поділити на дві групи (рис.14): роздільні (відрізування, вирізування, пробивання, надрізування, обрізування) і формозмінні (згинання, витягання, обтискання, формування тощо).



Рис. 14. Операції листового штампування

(Manufacturing, Engineering & Technology, Fifth Edition, by Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid. ISBN 0-13-148965-8. © 2006 Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ. All rights reserved)

## Роздільні операції листового штампування

При штампуванні вирубці (рис.15) відбувається зріз матеріалу між краями складноконтурного пуансону та еквідистантною до нього за контуром матрицею. Пуансон та матриця виконуються з матеріалів значно твердіших, ніж матеріал заготовки (загартована сталь, металокерамічний твердий сплав). Зазвичай тонколистовий матеріал ( $< 10\text{мм}$ ) вирубують без підігріву заготовки, при більшій товщині потрібен підігрів. Таким чином виготовляються заготовки складного контуру із пластичних металів. Розміри заготовок визначаються розмірами штампів і не перевищують 1 м. Точність визначається точністю виготовлення матриці та може досягати 6-7 квалітетів. Шорсткість поверхні зрізу в зоні руйнування матеріалу висока, але може бути зменшена за допомогою спеціальних прийомів (чистове штампування вирубка). Штампування вирубку широко застосовується в машинобудуванні, радіоелектронній промисловості, аерокосмічній промисловості.

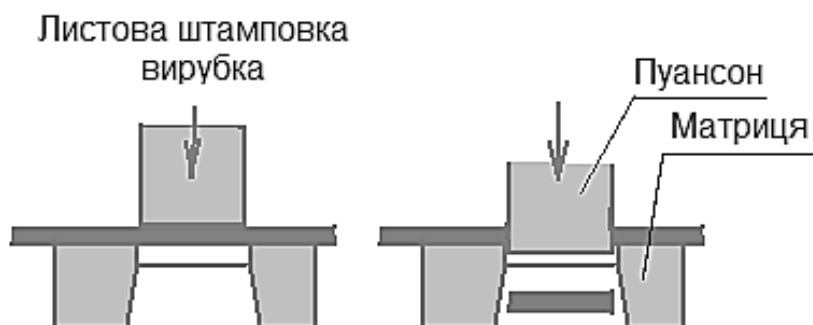


Рис. 15. Схема операції вирубку

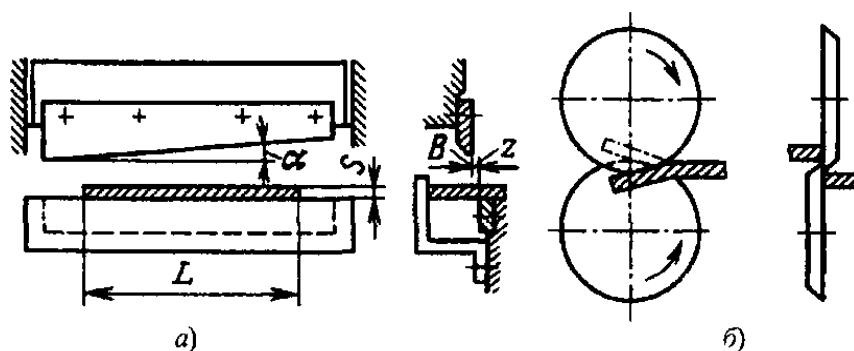


Рис. 16. Відрізування на гільйотинних (а) та дискових (б) ножицях

Координатно-пробивний прес - машина для обробки листового металу, що виконує операції штампування та формоутворення згідно заданих координат. Як правило, сучасні верстати мають розвинену систему управління (ЧПУ) і дозволяють в автоматичному режимі, за програмою, виконувати обробку листового матеріалу різними інструментами, які встановлені в магазині – наприклад, в мультіінструментальній револьверній головці. Вона може бути розрахована на велику кількість інструментів (наприклад прес, представлений на фото – 34 інструмента).

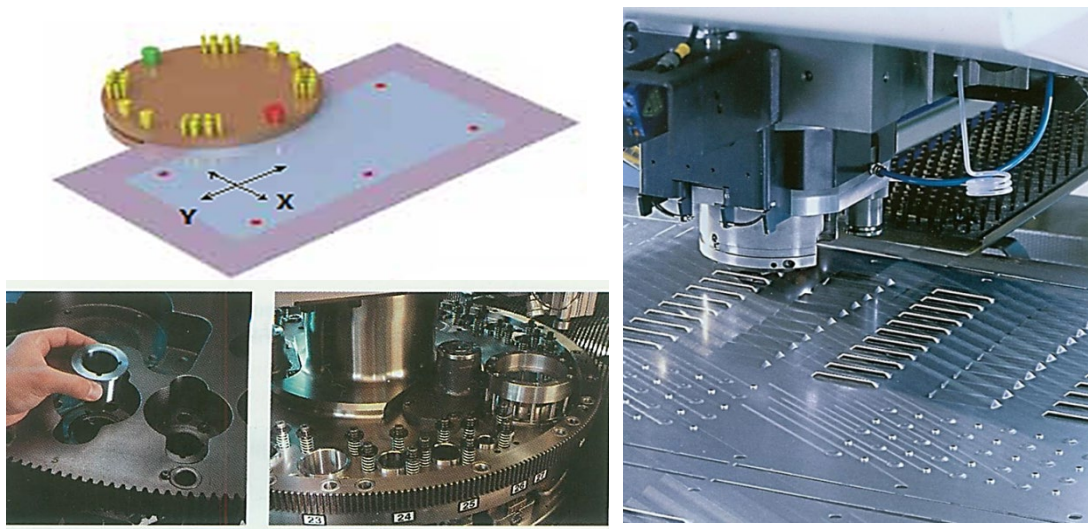


Рис. 17. Координатно-пробивний прес

### Згинання

Однією з найбільш поширених формозмінювальних операцій холодної штамповки є згинання, яке характеризується вузькою зоною деформації в місці контакту з пуансоном. В цій зоні волокна металу всередині кута згинання стискаються, а зовнішні - розтягуються, тому довжину заготовок деталей, які виготовляють згинанням, розраховують по середній лінії 1 (рис. 18, а). При згинанні деталь пружинить (частково відновлює форму після зняття навантаження), що потребує коригування розмірів штампу або наступного калібрування. Кут пружинення залежить від властивостей матеріалу, його товщини і відношення радіуса згинання до товщини листа і для різних сталей дорівнює  $1...8^\circ$ . Найменший внутрішній радіус згинання становить  $0,1...0,2$  від товщини листового матеріалу.

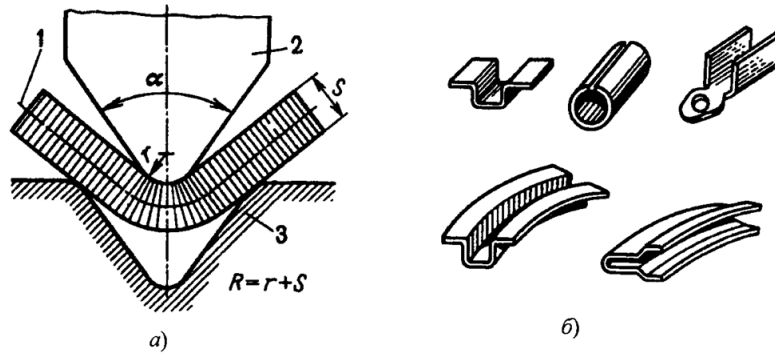


Рис. 18. Схема згинання (а) та виробу отримані згинанням (б):

1 – заготовка, 2 – пуансон, 3 – матриця

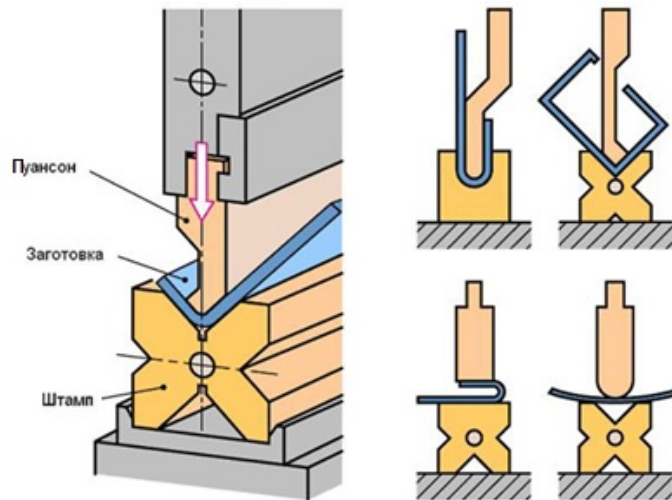


Рис. 19. Згинання листового матеріалу, отримання вигину різноманітної форми

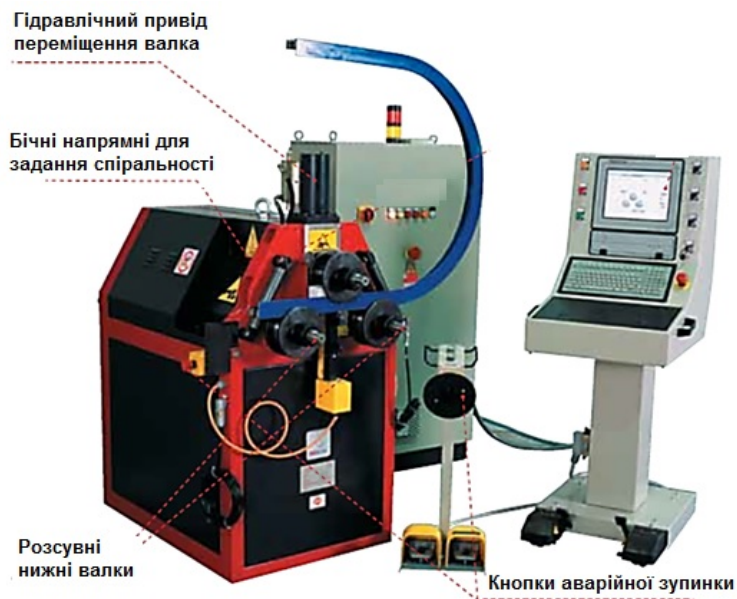


Рис. 20. Згинання профілю, труб на трьохвалковому профілезгинному верстаті з CNC

Формовка профілю з розтягуванням - це процес формування профілю в 2D або 3D з наступними перевагами: точність і повторюваність завдяки відсутності пружного повернення та залишкових напружень; досягнення складних форм завдяки ЧПУ; скорочення монтажних операцій; відсутність деформацій деталі, які неминучі після зварювання або механічної обробки; можливість формувати шпангоути фюзеляжу, стрінгери тощо.

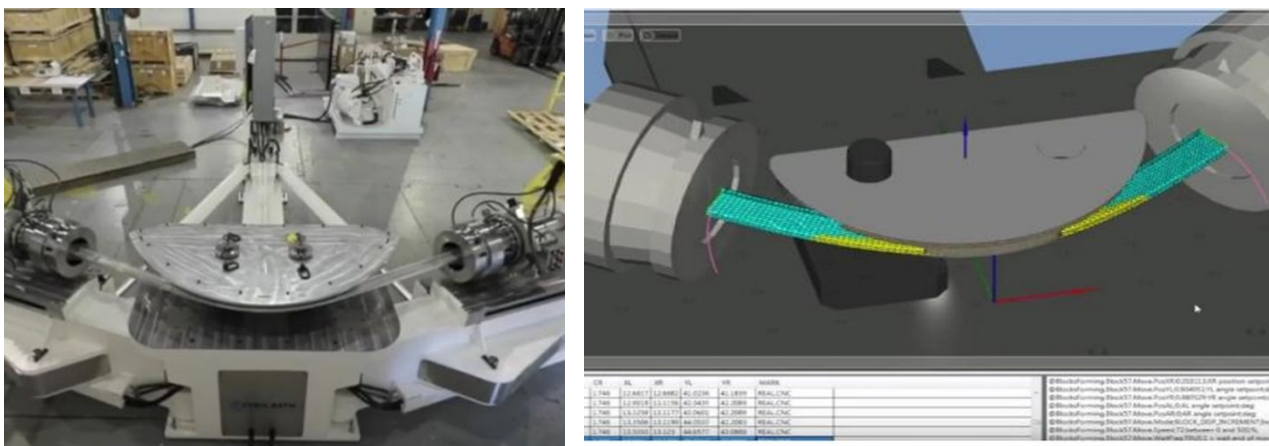


Рис. 21. Формовка профілю з розтягуванням

**Витяжка** - виготовлення об'ємної деталі замкнутого контуру з плоскої листової заготовки за рахунок значної пластичної деформації. Витяжкою можна виготовляти деталі з листа завтовшки 0,02...30 мм з розмірами від десятих часток міліметра до кількох метрів: кузови автомобілів, посуд, гільзи, ковпачки, коробчасті деталі тощо.



Рис. 22. Штамповка оболонки побутового відсіку з сплаву АД1, :  $\varnothing$  – 2500 мм;  $h$  – 1500 мм; товщина – 2...3 мм (а); деталі, отримані листовим штампуванням (б); штамповані з листа нервюри (в).



На рис. 22, 23 показані деталі отримані листовим штампуванням і схема листового штампування - витяжка.

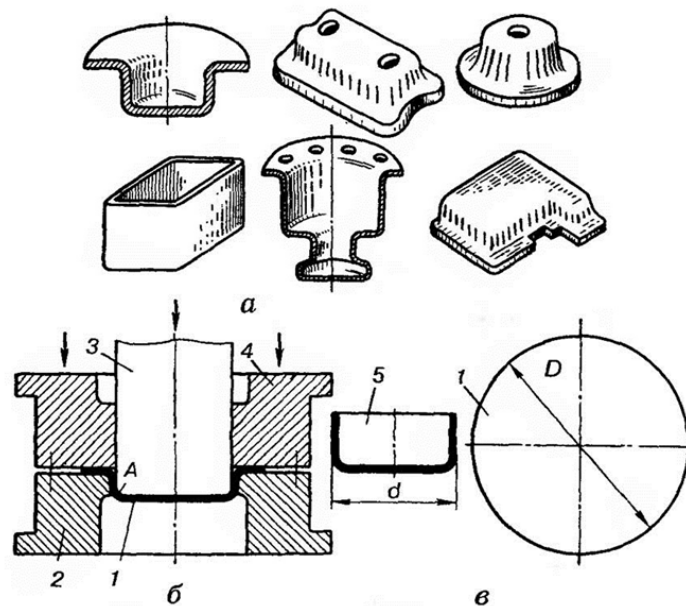


Рис. 23. а) - Різні деталі отримані витяжкою. б) - Схема операції витяжки: 1 – заготовка, що деформується; 2 – матриця; 3 – пуансон; 4 – притискач; 5 - деталь; в). заготовка.

**Формовкою** отримують місцеві виступи на заготовці, ребра жорсткості тощо. Розбортування виконують у штампах, подібних витяжним. Її застосовують для підвищення жорсткості конструкцій з листового матеріалу: полиць (поясів), нервюр, отворів полегшення нормальних нервюр.

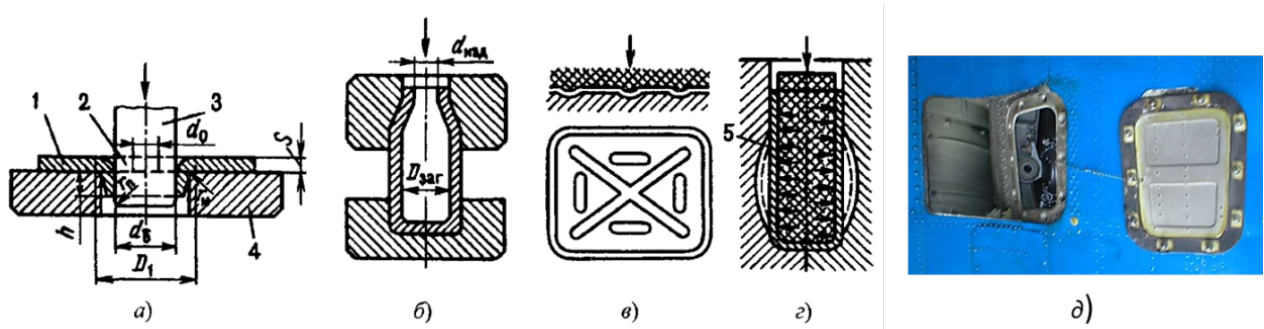


Рис. 24. Формоутворюючі операції листового штампування. Розбортування (а). Обтискання (б). Рельєфна формовка (в). Формовка розтягуванням (випинання) (г). Формовка ребер жорсткості на лючку літака (д)

**Обтяжка.** Типові деталі фюзеляжу ЛА: складні контури навколо кабіни, довгі частини фюзеляжу до 15 метрів, частини фюзеляжу, що вимагають можливості формування зворотного контуру, деталі передньої кромки, є обшивками одинарної і подвійної кривизни (рис. 25). Для формоутворення таких панелей застосовується **обтяжка** - процес формоутворення деталей подвійної кривизни вигином та розтягуванням листових заготовок до повного прилягання останніх до профільованої оправки - пуансону (рис. 26). Для більш точної відповідності форми деталі конфігурації оправки в усіх волокнах заготовки при обтяжці створюють напруження розтягу, що перевищують межу плинності. Цей процес знаходить широке застосування при виготовленні великогабаритних обшивок і деталей подвійної кривизни з високим відношенням радіусу кривизни до товщини матеріалу і насамперед - в аерокосмічній промисловості.



Рис.25. Приклади деталей фюзеляжу, отриманих обтяжкою

Згинання на розтяжно-обтяжних пресах та пресах поперечної або поздовжньої обтяжки є одним з найбільш універсальних методів формоутворення обшивок одинарної та подвійної кривизни довжиною до 15 метрів (і навіть більше) в аерокосмічній промисловості. Технологія дозволяє виготовляти великі деталі, найчастіше з алюмінієвих сплавів, з меншими витратами на інструменти, ніж при витяжці, оскільки для формування деталі на одній матриці потрібна тільки одна операція. Лист, що формується, розтягується навколо інструменту-

пуансону за рахунок сили, прикладеної до листа (завдяки затискним тримачам - губкам). Ця сила викликає розтягуючі напруження, що перевищують межу плинності матеріалу. За характером прикладання зовнішніх сил розрізняють три різновиди процесу обтяжки: *поперечна обтяжка* (рис.26, а); *обтяжка з поздовжнім розтягом* (рис. 26, б); *кільцева обтяжка* (рис.26, в).

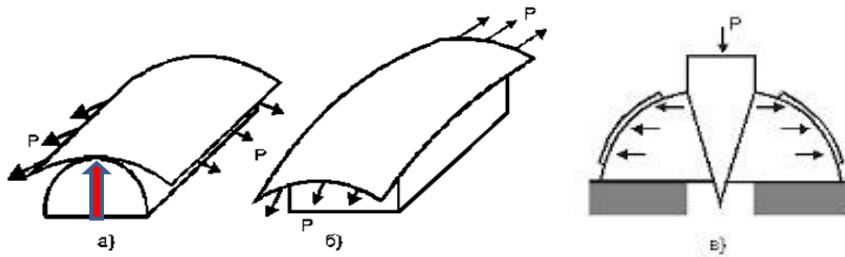


Рис. 26. Схеми дії зовнішніх сил при поперечній обтяжці (а) і обтяжці з поздовжнім розтягом (б)

При поперечній обтяжці зусилля формоутворення прикладається до пуансону, а напруження розтягу в листі виникають за рахунок сил реакції затискачів. При обтяжці з розтягом зусилля розтягування в листі створюється за рахунок прикладання зусиль розтягу до затискачів. Основною умовою отримання деталі необхідних розмірів є розтягнення всіх перерізів заготовки до стану пластичності. Після зняття деформуючих зусиль вигнута деталь частково розпрямляється під дією пружних деформацій. При цьому подовжені при вигині верхні шари кілька скорочуються, а стиснуті - подовжуються.

При кільцевій обтяжці заздалегідь зігнута в кільце і зварена заготовка під дією зусиль, створюваних зсередини за допомогою секцій розтискного пуансону або рідинного середовища, набуває нової форми за рахунок збільшення розмірів поперечних перерізів, що супроводжується розтягуванням матеріалу стінок у дотичному до кола напрямку.

Сутність процесу обтяжки полягає в тому, що плоска заготовка, два кінці якої закріплені у затискачах, згинається за пуансоном, а потім за рахунок докладання зусиль розтягується. Процес розтягнення триває до повного прилягання внутрішньої поверхні листа до пуансона, тобто доти, доки

напруження в менш розтягнутому місці не перевищать межу плинності даного матеріалу. При цьому заготовка в залежності від форми пуансону перетвориться на деталь подвійної або одинарної кривизни. Цей процес застосовується головним чином для отримання деталей подвійної кривизни.

Процес формоутворення при кільцевій обтяжці протікає аналогічно до процесу простої обтяжки. Відмінність полягає лише в тому, що при кільцевій обтяжці внаслідок наявності великої кількості секцій сили тертя, спрямовані по відношенню до кола розтискного пуансону, відіграють значно меншу роль; деформації у цьому напрямі наближаються до рівномірно розподілених, отже, напружено-деформований стан — до вісесиметричного.

Поперечна обтяжка застосовується для формоутворення обшивок одинарної кривизни і подвійної кривизни двоопуклої і опукло-увігнутої форм з великим кутом охоплення  $\alpha = 90 \dots 180^\circ$  (рис. 27). Поперечний режим підходить для глибоких вигинів (передні кромки, сидла). Це більш універсальний процес. Методом поперечної обтяжки з листових заготовок товщиною до 2 мм і довжиною до 3000 мм виготовляють обшивки незамкнутої форми носової частини фюзеляжу, гондол двигунів, каналів всмоктування (рис. 27, б) і різні закінчення зі значною поздовжньою і поперечною кривизною.

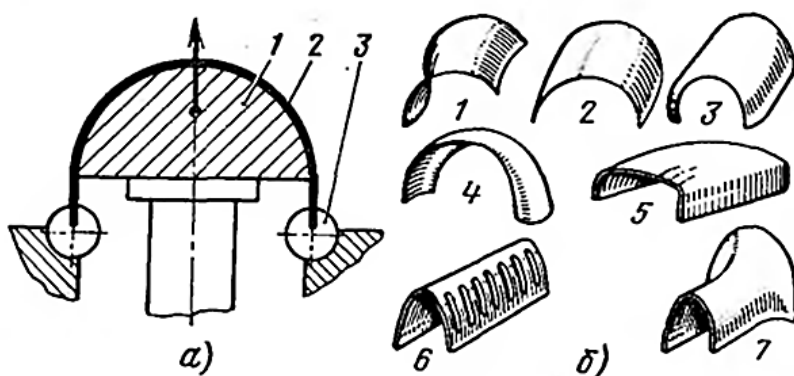


Рис. 27. а - схема поперечної обтяжки; 1 - пуансон; 2 - заготовка; 3 - затискні клеми; б - типові деталі, виготовлені на пресі ОП-3; 1, 3, 7 - деталі, виготовлені в спареному вигляді шляхом повторної обтяжки по одному і тому ж пуансону з проміжною термообробкою; 2, 4, 5 - деталі, виготовлені за одну

операцію обтяжки з термомеханічною обробкою; 6 - деталь, одержана обтяжкою з подальшою ручною доробкою (А.Л.Абібов / Технологія літакобудування)



Рис. 28. Прес поперечної обтяжки

Обтяжка з позовжним розтягом зазвичай застосовується для формоутворення обшивок двоопуклої форми з малими кутами охоплення  $\alpha < 90^\circ$  (рис.29). Поздовжній режим дає можливість виготовлення дуже довгих деталей (до 25 метрів) і обмежується неглибокими формами.

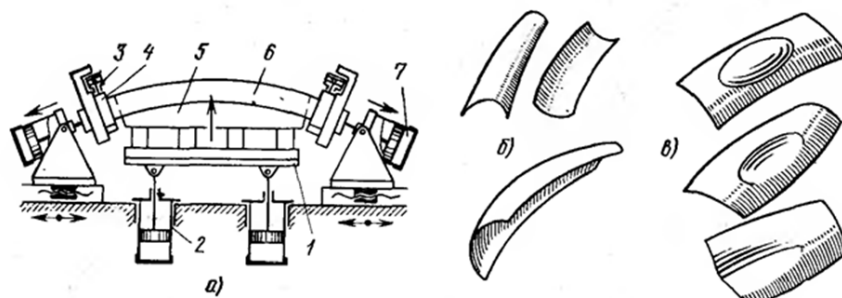


Рис. 29. Обтяжка з позовжнім розтягом:

*a* - схема процесу; 1 - стіл; 2 і 3 - гідравлічні пристрої для підйому столу та закріплення заготовки; 4 - затискачі; 5 - пуаїсон; 6 - заготівля; 7 - гідравлічний пристрій для створення зусилля, що розтягує; *б*, *в* - типові деталі, що виготовляються на обтяжних пресах з повздовжнім розтягом (*z*)

Для отримання деталей підвищеної точності та міцності з високоміцних і корозійно-стійких сталей операцію обтяжки поєднують з термічною обробкою, тобто застосовують термомеханічну обробку.

Кільцева обтяжка застосовується при виготовленні деталей замкнутих контурів, як калібрувальна операція, як операція правки після зварювання і як формоутворююча операція.

**Вібродарне зміцнення** здійснюється в результаті зіткнення кульок або абразивних гранул з оброблюваною поверхнею деталі, поміщених у контейнері, що призводять до коливального руху вібраторами. Вібродарний спосіб застосовується для зміцнення деталей з будь-якою формою поперечного перерізу. Величина стискаючих залишкових напружень в поверхневому шарі, глибина якого визначається частотою і амплітудою коливання, залежить від тривалості обробки. Шорсткість поверхні після зміцнення  $Ra = 2,5 \dots 0,32$ .

**Обробка дробом** значно збільшує межу втоми деталей, що зазнають змінної дії вигину та кручення. Цим способом можуть оброблятися силові деталі складної конфігурації: монолітні панелі, пояси лонжеронів, пружини, шестерні тощо. Сутність процесу полягає в тому, що поверхня деталі бомбардується потоком дробинок, що летять з великою швидкістю. При ударі об поверхню кожна дробинка залишає мікрОВ'ятину, у результаті поверхневий шар пластично деформується і зміцнюється. Внутрішні напруження і зміцнення спочатку зростають пропорційно до часу обробки, але потім (через 1...2 хв) настає «насичення». Подальша обробка стає вже шкідливою, оскільки веде до появи мікротріщин. Застосовується сталевий дріб діаметром 0,1 ... 0,8 мм. Дріб на

деталь подається або струменем стисненого повітря в дробоструминних установках, або крильчаткою, що механічно швидко обертається, в дробометних установках, (рис. 30). Після обробки сухим дробом або з додаванням змащувально-охолоджуючої рідини виходить «ряба» поверхня з шорсткістю відповідно Rz40...Rz20 та Rz20...Ra2,5 відповідно.

