

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

В.М.ПЛЕСКАЧ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни «Проектування виробів з порошкових і композиційних матеріалів» для студентів спеціальності 132 Матеріалознавство

спеціалізації Композиційні та порошкові матеріали, покриття
усіх форми навчання

Конспект лекцій з дисципліни «Проектування виробів з порошкових і композиційних матеріалів» для студентів спеціальності 132 Матеріалознавство спеціалізації Композиційні та порошкові матеріали, покриття усіх форми навчання / Укл.: В.М. Плескач – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 82 с.

Укладач: В.М. Плескач, доц., к.т.н.

Рецензент: О.А.Мітяєв, проф., д.т.н.

Відповідальний за випуск: В.М. Плескач, доц., к.т.н.

Затверджено на засіданні
кафедри композиційних
матеріалів, хімії та технологій,
протокол № 7 від 05.02.2025 р.

Рекомендовано до видання НМК
факультету БАД,
протокол № 5 від 14.04.2025 р.

..ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Умови експлуатації виробу.....	5
1.1 Навантаження і напруження в експлуатації	5
1.2 Граничні умови забезпечення експлуатації виробу.....	6
1.3 Робоче середовище виробу	7
2 Проектування виробів з композиційних матеріалів	9
2.1 Принципи проектування виробів з композиційних матеріалів.....	9
2.2 Композиційні матеріали для виготовлення виробів	11
2.3 Форма і розміри елементів виробів з композиційних матеріалів	17
2.4 Проектування стільникових конструкцій (СтК)	30
2.5 Міцність виробів з композиційних матеріалів	38
2.6 Точність виробів з композиційних матеріалів	51
2.7 Забезпечення технологічності виробу	52
3 Проектування виробів з порошкових матеріалів	54
3.1 Завдання на проектування та його аналіз	54
3.2 Порошкові матеріали для виготовлення виробів.....	55
3.3 Принципи проектування порошкових виробів	62
3.4 Класифікація порошкових виробів	63
3.5 Форма і розміри елементів порошкових виробів	65
3.6 Міцність виробів з порошкових матеріалів.....	72
3.7 Точність виробів з порошкових матеріалів.....	77
Література	78
Додаток А Експлуатаційні властивості матриць.....	80

ВСТУП

Проектування будь-яких виробів – складний і відповідальний процес. Він ґрунтується практично на всіх знаннях, отриманих під час попереднього навчання: від матеріалознавства і опору матеріалів і до спеціальних дисциплін. Особливість проектування виробів з порошкових і композиційних матеріалів полягає у тому, що формування виробу і утворення властивостей його матеріалу відбувається практично одночасно у процесі виготовлення виробу. Тому конструктор при проектуванні виробу повинен чітко уявляти призначення виробу, його матеріал і майбутню технологію виготовлення.

Перед початком проектування конструктор повинен усвідомити: призначення і необхідну довговічність виробу (фізичну і моральну), характер і розрахунковий час його роботи в експлуатації, проаналізувати робоче середовище, в якому доведеться працювати виробу та інші вимоги завдання на проектування. Якщо все це відомо, то загальна схема проектування така: обрати відповідний матеріал, надати виробу правильну форму і розміри, провести перевірку виробу на міцність та забезпечити технологічність його виготовлення.

Мета вивчення даної дисципліни власне й полягає в узагальненні знань про відповідні матеріали, вимоги до конфігурації виробів, способи розрахунку і забезпечення їх міцності в експлуатації.

1 УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБУ

1.1 Навантаження і напруження в експлуатації

Навантаження (у Н) поділяються на види:

- за способом прикладення сили – об'ємні та поверхневі;
- за характером дії – статичні та динамічні;
- за часом дії – постійні, тимчасові та циклічні.

Об'ємні, або масові, *навантаження* – це вага, сили інерції тіла, яке рухається тощо. Ці сили прикладені у кожній матеріальній точці об'єму, який займає тіло - виріб, елемент конструкції. Вони часто не враховуються, якщо нема спеціального застереження.

Поверхневі навантаження діють на зовнішню поверхню виробу. У свою чергу вони поділяються на зосереджені та розподілені. Зосереджені навантаження – це сили, прикладені до площинки, розміри якої замалі у порівнянні з розмірами конструкції, на яку вони діють. Розподілені навантаження утворюються тоді, коли сили прикладені рівномірно по довжині чи по поверхні всього виробу або його частині з достатньо великими розмірами.