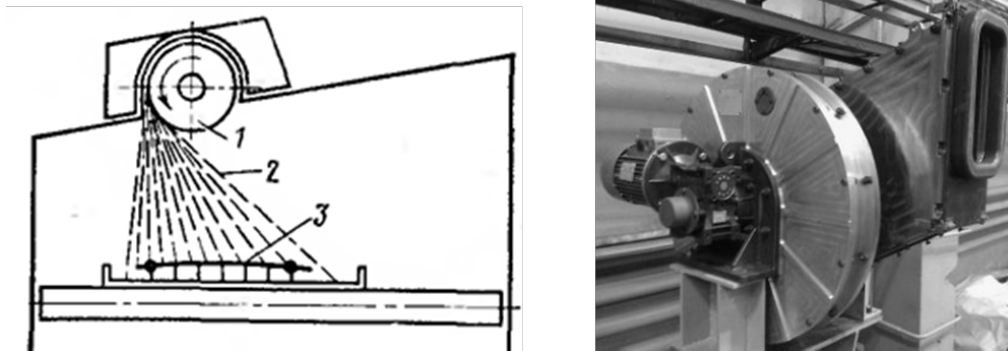


Рис. 30. Схема дробомету: 1 - крильчатка; 2 - струмінь дробу; 3 - панель, що зміцнюється та його загальний вигляд

### Дрободарне формоутворення

Дрободарний метод застосовують також для *формоутворення деталей* із напівфабрикатів невеликої жорсткості. Під дією напружень, що виникають у поверхневому шарі, заготовка, що піддається односторонній дрободарній обробці, згинається в бік струменя дробу до тих пір, поки напруження від наклепу і вигину не врівноважаться. При однаковій в обох напрямках жорсткості заготовка набуде опуклої сферичної форми. Якщо заготовка (наприклад, монолітна панель) підкріплена з одного боку поздовжніми елементами достатньої жорсткості, вигин буде відбуватися в площині найменшої жорсткості. Вздовж стрінгера панель залишається прямою. За кілька пропусків заготовки через потік дробу можна відформувати монолітну панель без застосування штампів або оправок. Змінюючи площу, що піддається впливу дробу, та кінетичну енергію дробинки, можна підібрати режими для заданої в певних межах формозміни

заготовки. Місця, які небажано піддавати дробоударному впливу, ізолюють листовою гумою.

### **Формоутворення великогабаритних обшивок і панелей літаків комбінованим методом формоутворення**

Застосовувана в комбінованих методах формоутворення схема односторонньої обробки дробом значно спрощує завдання створення технологічного обладнання. В даному випадку обробка дробом, а також подальша зачистка, виконується на спеціальній установці, в якій змінні робочі органи - дробометний апарат і зачисна головка переміщуються щодо деталі, закріпленої в поздовжньому контурі. Застосовувана схема дозволяє застосовувати програмне управління і забезпечує можливість вільного доступу до деталі для контролю її форми в процесі обробки.

Формоутворення дробом є найбільш прогресивним методом, при якому забезпечується необхідна геометрія і зміцнення поверхневого шару. Однак ця технологія пред'являє високі вимоги до параметрів процесу і сталості режимів обробки. Після формоутворення великим дробом здійснюються зачистка відбитків і подальше зміцнення дрібним дробом, які також надають вплив на кінцеву форму панелі. Традиційні методи формоутворення і редагування підкріплених деталей - гнуття на пресах і обробка дробом - не завжди дозволяють добитися необхідного результату, перш за все, в зв'язку з великими габаритними розмірами і складною формою деталей.

Технологічні можливості даного процесу можуть бути істотно розширені за рахунок застосування методів локального пластичного деформування (гнуття на копіювально-згинальних пресах, гнуття на пресах з варіюванням схем навантаження за відстаннями між опорами і різним зусиллям деформації в поєднанні з вибором схем деформації за один перехід, розкатка роликками).

При формоутворенні комбінованим методом необхідна форма деталі досягається суперпозицією двохосного вигину, створюваного односторонньої обробкою дробом, і одноосного вигину в поздовжньому напрямку, що



забезпечується різними методами пружнопластичного деформування в залежності від конструкції деталі. Поєднання дробообробки з пресовим гнуттям, гнуттям-прокаткою або **розкаткою** ребер (рис.31) дозволяє отримувати різні поверхні одинарної, подвійної і знакозмінної подвійної кривизни. При формуванні поздовжньої кривизни можна здійснити закрутку поперечних перерізів гнуттям-прокаткою під кутом до твірних або створенням змінного ступеню деформації при розкочування ребер монолітно-фрезерованих панелей.

У зв'язку із застосуванням в конструкціях сучасних літальних апаратів нових високоміцних і малопластичних сплавів з'явилася необхідність створення технології формоутворення і правки деталей з цих матеріалів після механічної обробки розкаткою. До розглянутих деталей відносяться лонжерони, балки, рами, нервюри, шпангоути і т.п. У більшості випадків їх виготовляють фрезеруванням з термічно зміцнених плит і профілів.

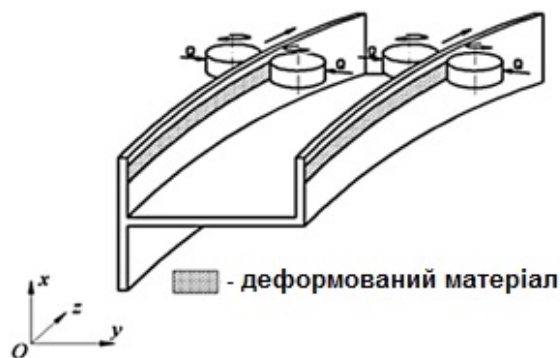


Рис. 31. Схема розкатки роликками

Заготівельно-штампувальні роботи постійно вдосконалюються завдяки застосуванню автоматизації та зниженню обсягу ручних доводочних робіт. Прогресивними методами є: штампування при високих тисках і при високих швидкостях деформування, застосування високочастотного і радіаційного нагріву заготовок перед штампуванням, освоєння електрофізичних методів при розкрої сталей і титану. Для виготовлення великогабаритних деталей застосовується нове обладнання для високошвидкісних методів штампування.

## Накатка різьби. Нарізані та накатані різьби

Накатка різьби - процес отримання різьби в результаті пластичної деформації заготовки різьбонакатним інструментом. Профіль різьби утворюється за рахунок вдавлювання інструменту в матеріал заготовки і видавлювання частини матеріалу у западини інструменту. При накатці різьби метал зміцнюється за рахунок ущільнення та наклепу (рис. 32).

Накатка дає значні переваги порівняно зі стандартними методами нарізування різьби:

- підвищену міцність, порівняно з аналогічною різьбою, виробленою методом нарізки;
- різьба та контур мають високу точність та якість;
- для деяких типорозмірів накатка різьб є єдиним можливим методом виробництва.



Рис. 32. (а) Особливості нарізаної або накатаної різьби. Мікроструктура в (б) нарізаних і (в) накатаних різьбах. На відміну від механічної обробки, яка прорізає зерна металу, накатка різьби надає підвищену міцність через холодну деформацію і сприятливу волокнисту структуру, яку утворюють зерна в результаті пластичної течії.

Ресурс багатьох авіаційних конструкцій значною мірою залежить від правильності вибору елементів кріплення. При складанні лонжеронів крила, центроплана і оперення, силових нервюр і шпангоутів, монолітних панелей фюзеляжу по повздовжних стиках та інших силових вузлів планера літака застосовують, крім звичайних стрижневих заклепок, болти, заклепки з високим опором зрізу і болти-заклепки.

Найбільш прогресивним способом виготовлення різьби є накатка, яка, крім підвищення точності та покращення чистоти різьбової поверхні, підвищує також механічні якості різьби. За даними досліджень, накатка збільшує зрізуючі зусилля витків різьби болта на 4...8% і підвищує при відповідних режимах циклічну міцність до двох разів. Накатку різьби можна проводити на всіх матеріалах з відносним видовженням не нижче  $\delta = 8...10\%$  і твердістю не вище за HRC 36. Накатка різьби проводиться також на порожнистих деталях достатньої жорсткості.

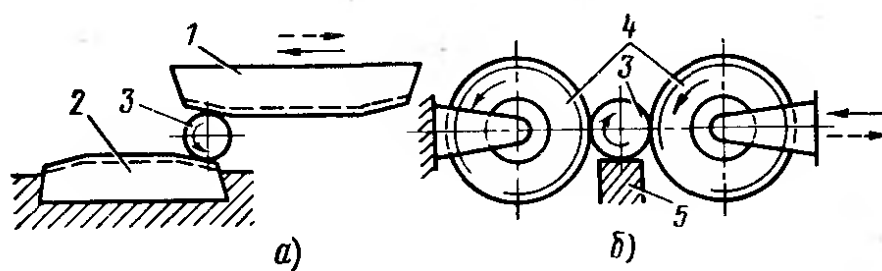


Рис. 33. Схеми накатки різьби: (а) плоскими плашками; (б) роликами.

1 - рухома плашка, 2 - нерухома плашка, заготовка, 4 - ролики, 5 - напрямна

Плоскими плашками (рис. 33, а) накатують різьби діаметром 3 ... 24 мм і довжиною до 125 мм з точністю 7 ... 9 квалітетів і шорсткістю різьбової поверхні  $Ra\ 2,5 \dots Ra\ 1,25$ . Внаслідок значного зусилля, що діє на заготовку у процесі деформування, виключається можливість накатки різьби на порожнистих деталях. Роликами (рис. 33, б) можна накатувати різьбу і на порожнистих деталях з матеріалу з  $\sigma_b < 1080$  МПа. Точність накатки різьби роликами - 7 ... 5 квалітети, шорсткість –  $Ra\ 0,63 \dots Ra\ 0,32$ . Різьби діаметром до 100 мм накатують на спеціальних верстатах роликами в упор, якщо довжина різьбової поверхні деталі менше 150 мм, і на прохід при довжині більше 150 мм. Накатують різьби також і на верстатах токарної групи, використовуючи нескладні за конструкцією державки з трьома роликами.

## Питання для самоперевірки

1. Які властивості матеріалу визначають можливість обробки його методами обробки тиском?
2. Який вид заготовок використовують при прокатуванні?
3. Якими факторами визначається точність профілю пресованих виробів?
4. Чому під час волочіння неможливо отримати велику ступінь потоншення (обтискання) заготовки?
5. Чому обмежена маса одержуваних об'ємним гарячим штампуванням заготовок?
6. Від чого залежить точність контуру заготовки при вирубуванні?
7. Яка властивість матеріалу заготовки визначає можливість застосування для її обробки витяжку?
8. Чому в індивідуальному виробництві недоцільно застосування гарячого об'ємного штампування?
9. Які матеріали переробляються методом пресування?
10. З якою метою нагрівають матеріал при обробці тиском?
11. Які вироби отримують прокаткою?
12. Вироби якої маси можна отримати гарячим об'ємним штампуванням?
13. Яким способом отримують сталевий дріт  $\varnothing 0,5$  мм?
14. Яким способом виготовляють алюмінієві каструлі?
15. Який спосіб обробки тиском дозволяє одержувати найбільш складні за формою перерізу вироби?
16. Які фактори впливають на пластичність?
17. Яким способом отримують безшовні труби?
18. Який спосіб виготовлення різьби кріплення авіаційних конструкцій є найбільш прогресивним? Чому?
19. Якими способами отримують панелі літальних апаратів?
20. В чому полягає процес витяжки?
21. В чому полягає процес обтяжки?
22. Чому пресуванням можна обробляти як пластичні, так і малопластичні сплави?
23. Яким способом формують з листа довгі частини фюзеляжу до 15 метрів?

24. Яким способом можуть зміцнюватись силові деталі складної конфігурації:

25. Які сплави алюмінію використовують у літакобудуванні для високонавантажених деталей конструкцій (обшивка, шпангоути)?

## ОБРОБКА РІЗАННЯМ

Механічна обробка або обробка різанням широко застосовується при виготовленні авіаційних деталей, а також при доробці вузлів і агрегатів у місцях їх з'єднання. Основними групами деталей, що виготовляються механічною обробкою, є (рис. 34): монолітні панелі, нервюри, шпангоути, лонжерони, деталі та вузли шасі та гідравлічних підйомників, окремі елементи силового набору: стрінгери, полиці лонжеронів та нервюр, фітинги, стикувальні вузли та гребінки, підмоторні рами тощо. За останні роки номенклатура таких деталей істотно розширилася внаслідок збільшення монолітності деталей та посилення вагових допусків, що викликало необхідність знімати з деталей весь «зайвий» метал для приведення всіх перерізів деталей у відповідність до розрахункових.

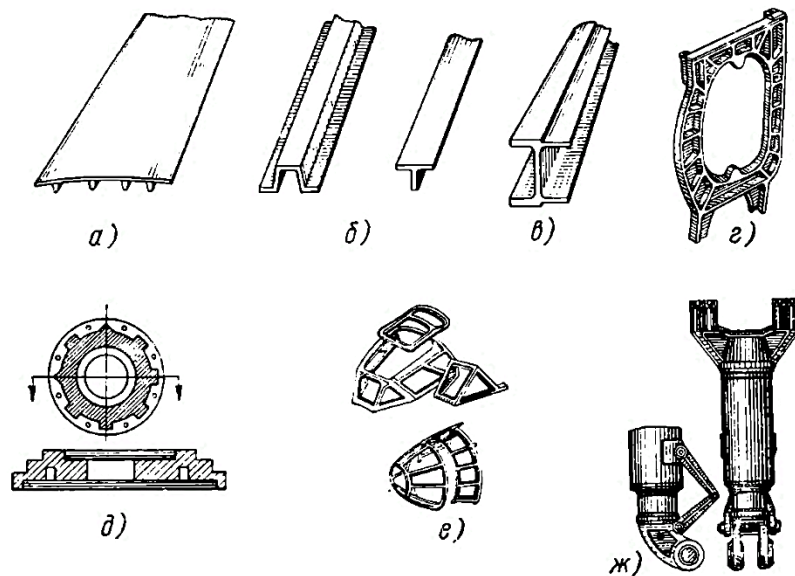


Рис. 34. Типові деталі, що виготовляються обробкою різанням:

*a)* - монолітні панелі; *б)* - стрінгери; *в)* – лонжерони, балки; *г)* - підмоторні рами;  
*д)* - рами, шпангоути; *е)* - деталі ліхтарів; *ж)* - деталі шасі.

Деталі, що підлягають механічній обробці, виконані з алюмінієвих, магнієвих і титанових сплавів, високоміцних, головним чином, хромонікелевих сталей. Заготовки для деталей поставляються у вигляді поковок та штамповок, пресованих профілів та панелей, у вигляді виливків та сортового прокату. Найбільший обсяг механічної обробки посідає фрезерування (близько 75%). Стрингери, лонжерони, монолітні панелі та інші елементи силового набору зазнають фрезерування; точіння застосовується для деталей шасі, підйомників; свердління - для утворення отворів під заклепки та болти.

Для обробки деталей поздовжнього та поперечного силового набору в даний час застосовують поздовжньо-фрезерні верстати, на яких можна обробляти деталі довжиною до 20-30 м. Для обробки монолітних панелей промисловість оснащена також спеціалізованими верстатами, що дають можливість фрезерувати панелі довжиною до 20 м, а в перспективі - до 30 м. Спеціалізованим обладнанням виробництво оснащено для обробки стикувальних елементів (фітінгів, гребінок), підмоторних рам.

Для механічної обробки невеликих корпусних відсіків широкого поширення набули агрегатні верстати, які компонують із нормалізованих елементів (агрегатів). Для зняття припусків та забезпечення необхідної точності розмірів отворів та площин стиків зібраних відсіків фюзеляжів та крил застосовують спеціальні обробні стенди. Для механічної обробки в літакобудуванні широко застосовуються верстати з програмним управлінням (рис. 35). Сучасні літакобудівні заводи оснащені сотнями металорізальних верстатів з числовим програмним керуванням, на яких проводять обробку деталей найбільш економічним способом з найменшими витратами на підготовку виробництва. Механічна обробка забезпечує високу точність формоутворення поверхонь і малу їхню шорсткість. Обсяг механічної обробки становить 20-25% усієї трудомісткості виготовлення літаків.

Обробка конструкційних матеріалів різанням полягає у відокремленні різальними інструментами з заготовки шару матеріалу з метою виготовлення деталі потрібної форми, відповідних розмірів і шорсткості поверхонь.



Рис. 35. Вертикальний фрезерний верстат з ЧПУ для авіації / 5 і більше осей. TORRESMILL®M.TORRES DISEÑOS INDUSTRIALES S.A.U.

Методи формування поверхонь при обробці різальними інструментами є поверхневими, послідовними, тому за продуктивністю і раціональністю використання матеріалів така обробка поступається більш сучасним методам виготовлення деталей - без зняття стружки (точне лиття, точне штампування, висадка тощо). Проте більшості деталей надають остаточної форми і розмірів саме обробкою різанням на металорізальних верстатах, що дозволяє задовольнити зростаючі вимоги щодо точності розмірів і чистоти поверхонь. Обробка різанням значною мірою визначає якість виготовлення машин, їхню точність, довговічність і надійність, а також вартість. Незважаючи на те, що методи обробки деталей на металорізальних верстатах безперервно вдосконалюються, трудомісткість верстатних робіт у машинобудуванні становить найбільшу частку, досягаючи 30...35 % від загальної трудомісткості виготовлення машин.

До основних методів обробки різанням належать: точіння, свердління, фрезерування, стругання, протягання, шліфування (рис. 36).

**Точіння.** На токарних верстатах обробляють різні поверхні тіл обертання: циліндричні, конічні й фасонні, а також поверхні, перпендикулярні до осі обертання заготовки.

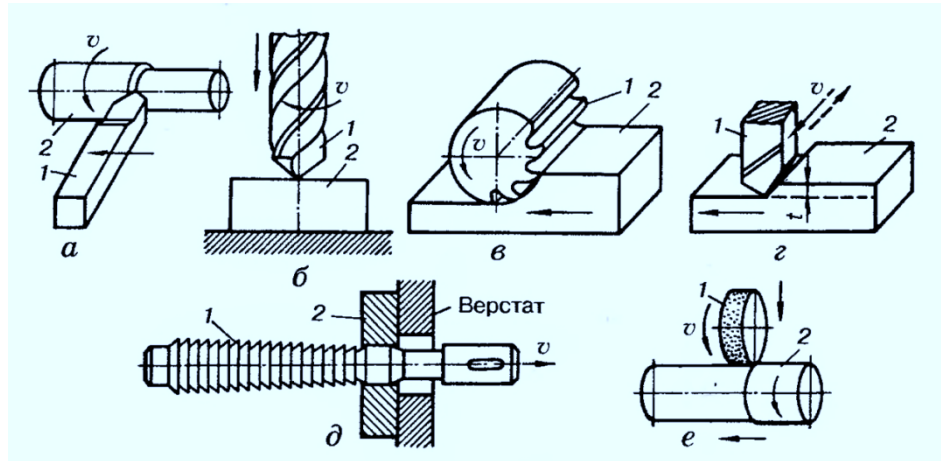


Рис. 36. Схеми основних методів обробки різанням: а) - точіння, б) - свердління, в) - фрезерування, г) - стругання, д) - протягання, е) - шліфування

Крім цього, на токарно-гвинторізних верстатах можна нарізати різцем різьби на циліндричних і конічних поверхнях, а також спіральні канавки на торцевих площинах заготовок (рис. 37). Токарні верстати поділяються на: токарні напівавтомати і автомати одношпindelні та багатшпindelні, револьверні, свердлильно-відрізні, карусельні, токарні і лобові, багаторізцеві, спеціалізовані тощо. З усіх типів верстатів токарної групи на машинобудівних заводах і в ремонтних майстернях найширше застосовують токарно-гвинторізні (рис.1.38), карусельні і револьверні верстати.

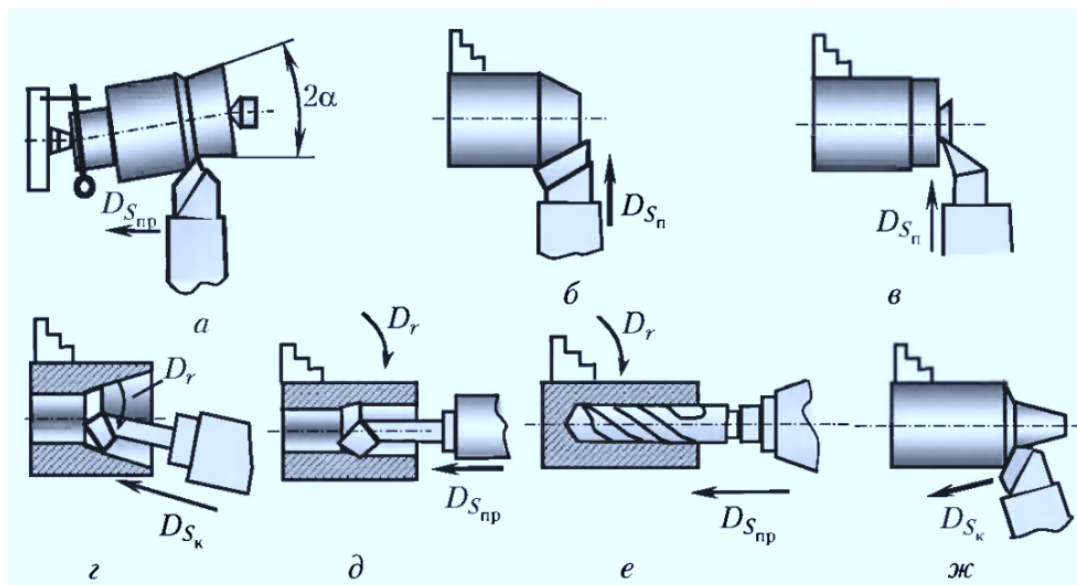


Рис. 37. Деякі схеми обробки поверхонь заготовок на токарно-гвинторізному верстаті: а) - зовнішніх конічних поверхонь; б) - коротких конічних поверхонь



(фасок); в) - відрізання деталей; г, д)- розточування внутрішньої конічної та циліндричної поверхонь; е) - висвердлювання отворів; ж) - обточування конічних поверхонь з будь-яким кутом; Dr - головний рух різання; DSp, Dспр - рух подачі відповідно поперечний і поздовжній; Dск - рух подачі по конусу

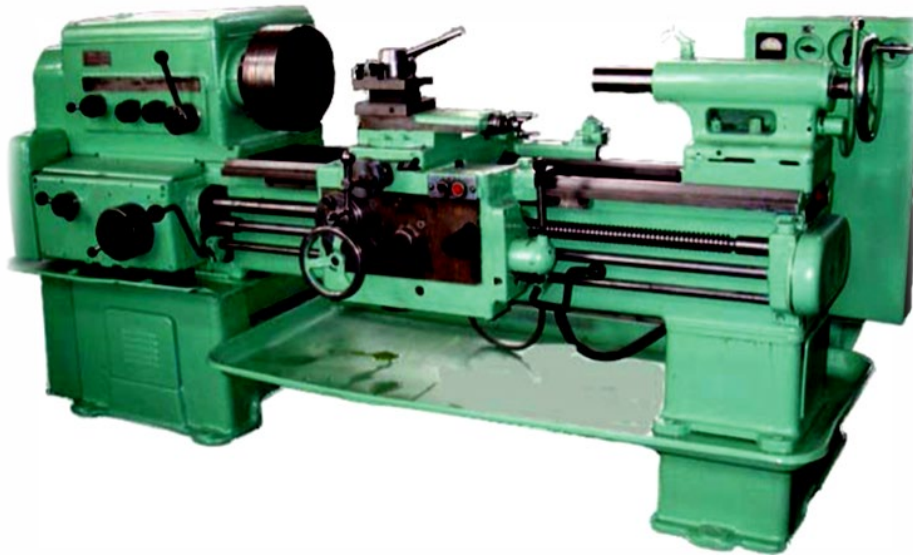


Рис. 38. Токарно-гвинторізний верстат 1К62

**Фрезерування** - це процес обробки різанням, при якому різальний інструмент (фреза) виконує обертальний (головний) рух, а заготовка, що обробляється, - поступальний чи обертальний рух подачі. Фреза - це тіло обертання, на поверхні якого розміщено різальні зубці (рис. 39), а здійснюється фрезерування на фрезерних верстатах (рис. 40). Найбільш розповсюджені типи - вертикально - і горизонтально - фрезерні верстати. Вони відрізняються розташуванням шпинделя - головного вала верстата, на якому кріплять фрезу. У вертикально - фрезерного верстата шпиндель розташований вертикально, у горизонтально - фрезерного - горизонтально. У літакобудуванні широко застосовуються спеціалізовані фрезерні верстати з програмним управлінням (Рис. 35, 41). Головним рухом при фрезеруванні є обертальний рух фрези. Заготовці задається рух подачі  $S$  (мм/хв), що може бути повздовжнім, поперечним і вертикальним. При фрезеруванні в роботі беруть участь одночасно кілька зубів фрези, тому процес відрізняється більш високою продуктивністю, чим при роботі однолезовим інструментом. Плоскі поверхні фрезерують циліндричними (рис. 39,

*a*), торцевими (рис.39, *б*) і кінцевими фрезами (рис. 39, *в*); пази -тристоронні дисковими (рис. 39, *г*), Т-твірні (рис. 39, *д*) тощо.

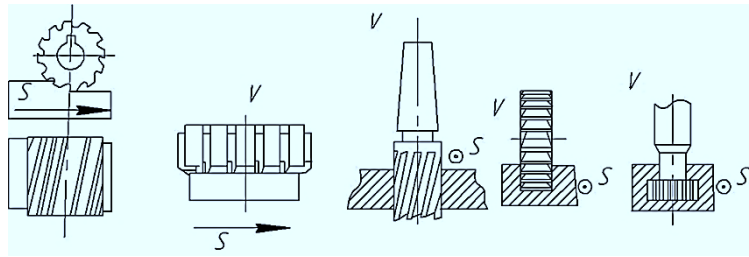


Рис. 39. Фрези циліндричні (*a*), торцеві (*б*), кінцеві (*в*); тристоронні дискові (*г*), Т-твірні (*д*)



*a*



*б*

Рис. 40. *a*) – вертикально-фрезерний верстат; *б*)- горизонтально-фрезерний верстат



*a*



*б*

Рис. 41. *a*) - Інтегрований фрезерний верстат спеціально розроблений для заміни традиційного хімічного фрезерування на механічне поверхневе фрезерування (TORRES SURFACE MILLING ®). *б*) - процес фрезерування

Інтегрований фрезерний верстат (рис. 41) дозволяє точно обробляти кишені панелей обшивки фюзеляжу, вимірюючи в реальному часі за допомогою вбудованої системи ультразвукових вимірювань фактичну товщину кишені. Це замінює традиційний хімічний процес травлення.

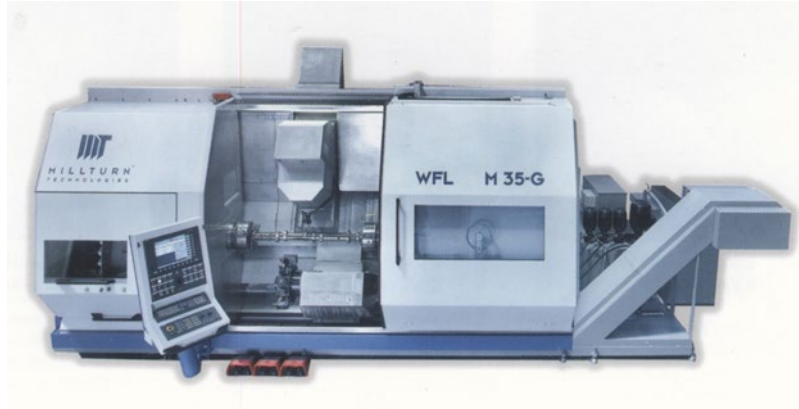


Рис. 42. Зовнішній вид обробного центру

Для виготовлення складних високоточних деталей ЛА, в першу чергу у виробництві за програмою малої (або одиничної) кількості, доцільно використовувати обробні центри - багатоопераційні верстати з числовим програмним управлінням, які можуть здійснювати комплексну механічну обробку 3-вимірних заготовок за допомогою різних інструментів і відповідно використовуючи різні види обробки різання. В залежності від конфігурації такого обробного центру, на ньому можна здійснювати фрезерування, точіння, нарізання різьби, або зубців деталей зубчастих передач, довбання, стругання, свердління, шліфування тощо. На рис. 42 показаний такий обробний центр, а на рис. 43 робочі рухи його елементів. Для різних моделей, звичайно, їх кількість може бути іншою.



Рис.43. Робочі рухи елементів: С1 - обертальний рух шпинделя токарного верстату передньої бабки (прямий і реверсний, фіксація повороту на заданий кут), С2 - так само для пінолі задньої бабки, Z4 - поздовжний рух пінолі, X2, Z2 - рухи поздовжнього і поперечного супортів, X1, Y1, Z1, B1 - відповідні рухи інструментальної багатофункціональної головки (фрезерування, довбання, стругання, шліфування, свердління та ін.).

На рис. 44 наведені приклади деяких типових деталей, отриманих фрезеруванням, та на рис. 45 процес фрезерування лопатки і готові лопатки.

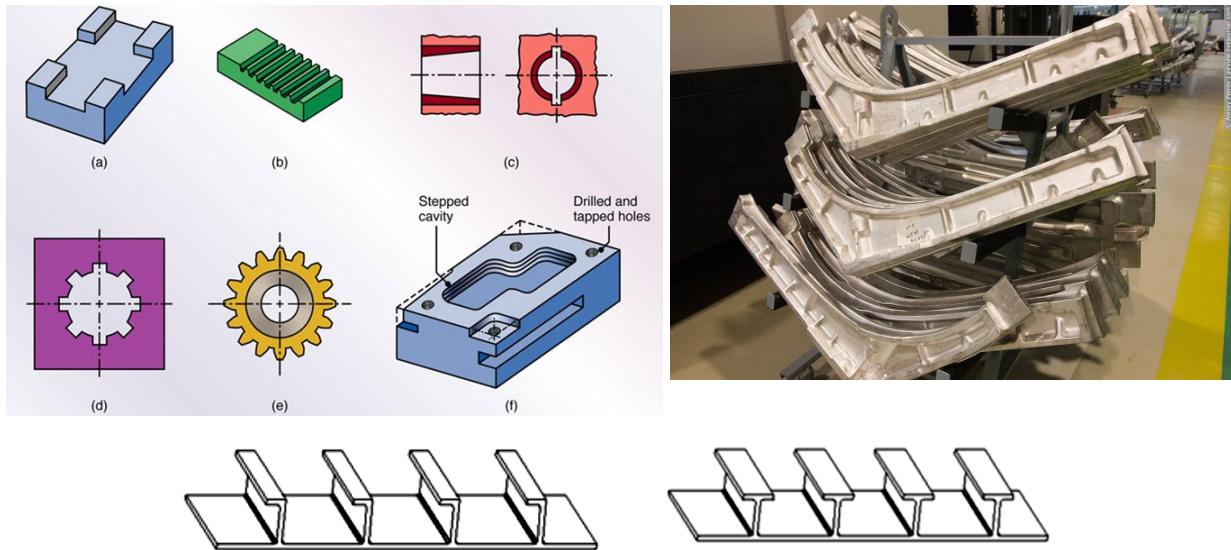


Рис. 44. Типові фрезеровані деталі (а), фрезеровані шпангоути (б), фрезеровані монолітні панелі (в)



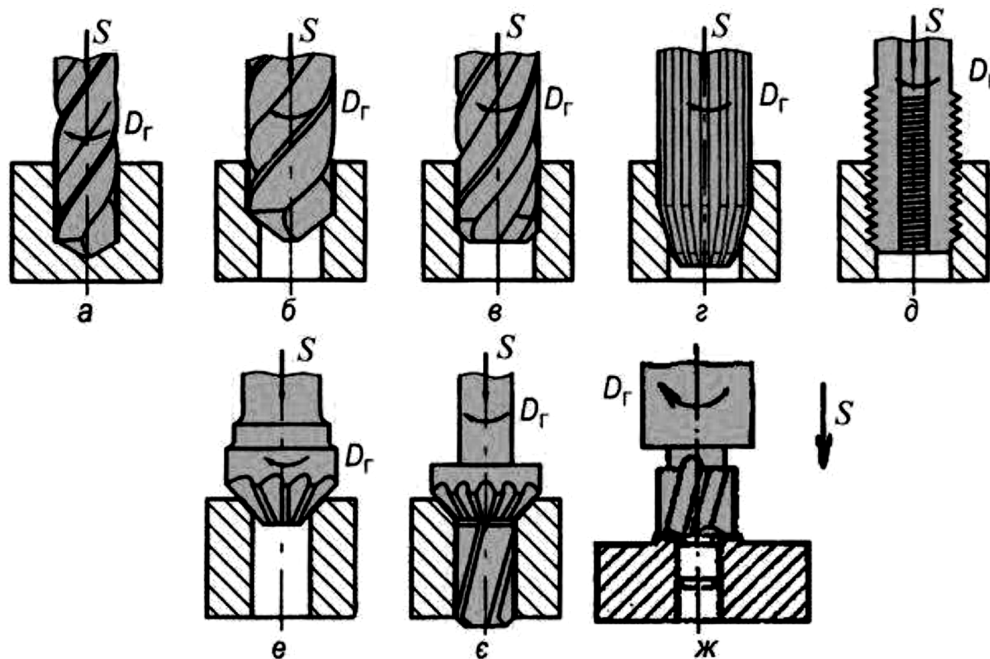
Рис. 45. Процес фрезерування турбінної лопатки (а) та готові фрезеровані лопатки (б) <https://docplayer.com/40504950-Tehnologiya-proizvodstva-letatelnyh-apparatov.html>

**Обробка отворів** настільки поширена операція, що для її виконання, поряд з токарними, застосовуються спеціальні верстати: вертикально- і радіально-свердлильні, горизонтально-розточувальні, координатно-розточувальні, алмазно-розточувальні тощо. Найбільш складною при обробці отворів є операція свердління суцільного матеріалу. В даному випадку на інструмент діють великі сили різання, але його конструкція повинна забезпечити відведення великої кількості стружки. Для цього на інструменті виконують глибокі канавки, що зменшує його жорсткість та міцність). Для свердління отворів у суцільному матеріалі найчастіше застосовують спіральні свердла. Однак при обробці глибоких отворів, при глибині більше 10 діаметрів, спіральні свердла не можуть забезпечити вихід стружки, тому доводиться застосовувати спеціальні свердла (рушничні, гарматні), у яких вихід стружки забезпечується подачею рідини під великим тиском. Через високі навантаження на ріжучі кромки, низької жорсткості інструменту, дряпання стінок отвору стружкою, що відводиться, свердління спіральним свердлом може забезпечити тільки 12...14 квалітети точності, при шорсткості  $Rz=40...80\text{мкм}$ .

На свердлильних верстатах виконують наступні види робіт (рис. 46):

- свердління (рис. 46а) – одержання отвору в суцільному матеріалі свердлом;
- розсвердлювання (рис. 46б) – збільшення діаметра наявного отвору свердлом;
- зенкерування (рис. 46в) – збільшення діаметра наявного отвору зенкером, що забезпечує точність і чистоту поверхні вищі, ніж свердлом;
- розвертання (рис. 46г) – чистова фінішна обробка отвору (завжди виконується після зенкерування);
- нарізання різьби на внутрішній циліндричній поверхні в попередньо оброблених отворах за допомогою мітчика гвинтової канавки (рис. 46д), профіль якої відповідає профілю ріжучої частини;
- зенкування (рис. 46е) – отримання в оброблених отворах циліндричних чи конічних заглиблень під головки гвинтів, болтів, заклепок та інших деталей у

попередньо просвердлених отворах за допомогою інструмента зенківки;  
 - одночасну обробку в отворі, наприклад, циліндричної та конічної поверхонь виконують (рис. 46є) спеціальним комбінованим інструментом;  
 - цекування (рис. 46ж) - це обробка торцевої поверхні отвору цеківкою (торцевим зенкером) для досягнення перпендикулярності плоскої торцевої поверхні отвору відносно його осі.



*Dr – головний рух різання; S – рух подачі*

Рис. 46 – Схема обробки отворів на свердлильному верстаті для свердління (а), розсвердлювання (б), зенкерування (в), розвертання (г), нарізання внутрішньої різьби мітчиком (д), зенкування конічної поверхні в отворі (е), обробка циліндричної та конічної поверхні в отворі комбінованим інструментом зенкер-зенківка (є), цекування (ж)

Істотне підвищення точності можна отримати, проводячи остаточну обробку додатковим розсвердлюванням. При цьому можна вибрати глибину різання "t" досить малою, щоб забезпечити суттєво менші сили різання та об'єм стружки, що не ушкоджує стінки обробленого отвору. При розсвердленні точність може бути підвищена до 10-12 квалітетів. При обробці більш точних отворів, після свердління, застосовують операції зенкерування та розвертання.

За рахунок збільшення кількості ріжучих кромки інструменту при суттєвому зниженні глибини різання (навантажень) вдається підвищити точність отворів - при зенкеруванні до 9-10 квалітетів точності ( $Ra = 2,5 - 5$ ), а при ровертанні до 6-8 квалітетів ( $Ra = 0,63 - 1,25$ ).

**Отвори для заклепок в деталях ЛА, що з'єднуються, свердлять або пробивають.** Найбільш поширеним способом є свердління отворів, тому що при цьому вони виходять якіснішими. Міцність заклепувальних з'єднань з пробитими для заклепок отворами менше, ніж таких з'єднань зі свердленими отворами. Найбільш досконалим є свердління та зенкування (утворення гнізда під головку потайної заклепки) деталей у всьому зібраному пакеті спеціальним інструментом - свердлом-зенківкою одночасно за один хід інструменту. При цьому способі добре збігаються отвори у всіх деталях пакета, що з'єднується, і центр отвору з центром гнізда під потайну головку заклепки. При застосуванні свердла-зенковки трудомісткість виконання свердлильно-зенкувальних робіт менше, ніж при роздільному свердлінні та застосуванні двох інструментів - свердла та зенковки.

В авіаційній промисловості найбільш поширені такі види свердлильно-зенкувального обладнання: ручні пневматичні та електричні дрилі; універсальні свердлильні верстати; спеціальні свердлильно-зенкувальні верстати (автомати) та установки; свердлильно-зенкувальні та агрегатні головки; встановлені в стапелях свердлильно-зенкувальні агрегати (рис. 47).

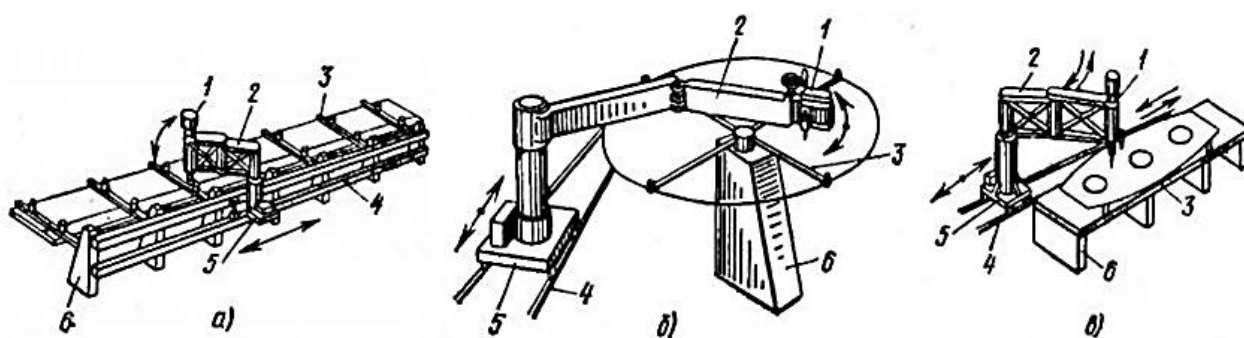


Рис. 47. Свердлильно-зенкувальні установки:

- а - установка для лонжеронів і панелей; б - установка для шпангоутів; в - установка для нервюр: 1 - свердлильна головка; 2 - радіально-свердлильний верстат; 3 - пристрій, що підтримує; 4 - напрямні; 5 - візок верстату; 6 - колони (А.Л.Абібов / Технологія літакобудування)



Рис. 48. Роботизований комплекс свердління-зенкування та клепки фюзеляжів літаків (Фото igus)

Роботизовані комплекси суттєво підвищують ефективність за рахунок свердління-зенкування та клепки панелей одинарної та подвійної кривизни (рис. 48).

Крім зазначених, застосовуються і ряд інших схем обробки металів різанням: **стругання, довбання, протягування** (рис. 49), шевінгування тощо.

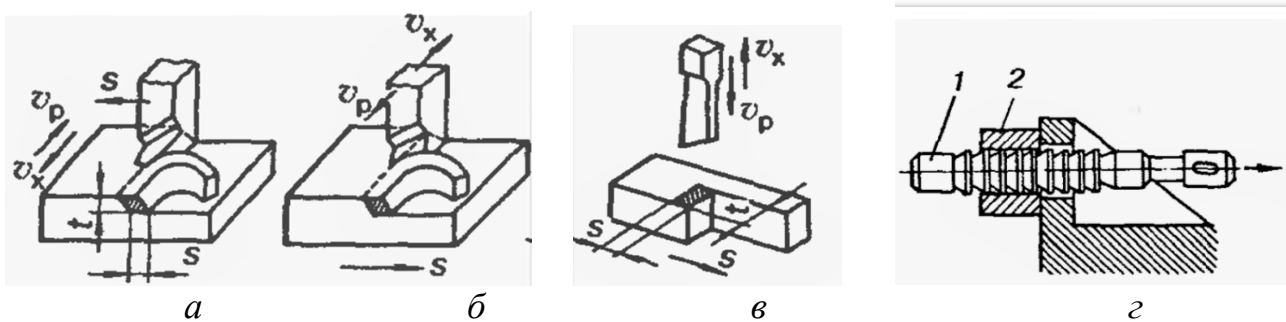


Рис. 49. Схеми стругання (а),(б), довбання (в), протягування (г)

При **шліфуванні** інструментом служить абразивний шліфувальний круг. Шліфуванням роблять чистову й оздоблювальну обробку деталей з високою точністю. Шліфують найрізноманітніші матеріали, а для заготовок із загартованих сталей шліфування – найбільш розповсюджений метод чистової обробки. При шліфуванні (рис. 50) головним рухом є обертання шліфувального круга  $V$  (м/с).



Заготовка переміщується в зворотно-поступальному напрямку поздовжньою подачею  $S_{pd}$  (мм/хв). Для обробки поверхні на всю ширину заготовка або шліфувальний круг переміщуються переривчасто з поперечною подачею  $S_p$  (мм/дв.хід) після кожного подвійного поздовжнього ходу. Періодично здійснюється і подача  $St$  (мм) на визначену глибину різання наприкінці поперечного ходу.

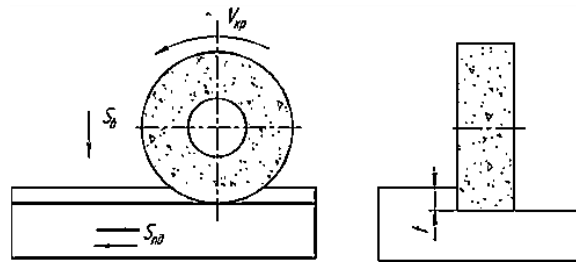


Рис. 50. Схема процесу шліфування на плоскошліфувальному верстаті

### Чистові методи обробки

Шліфування в ряді випадків не відповідає вимогам до якості обробки важливих деталей, тому застосовують методи обробки, які забезпечують більш високу якість поверхні. Найпоширенішими серед таких методів є хонінгування, суперфініш, притирання і полірування.

*Хонінгуванням* називають метод чистової обробки за допомогою дрібнозернистих абразивних брусків, які вставлені в спеціальний пристрій (хонінгувальну головку). Разом з нею вони здійснюють головний обертальний рух і поступальне переміщення вздовж осі, що є рухом подачі (рис. 51, а). Під дією пружин бруски в процесі роботи притискаються до оброблюваної поверхні, забезпечуючи точність обробки отворів ІТ7...ІТ6 і шорсткість до  $Ra = 0,04$ , овальність і конусність до 5 мкм.

*Суперфініш* - метод дуже тонкої чистової обробки з метою утворення особливо гладкої поверхні. Суперфінішна головка 2 (рис. 51, б) за допомогою встановлених у ній дрібнозернистих абразивних брусків знімає з деталі 1 гребінці шорсткості, що залишилися від попередньої обробки. При цьому поєднуються обертальний та поступальний рухи вздовж осі оброблюваної деталі 7,

коливальний (осцилюючий) рух брусків при інтенсивному змащенні. Коли в процесі обробки гребінці згладжуються, мастило утворює безперервну плівку, тиск бруска недостатній, щоб її прорвати, і різання припиняється. Суперфінішем досягають шорсткості поверхні  $Ra = 0,02$ .

*Притирання* - один з поширених методів чистової обробки, який забезпечує виготовлення дуже точних розмірів (до 0,1 мкм) і дуже високої якості поверхні  $Ra = 0,02$ . Це остаточна обробка, що здійснюється за допомогою притира 2 (рис. 51, в), на поверхню якого наноситься дрібний абразивний порошок 7, змішаний з маслом, або абразивна паста. В процесі притирання відбувається відносно переміщення з невеликою швидкістю оброблюваної деталі 3 і притира 2. Притирання проводиться на верстатах і вручну.

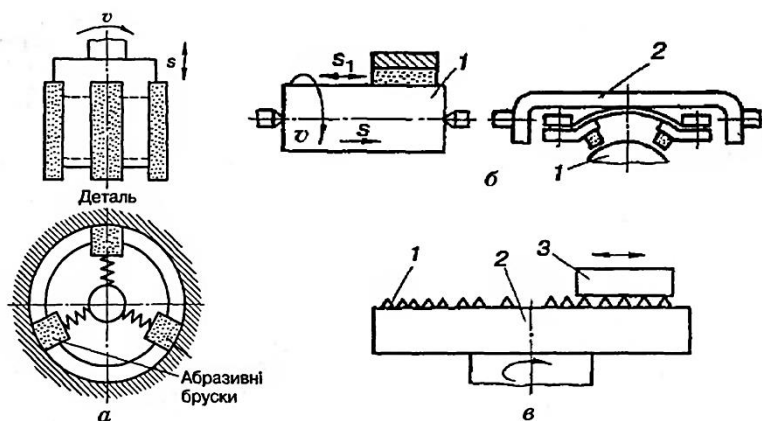


Рис. 51. Схеми чистової обробки поверхонь: а) - хонінгування; б) - суперфініш; в) - притирання

**Полірування** - це процес чистової обробки дрібнозернистим абразивом, змішаним із зв'язкою (маслом, сумішшю воску, парафіну або сала з гасом) і нанесеним на поверхню круга або стрічки з м'якого еластичного матеріалу. Поліруванням можна обробляти деталі найскладнішої конфігурації. При цьому дефекти форми, набуті деталлю під час попередньої обробки, не виправляються, проте нерівності згладжуються, шорсткість досягає  $Ra = 0,02$  і поверхня набуває дзеркального блиску. Полірування підвищує антикорозійну стійкість і міцність від утомленості, тому цій обробці піддають деталі, які працюють у потоці газу або рідини (наприклад, турбінні лопатки), при знакозмінних навантаженнях тощо.

Полірування проводять перед нанесенням гальванічних покриттів і з декоративною метою.

Зубчасті колеса, щодо точності й шорсткості поверхонь яких ставлять підвищені вимоги, після зубонарізання піддають чистовій обробці - *шевінгуванню*, а після термічної обробки використовують *зубошліфування*.

### **Питання для самоперевірки**

1. Чому під час свердління важко забезпечити низьку шорсткість обробленої поверхні?
2. Чому спіральним свердлом неможливо обробляти "глибокі" отвори?
3. Якими методами обробки різанням, крім фрезерування, можна отримати плоску поверхню?
4. С якою метою проводиться розгортання отворів?
5. На яких металорізальних верстатах неможливо обробляти отвори?

### **Тестові питання**

1. Які поверхні за формою можливо отримати токарним методом:
  - а). плоскі і циліндричні;
  - б). поверхні обертання і гвинтові поверхні;
  - в). будь-які поверхні
2. Який метод обробки отворів дозволяє отримувати більш точні поверхні:
  - а). свердління;
  - б). розгортання;
  - в). зенкерування.
3. Чому обробка більш точної поверхні різанням дорожче:
  - а). через необхідність зниження швидкості різання;
  - б). через застосування більш дорогого верстата і інструменту;
  - в). через обробку поверхні за кілька проходів.
4. Чому отримання різанням поверхні з малою шорсткістю дорожче, ніж з великою:
  - а). через необхідність зменшення подачі;

- б). через застосування більш дорогого верстата і інструменту;
- в). через обробку поверхні за кілька проходів.

5. Якими фрезами обробляють складні за формою поверхні:

- а). фасонними та кінцевими;
- б). циліндричними і кінцевими;
- в). фасонними і грибковими.

### **Хімічне фрезерування (розмірне контурне травлення) монолітних панелей**

При хімічному фрезеруванні здійснюється процес вибіркового фігурного хімічного розчинення металу з окремих ділянок поверхні заготовок у розчинах лугів або кислот. Заготовка покривається захисною плівкою. На ділянках, що підлягають травленню, ця плівка видаляється, потім заготовка занурюється в розчин, що травить, який розчиняє метал на незахищених ділянках (рис.52).

Перевагою хімічного фрезерування в порівнянні з механічним фрезеруванням є можливість отримання панелей найрізноманітніших форм та розмірів із широкими та вузькими пазами при забезпеченні високої точності. При хімічному фрезеруванні виключаються деформації панелей. Метод дозволяє створювати більш рівномірні конструкції. Хімічно фрезеровані панелі практично не вимагають подальшого ручного слюсарного доопрацювання і після відпрацювання місцевих ускладнень форми (отвори, пази тощо) передаються до складання. При цьому процесі показники міцності поверхневого шару вихідного матеріалу не покращуються через відсутність поверхневого пластичного деформування (наклепу).

Видалення тонкого шару на великих пласких або кривих поверхнях; тонколистове вирубання; малий набір інструментів і низька вартість устаткування; підходить для дрібносерійного виробництва. Продуктивність процесу по товщині шару, що знімається коливається в межах 0,025-0,1 мм / хв. Точність обробки - від  $\pm 0,5$  до  $\pm 0,015$  мм, шорсткість поверхні –  $Rz= 40...10$  мкм.

У літакобудуванні розмірне контурне травлення застосовується в основному для зняття припуску по товщині, на тонкостінних, мало навантажених деталях

обшивки з метою усунення місцевих надлишків товщини, що обумовлюються сталістю перерізів стандартних листів та профілів. Розмірне контурне травлення застосовується також для збільшення ступеня монолітності конструкцій (заміна приклепаних посилень у місцях вирізів під люки монолітними потовщеннями (рис. 52, а) місцеві потовщення в зоні зварних швів, місцеві посилення листів на ділянках зосереджених сил — у місцях закладки стрінгерного набору, у місцях свердлень під болти кронштейнів підвіски елеронів та закрилків). На рис. 52, б показано виготовлення ребристих оболонок – елементів корпусу ракети. Заготовки з алюмінієвого сплаву після профілювання на листозгинальній машині піддавались хімічному фрезеруванню. Така обробка суттєво покращує коефіцієнт жорсткість – маса. Хімічне травлення позитивно впливає на корозійну стійкість матеріалів, зменшує концентрацію напружень навколо нерівностей поверхні листових деталей. Спосіб обробки є енергозберігаючим процесом, тому що вимагає в 3-5 разів менше витрат енергії, ніж при обробці різанням.

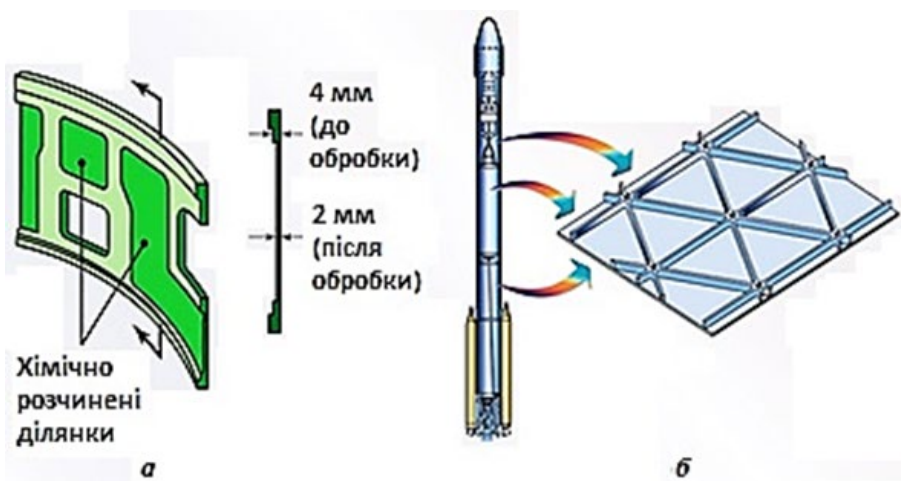


Рис. 52. Виготовлення ребристих оболонок – елементів корпусу ракети

Manufacturing, Engineering & Technology, Fifth Edition, by Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid.  
ISBN 0-13-148965-8. © 2006 Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ. All rights reserved.