Статичні навантаження – це навантаження, які прикладаються з малою швидкістю або які зростають поступово від нульового до свого кінцевого значення, а потім залишаються постійними.

До *динамічних навантажень* відносяться ударні навантаження, час дії яких триває дуже малі частки секунди, а також періодичні навантаження і сили інерції, які виникають при коливаннях.

Постійні навантаження діють протягом всього періоду експлуатації виробу, а *тимчасові* з'являються на деякий час, а потім зникають. З точки зору забезпечення працездатності виробів не має значення – діє сила постійно чи тимчасово. Розрахунок ведеться по максимальному навантаженню, яке діє у певний момент часу.

Циклічні навантаження – це навантаження, які змінюються в часі із заданою закономірністю. Циклічні навантаження у деталях машин змінюються між двома крайніми значеннями – найбільшим навантаженням P_{\max} і найменшим P_{\min} . Характер зміни навантажень за період циклу може бути досить різноманітним. Він характеризується *коефіцієнтом амплітуди* (або асиметрії) циклу r : $r = P_{\min} / P_{\max}$. При цьому навантаження беруться з урахуванням знаку (плюс – при розтяганні, мінус – при стисканні). Найпоширенішим циклічним навантаженням є симетричне навантаження з $r = -1$.

Навантаження викликають *деформації*. Види деформацій: розтяг, стиск, зсув (зріз), кручення, згин.

Згин може бути поперечним і поздовжнім. При *поперечному згині* стрижень (балка) згинається у напрямку, перпендикулярному його осі. *Поздовжній згин* – це деформація (втрата прямолінійності) видовженого стрижня, який стискається поздовжніми силами.

Робочий стан виробу в експлуатації точніше характеризується напруженнями, які виникають у небезпечних перерізах. *Напруження* (у Па) – це сила, що діє на виріб, віднесена до одиниці площі її поперечного перерізу. Воно характеризує ступінь дії на виріб зовнішнього навантаження незалежно від його розмірів. Розрізняють *нормальне* напруження, яке діє перпендикулярно до поперечного перерізу $\sigma = P/F$, і *дотичне* напруження, яке діє у площині поперечного перерізу $\tau = P/F$ (тут P – навантаження у Н, а F – площа поперечного перерізу у m^2 (Па)). Характеристикою міцності матеріалу при статичному навантаженні є *границя міцності* $\sigma_b = P_b/F$, де P_b – найбільше зусилля, яке витримує матеріал до руйнування.

Здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при циклічному навантаженні називається *опором втомі*, або *витривалістю*. Найбільше напруження, яке матеріал може витримати, не руйнуючись, нескінченну кількість циклів зміни напружень (порядку 10^7 циклів), називається *границею витривалості* σ_r (або τ_r).

У місцях різкої зміни поперечного перерізу виникають місцеві підвищення (*концентрації*) напруження до σ_{max} . Концентраторами напружень можуть бути проточки, отвори, пори, тріщини та інше. Ступінь концентрації характеризується *коефіцієнтом концентрації напружень* $\alpha = \sigma_{max}/\sigma$ (де σ – середнє, або номінальне напруження у даному поперечному перерізі).

1.2 Граничні умови забезпечення експлуатації виробу

З метою надійного виконання виробом своєї функції необхідно визначити граничні умови за міцністю, жорсткістю та стійкістю.

Для забезпечення *міцності* деталі важливо правильно обрати безпечне, або допустиме напруження. *Допустимим напруженням* $[\sigma]$ називається найбільше напруження, при якому забезпечуються розрахункові міцність і довговічність виробу, що проектується. Воно становить частку від граничних напружень, які витримує матеріал виробу. Число n , яке показує, у скільки разів допустиме напруження

менше граничного, називається *запасом міцності*. Для крихких матеріалів за граничне напруження береться границя міцності σ_b , для пластичних – границя плинності σ_t . Вибір запасу міцності n залежить від конструкції та призначенні деталі, стану (однорідності) її матеріалу, передбачуваної довговічності, виду навантажень та інше. Допустиме напруження для крихких матеріалів знаходиться як $[\sigma] = \sigma_b/n$, а для пластичних – як $[\sigma] = \sigma_t/n$.

Умовою міцності при циклічних навантаженнях для симетричного циклу є $\sigma_{-1}^{\max} \leq [\sigma_a]$ - *допустима амплітуда навантажень*. У свою чергу допустима амплітуда навантажень визначається як $[\sigma_a] = \sigma_{-1}\varepsilon/n$ (де ε – коефіцієнт, який враховує розміри деталі).