Значно рідше розмірне контурне травлення застосовується для отримання деталей з клиноподібними перерізами та для обробки деталей, що мають велику товщину. Якщо деталь має жорсткість, достатню для надійного затискання при механічній обробці, її доцільніше обробляти на металорізальних верстатах.

Розмірним контурним травленням можна обробляти деталі зі сплавів на основі алюмінію, титану, вуглецевих і низьколегованих сталей, нержавіючих

жаростійких сталей тощо. Трудомісткість травлення в кілька разів нижче обробки на фрезерних верстатах при низькій кваліфікації виконавців.

## **ЗВАРЮВАННЯ**

Область зварювання об'єднує групу технологічних процесів з'єднання, роз'єднання та в ряді випадків обробки матеріалів з використанням місцевого нагріву: власне зварювання, термічне різання, наплавлення, напилення, адитивні методи тощо.

Зварювання – це технологічний процес отримання нероз'ємних з'єднань твердих матеріалів за рахунок створення міжатомних і міжмолекулярних сил зчеплення. Міжатомні зв'язки між частинами заготовок можуть бути отримані в результаті спільної кристалізації після розплавлення певних зон частин, що з'єднуються, за рахунок місцевої пластичної деформації і при взаємній дифузії атомів частин, що з'єднуються. Зварювання широко використовують при виготовленні нероз'ємних з'єднань металевих виробів і конструкцій, для з'єднання деяких неметалевих матеріалів (пластмас, скла, деяких гірських порід, смол), а також металів з неметалевими матеріалами - керамікою, графітом, склом та ін. Проте найважливіше значення має зварювання металів, що як й інші способи обробки металів, широко застосовують у сучасному машинобудуванні і в будівництві.

Способи зварювання класифікують за формою введеної енергії, яка визначає клас зварювання. Всі процеси зварювання здійснюються з використанням двох форм енергії - термічної і механічної. Виходячи з цього, зварювання поділяють на три класи: термічний, термомеханічний і механічний (рис 53).

**Термічне зварювання** ґрунтується на частковому плавленні елементів з'єднання. При цьому кромки цих елементів (основний метал) і в більшості випадків додатковий (присадний) метал нагрівають до рідкого стану, утворюючи загальну зварювальну ванну. Після віддалення джерела теплоти метал ванни твердіє, утворюючи зварний шов, який з'єднує зварювані елементи. До

термічного класу належать такі види зварювання: дугове, газове, електрошлакове, індукційне, термітне, плазмове, електронно-променеве, лазерне та деякі інші (рис. 54).

При **термомеханічному** зварюванні зварне з'єднання утворюється нагріванням зварюваних деталей до пластичного стану або до початку плавлення і додатковим прикладанням механічних зусиль стисканням.

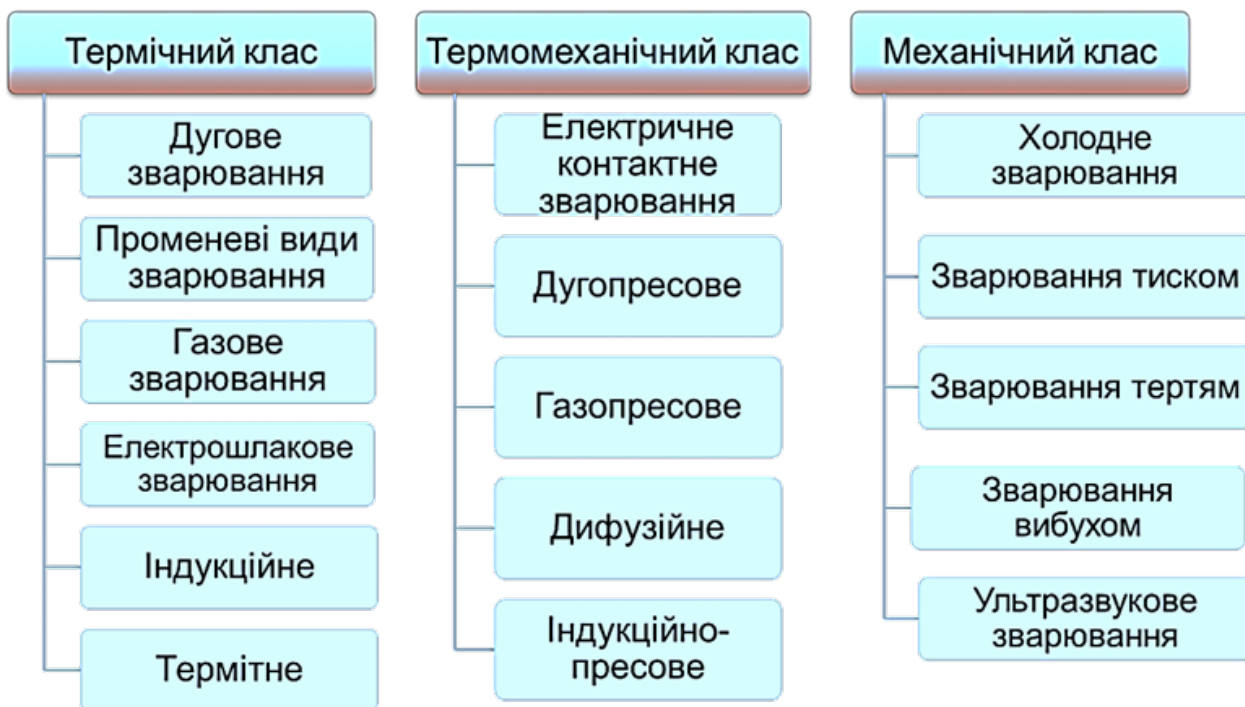


Рис. 53. Класифікація способів зварювання за формою енергії, що використовується для утворення зварного з'єднання



Рис.54. Деякі термічні способи зварювання

До цього класу належать електричне контактне, дугопресове, газопресове, дифузійне, індукційно-пресове зварювання (рис.55). Механічне зварювання ґрунтується на використанні різних видів механічної енергії (холодне зварювання, зварювання тиском, тертям, вибухом, ультразвукове) .

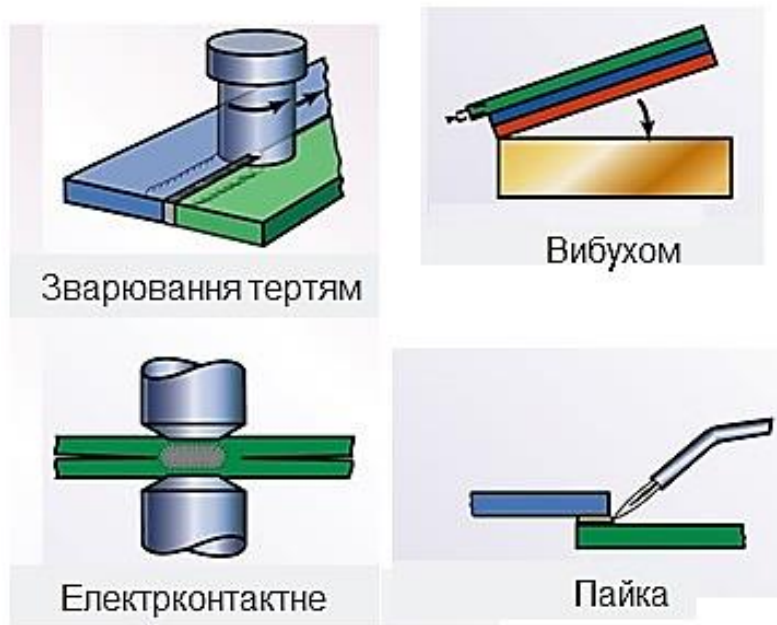


Рис.55. Деякі механічні, термомеханічні способи зварювання та пайка

За ступенем механізації зварювання поділяють на ручне, напівавтоматичне і автоматичне. Крім того, кожний вид зварювання може мати особливості за технічними і технологічними ознаками. Наприклад, дугове зварювання можна виконувати дугою прямої або посередньої дії, плавким або неплавким електродом, з захистом металу газом, флюсом або іншим способом.

Найпоширенішими видами зварювання є дугове, контактне і газове.

У виробництві ЛА найбільш часто застосовують зварювання, що забезпечує високоефективний захист зварювальної ванни (дугове зварювання в середовищі інертних газів (рис. 56) або у вакуумі електродами, плавкими і неплавкими), а також зварювання із застосуванням висококонцентрованих джерел тепла, що забезпечує найменшу зону термічного впливу і мінімальні залишкові деформації: променеву, плазмову та лазерну (рис. 59). Вони застосовуються для зварювання сталевих алюмінієвих і титанових деталей - обшивок, оболонок, роторів, панелей,



рам, балок, стійок шасі, ємностей, відсіків (рис. 57) тощо. Каркасні вузли і панелі фюзеляжу, а також стільникові панелі з титанових сплавів і жароміцних сталей отримують за допомогою контактного зварювання (рис. 60), а кільцеві заготовки - контактним зварюванням на стикових машинах. В галузі технології отримання зварних з'єднань освоюються способи зварювання в твердій фазі (дифузійна, магнітно-імпульсна, вибухом, тертям), а також методи зниження деформацій зварних конструкцій. Використовуються гнучкі інтегровані технології та спеціальне обладнання, що дозволяє на одному робочому місці виконувати всю підготовку під зварювання, зварювання та зональну термічну обробку з контролем якості. Лінійне зварювання тертям застосовується у виробництві малих і великих деталей літаків: блисків (лопаткових дисків), затискачів, кронштейнів, фурнітури, петель, нервюр крила, рейок сидінь, рам фюзеляжу, перемичок, деталей дверей тощо.

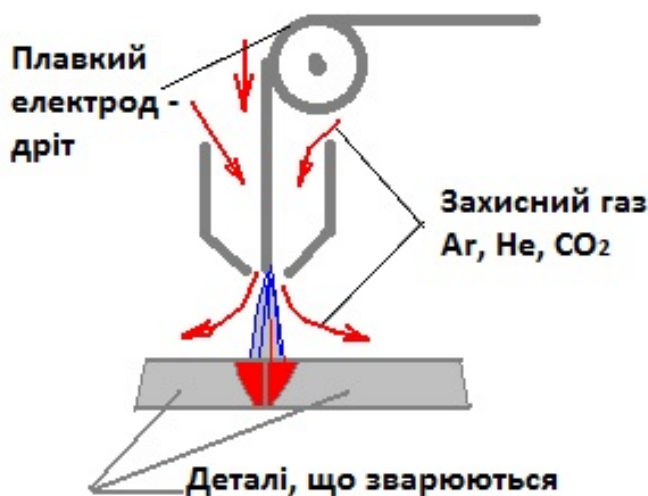
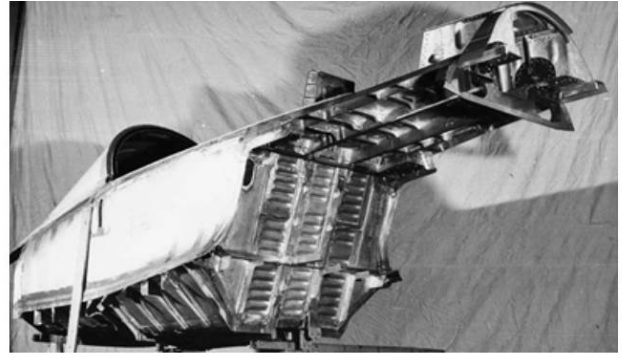
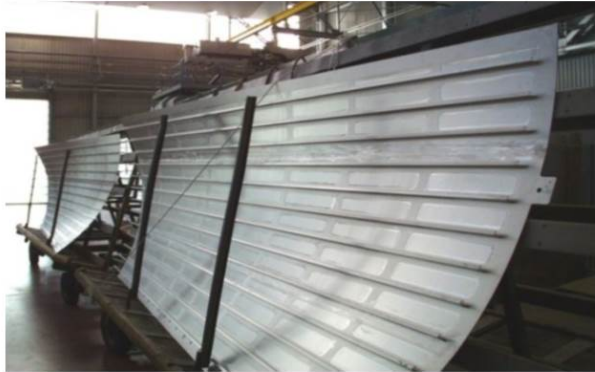


Рис. 56. Аргоно-дугове зварювання алюмінію в захисних газах (MIG/TIG).  
 MIG - дугове зварювання плавким електродом у захисному інертному газі  
 TIG - дугове зварювання неплавким (вольфрамовим) електродом у захисному інертному газі

Ефективним способом отримання нероз'ємних з'єднань деталей з високолегованих жароміцних сталей та титанових сплавів є високотемпературне паяння, що застосовується при виготовленні камер згоряння, турбін, компресорів високого тиску, панелей із стільниковим заповнювачем (рис.58) та ін. вузлів.



Зварний паливний бак (а) і кабіна пілота (б) винищувача МіГ-29М

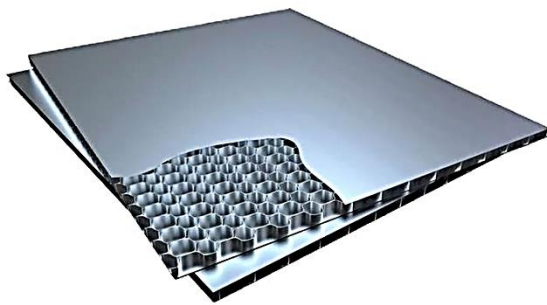


Зварна панель із сплаву 1424



Перша ступінь Falcon 9, виготовлена з сплаву 2198 із застосуванням ЗТП (зварювання тертям з перемішуванням)

Рис. 57. Зварні конструкції літальних апаратів

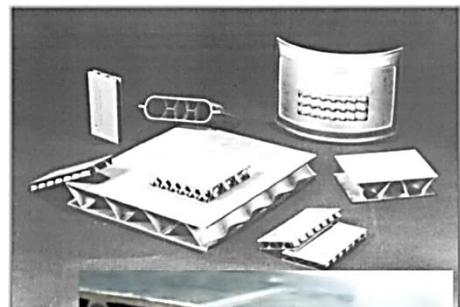
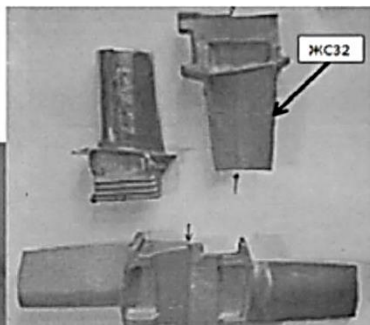


Сотова (стільниково) панель, виготовлена з фольги з використанням дифузійного зварювання і суперпластичного деформування

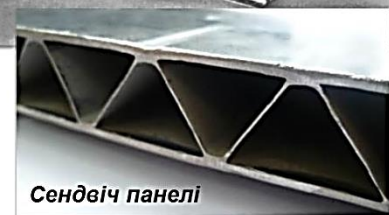
Лопатка отримана з 2х частин дифузійним зварюванням



Место сварки



Сендвіч панелі



Паяна сотова модель



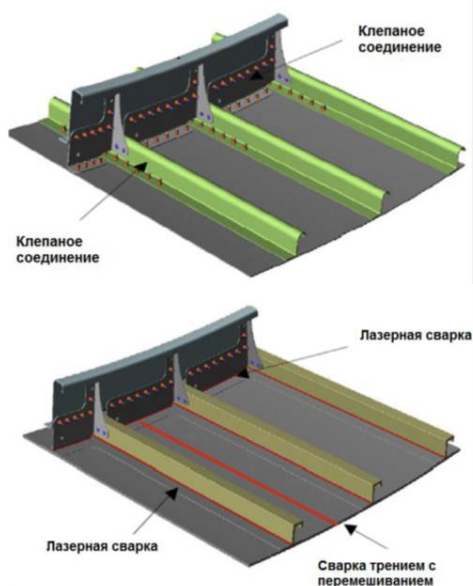
Рис. 58. Приклади застосування зварювання (також, паяння) у виробництві стільникових панелей та турбінних лопаток



Рис. 59. Лазерне зварювання при складанні літака А318 корпорацією Airbus дозволило зменшити вагу і прискорити його виробництво. На нижніх панелях фюзеляжу А320 застосоване лазерне зварювання стрингерів та обшивки, що суттєво зменшило кількість кріплення.



Рис. 60. Зварювання елементів панелі способом електричного контактного точкового зварювання (в Lynn Welding)



*Варианти виготовлення панелей:*

*а – клепана панель; б – зварена лазером панель; в – панель зварена методом ЗТП (зварювання тертям з перемішуванням); г – лазерний зварювальний робот Laser Weld 8R60*

Свариваемые алюминий-литиевые сплавы третьего поколения  
Антипов В.В., к.т.н. Вахромов Р.О., Оглодков М.С., Романенко В.А.,  
Пантелеев М.Д. (ФГУП «ВИАМ»),

Рис. 61. Варіанти виготовлення панелей: клепана, зварена лазерним променем, зварена методом зварювання тертям з перемішуванням.

### Тестові питання

1. Чому при зварюванні плавленням необхідне потужне концентроване джерело теплової енергії?
  - а). Для забезпечення розплавлення з'єднаних заготовок.
  - б). Для забезпечення розплавлення локальних зон з'єднаних частин заготовок.
  - в). Для забезпечення безпеки персоналу.
2. В яких випадках застосовуються методи зварювання?
  - а). Зварювання застосовують при виготовленні не різних з'єднань металевих виробів і конструкцій.
  - б). Зварювання застосовують при виготовленні різних з'єднань металевих виробів і конструкцій.

в). Зварювання застосовують при виготовленні не рознімних з'єднань металевих виробів і конструкцій, деяких неметалевих матеріалів, металів з неметалами.

3. Назвіть раціональні області застосування зварювання в захисних газах.

а). Зварювання хімічно активних у нагрітому стані сплавів на основі алюмінію, титану в аерокосмічній промисловості, суднобудуванні, машинобудуванні;

б). Зварювання хімічно активних у нагрітому стані сплавів на основі алюмінію, титану в умовах космічного простору;

в). Зварювання хімічно активних у нагрітому стані сплавів на основі алюмінію, титану в морський воді.

4. Яка основна умова зварювання металів плавленням?

а). забезпечення розплавлення з'єднуваних заготовок.

б). забезпечення розплавлення локальних зон з'єднуваних частин при збереженні форми і властивостей матеріалу основної (більшої) частини заготовок.

в). забезпечення пластичної деформації зон з'єднуваних частин при збереженні форми і властивостей матеріалу основної частини заготовок.

5. Яка основна умова електроконтактного зварювання?

а). Нагрів зони контакту заготовок струмом високої щільності з механічним стисканням;

б). Механічне стискання заготовок після їх нагріву в дуговій електричній печі;

в). Механічне стискання заготовок після їх нагріву в індукційній електричній печі;

6. У яких випадках раціонально застосовувати газове зварювання?

а). При виготовленні листових і трубчастих конструкцій з сталі товщиною більше 5 мм.;

б). При зварюванні тонкостінних посудин для газу;

в). При виготовленні листових і трубчастих конструкцій з сталі завтовшки 3...5 мм.

7. Яке обмеження розмірів зварних конструкцій?

- а). Від 5000 мм до 1 мм;
- б). Від 1000 мм до 1 мм;
- в). Не обмежені;

8. У чому полягають переваги лазерного та електронно-променевого зварювання?

- а). Утворення кутового шва ;
- б). Утворення таврового шва;
- в). Утворення кинджального шва;

9. Перерахуйте складові витрат при аргонодуговому зварюванні;

- а). Електроенергія, захисний газ, електродний дріт
- б). Електроди з покриттям, електроенергія, вода;
- в). Електроенергія, електроди з покриттям.

10. Перерахуйте складові витрат при електродуговому ручному зварюванні.

- а). Електроенергія, захисний газ, електродний дріт
- б). Електроди з покриттям, електроенергія, вода;
- в). Електроенергія, електроди з покриттям.

11. Який вид зварювання найбільш продуктивний?

- а). електродуговий;
- б). під флюсом;
- в). газовий;

12. Яким видом зварювання можливо з'єднання листів з алюмінієвого сплаву АМгб:

- а). Електродуговим, автоматичним під флюсом;
- б). Аргонодуговим, електроконтактним;
- в). Газовим, електронно-променевим

13. Який вид зварювання найбільш дорогий:

- а). електродуговий;
- б). аргонодуговий;
- в). газовий;

14. Якими способом зварювання з'єднують труби при прокладанні магістральних газопроводів:

- а). Електродуговим, електроконтактним;
- б). Електродуговим під флюсом, аргонодуговим;
- в). газовим;

15. Які види зварювання використовуються при будівництві корпусів суден зі сталі:

- а). Електродугове, автоматичне під флюсом;
- б). Електроконтактне;
- в). електронно-променеве;

16. Для яких цілей використовується стикове електроконтактне зварювання:

- а). Для зварювання заготовок інструменту;
- б). Для зварювання будівельних конструкцій;
- в). Для зварювання корпусів суден, панелей літаків;

## **ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ**

Методи електрофізичної та електрохімічної обробки ґрунтуються на енергетичній дії різних електрофізичних, електрохімічних, хімічних, механічних процесів на тверде тіло, при яких від нього відокремлюються або додаються частинки і утворюється деталь заданих форми і розмірів.

В залежності від форми енергії, необхідної для здійснення технологічної дії на заготовку ці методи можна поділити на групи (рис. 62):

- термічні,
- електрохімічні та хімічні,
- механічні.

Так, для прикладу, електроерозійна обробка струмопровідних матеріалів ґрунтується на використанні теплової енергії електричних розрядів, які збуджуються між інструментом і заготовкою; електрохімічна - на явищі анодного розчинення в електролітах; хімічна - на видаленні поверхневого шару заготовки або утворенні захисного шару в результаті хімічних реакцій (рис. 63).



Рис. 62. Класифікація методів електрофізичної та електрохімічної обробки матеріалів

Променеві методи обробки матеріалів полягають в нагріванні, плавленні та випаровуванні матеріалу в зоні обробки під дією енергії потоків високоенергетичних частинок. Ці методи ґрунтуються на фізичних процесах, що відбуваються при взаємодії потоків електронів, фотонів, іонів, молекул і атомів робочого середовища з матеріалом заготовки. До цих методів відносять методи електронно-променевої, лазерної, іонно-вакуумної та плазмової обробок. Ультразвукова розмірна обробка, гідроабразивна обробка ґрунтується механічній дії частинок абразиву на поверхню заготовки.

Ці методи порівняно з іншими мають такі переваги: їх доцільно застосовувати для обробки конструкційних матеріалів, що мають низьку оброблюваність лезовим та абразивним інструментом, у тому числі високолегованих сталей, твердих сплавів, феритів, кераміки, напівпровідників,



ситала тощо; завдяки простоті кінематики формоутворення цими методами можна обробляти деталі, які неможливо обробити іншими способами (наприклад, глухі фасонні отвори, порожнини складної форми, отвори з криволінійною віссю, отвори діаметром порядку сотих часток міліметра); можливість відтворення (копіювання) форми інструмента відразу по всій оброблюваній поверхні заготовки при звичайному поступальному русі інструмента (прес-форми, деталі лопаток турбін тощо); за відсутності силової дії на тонкостінні нежорсткі деталі застосовується хімічного фрезерування панелей ЛА; обробку цими методами легко автоматизувати.

При обробці звичайних конструкційних матеріалів механічна обробка різанням забезпечує більш високу продуктивність і точність, ніж електрофізичні і електрохімічні методи обробки, тому вона переважно використовується для виготовлення деталей з важкооброблюваних матеріалів і складних за формою.

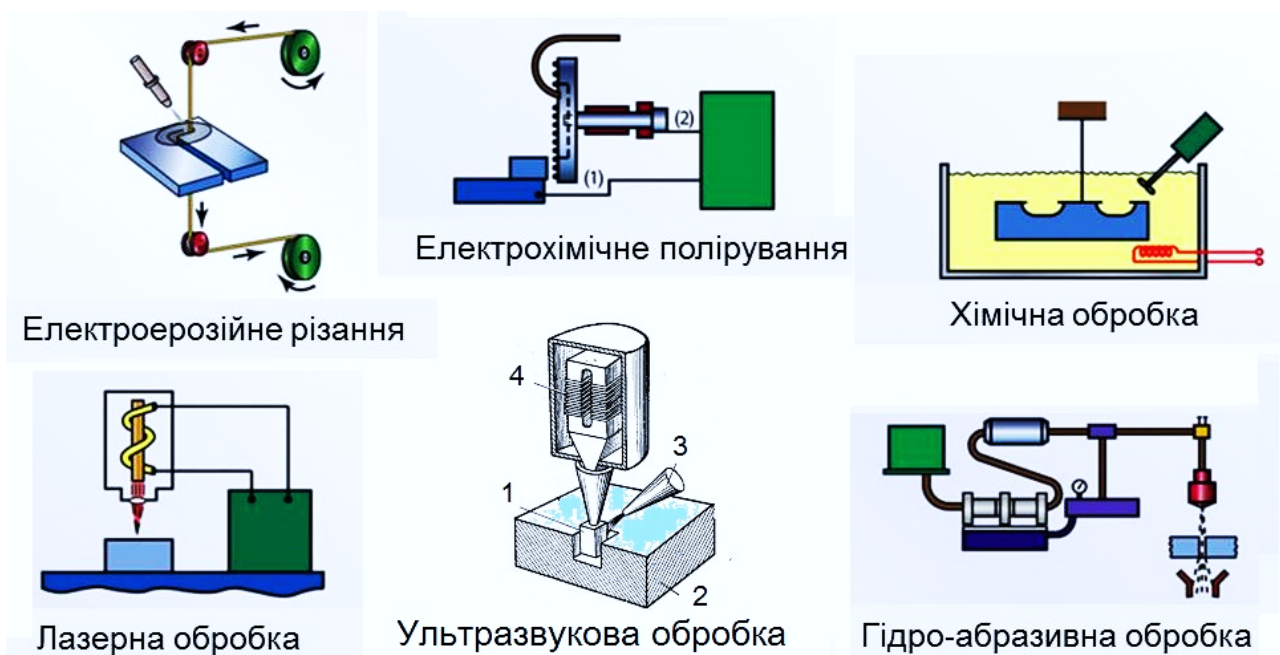


Рис. 63. Схеми поширених електрофізичних та електрохімічних методів

### Електроерозійна обробка сплавів

Електроерозійна обробка (рис. 64) полягає в зміні форми, розмірів, шорсткості і властивостей поверхні заготовки (2) в результаті електричної ерозії

під дією електричних розрядів (4), що відбуваються між двома електродами (1 і 2) розділеними діелектричною рідиною (3). Видалення металу відбувається розплавленням та випаровуванням поверхонь електродів в результаті дії надзвичайно високих температур, які досягаються високоінтенсивними розрядами між електродами. Серія імпульсів напругою 20 - 120 В і частотою порядку 5 кГц подається на два електроди, які розділені невеликим проміжком, зазвичай 0,01-0,5 мм.

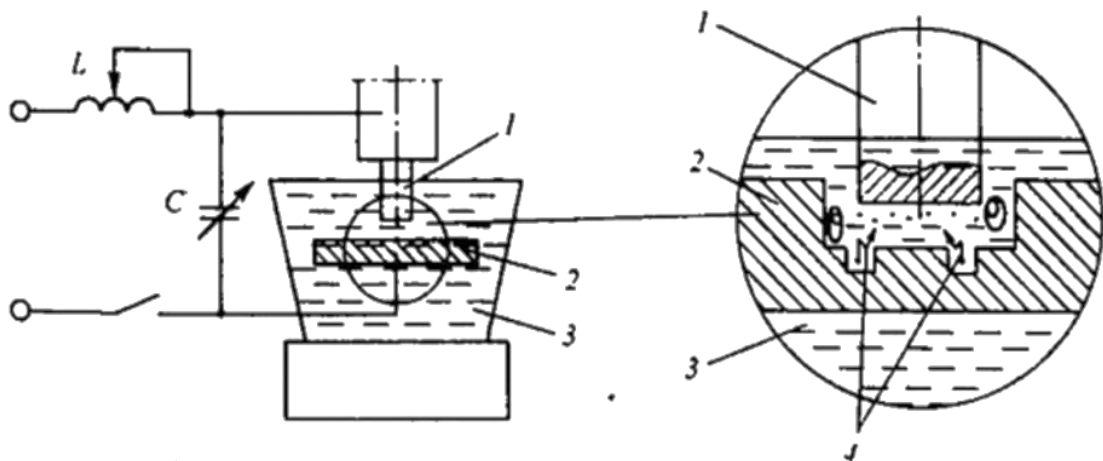


Рис. 64. Схема електроерозійної обробки: 1 – електрод-інструмент, 2 – електрод-заготовка, 3 – діелектрична рідина, 4 – електричні розряди

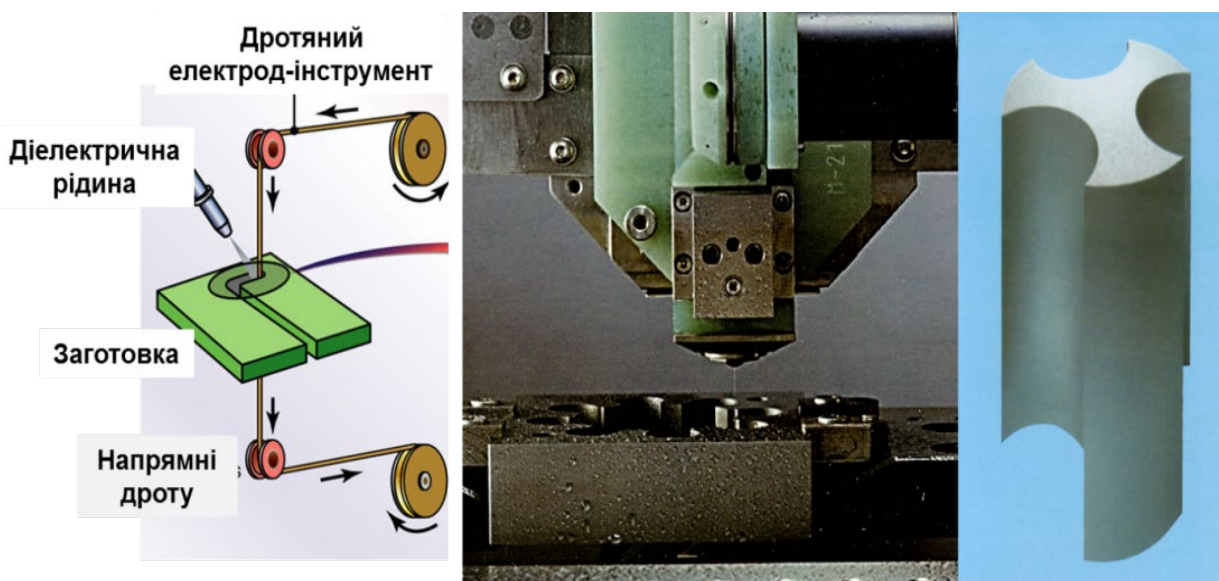


Рис. 65. Схема вирізання непрофільованим (дротяним) інструментом

Крім схеми прошивання (рис. 64), в якій інструмент здійснює один рух на заготовку, також застосовується схема електроерозійного вирізання дротяним електродом-інструментом (рис. 65), який переміщується і таким чином процес постійно виконується не зношеним інструментом. На рис. 66 наведено приклади використання електроерозійних методів обробки при виготовленні турбінних лопаток (*а* - лопатка турбіни, з прошитими охолоджуючими отворами  $\varnothing 0,3$  мм, матеріал - хромонікелевий сплав, *б* - процес вирізання замкової частини лопатки на електроерозійному вирізному верстаті), та моноколіс двигунів (*с* - процес прошивання пазів лопаточних монолітних роторів турбін - *д*) на 5+ - осьових електроерозійних верстатах).

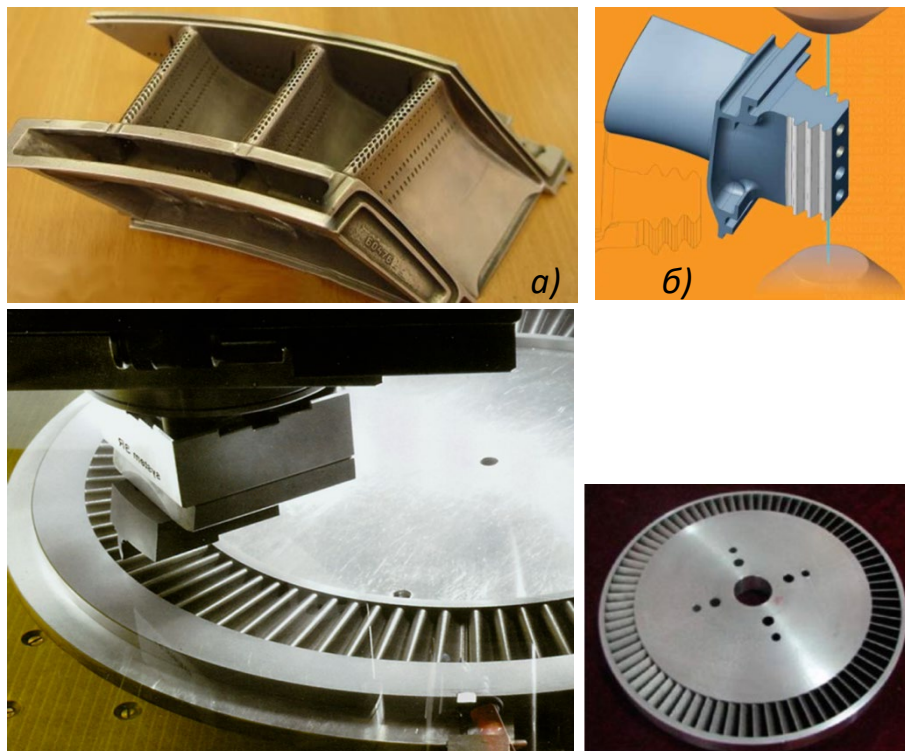


Рис. 66. Приклади використання електроерозійних методів обробки при виготовленні турбінних лопаток та моноколіс двигунів

### Електрохімічна обробка

Електрохімічна обробка ґрунтується на явищі анодного розчинення металів, яке полягає в тому, що при проходженні електричного струму крізь електроліт

метал анода (заготовки) розчиняється і виноситься електролітом із робочої зони. Широко використовується електролітичне полірування для ретельної обробки (при різних умовах можна досягти шорсткості  $Ra = 0,63 \dots 0,01$ ) деталей складної форми з високолегованих сталей (лопатки турбін, клапани двигунів, інструменти та ін.), електрохімічне прошивання отворів, хонінгування, маркування тощо.

У виробництві компресорних лопаток і лопаток турбін низького тиску з титанових, алюмінієвих, інтерметалідних (Ti-Al, Ni-Ti-Al) і наноструктурних матеріалів, спроектованих на основі тривимірного комп'ютерного моделювання нестационарних турбулентних течій, до яких пред'являються високі вимоги застосовується електрохімічна обробка поверхні пера що може мати регулярний мікрорельєф (рис. 67).

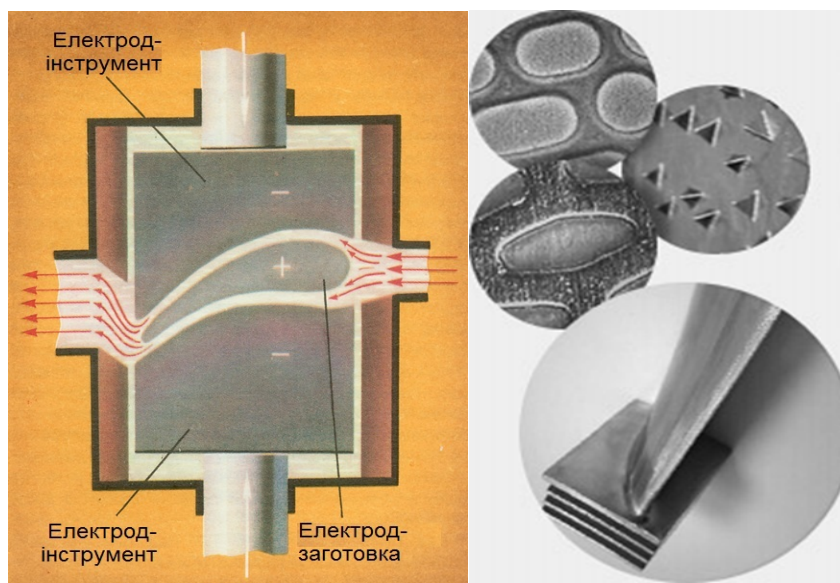


Рис. 67. Схема електрохімічної обробки турбінної лопатки (а) та нанесений регулярний поверхневий мікрорельєф типу «Акуляча шкіра» на компресорних та турбінних лопатках.

### Ультразвукова обробка

Ультразвукова розмірна обробка деталей відбувається під дією пружних механічних коливань із частотою близько 20 кГц. При цьому заготовка зазнає ударів зерен абразиву завислих у суспензії (воді, маслі), які набувають великих

швидкостей від осцилюючого пуансону, а також внаслідок кавітації. Ультразвуковою обробкою (рис. 68) досягається шорсткість  $Ra = 0,63 \dots 0,16$ ; за її допомогою можна обробляти не тільки метали, а й діелектрики: скло, кварц, силіцій, германій, ферити, рубіни тощо).

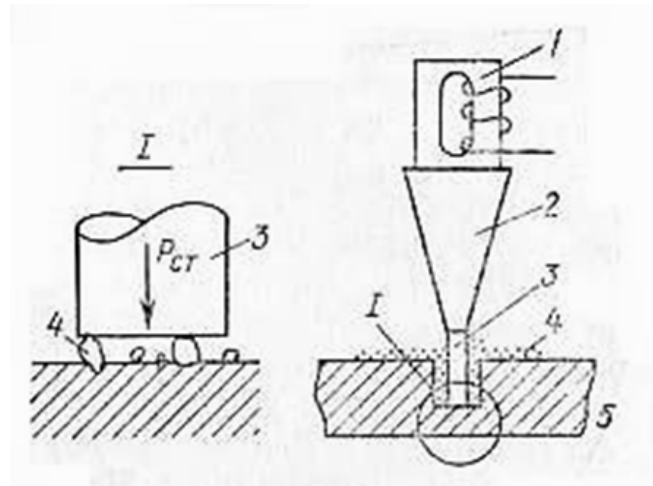


Рис. 68. Схема ультразвукової обробки: 1 - перетворювач, 2 - концентратор, 3 - інструмент-пуансон, 4 - зерна абразиву у рідині, 5 - заготовка

### Лазерна обробка

При лазерній обробці потужний світловий промінь, який випромінюється лазером, може бути сфокусований на поверхні заготовки на площі діаметром до 0,01 мм (рис.69). При цьому концентрація енергії досягає  $10^5 \dots 10^7$  кВт/см<sup>2</sup>, температура - кількох тисяч градусів, тому відбувається миттєве розплавлення і випаровування матеріалу. За допомогою лазерів можна вести обробку малих отворів, пазів тощо в різноманітних матеріалах незалежно від їхніх фізико-механічних властивостей (метали і сплави, композити, полімерні і композитні матеріали, кераміка, алмази, тверді сплави тощо). Крім різання, вирізання і прошивання отворів лазерне випромінювання використовується для технологій зварювання, наплавлення, напилення, для термічної і хіміко-термічної обробки поверхні деталей, для модифікації поверхні, для реалізації процесу полімеризації,

спікання або сплавлення при адитивних технологіях і, навіть для процесів формозміни листових заготовок за рахунок термопластичних деформацій.

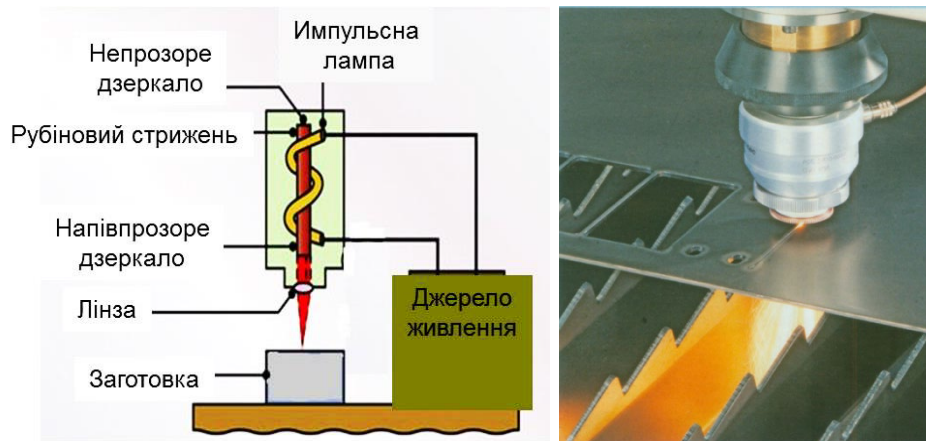


Рис. 69. Схема лазерної обробки (а) і процес різання листового металу лазерним розкрійним комплексом (б).

На рис. 70 представлено 5-осьовий порталний високошвидкісний лазерний верстат DNC-CNC спеціально розроблений для високошвидкісного лазерного розкрою та демаскування для хімічного фрезерування панелей літаків. Такий розкрій панелі після операції обтяжки значно покращує технологічність і як наслідок - точність при вирізанні вже сформованої оболонки у порівнянні з обтяжкою після розкрійних операцій. Крім того лазер дозволяє видаляти захисну плівку з ділянок які будуть видалятися хімічним травленням (дивись рис. 52).



Рис. 70. 5-осьовий порталний високошвидкісний лазерний верстат DNC-CNC TORRESLASER® спеціально розроблений для високошвидкісного лазерного розкрою панелей літаків

## Гідроабразивна обробка

Сфокусований струмінь води або абразивного порошку в газовому струмені «стріляє» з високим тиском з сопла на заготовку. Ця реактивна струя діє так само як тонке, кругле, діамантове пильне полотно, не піддаючи заготовку нагріванню. Тому у поверхневому шарі відсутня зона термічного впливу і термічні напруження. Контур або форма поверхні задається за допомогою ЧПУ.

Струменева гідроабразивна механічна обробка (рис. 71) дозволяє видаляти матеріал заготовки або виконувати вузький різ за рахунок високого тиску високошвидкісного потоку води з добавками абразиву (гранатового піску).

Водяне реактивне сопло призначено для доставки абразивних частинок реактивним потоком води в зону різання і забезпечення механічної обробки. Високий тиск використовується для різання заготовок великої товщини, низький тиск - для чистової обробки, для прошивання тендітних матеріалів, зняття задирок (після традиційної обробки) тощо.

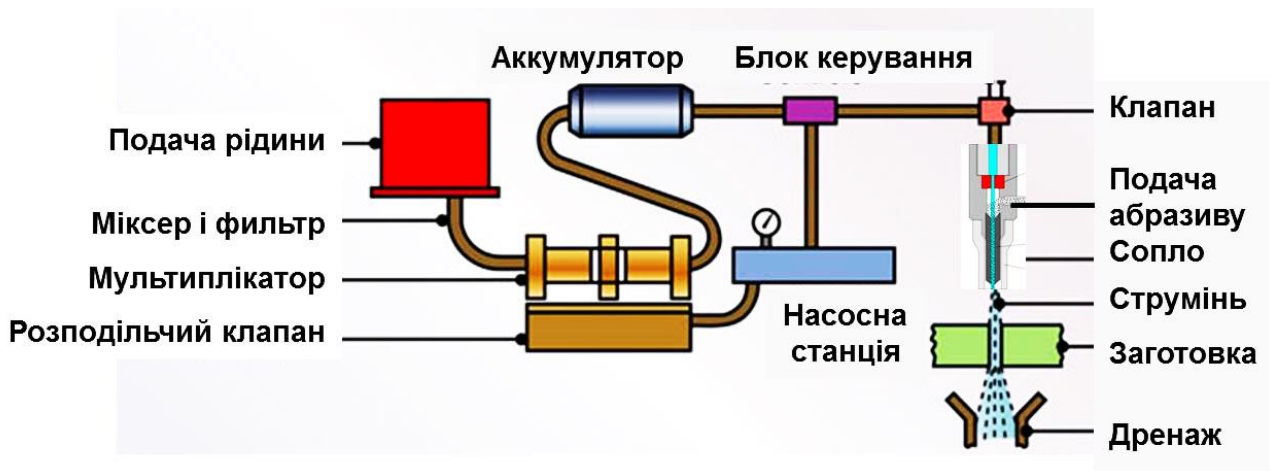


Рис. 71. Схема процесу гідроабразивної обробки

Manufacturing, Engineering & Technology, Fifth Edition, by Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid.  
ISBN 0-13-148965-8. © 2006 Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ. All rights reserved.

Таким чином інструментом є вода стиснута насосом до 4000 бар до якої додають абразив – гранатовий пісок з розміром частинок 0,08...0,3 мм. Швидкість витікання струменю з сопла – 1200 м/с. Знаходить застосування у машинобудуванні і будівництві для обробки мозаїки, стільниць, плитки, гранітних блоків, бетону, гіпсокартону, ізоляційних матеріалів, мінерального

волокна тощо, у виробництві продуктів харчування: хлібобулочних виробів, фруктів і заморожених продуктів (рис. 72).

У авіабудуванні і космонавтиці гідро абразивна обробка застосовується для розкрою листових заготовок зі сплавів титану, алюмінію, Cr-Ni-Co-матеріалів, а також композитів, яким в авіа і моторобудуванні віддається перевага.



Рис. 72. Приклади деталей, отриманих гідроабразивним різанням (а,б,д), кутова головка (в) - система з додатковими координатами для вирізання 3-вимірних деталей, нарізання продуктів харчування (г).

### Питання для самоперевірки

1. В яких випадках раціонально проводити обробку електрофізичними методами?
2. Які матеріали доцільно обробляти електроерозійним способом?
3. Яка роль рідини при електроерозійній обробці?
4. Які рідини використовуються при хімічній обробці?
5. Який процес забезпечує видалення матеріалу під час електрохімічної обробки?
6. Чому при електрохімічній обробці заготовка набуває форми, близької до форми електрода-інструменту?
7. Які матеріали доцільно обробляти ультразвуковим способом?
8. За рахунок яких процесів відбувається видалення матеріалу при лазерній обробці?



## Тестові питання

1. Який метод доцільно використовувати при обробці отворів у скляній заготовці?
  - а). Хімічний
  - б). Ультразвуковий
  - в). Лазерний
2. Які групи матеріалів можна обробити електроерозійним методом?
  - а). Скло, кварц, корунд
  - б). Загартована сталь, твердий металокерамічний сплав
  - в). Деревина, пластмаса
3. При якому методі обробки густина потоку енергії впливає на оброблювану поверхню заготовки вище?
  - а). При лазерній
  - б). При електроерозійній
  - в). При електрохімічній
4. При застосуванні якого методу обробки у структуру витрат входять: витрати на електроенергію, вартість спеціальної рідини, вартість абразивного порошку?
  - а). Електроерозійного
  - б). Електрохімічного
  - в). Ультразвукового
5. Який із електрофізичних методів забезпечує найменшу шорсткість поверхні?
  - а). Лазерний
  - б). Електрохімічний
  - в). Електроерозійний

## АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Аддитивна технологія визначається як «процес об'єднання матеріалів з метою створення об'єктів з даних 3D-моделі, як правило, шар за шаром, на відміну від субтрактивних (віднімальних) виробничих технологій». (Стандарт

ASTM F2792.1549323-1: «Additive Manufacturing - process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies»).

Аддитивне виробництво включає процеси, що дозволяють отримувати об'ємні моделі, готові деталі і вироби, зразки для випробування, скоротивши витрати часу і засобів на їх розробку, використовуючи можливості сучасних комплексів комп'ютерного проектування і установок швидкого прототипування. По суті справи, математичну модель з монітора комп'ютера можна легко і швидко " матеріалізувати" безпосередньо без виготовлення робочих креслень, технологічних карт і спеціального оснащення і суттєво скоротити час виробництва об'єкта. Надрукувати деталь швидше та простіше, ніж зробити її за допомогою лиття, штамповки або фрезерування. До того ж, промислові 3D-принтери здатні створювати різні види об'єктів, а значить, всі виробничі потужності можна зосередити в одній локації. Використовуючи принтер для об'ємного друку, французька компанія Latécoère створила частину дверей літака за два дні, що на 95% менше від звичайного терміну.

За допомогою адитивної технології можуть бути виготовлені деталі пристроїв та сопла авіаційних та ракетних двигунів; лопаткових вінців вентиляторів, компресорів та турбін, що охолоджуються; інші деталі авіаційної та ракетної техніки.

Пристрої для 3D-друку дозволяють виготовити цілісну деталь, яку за традиційних технологій можна було лише зібрати. Наприклад, компанія GE Aviation удосконалила форсунки, які раніше склалися з 20 елементів. За допомогою адитивних технологій деталі тепер роблять цільнотрукованими.

В авіабудівній галузі важлива вага об'єктів та їх елементів. За допомогою деталі виходять легшими, що суттєво зменшує витрати пального. Об'ємний друк також знижує кількість відходів виробництва на 70-95%. Так, Boeing завдяки 3D-друку деталей з титану заощаджує від \$2 млн до \$3 млн на кожній моделі літака 787 Dreamliner. General Electric друкує форсунки для двигунів, які використовують компанії Airbus та Boeing. Так, частина деталей двигуна LEAP

виготовлена компанією GE Aviation із застосуванням АТ (рис. 73, а) (Джерело:<https://www.3dpulse.ru/news/zhurnal-additivnye-tehnologii/additivnye-tehnologii-dlya-aviakosmicheskoi-tehniki/>). Слід зазначити, що такі деталі працюють, як правило, в екстремальних умовах і виготовлені з матеріалів з низькою оброблюваністю різанням. Деталі газотурбінних агрегатів Aneto (від Safran Helicopter Engines), також надруковані на 3D-принтері. При цьому двигун компактний, економічний і на 30% потужніший, ніж подібні до нього установки. Використання 3D-технологій в авіабудуванні сприяє ефективному розвитку галузі, оскільки замінює недешеві штампування та лиття. Адитивні технології також допомагають заощадити не лише на матеріалах, а й на обслуговуванні готового літака.

Британська космічна компанія Orbex надрукувала ракетний двигун на 3D-принтері (рис.73. б). Двигуном оснастили двоступеневу ракету Prime. Її виготовили з спеціально розробленої суміші вуглецевого волокна і алюмінію. Двигун не має стиків і зварних швів. Ступінь ракети надрукували литим шматком.

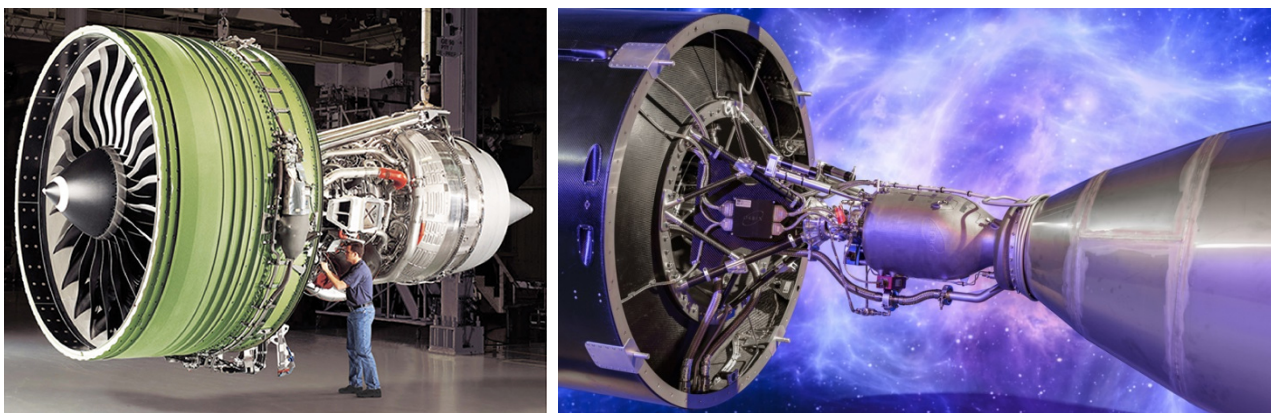


Рис. 73. а) - Двигун LEAP компанії GE Aviation

Джерело: <https://www.3dpulse.ru/news/zhurnal-additivnye-tehnologii/additivnye-tehnologii-dlya-aviakosmicheskoi-tehniki/>; б). прототип найбільшого у світі ракетного двигуна із цільною конструкцією, надрукований з порошкових матеріалів на промисловому 3D-принтері виробництва SLM Solutions

Найбільш популярними адитивними технологіями на сьогоднішній день є - метод лазерної стерео літографії (рис.74, а), при якому об'єкти нарощуються шляхом пошарового нанесення фотополімерної смоли, що полімерізується під дією випромінювання ультрафіолетового лазера - Stereolithography (SLA);

- метод селективного лазерного спікання (рис.74, б)- Selective Laser Sintering (SLS);
- моделювання методом пошарового наплавлення термопластичного матеріалу - Fused Deposition Modeling (FDM);
- технології прямого лазерного спікання порошків металів і сплавів (рис.75) - Direct Metal Laser Sintering (DMLS);
- метод електронно-променевого плавлення (EBM), в якому застосовуються електронні випромінювачі замість лазерів (рис. 76) - Electron-beam additive manufacturing, or electron-beam melting.