При розтягу (стисканні) у певних межах матеріал деталі може деформуватися пружно *поздовжньо* пропорційно навантаженню (закон Гука): $\varepsilon = \sigma/E$ (E - модуль пружності матеріалу у Па, $\varepsilon = \Delta l/l$ – відносна деформація). Пропорційність зберігається доти, доки матеріал виробу деформується пружно, і діюче напруження не перевищує границю пропорційності $\sigma_{пр}$, за якою починається *пластичне* деформування (плин) матеріалу деталі. Такий стан може бути обмеженням *допустимої деформації* деталі $[\varepsilon]$ під час експлуатації.

Добуток $E \cdot F$ характеризує *жорсткість* деталі - її здатність зберігати свої геометричні розміри і форму при розтягу (стиску).

Запас *стікості* стрижнів при поздовжньому згині визначається значенням *критичної сили* $P_{кр}$ - сили, при якій стрижень втрачає стійкість (прямолінійність). Відношення $P_{кр}$ до максимальної в експлуатації сили $P_d - P_{кр}/P_d = k > 1$ називається *запасом стікості*.

1.3 Робоче середовище виробу

1.3.1 Атмосфера

Найчастіше виробу експлуатуються на *повітрі*. Воно складається з кисню, азоту і невеликої кількості інших газів. Але важливу роль відіграють домішки - сторонні гази, які не входять в елементарний склад повітря (SO_2 , SO_3 , H_2S , NH_3 , Cl_2 , HCl), волога, тверді частинки тощо.

При взаємодії повітря з поверхнею виробу може виникнути атмосферна корозія.

За ступенем зволоженості поверхні виробу розрізняють такі типи атмосферної корозії: *суха атмосферна корозія* – повна відсутність плівки вологи на поверхні виробу; *волога атмосферна корозія* – на поверхні металу є тоненька, невидима плівка вологи, яка утворюється в результаті капілярної, адсорбційної або хімічної конденсації при відносній вологості повітря нижче 100 % (але понад 60...70 %); *мокра атмосферна корозія* – корозія при наявності на поверхні металу видимої плівки вологи.

За кліматичною ознакою склад повітря поділяється на такі типи: сухе континентальне, сухе тропічне, морське та індустріальне. Залежно від вмісту вологи у повітрі можна розглядати повітря сухим або вологим. При розчиненні у волозі сторонніх газів виникає кисле середовище, яке у вигляді «кислотних дощів» може активно діяти на поверхню виробу. Висока температура повітря (у тропіках) та наявність у ньому солей (морське повітря) підсилює дію атмосфери на виріб. З урахуванням дії на виріб вологи і активних газів, які можуть міститися у повітрі, найагресивнішим є індустріальне повітря, найменш активним – сухе континентальне.

1.3.2 Вода

Вода – найпоширеніший розчинник на Землі, здатна розчиняти рідкі, тверді та газоподібні речовини. Вона може бути двох видів: прісна і солоня (морська). Внаслідок іонізації *прісна вода* до певної міри може проводити електричний струм. У хімічному відношенні вода досить активна. З багатьма речовинами вона вступає в **хімічні** реакції вже при звичайній температурі. *Морська вода* містить розчинені гази, мінеральні солі та органічні сполуки, до яких входять майже всі відомі хімічні елементи. Їх кількість визначає *солоність* води, яка вимірюється у проміле — ‰ (тисячних частках).

Морська вода досить агресивна. Її вплив на вироби залежить від солоності, температури, швидкості відносного руху води, ступеня її аерації, наявності твердих домішок тощо.

1.3.3 Нафтопродукти

Бензин – активний органічний розчинник. На стан виробів, крім його власної дії, впливає вміст у бензині мінеральних і органічних кислот, лугів, смол, сірки та її сполук. У бензині внаслідок неякісного очищення може виявитися сірчана кислота. Присутність активної сірки у бензині не допускається. З підвищенням температури бензину

і при контакті бензину з повітрям прискорюється виділення смол на поверхні деталей.

Гас – дещо менш активний розчинник, ніж бензин; змішується з іншими нафтовими розчинниками, але не змішується з водою. Вміст сірки в ньому допускається, але не більше 0,1%.