Ці технології дозволяють виготовляти деталі і конструкції ЛА з різноманітних полімерних та металевих матеріалів методом пошарової побудови з використанням специфічних процесів. Ці матеріали мають високі механічні властивості та дозволяють отримувати вироби складної геометричної форми, створення яких неможливе традиційними методами обробки (рис. 77).

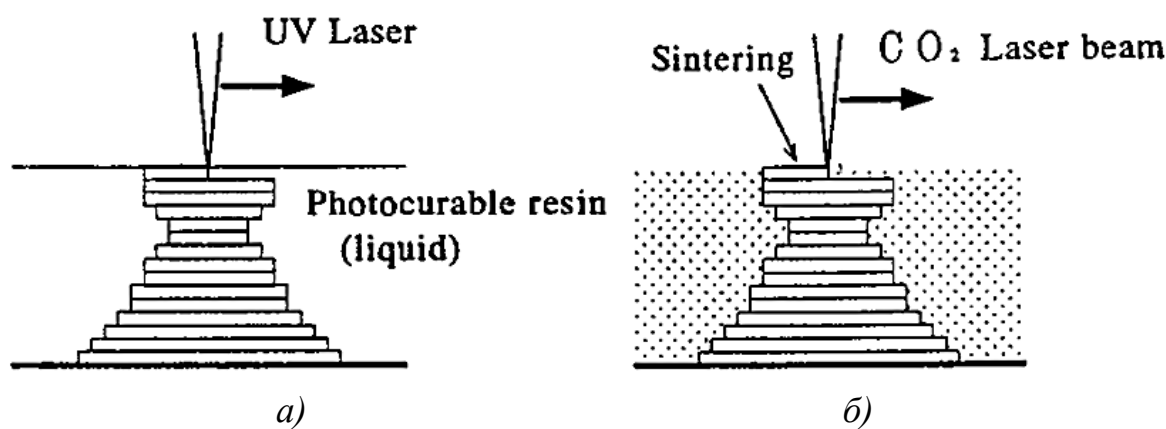


Рис. 74. а) - метод лазерної стереолітографії дає можливість "вирощувати" моделі із смоли, що фотополімеризуються під дією ультрафіолетового лазерного випромінювання. б) - метод вибіркового лазерного спікання порошку з крохмалю, кераміки, ливарного піску, сплаву тощо, покритий зв'язуючим полімером, спікають пошарово лазерним променем

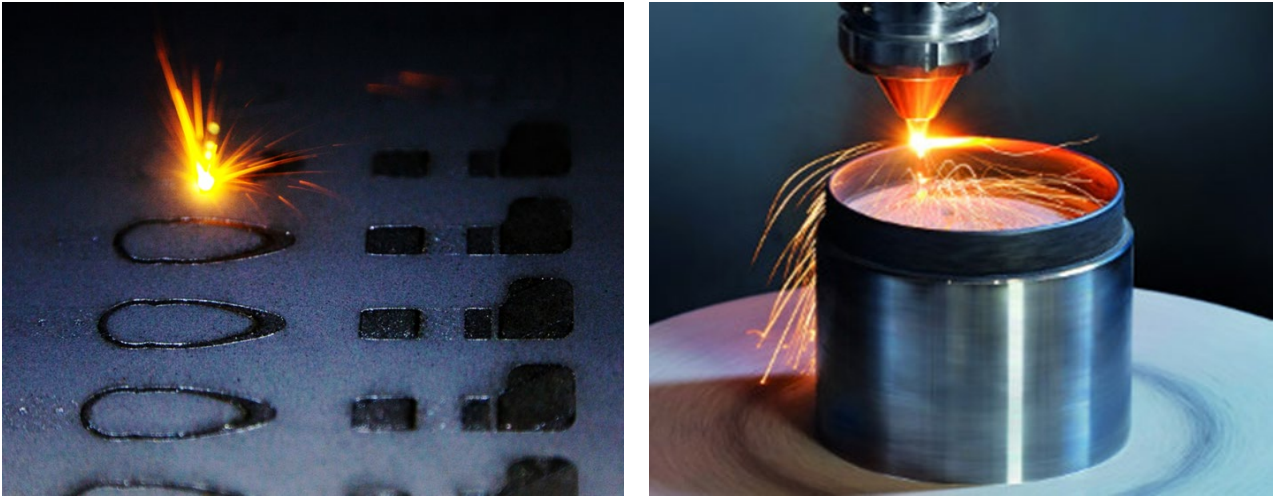


Рис. 1. 75. - Технологічний процес прямого лазерного спікання порошків металевих сплавів - Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

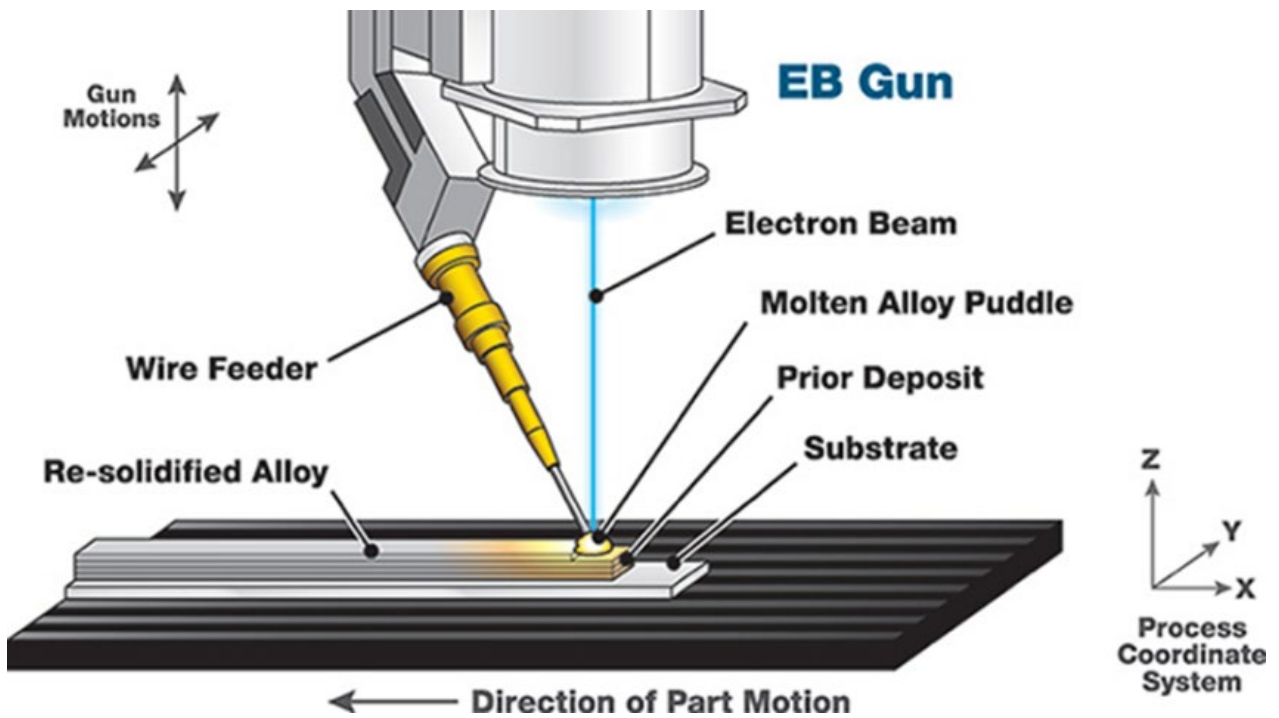


Рис. 1.76. Схема процесу електронно-променевого плавлення - Electron-Beam Melting (EBM) [https://www.sciaky.com/images/Wire-vs-Powder/EBDM\\_Illustration-web.jpg](https://www.sciaky.com/images/Wire-vs-Powder/EBDM_Illustration-web.jpg)

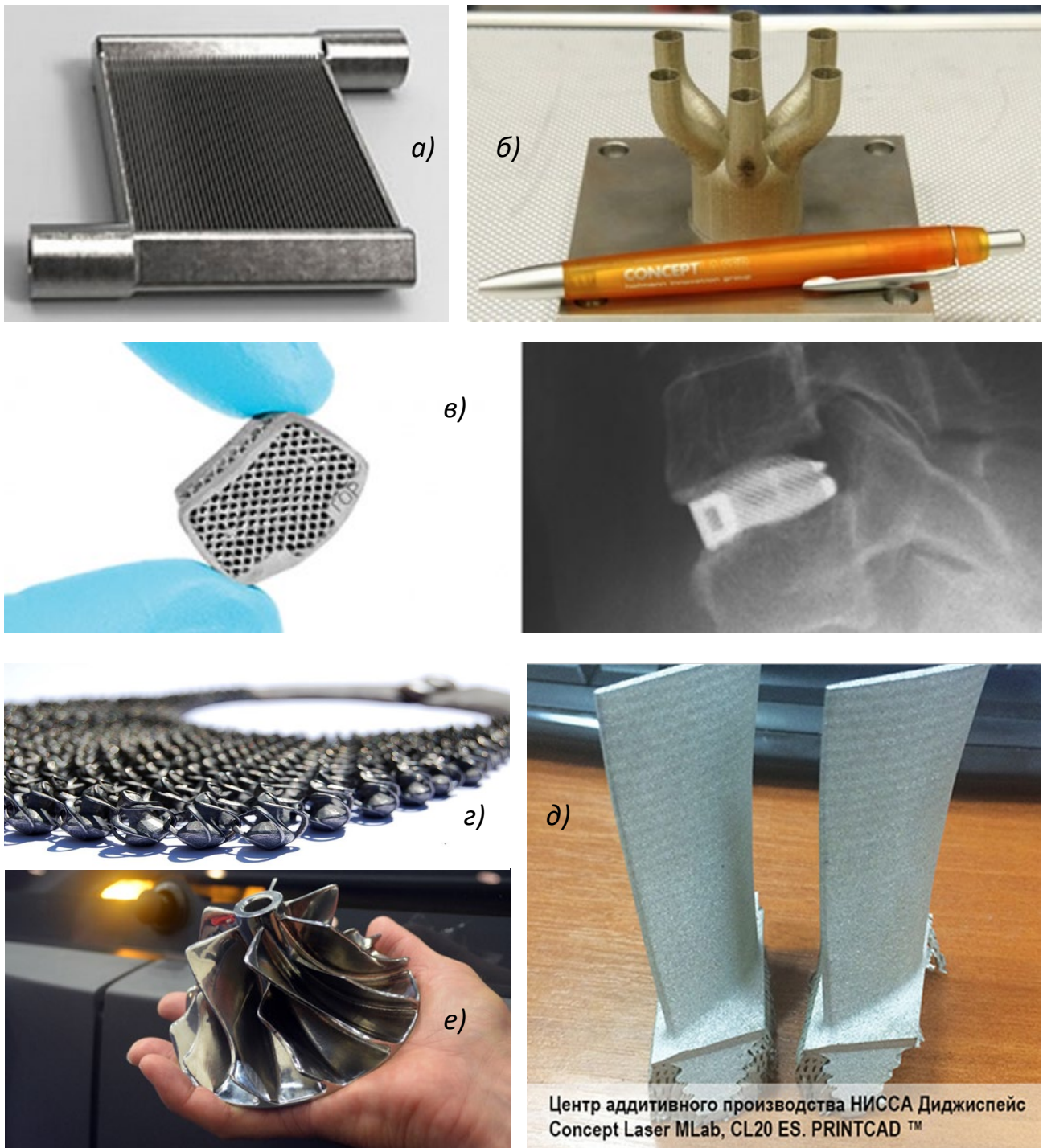


Рис. 77. Приклади деталей, отриманих прямим друком металу: *а)* - тонкостінний і ергономічний теплообмінник, *б)* - деталь для ракетного двигуна J2-X, надрукована NASA, *в)* - 3D-друк для медичних програм, *г)* - ювелірні вироби, *д)* - лопатки турбіни, *е)* - імпелер (<http://www.3dpulse.ru/news/zhurnal-additivnye-tehnologii/additivnye-tehnologii-dlya-aviakosmicheskoi-tehniki>)

## Питання для самоперевірки

1. Назвіть види адитивних технологій і матеріали для їх застосування.
2. В чому полягає метод лазерної стерео-літографії?
3. В чому полягає метод вибіркового лазерного спікання?
4. Як відбувається технологічний процес прямого лазерного спікання порошків.
5. Які адитивні технології застосовують у ливарному виробництві?
6. В чому сутність електронно-променевого селективного лазерного наплавлення?

## ТЕХНОЛОГІЇ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Композиційні матеріали (від лат. *compositio* — поєднання) — це матеріали, які утворені об'ємним поєднанням хімічно різнорідних компонентів з чіткою межею розподілу між ними і мають специфічні властивості, відмінні від сумарних властивостей їх складових компонентів.

Композиційні матеріали містять дві і більше різні фази, причому одна з них неперервна (матриця), а інші розподілені в об'ємі неперервної фази (наповнювачі). Властивості композиційного матеріалу формують або підсумовуванням властивостей компонентів (*адитивність*), або їх взаємним підсиленням (*синергізм*). У зв'язку з цим різко поліпшуються властивості матеріалу, порівнюючи з аналогічним матеріалом, який містить тільки неперервну фазу.

У композиційних матеріалах поєднуються ліпші якості різних складових фаз — міцність, пластичність, зносостійкість, невелика густина тощо. Ці матеріали мають пластичну основу (матрицю), яка послуговує зв'язкою, і вкраплення різних спеціальних компонентів у вигляді порошків, волокон, тканин та інших форм, доступних для формування композиційних матеріалів (табл. 4).

Армування композитів досягається різними способами: частинками, волокнами, тканинами тощо (рис.78).

Типи і загальні характеристики композиційних матеріалів	
Матеріал	Характеристики
<b>Волокна</b>	
Скло	Висока міцність, низька жорсткість, висока щільність; найменша вартість; E (алюмоборсилікат кальцію) та S (магнезіально-алюмосилікатний) типи, що часто використовуються
Графіт	Доступні як високий модуль так і висока міцність; низька вартість; менш щільний, ніж скло
Бор	Висока міцність і жорсткість; найвища щільність; найвища ціна; має вольфрамову нитку в центрі
Арамід (кевлар) aromatic polyamide	Найвища питома щільність; висока вартість
Інші волокна	Нейлон, карбід кремнію, нітрид кремнію, оксид алюмінію, карбід бору, нітрид бору, карбід танталу, сталь, вольфрам, молібден
<b>Матричні матеріали</b>	
Термореактопласти	Епоксидний і поліефірний, є найбільш часто використовуваними; інші - феноли, фторвуглеці, поліетерсульфон, кремній і полііміди
Термопласти	Поліефіровий кетон; більш жорсткі, ніж термореактивні, але менша стійкість до температури
Метали	Алюміній, алюміній-літій, магній і титан; волокна - це графіт, оксид алюмінію, карбід кремнію та бор
Кераміка	Карбід кремнію, нітрид кремнію, оксид алюмінію та муліт; різні волокна у кераміці

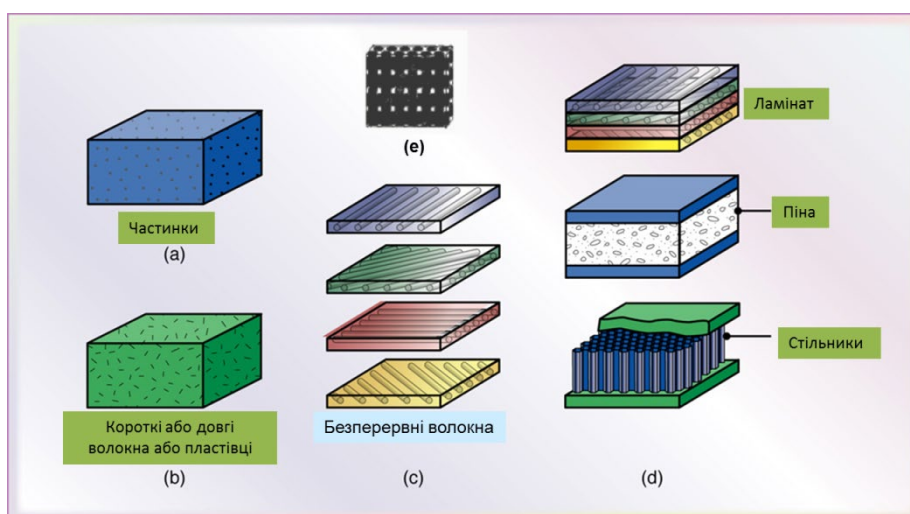


Рис. 78. Схематична ілюстрація методів армування композитів (матриці) (а) частинками, (б) короткими або довгими волокнами або пластівцями і (в) безперервними волокнами. Ламінатні структури, показані в (д), можуть бути отримані з шарів безперервного волокна (шаруваті композити) або сендвіч-структур з використанням спіненого або стільникового ядра. Армування тканинами (е) (Manufacturing, Engineering & Technology, Fifth Edition, by Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid.



Композиційні матеріали в вузлах літаків використовуються протягом десятиліть. До середини 80-х років виробники використовували композиційні матеріали у вторинних елементах конструкцій (наприклад, обведення крил і рульових поверхонь). У 1988 році представили Airbus A320, перший літак, з суцільнокомпозиційним хвостом, а в 1995 році, компанія Boeing представила Boeing 777, хвіст якого також виготовлений з композиту. Починаючи з 2011 року почали будувати великі літаки, майже повністю використовуючи в них композитні матеріали. Композиційні матеріали, що використовуються в комерційних літаках зазвичай виробляються шляхом об'єднання шарів вуглецю або скляних волокон з епоксидною смолою. Ці матеріали зазвичай легше і більш стійкі до корозії, ніж метал, традиційно використовуваний в літаках.

Boeing 787 є першим авіалайнером, в якому композитні матеріали становлять близько 50 відсотків від ваги (без двигунів). Незабаром з'явився Airbus A350, маючи композитні матеріали приблизно в тій же пропорції, як його конкурент Boeing (рис. 79).

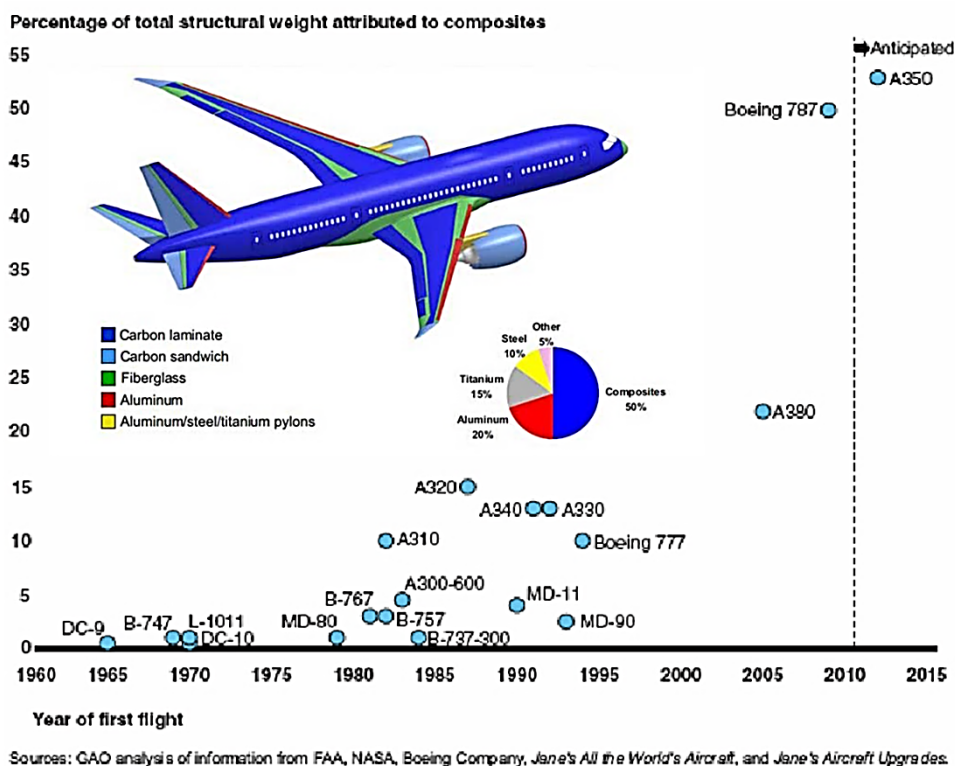


Рис. 79. Збільшення долі композитів у комерційних літаках. Темно-сірим кольором виділені деталі лайнера Boeing-787з вуглепластика

В конструкції літака з композиційних матеріалів можна виготовити фюзеляж, крила, хвостове оперення, мотогондоли, деталі інтер'єру. Найчастіше для літаків застосовується більш легкий вуглепластик, а склопластик - для ненавантажених деталей і для носового обтічника. Склопластик важче, ніж вуглепластик, і менш міцний, але він значно дешевше. Носовий обтічник літака роблять зі склопластику, так як ця деталь повинна пропускати радіохвилі, а вуглеволокно проводить струм і створює перешкоди.

У зв'язку з використанням великої частки композиту в структурі літака з'явилися деякі побоювання. Ці проблеми виникли в наслідок розширеного використання композитних матеріалів в літаках цивільної авіації та відсутності достатнього досвіду застосування таких технологій. Європейські та американські авіаційні власті (FAA і EASA) вживають заходів щодо вирішення проблем безпеки, пов'язаних з використанням композитів.

GAO (Government Accountability Office) виявив чотири проблеми, пов'язані з безпекою:

1. Першою проблемою є обмежена інформація про поведінку планера з композитів. Необхідно знати як структури композитного планера поведуться при пошкодженні і як вони старіють. Ці побоювання пояснюються обмеженим досвідом використання композиційних матеріалів в конструкції планера і браком інформації про їх поведінку, на відміну від поведінки металів.

2. GAO також виявив проблеми, які стосуються виявлення пошкоджень в композиційних матеріалах, пов'язані з їх унікальними властивостями. "Наслідки пошкодження композиційних структур є унікальними, тому що можуть бути невидимими або можуть бути ледь помітні, що викликає проблеми з виявленням авіатехніками цих пошкоджень і робить ремонт більш складним, ніж металевих конструкцій". "Проводити ремонт є також проблемою почасти тому, що складові такого ремонту більш сприйнятливі до людської помилки, ніж ремонт металевих частин.". Досвід показав, що ремонт літака може бути затягнутий на кілька днів, в той час як лише кілька годин буде потрібно на некомпозитний ремонт. Це може

бути серйозним недоліком для авіакомпаній як у фінансовому відношенні, так і в провокуванні людського фактора.

3. Крім того існують обмеження стандартизації композиційних матеріалів і методів ремонту, в порівнянні з ремонтом металевих комплектуючих. Це частково обумовлено власною бізнес-практикою авіакомпаній і "відносною незрілістю" використання композитів в конструкції літака. "Технік запросто може переплутати матеріали або процеси, які можуть призвести до" некваліфікованого ремонту, "декларує GAO. Це також може мати негативні економічні наслідки для авіакомпаній і підрозділів обслуговування, тому що для ремонту об'єкта, можливо, доведеться мати більший запас ремонтних матеріалів і деталей . Крім того композити, як правило, повинні зберігатися при певній температурі, і матеріали також мають обмежений термін зберігання.

4. Організацією GAO також виявлені проблеми, пов'язані з рівнем підготовки фахівців з ремонту та обробці композиційних матеріалів. "Техніки та інженери, які працювали з металом протягом десятиліть, як правило, малознайомі з композитними матеріалами, які широко застосовуються в літаках відносно недавно, а також унікальні характеристики яких, будуть викликати технічні проблеми.

### **Технології виробництва продукції та деталей з композитів**



## Армовані деталі

Армований виріб являє собою нероз'ємне з'єднання армуючої деталі (з металу, скла, кераміки), поверхню якої обпресовують або заливають (в формах) пластмасою, керамічною масою, гумою та іншими матеріалами. Армування виробів застосовується для підвищення механічної міцності виробів, закріплення електроконтактів, різьбових елементів для з'єднання з іншими деталями, для ізоляції одних деталей (ручки, кнопки) від інших (наприклад, струмопровідних) деталей (рис. 80, 81).

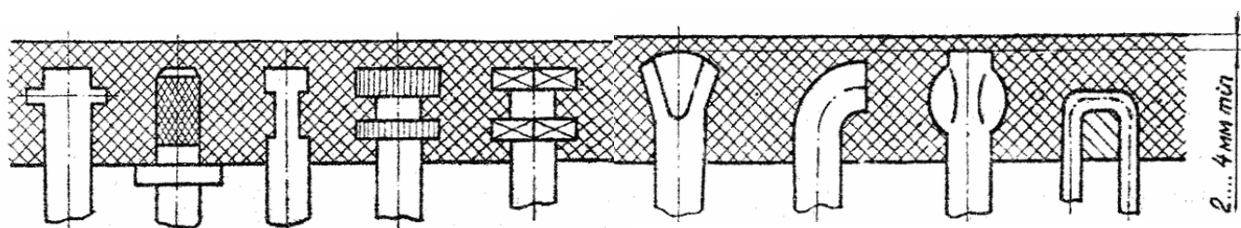


Рис. 80. Приклади армованих деталей

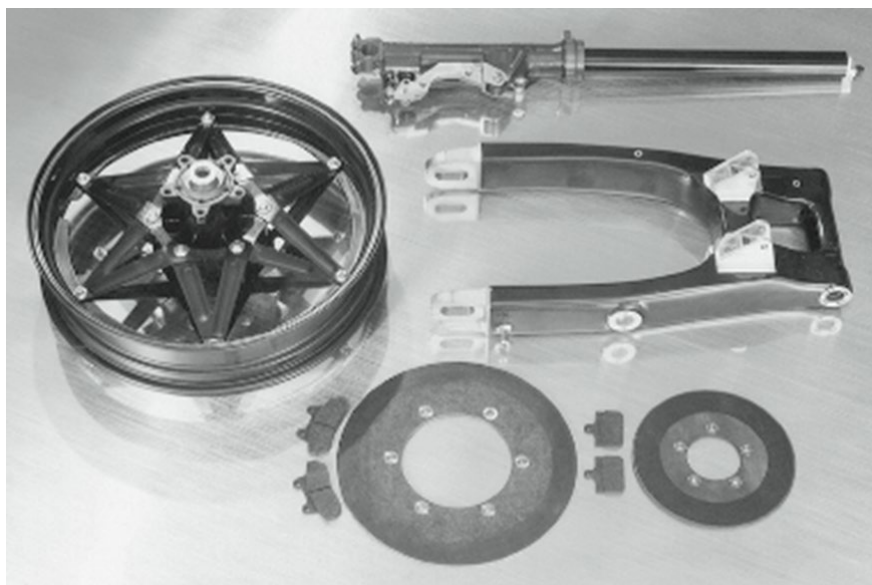


Рис. 81. Армовані пластикові компоненти для мотоцикла Honda. Зображені деталі - передні та задні вилки, задні колеса, колесо та гальмівні диски.

## Препреги

Препреги (pre-preg, скор. від pre-impregnated — попередньо просочений) — це композиційні матеріали-напівфабрикати. Виготовляються у вигляді листів тканих або нетканих волокнистих матеріалів, просочених незатверділими

полімерними зв'язуючими. Традиційні волокнисті матеріали - це вуглеволокно, скловолокно, келар (рис. 82). В якості зв'язуючих використовують термореактивні або хімічно твердіючі смоли.

Препреги виготовляють шляхом просочення армуючої волокнистої основи рівномірно розподіленими полімерними зв'язуючими. При використанні однорідних термореактивних зв'язуючих препреги можуть мати обмежений термін і умови зберігання, щоб зв'язуюче не полімеризувалось при зберіганні. При використанні хімічно твердіючих зв'язуючих виготовляють два види листів, кожен просочений своєю речовиною. При укладанні в виріб їх поєднують, щоб зв'язуюче перемішалось і виріб затвердів.

Препреги поставляють у вигляді листів, покритих з обох сторін поліетиленовою плівкою, або згорнутими в рулон з прокладкою. Подальше застосування включає в себе нарізку листів, викладання на односторонню матрицю необхідної форми для отримання необхідної товщини, вакуумування під плівкою, затвердіння в автоклавах при високій температурі і тиску. Препрегова технологія дозволяє отримувати вироби складної форми при мінімальних витратах. Препреги представляють собою компроміс між механічними властивостями виробу і його трудомісткістю. Вдосконалення композитних технологій дозволяє все частіше використовувати препреги навіть в відповідальних виробках, наприклад деталях літаків.



Рис. 82. Приклади препрегів: кевлар, стрічка зі скловолокна, карбонова пластина

Препреги застосовуються при виготовленні корпусів літаків і вертольотів, крил, обтікачів, гвинтів. Використання подібних матеріалів дозволяє знизити вагу і, як наслідок, витрати палива повітряних суден, збільшити характеристики міцності і термін служби. Перспективним ринком застосування препрегів є їх використання при виготовленні лопатей для вітроенергетичних установок. У друкованих платах препреги використовують в якості зв'язуючого для виготовлення твердої частини гнучко-жорстких ламінованих багат шарових радіоелектронних плат. Препреги застосовуються в медицині при виготовленні ортезів. При цьому вдається обійтися без металевих шин, що значно знижує вагу конструкції. Комбінуванням типів наповнювачів з різними товщинами ниток, а також варіюванням кількістю шарів препрегів і об'ємною формою силових елементів при викладенні, можна отримати практично будь-які необхідні міцнісні і пружні характеристики в різних елементах і ділянках каркасів ортеза. Препреги можуть застосовуватися в автомобіле- і суднобудуванні, для виготовлення суднових корпусів і несучих деталей автокузовів; в будівництві, в тому числі для армування бетонних конструкцій; при виготовленні протезів і медичних приладів, а також спортивного інвентарю. На рис. 83 показаний виробничий процес виготовлення армованих пластикових листів.

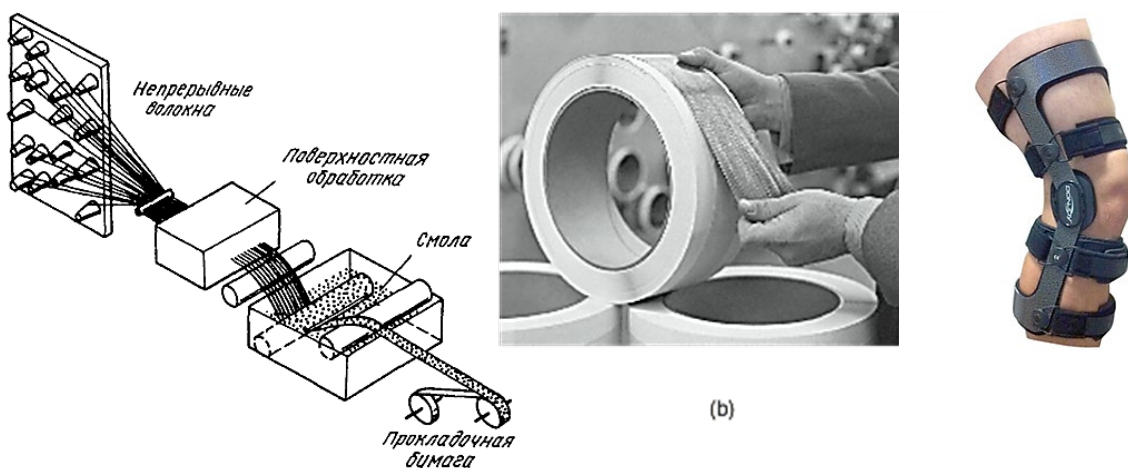


Рис. 83. Схема виробничого процесу виготовлення армованих пластикових листів - а). Лист все ще в'язкий на цій стадії - в), і пізніше може бути сформований у різні форми - с)

Найбільше практичне застосування знаходять такі способи виробництва виробів із армованих пластиків:

- контактне формування із укладанням просоченого смолою волокнистого полотна на форму;
- напилення волокнисто-полімерної композиції на поверхню форми;
- різні способи формування у закритій формі;
- намотування просоченого смолою волокна на форму;
- пултрузія, або формування профільних виробів шляхом протягування волокна через ванну з полімером та калібруючу фільтру.

**Контактне формування** – це технологія виробництва композитного матеріалу, що підходить переважно для виготовлення одиничних екземплярів та малих партій. Суть методу виготовлення складається з пошарового укладання та просочування сухих, армуючих матеріалів до формування виробу заданої товщини. Формування здійснюється вручну, з використанням валиків, або за допомогою спеціальних установок (рис. 84).

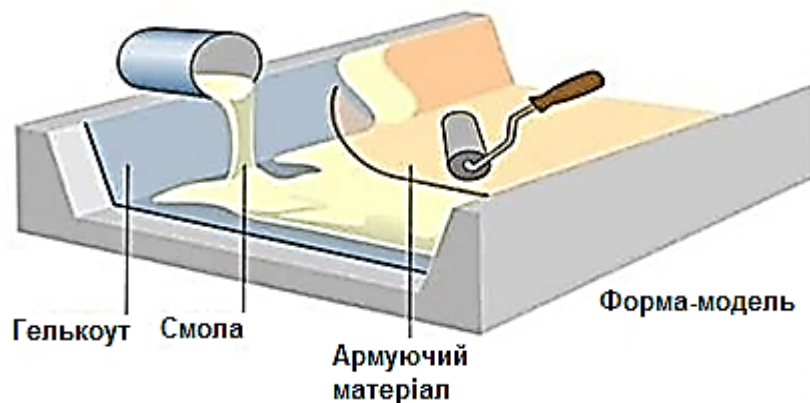


Рис. 84. Схема контактної (ручної) форми прегрегів

**Вакуумна інфузія** - технологія виробництва композитного матеріалу (деталі), при якій із застосуванням вакуумної плівки (мішка) створюється розрідження в робочій порожнині форми і за рахунок різниці в тиску відбувається всмоктування смоли та просочування армуючих матеріалів. За такого технологічного процесу можливе як виробництво штучних деталей, так і виготовлення невеликих партій. Основними перевагами вакуумної інфузії є:

отримання композиту з високим вмістом армуючого матеріалу; низька пористість; можливість виготовлення великих деталей повністю без поділу на складові.

**Формування препрегів** – технологія виробництва композитних матеріалів (деталей), в якій використовуються препреги - просочені заздалегідь матеріали, що складаються зі смоли та армуючого матеріалу. У процесі виробництва виріб переробляють пресуванням чи вакуумним формуванням. Основними перевагами формування препрегів є: висока щільність волокон може бути легко досягнута без утворення великої кількості порожнеч; високі механічні властивості виробів; повна автоматизація процесу, завдяки застосуванню технології автоматизованої викладки волокон та стрічок (рис. 85).

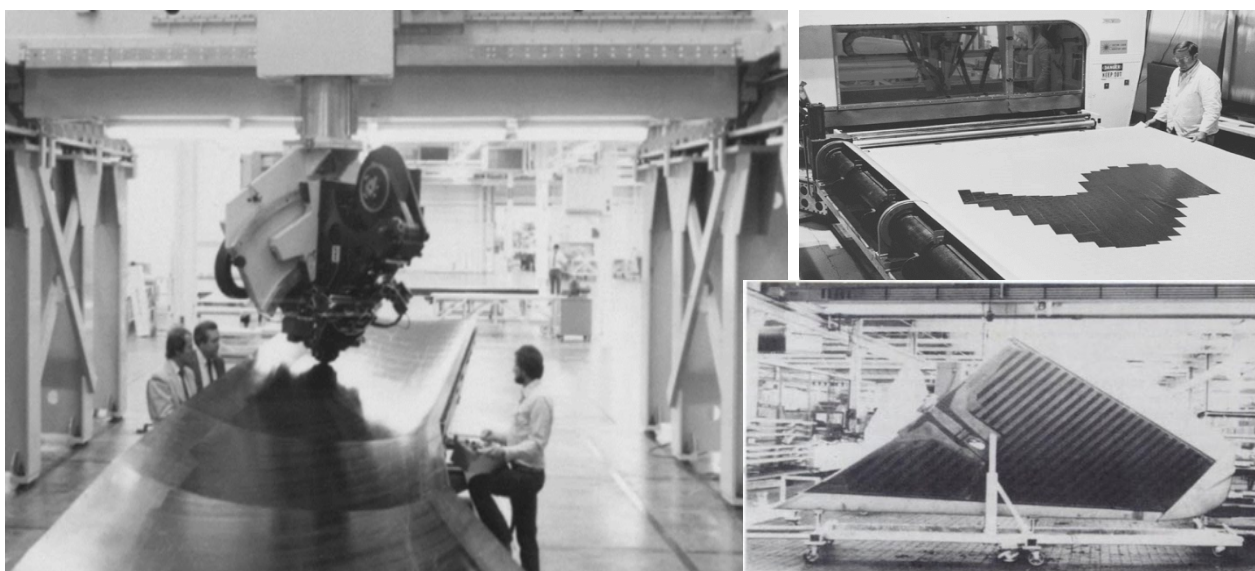


Рис. 85. Автоматизована викладка (а) бор-епоксидної стрічки для горизонтального стабілізатора винищувача F-14 (в); (б) 10-осьова система комп'ютерного керування укладання стрічки. Ця машина здатна укладати 75- і 150-мм стрічки зі швидкістю до 0,5 м / с (1,7 м / с) (Source: (a) Courtesy of Grumman Aircraft Corporation. (б) Courtesy of The Ingersoll Milling Machine Company)

**Намотування** - це універсальний метод виготовлення композитних конструкцій витками ниток, що повторюються, або стрічок у безперервному автоматизованому режимі (рис. 86). Існуючі методи намотування: твердофазна, «суха» – формування заготовок виробів, що мають форму тіл обертання, шляхом намотування препрега (попередньо просоченого матеріалу) на оправку;



рідкофазна, «мокра» - волокна просочуються рідким сполучним безпосередньо перед намотуванням, тобто. просочення технологічно поєднане з формуванням виробу. Методом намотування можна отримати різні пустотілі вироби, що мають форму тіл обертання: труби, бочки, цистерни, композитні труби, контейнери, циліндричні ємності тощо. Найбільш поширені вироби циліндричної форми. Залежно від характеру навантажень (розподілених, знакозмінних або локальних) визначають структуру намотування, кількість шарів намотування, напрямок та розподіл витків за шарами.



Рис. 86. Процес намотки склотканини на балон

**Пултрúзія** ("протязка") - технологія виготовлення прямих високонаповнених волокном композиційних деталей з постійним поперечним перерізом на основі волокон скла, вуглецю, базальту і полімерних смол. Використовується у виробництві полімерних композиційних матеріалів.

Пултрузійна установка (рис. 87, 88) включає в себе систему подачі волокна, полімерну ванну, преформувальний пристрій, нагріту фільєру (пресформу), синхронізовану тягнучу машину і відрізну машину.

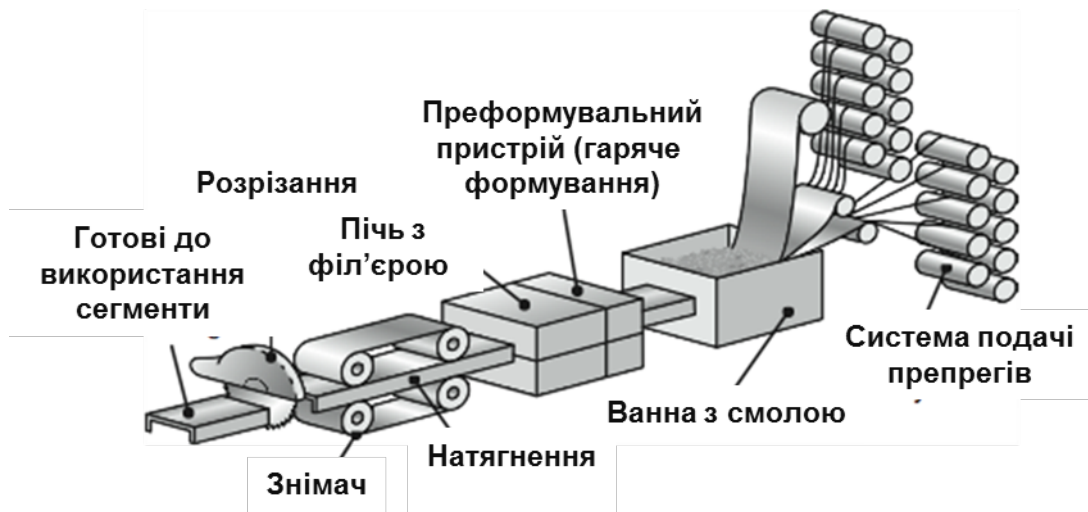


Рис. 87. Схема процесу пултрузії

В якості полімерів зазвичай використовують поліефірні, вінілові, епоксидні смоли. Останнім часом використовують спеціальні «пултрузійні» смоли і отверджувачі оптимізовані для пултрузійного процесу, це підвищило швидкість процесу до 4 ... 6 метрів за хвилину (перші пултрузійні установки мали швидкість протягання близько 1 м / хв.) Найбільш часто використовуваними в пултрузії волокнами є скловолокно та графіт. Волоконні нитки або мати подаються з котушок і пропускаються через полімерну ванну, де вони просочуються полімером. Потім просочені полімером волокна пропускаються через пресформувальний пристрій, який надає волоконно-полімерному складу бажану форму і вирівнює волокна. Після проходження пресформувальних пристроїв волокна і незатверділий полімер пропускаються через нагріту пресформу (фільєру). Вхідна зона фільєри при певних режимах охолоджується водою, щоб не допустити передчасної коагуляції полімеру на вході. Кінцевий продукт, що виходить з фільєри - це сильно отверділий продукт, який не потребує обробки. Отверділий продукт витягується з фільєри витяжною машиною і в відрізній машині розпилюється на готові до використання сегменти. В даний час виготовляються пултрузійні машини з розмірами робочої зони від 305x100 мм (зусилля протягання 5,5 тонн) до 1270x305 мм (зусилля протягання 18 тонн).



Рис. 88. а) Приклади деталей, отриманих пултрузією, (б) Пултрузійна машина.

Використання стільникових конструкцій в літаках представлено на рис. 89. В якості стільникових панелей використовуються препреги з арамідної тканини з епоксидною смолою (рис. 90).

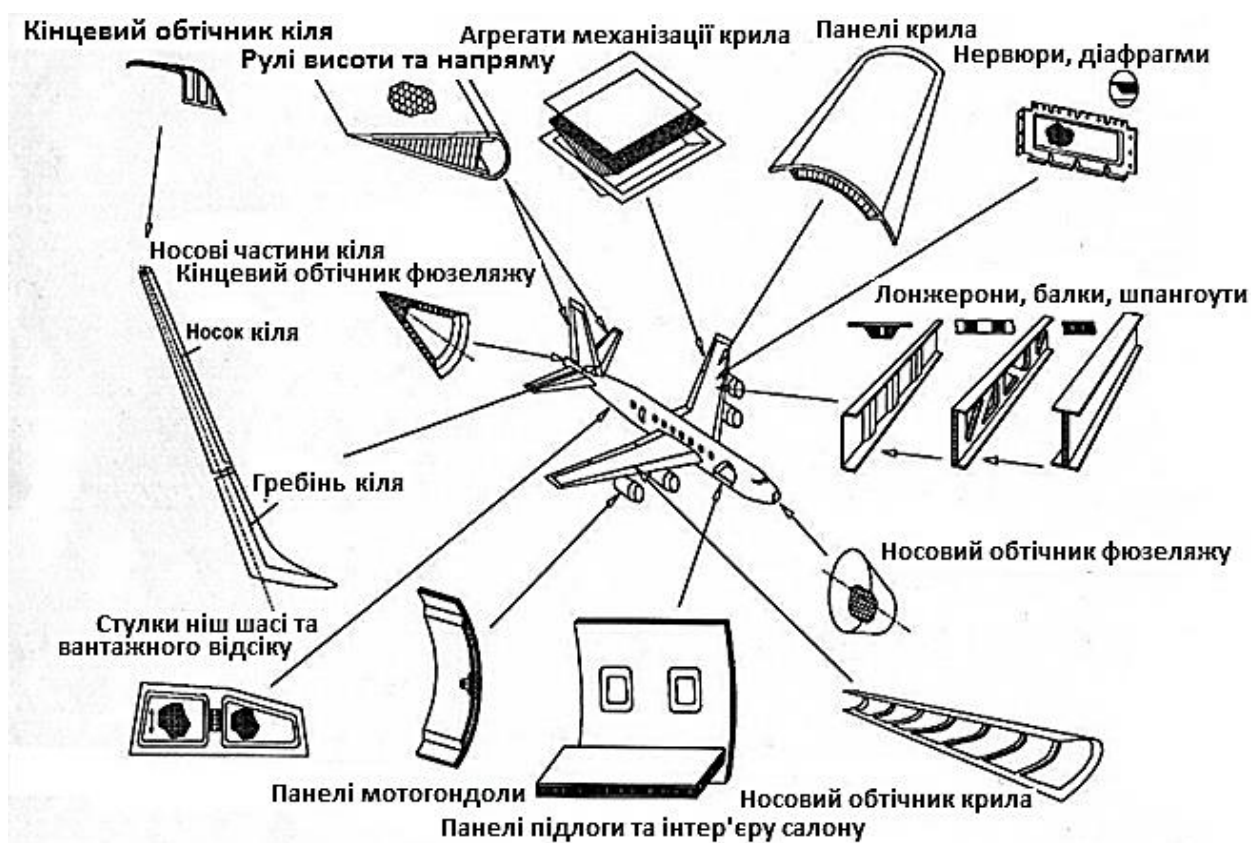


Рис. 89. Використання стільникових конструкцій в літаках

Manufacturing, Engineering & Technology, Fifth Edition, by Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid.  
ISBN 0-13-148965-8. © 2006 Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ. All rights reserved.

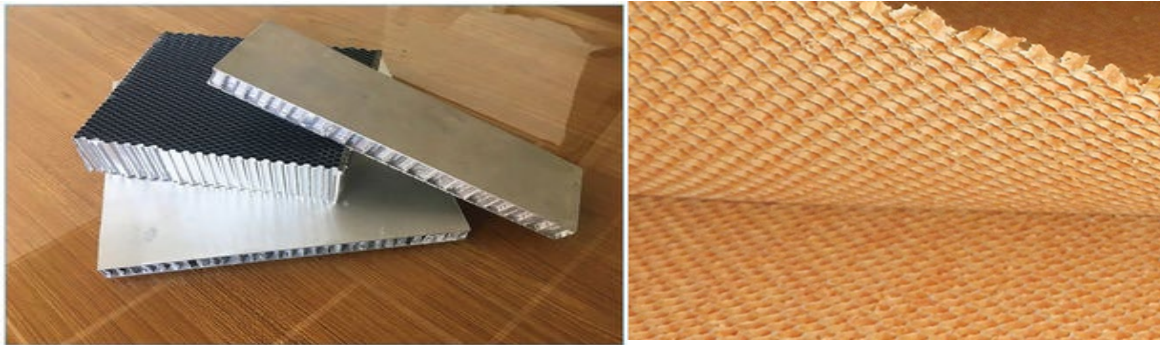


Рис. 90. Арамідні стільники

### Технологічні особливості обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ)

При проектуванні конструкцій з ПКМ необхідно враховувати (для забезпечення технологічності) об'єми, способи і види обробки - фрезерування, свердління, лазерне, гідроабразивне різання тощо. Складності при механічній обробці ПКМ визначаються їх фізико-механічними характеристиками (рис. 91): схильності до розшарування в процесі обробки в наслідок їх шаруватості, структурної неоднорідності, високої твердості матеріалу наповнювача і низької пластичності матриці. При обробці ПКМ необхідно використовувати інструмент із твердосплавним або алмазним покриттям (рис. 92), а також враховувати якість, спосіб заточування, конструкцію робочої зони і геометричну форму різальної кромки, який би забезпечив обробку двох різних матеріалів одночасно, з яких складається ПКМ, - високов'язка полімерна матриця і високоміцний і високомодульний наповнювач.

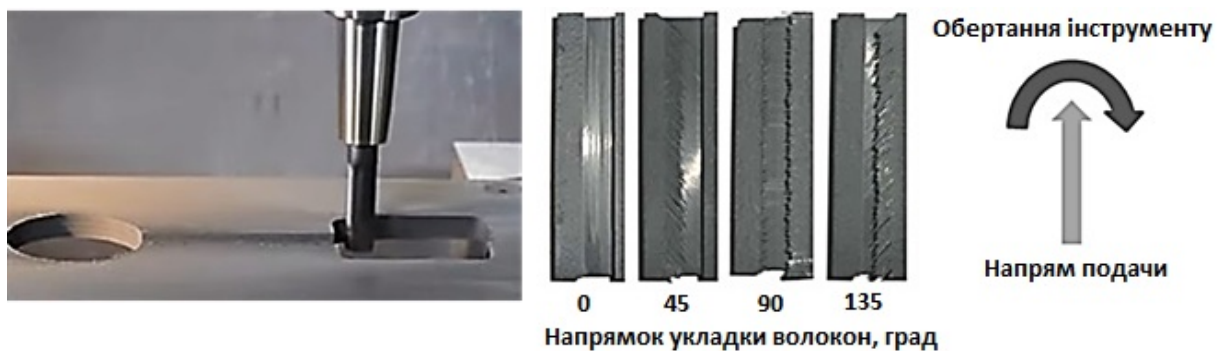


Рис. 91. Фрезерування вуглепластику - а). Вплив напрямку укладання волокон в ПКМ на якість фрезерування поверхні пластин вуглепластику - б) (А. Е. Раскутін, А. В. Хрульков, Р. І. Гірш / Технологічні особливості механообробки композиційних матеріалів при виготовленні деталей конструкцій / Огляд)



Рис. 92. Приклади інструменту для механічної обробки

Гідро-абразивна і лазерна операції розкрою використовуються на етапах отримання заготовок для деталей з препрегів, вуглепластиків і склопластиків, в тому числі і при пакетному різанні (рис. 93). У зв'язку з тим, що при лазерній обробці температура плавлення волокон набагато вище, ніж температура плавлення смоли, лазерна різка армованого скловолокном пластику і вуглецевого волокна є складним завданням, оскільки пластмаса має тенденцію обвуглюватися на різучій кромці. Найкращі результати дає різання за допомогою лазерів з дуже високою піковою потужністю і короткою довжиною імпульсу. Якщо процес проходить при високій швидкості повторень, то гарна якість розкрою може бути досягнута з використанням методу багатопрохідного різання. Оптимальні результати досягнуті також за допомогою довжини хвилі лазера в УФ діапазоні. Недоліком даного методу є низька ефективна швидкість різання і тривалий цикл обробки. Таким чином, спосіб багатопрохідного різання використовується головним чином для матеріалів невеликої товщини.

У порівнянні з механічним вирізанням з подальшим фрезеруванням гідроабразивний процес більш продуктивний, але є ряд обмежень при реалізації цього технологічного процесу. З боку виходу струменя рідини має бути вільне місце, а такий процес складно реалізувати при складанні, тому що гідроабразивному струменю нікуди буде виходити. Крім того, різ на товстих

матеріалах виходить не таким рівним, так як струмінь при русі може відхилитися від прямої лінії та залишатимуться риси. На самому початку процесу також виникає гідроудар, від якого може відбуватися розшарування матеріалу з боку виходу струменю рідини.

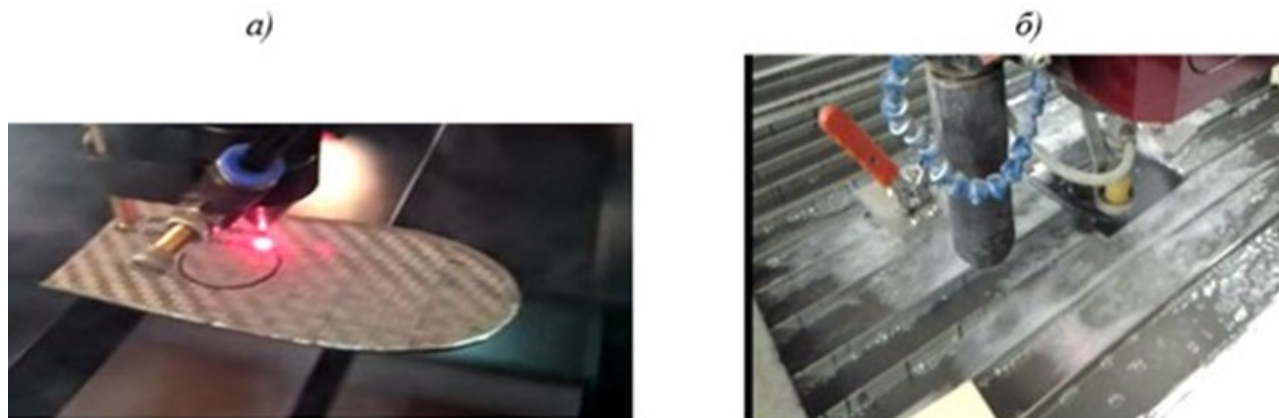


Рис. 93. Процес різання вуглепластику лазерним променем (а), гідроабразивною струєю (б) (А. Е. Раскутін, А. В. Хрульков, Р. І. Гірш / Технологічні особливості...)