Мастила – рідкий продукт перероблення нафти і мінеральних масел. Важливими є такі фізико-хімічні властивості мастил, як їх летючість, сумісність з каучуком і деякими полімерами. Вони можуть містити досить велику кількість сірчистих сполук. Фізико-хімічні властивості мастил у процесі експлуатації піддаються значним змінам. У них накопичуються продукти старіння, що випадають у вигляді шламу, води, органічних кислот, механічних домішок. Мастило може викликати корозію внаслідок наявності в ньому сірчистих сполук. *Консистентне мастило* – пластичний матеріал, який становить структуроване загусником рідке мастило, продукт перегонки нафти, вугілля і смолистих сланців. Хімічна активність нижче, ніж у рідких мастил. Один з найпоширеніших видів консистентних мастил – *солідол* – суміш кальцієвих мил і мінеральних індустріальних мастил.

1.3.4 Кислоти і луги

Кислоти у класичному визначенні — електроліти, які розчиняються в іонізуючому розчиннику (наприклад, у воді). До найвживаніших належать кислоти: соляна HCl, сульфатна (сірчана) H₂SO₄, нітратна (азотна) HNO₃ і фосфатна (фосфорна) H₃PO₄. Сильні кислоти – соляна і азотна – корозійні. В міру розбавлення сила дії кислот згладжується.

Луги добре розчиняються у воді. Найбільше значення серед лугів мають їдкий калій КОН і їдкий натрій NaOH. Особливістю лугів є висока реакційна здатність щодо найрізноманітніших матеріалів. Луги спричиняють руйнівний вплив на скло, порцеляну, вовну, шовк та шкіру. Луги зберігають у спеціальних пластмасових упаковках.

2 ПРОЕКТУВАННЯ ВИРОБІВ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Принципи проектування виробів з композиційних матеріалів

Загалом проектування виробів з композиційних матеріалів (КМ) значно відрізняється від проектування виробів з традиційних (компактних) матеріалів.

Проектування деталей з КМ починається з визначення заданих експлуатаційних характеристик виробу. На їх підставі паралельно вирішуються такі питання:

- розроблення складу КМ (необхідний рівень механічних властивостей; об'ємне співвідношення компонентів; взаємодія між компонентами матриця-наповнювач);
- розроблення схеми армування КМ (одно- або двоспрямована, просторова, комбінована);
- визначення геометрії форми і розмірів окремих елементів виробу;
- перевірка міцності виробу.

Процес проектування КМ складається з таких етапів.

На першому етапі розробляються критерії проектування, які можна поділити на конструктивні та проектувальні. До конструктивних критеріїв відносяться: визначення діючих навантажень, загальної конфігурації деталі, з'ясування функціональних вимог і властивостей робочого середовища. Проектувальні критерії – це необхідні властивості матеріалу виробу, визначення можливої технології та орієнтовної собівартості його виготовлення.

На другому етапі на підставі сформульованих критеріїв розробляються вихідний матеріал композиту та детальніша конструкція виробу. Розроблення останньої йде по-різному для таких основних типів виробів: полімерні КМ (ПКМ) (на основі різних типів полімерної матриці), металеві КМ (МКМ), керамічні КМ (ККМ), а також стільникові конструкції (СтК), оскільки для кожного типу властиві свої технології.

Далі проводиться аналіз напружень у небезпечних перерізах (розрахунок на міцність), оптимізується склад і структура матеріалу, уточнюються форма і розміри деталі.

При створенні виробів з ПКМ розглядаються два напрямки. Перший напрямок передбачає створення деталей з порівняно *низькими* міцністними характеристиками. Їх основу становлять дисперснонаповнені матеріали на полімерній основі, але зате вони мають високу технологічність. Другий напрямок - створення деталей з матеріалів з *високими* міцністними характеристиками, в яких як наповнювачі використовують безперервні волокна (наприклад,

скляні), стрічки, ровінг і тканини. Проте складніша технологія збільшує вартість і обмежує серійність їх виробництва.

Проміжну групу становлять вироби з ПКМ, які мають як наповнювач різані волокна. Вони дають виробам меншу міцність, ніж безперевні волокна, але за технологічністю наближаються до матеріалів першого напрямку.

При проектуванні виробу необхідно зважати на його технологічність. Урахування технологічних вимог дуже важливе, оскільки різноманітність технологічних процесів перероблення КМ, широка гамма напівфабрикатів і труднощі контролю якості продукції можуть істотно вплинути на ефективність як самої конструкції виробу, так і її виробництва. Виріб має бути технологічним, легко формуватися й одночасно бути зручним та надійним в експлуатації. Цій меті завжди сприяє спрощення його конфігурації.