При виготовленні деталей конструкцій літаків одним з масових процесів механічної обробки ПКМ є свердління. Процес свердління застосовується при отриманні отворів : - під складально-монтажні операції; - під попереднє технологічне складання; - технологічних і базових отворів; - контрольних - для визначення наявності зв'язуючого при операціях просочення тощо. При виконанні отворів необхідно враховувати їх функціональне призначення - отвори для зборки силових елементів конструкцій, функціональні (для переливу палива, в шумопоглинаючих панелях, зливу конденсату тощо) і технологічні. У кожному з цих випадків вимоги до якості отворів визначаються вимогами конструкторської документації. Якість одержуваних отворів по входних і вихідних кромках, точність і чистота поверхні циліндричної частини отвору надзвичайно важливі з точки зору надійності, довговічності і працездатності конструкції. Максимальну продуктивність і стабільну якість наскрізних отворів в ПКМ забезпечує правильно підібраний інструмент та режими різання під час свердління, а також конструктивна жорсткість технологічної оснастки. Велику роль в забезпеченні

якості поверхні отворів грає стійкість і геометрична форма ріжучих крайок інструменту.

Основними дефектами, що виникають при механічній обробці, є: розтріскування зв'язуючого, розшарування, висмикування волокон, непрорізання волокон, термічна деструкція зв'язуючого. Ріжуча кромка зазвичай крихко руйнує матрицю і зрізає армуючі волокна. Для усунення цих дефектів використовують спеціальні конструкції інструментів, оптимізують їх геометричну форму, технологічні режими свердління, використовуючи спеціальні пристосування.

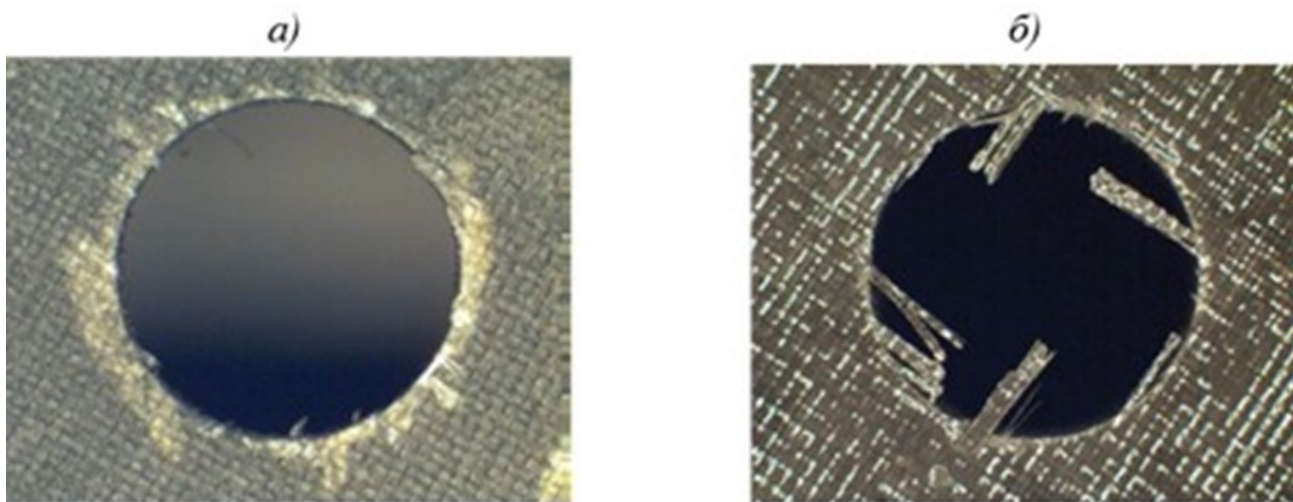


Рис. 94. Дефекти, що виникають при механічній обробці: розшарування (деламінація) (а), розшарування і непрорізання волокон (б) (А. Е. Раскутін, А. В. Хрульков, Р. І. Гірш / Технологічні особливості...)

При свердлінні ПКМ часто виникають дефекти на вході і виході отвору, зумовлені особливостями силового впливу свердла на заготовку. На вході спостерігаються розшарування (деламінація) (а) і розрив матеріалу, а на виході - розшарування і непрорізання волокон (б). Оскільки отвори є концентраторами напружень, такі дефекти сприяють зниженню втомної і статичної міцності конструкцій. Для мінімізації дефектів інструментальні фірми пропонують спеціальні конструкції свердел.

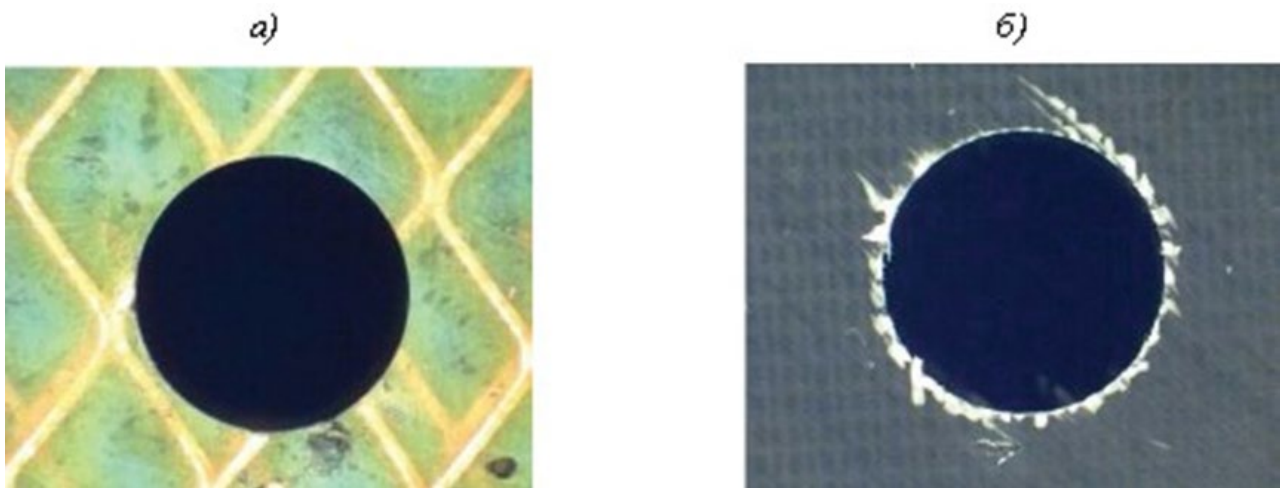


Рис. 95. Блискавкозахисний шар у вигляді дрібної або більшої мідної сітки (а) дозволяє свердлити вуглепластик з прискореною подачею без втрати якості отвору; склотканина - підвищує ризик деламінації (б), погіршуючи якість. Обидва матеріали можуть легко оброблятися при правильному виборі інструменту і режимів обробки. (А. Е. Раскутін, А. В. Хрульков, Р. І. Гірш / Технологічні особливості...)

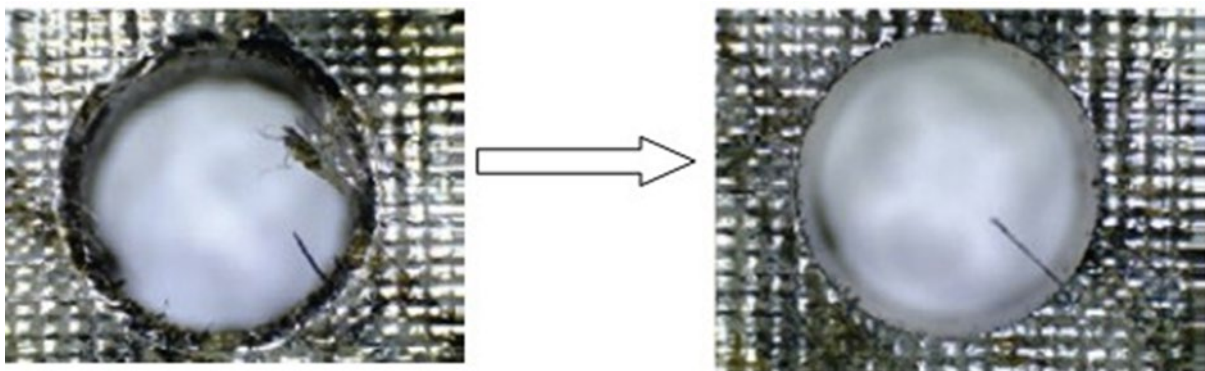


Рис. 96. Двостадійна обробка різними інструментами (А. Е. Раскутін, А. В. Хрульков, Р. І. Гірш / Технологічні особливості...)

Прискорення подачі інструменту і швидкості різання підвищує продуктивність процесу, але більш важливим фактором є якість отвору. Низька якість отвору призводить до необхідності двостадійної обробки різними інструментами. Приклад отримання якісного отвору при двостадійній обробці при свердлінні представлений на рис 96.



Для зменшення розшарування на вході отвору використовують свердла з подвійним заточуванням, а для усунення не прорізання волокон - свердла з гострими крайками на периферії.

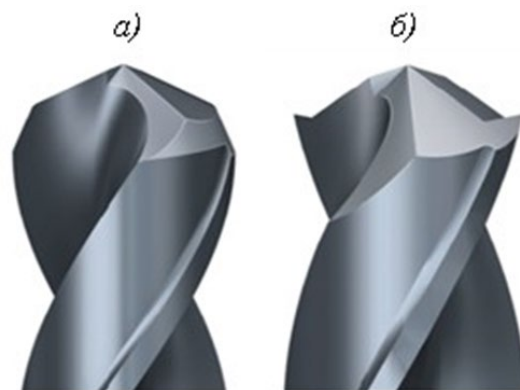


Рис. 97. Свердла для ПКМ з подвійною заточуванням (а) і з підрізними кромками (б)

Таким чином кожен з розглянутих способів розкрою має свої специфічні особливості, обумовлені різною природою дії на матеріал. Типові переваги і недоліки механічного, лазерного, гідроабразивного різання наведені у табл.5.

Таблиця 5.

Порівняльна характеристика способів обробки композитів.

Вид обробки	Переваги	Недоліки
Механічна	Технологія обробки широко використовується і забезпечує високу точність при виготовленні деталей	Малий ресурс інструменту - притуплення крайок призводить до розшарування, наявності вирваних волокон, підвищення температури в зоні різання, що призводить до термічної деструкції матриці
Струйно-абразивна	Забезпечує різання пакетів великої товщини і велику продуктивність; точність при різанні з значними допусками	Підвищена шорсткість на поверхнях в зоні розрізу, небезпека насичення деталі водою
Лазерна	Висока швидкість і точність різання, немає обмежень за габаритами заготовок або деталей	Термічна деструкція матриці в зоні різання з незначною зоною оплавлення країв

## **Питання для самоперевірки**

1. Назвіть основні проблеми пов'язані з використанням великої частки композиту в структурі літака?
2. Які основні технології виробництва композитних деталей та продукції.
3. В чому полягає технологія виробництва композитного матеріалу – контактне формування?
4. Як виготовляють препреги? Сфери їх застосування. Виробництво препрегів.
5. В чому полягає технологія пултрузії? Схема процесу.
6. В чому полягає технологія виробництва композитного матеріалу – вакуумна інфузія?
7. Які технологічні особливості обробки композиційних матеріалів?
8. Дайте порівняльну характеристику способів обробки композитів?
9. Які дефекти можуть виникати при механічній обробці листових ПКМ?
10. Назвіть основні недоліки механічної обробки композитів.
11. Назвіть основні недоліки гідро-абразивного і лазерного розкрою композитів.

## **ПОКРИТТЯ**

### **Класифікація покриттів за призначенням**

Деталі машин та приладів контактують один з одним і з навколишнім середовищем своїми поверхнями, до властивостей яких висувають специфічні вимоги, що часто не забезпечуються властивостями матеріалу деталі. Так, до тієї чи іншої поверхні виробу або навіть до всього виробу можуть пред'являтися вимоги особливої хімічної стійкості, зносостійкості, високої відбивної здатності, високої електропровідності тощо. Відомі конструкційні матеріали в багатьох випадках такі властивості на необхідному рівні не мають. Іноді економічно вигідніше виготовити деталь з дешевого конструкційного матеріалу, а властивості поверхні забезпечити нанесенням спеціального покриття. Сучасний рівень розвитку машинобудування багато в чому визначається розвитком технологій нанесення покриттів та їх властивостями.

За призначенням покриття поділяють на:

- захисні, що забезпечують стійкість об'єкта при взаємодії із зовнішнім середовищем;
- захисно-декоративні, що покращують, крім захисних властивостей, зовнішній вигляд виробу;
- спеціальні, що служать для зміни фізичних властивостей поверхневих шарів виробу (підвищення мікротвердості, зміни коефіцієнта тертя, зміни оптичних, магнітних, електричних та інших властивостей поверхні);
- відновлювальні призначені для відновлення форми та розмірів поверхонь зношених деталей або деталей із виправним браком (за формою та розмірами); часто відновлювальні покриття виконують одночасно захисні функції;
- конструкційні покриття виконують у виробі роль конструктивного елемента: тонкоплівкові шари у виробках мікро- та радіоелектроніки (інтегральні мікросхеми, напівпровідникові елементи та ін.), резистори та ін. утворюють самостійний виріб, наприклад коркові деталі тугоплавких матеріалів, одержувані напиленням
- технологічні покриття не несуть будь-яких функцій у виробі та є допоміжними на певних етапах та операціях виготовлення виробу.

В залежності від матеріалу, що наноситься, покриття ділять на:

- металеві;
- неметалічні неорганічні (хімічні сполуки – оксидні, фосфатні, силікатні, фторидні тощо).
- органічні (лакофарбові, полімерні, рослинні, смоли, жива тканина);

У багатьох випадках найбільш оптимальним є нанесення комбінованого покриття, що складається з кількох шарів (рис. 98).

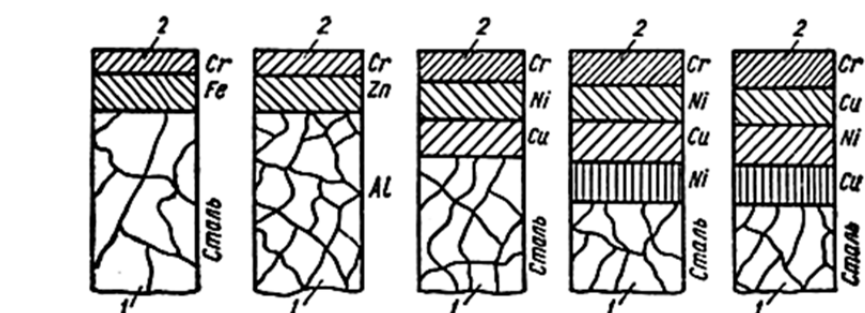


Рис. 98. Приклади використання поліметалічних шаруватих комбінованих електролітичних покриттів: 1 - основний метал; 2 - комбіноване електролітичне покриття

## Захисні покриття деталей і конструкцій літаків

Для запобігання та захисту деталей ЛА від корозії на їх поверхні створюють захисні водонепроникні плівки: металеві, окисні, лакофарбові та масляні.

До металевих відносяться анодні і катодні покриття, плакування одного металу іншим. Наносять, їх гарячим і гальванічним способами. При гарячому способі деталі занурюють у ванну з розплавленим металом або набризкують його на поверхню деталі (металізація). Металеві покриття наносять також термомеханічним способом, званим плакуванням. Гальванічний спосіб нанесення захисного шару металу проводиться за допомогою електричного струму.

У літакобудуванні з гальванічних покриттів найбільш широко застосовуються кадміювання і цинкування, а з катодних - хромування.

Для захисту металів і сплавів від корозії також знайшло широке застосування оксидування, що створює окисні плівки (анодування, хімічне оксидування, воронування). Анодування (анодне оксидування) широко застосовується для захисту від корозії алюмінієвих сплавів.

Обшивка літаків, виготовлена з алюмінієвих сплавів, від корозії захищається наступними способами: оксидною плівкою; оксидною плівкою, покритою безбарвним лаком; оксидною плівкою, покритою емаллю; оксидною плівкою, покритою грунтом і емаллю.

Деталі, виготовлені з магнієвих сплавів що мають знижену корозійну стійкість, у всіх випадках захищаються грунтовкою і емаллю, що наносяться на попередньо оксидовану поверхню.

Сталеві деталі в залежності від їх призначення захищають:

- металевими покриттями (цинком, кадмієм, хромом);
- лакофарбовим покриттям по попередньо фосфатованій або опіскоструминеній поверхні;
- фосфатуванням з подальшим нанесенням мастила.

При виявленні на будь-яких агрегатах і деталях літака корозії необхідно в першу чергу з'ясувати причину її появи і, якщо вона не є небезпечною, усунути її,

для чого попередньо видалити продукти корозії, а потім зробити фарбування або нанести анодну плівку або цинкове покриття в залежності від матеріалу агрегату або деталі. Причинами корозії можуть бути не тільки природні корозійні процеси, а й низька якість захисних покриттів деталей. В останньому випадку необхідно вжити заходів до поліпшення якості захисних покриттів або нанести захисні покриття знову, попередньо видаливши старі.

Найбільш схильні до корозії наступні деталі конструкцій ЛА:

- обшивка крила і хвостового оперення, особливо нижня частина поверхні;
- деталі, розташовані в зоні дії вихлопних газів;
- шарнірно-болтові з'єднання;
- ділянки конструкцій поблизу місць розташування акумуляторів, що стикаються з теплозвукоізоляцією, де може затриматися волога;
- гвинти, що кріплять знімні панелі, залисина і кришки люків; .
- деталі з магнієвих сплавів в місцях контактів з іншими деталями і в зазорах;
- підшипники відкритого і закритого типу в результаті попадання в них вологи при недостатньому мастилi;
- штоки циліндрів, пружини і клапани різних агрегатів систем літака;
- трубопроводи, що знаходяться під впливом вологи, спирто-гліцеринової суміші та протипожежної рідини.

Ознакою корозії алюмінієвих сплавів служить поява на поверхні деталей білих і сірих плям, окремих виразок або чорних крапок.

На сталевих деталях корозія супроводжується утворенням коричнево-червоного нальоту (іржі).

Деталі з магнієвих сплавів відносно корозії є менш стійкими, ніж деталі з інших матеріалів, і тому вимагають ретельного і систематичного догляду та спостереження за ними. Корозія магнієвих сплавів виявляється по спучуванню лакофарбового покриття і появи вологого сольового нальоту брудно-білого (сірого) кольору.

Металеві покриття широко застосовують у промисловості, їх наносять головним чином на металеві поверхні, а в ряді випадків і на неметалічні матеріали (скло, пластмаси, слюду, папір тощо). Їх наносять на метали в основному для захисту від корозії. За принципом захисної дії розрізняють анодне і катодне покриття. Анодні покриття мають у водневому розчині електролітів більш негативний електрохімічний потенціал, ніж захищений метал, а катодні — більш позитивний. При наявності в покритті пор або пошкоджень на поверхні утворюються мікропари з покриття і металу, який захищається. В мікропарах руйнуються ділянки з більш електронегативним потенціалом (аноде). Таким чином, якщо пористе покриття анодне, то воно руйнується, захищаючи тим самим руйнування металу. Пористі катодні покриття особисто не руйнуються, а прискорюють руйнування нижчележачого металу тим більше, чим більша різниця потенціалів між покриттям і основним металом і чим більше електропровідне навколишнє середовище. Тому катодні покриття можна застосовувати тільки при відсутності в них наскрізних пор.

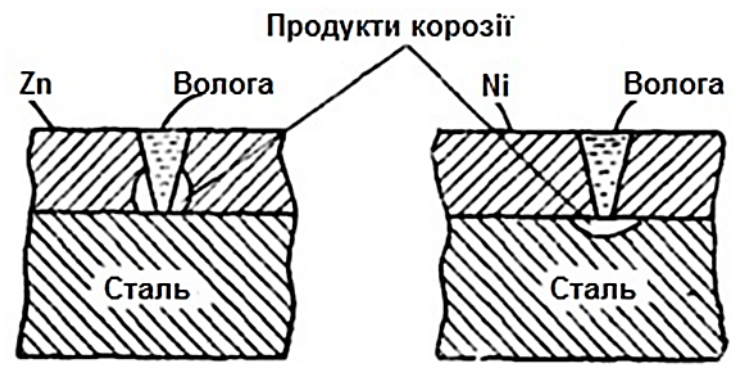


Рис. 99. Руйнування в анодному покритті і основного металу з катодним покриттям

Металеві покриття не тільки захищають від корозії, але й надають поверхні гарний зовнішній вигляд, твердість, зносостійкість, електропровідність, відбивальну здатність і інші властивості.

Для отримання металевих покриттів на металах застосовують наступні методи: електролітне осаджування, хімічне осаджування, гаряче нанесення, термодифузійну обробку, плакування, металізацію напиленням.

**Лакофарбовим покриттям** називається один або кілька висохлих шарів лакофарбових матеріалів, нанесених на поверхню і міцно з'єднаних з основою в результаті складних фізичних чи хімічних процесів (полімеризації, поліконденсації, карбонізації тощо), що перетворюються в тверду декоративно-захисну плівку.

Лакофарбові покриття застосовують для захисту поверхні від атмосферних впливів, металевих виробів від корозії, дерев'яних виробів від руйнування або зношення, для декоративного оздоблення різних конструкцій, підвищення їх санітарно-гігієнічних і протипожежних властивостей, а також в естетичних і інженерних цілях.

Лакофарбові покриття відрізняються дешевизною, простотою нанесення та надійністю. Вони знайшли застосування як захисні та захисно-декоративні покриття. В даний час понад 80% всіх металевих виробів захищають лакофарбовим покриттям.

Для отримання хорошого захисного ефекту і зовнішнього вигляду зазвичай використовують системи покриттів (рис. 100), застосовуючи пошарові речовини, що мають підвищену адгезію до основи, що покривається (ґрунти), речовини для вирівнювання поверхні (шпаклівки або шпатлівки), захисні та декоративні склади: емалі, фарби, лаки (табл. 6).

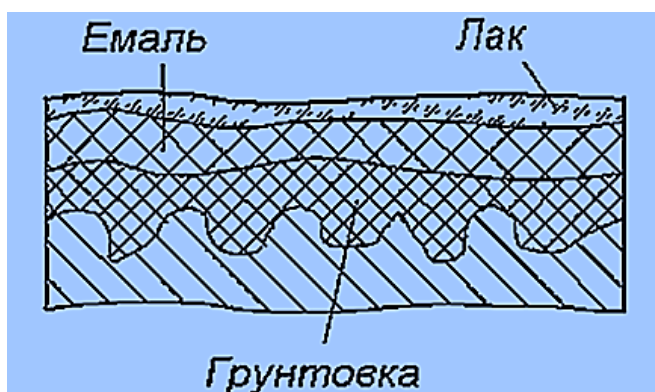


Рис. 100. Схема системи лакофарбового покриття

## Системи (шари) лакофарбових покриттів на металах.

Захисно-декоративні покриття		Захисні і спеціальні покриття		
поверхні виливків, штамповки в стані поставки з $Rz > 12,5$ мкм	поверхні з шорсткістю $Rz \leq 12,5$ мкм	кольорові і чорні метали	кольорові та чорні метали під час експлуатації всередині приміщення	кольорові метали під час експлуатації всередині приміщення
Грунт, шпаклівка, емаль (фарба) в 2-3 шари, лак	Грунт, емаль (фарба), 2–3 шари	Грунт, емаль (фарба), 2–3 шари	Емаль	Лак

**Питання для самоперевірки**

1. Яке призначення покриттів?
2. Назвіть захисні покриття деталей і конструкцій ЛА.
3. Які існують методи нанесення покриттів на поверхні виробів?
4. Якими способами захищається від корозії обшивка літаків, виготовлена з алюмінієвих сплавів?
5. Як захищаються поверхні деталей, виготовлених з магнієвих сплавів?
6. Як захищаються поверхні сталевих деталей?
7. Які з гальванічних покриттів найбільш широко застосовуються у літакобудуванні?
8. Яка різниця між анодними і катодними покриттями?
9. На які матеріали наносять металеві покриття?
10. Які методи застосовують для отримання металевих покриттів на металах ?
11. Перелічить найбільш схильні до корозії деталі конструкцій ЛА.
12. Для чого проводять анодне оксидування алюмінієвих і титанових сплавів.



13. Які ознаки корозії алюмінієвих сплавів на поверхні деталей? Магнієвих?
14. Які ознаки корозії на поверхні сталевих деталей?
13. Які ознаки корозії магнієвих сплавів на поверхні деталей?

### Література

1. Технологія конструкційних матеріалів. Підручник/ М. Н. Сологуб, І. О. Рожнецький, О. І. Некоз та ін. За ред.. М. Н. Сологуба – К.:Вища школа; 2002 – 374с.
2. Ключников Ю.В. / Технологія конструкційних матеріалів. Конспект лекцій /, П.В. Кондрашев та інші. -2017. НТУУ «КПІ».-[Електронний ресурс].- - 165с. : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/20833>
3. Ключников Ю.В. / Технологія конструкційних матеріалів: Обробка металевих виробів різанням. Практикум / Д. А. Лесик, В. В. Джемелінський, Ю. В. Ключников, О. Т. Сердітов.– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 119 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41343>
4. Ключников Ю. В. / Методичні вказівки з лабораторних і практичних робіт до вивчення до вивчення дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів». Розділ: Технологія ливарного виробництва [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» ; уклад. Ю. В. Ключников, П. В. Кондрашев, В. В. Джемелінський, О. Т. Сердітов, А. М. Лутай, О. О. Гончарук. – Електронні текстові данні (1 файл: 4,96 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 58 с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/20835>
5. Ключников Ю. В. / Методичні вказівки з лабораторних і практичних робіт до вивчення до вивчення дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів». Розділ: обробка металів тиском/ [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. В. В. Джемелінський, Ю. В. Ключников, О. Т. Сердітов, О. Д. Кагляк, П. В. Кондрашев. – Електронні текстові данні (1 файл: 860,4 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 62 с. <http://ela.kpi.ua/jspui/handle/123456789/20499>

6. Ключников Ю. В. / Методичні вказівки з лабораторних і практичних робіт до вивчення до вивчення дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів». Розділ:Зварювальне виробництво/ Укладачі В. В. Джемелінський, Ю. В. Ключников, О. Т. Сердітов, А.М.Лутай, В.Л.Дубнюк, НТУУ-КПІ електронний ресурс. 2017. - 37 с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/20834>

*Додаткова література*

7. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко та ін. – 2-ге вид., перер. і доп. – К. ІВЦ «Політехніка», 2002. – 384 с.

8. Кузін О.А., Яцюк Р.А. Металознавство та термічна обробка металів: підручник. – Л.: «Афіша», 2002. – 304 с.

9. Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials / F.C. Campbell . © ISBN-13: 978-1-85-617495-4 / ISBN-10: 1-85-617495-6 / Printed in Great Britain. 2006 Elsevier Ltd. – 600 p.

10. Manufacturing, Engineering & Technology, Fifth Edition, by Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid. ISBN 0-13-148965-8. © 2006 Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.

11. Groover M.P. Fundamentals of modern manufacturing: Materilas, processes, and systems, Fourth Edition. – USA: «John Wiley & Sons (Wiley)», 2010. – p. 1013.