Свої технологічні особливості мають конструкції зі стільниковими заповнювачами. Вимог до стільникових конструкцій відносно небагато: вони повинні мати задану міцність і жорсткість при зменшенні маси конструкції і достатній технологічності.

2.2 Композиційні матеріали для виготовлення виробів

Вибір матеріалу композиційного виробу починається з його призначення: в яких умовах виріб працює (робоче середовище), які навантаження на нього діють, їх характер і т.п. За взаємодію з навколишнім середовищем відповідає *матриця* виробу, її стійкість до сонечного випромінювання, повітря, води, хімічних реагентів тощо. Тобто, під час вибору КМ треба орієнтуватися на таку матрицю, яка задовольнятиме умовам експлуатації. Експлуатаційні властивості основних матричних матеріалів наведені у додатку А.

Міцність і більшість механічних властивостей виробу залежать головним чином від *наповнювачів* композиту, їх виду, кількісних характеристик, розташування у матриці тощо. Отже, вибираючи матеріал виробу, треба оцінювати його *склад* загалом – і матрицю, і наповнювачі. При наявності тривалого зовнішнього навантаження треба рахуватися з можливістю релаксації напружень внаслідок певного деформування виробу під час експлуатації.

Одночасно не повинні залишатися поза увагою *технологічні властивості* вибраного композиційного матеріалу, пов'язані і з матрицею, і з наповнювачем.

Найчастіше композиційні матеріали за призначенням поділяються на наступні групи.

2.2.1 Конструктивні деталі загального призначення

У виробках на основі *поліетилену* як наповнювачі використовують високодисперсні порошки і різані волокна; їх вміст звичайно становить 10...50%; технологія виготовлення виробів – лиття під тиском, екструзія, ротаційне формування. При використанні поліетилену ВТ (високого тиску) робоча температура експлуатації становить $t_{\text{екс}} = -40...+70^{\circ}\text{C}$, а на основі поліетилену НТ (низького тиску) - $t_{\text{екс}} = -60...+100^{\circ}\text{C}$.

У виробках на основі *ненасичених полієфірів* як матриця використовуються смоли ПН-1, ПН-3, ПН-11 та інші, армовані склотканинами або стрічками. Внутрішній шар наповнювача може бути сформований зі скломатів. Деталі виготовляються намотуванням, ручним викладанням, автоклавним формуванням. Безперервні труби, будівельні конструкції можуть виготовлятися пултрузією.

Ненасичені малоусадочні полієфіри використовують для виготовлення об'ємним і листовим формуванням деталей автомобіля, де не вимагається висока жорсткість. Наповнювачем служить коротке рублене волокно. Робоча температура може бути до $+130^{\circ}\text{C}$.

У деталях на основі *епоксидних смол* наповнювачем служать односпрямовані волокна (40...60% об.); технологія виготовлення – пневматичне формування, формування намотуванням. Робоча температура $t_{\text{екс}}$ до $+170^{\circ}\text{C}$.

Для виготовлення конструктивних деталей також використовуються премікси на основі термореактивних смол з рубленим скловолокном; вони переробляються пресуванням і екструзією.

2.2.2 Конструктивні високоміцні деталі

Такі вироби виготовляються на основі *поліформальдегідів*: матриця - матеріали СФД-30С, СТД-30С, наповнювач – рублене скловолокно (30%); технологія виготовлення - лиття під тиском.

Якщо як матриця використовується *полікарбонат* дифлон СТН і як наповнювач - 20...30% рубленого скловолокна довжиною 2...6 мм, то такі деталі мають робочу температуру $t_{\text{екс}}$ до 150°C . Технологія виготовлення – також лиття під тиском.

Матрицею можуть бути *епоксидні смоли* при наповнювачі – 38...57% склотканини (наприклад, Т-22-78); такі вироби мають $t_{\text{екс}}$ до

180°C. Технологія виготовлення – вакуумне або автоклавне формування.

Корпусні деталі автомобілів виготовляють напилюванням на основі *поліефірів, акрилових* або *полістирольних* смол. Для товстостінних деталей як наповнювач використовують мати з рубленого скловолокна; формування – в матрицях під тиском при заданих температурі та часі витримки.

2.2.3 Конструктивні деталі підвищеної теплостійкості

Леталі підвищеної теплостійкості виготовляються на основі *поліпропілену*, наповнювач – азбест; технологія – лиття під тиском. Для деталей розвиненої в одній площині конфігурації використовується склотекстоліт на основі *поліформальдегідів* зі скляною або кремнеземною тканиною як наповнювач. Робоча температура $t_{\text{екс}} = 200...300^{\circ}\text{C}$. Технологія виготовлення – автоклавне пресування.

Можливе використання композитів на основі *полістиролу* АТ-1, АТ-2, наповнювач – діоксид титану, алюмінієва пудра; $t_{\text{екс}} = -40...+70^{\circ}\text{C}$. Технологія виготовлення – лиття під тиском.

2.2.4 Радіо- і електротехнічні матеріали

Для виготовлення виробів цієї групи використовуються такі матеріали:

- на основі *полістиролу*: прес-матеріал ПТ; наповнювач – діоксид титану; технологія – пряме пресування;

- на основі *поліамідів*: поліамід П-68, наповнений поліамідними волокнами або тканиною з них; робоча температура $t_{\text{екс}} = -70...+150^{\circ}\text{C}$; технологія – пряме пресування;

- на основі *епоксидних смол*: епоксидна смола ЕД8 зі скловолокном або склошпоном (до 75%); робоча температура $t_{\text{екс}}$ до 150°C; технологія – пряме пресування;

- на основі *фенольних смол*: фенолформальдегід з наповнювачами азботканина, тканина з поліамідних волокон, кварцове волокно; робоча температура $t_{\text{екс}}$ до +150°C; технологія – пряме пресування.

Для підвищення іскрогасіння потрібні інертні неорганічні наповнювачі (кремнезем, каолін).

2.2.5 Деталі антифрикційного призначення

Для деталей на основі *фторопластів* використовується велика кількість композицій на основі фторопласта-4 з наповнювачами: 15%

коксу, порошкоподібного нікелю, графіту, дисульфиду молібдену та інші; $t_{\text{екс}} = -60 \dots +250$; технологія – пресування. Фторопласт порівняно дорогий і під навантаженням з часом схильний до плинину у холодному стані.

На основі *фенольних смол* використовують суміші з фенолформальдегіду з добавками дисульфиду молібдену, бавовняної тканини. Робоча температура: $t_{\text{екс}} = -60 \dots +120^{\circ}\text{C}$; Технологія – лиття під тиском.

Для великих підшипників можливе використання композиту з фенолформальдегіду і деревного шпону ДСП-В, укладеного у різних напрямках в суміжних шарах.

Порівняно дешеві підшипники ковзання виготовляються на основі *поліамідів* з додаванням 5...10% графіту, коксу, капрону. Робоча температура $t_{\text{екс}} = -50 \dots +120^{\circ}\text{C}$; технологія - пряме пресування, лиття під тиском.

2.2.6 Деталі фрикційного призначення

Виготовляються на основі *фенольних смол*: прес-матеріали з наповнювачами – азбест, барит, електрокорунд, латунна стружка, каолін та інші добавки. Технологія – пряме пресування.

2.2.7 Деталі, які працюють в агресивному середовищі, у тому числі контактують з бензином, гасом, мастилами і т.п.

На основі *фторопластів*: а) композиції з фторопласту-4 і 15% коксу, дисульфиду молібдену (робоче середовище - вакуум, волога, газове); робоча температура $t_{\text{екс}} = -60 \dots +250^{\circ}\text{C}$; технологія виготовлення – пресування з наступним спіканням; б) композиції з фторопласту-4 і 25...40% керамічних волокон (робоча температура до $+250^{\circ}\text{C}$), мають тривалий час роботи в агресивному середовищі; в) фторопласт з різаними скловолокнами або з тканиною зі скляних чи поліамідних волокон; $t_{\text{екс}} = -60 \dots +250^{\circ}\text{C}$, висока хімічна стійкість; технологія - найчастіше пресування з наступним спіканням.

На основі *епоксидних смол*: наповнювач – скляні волокна і нитки та інші добавки (кисле або лужне робоче середовище); $t_{\text{екс}}$ до 50°C . Технологія – пряме пресування. Епоксидні смоли – найкраща матриця за міцністю та хімічною стійкістю. Якщо треба отримати особливо високу хімічну стійкість, як наповнювач використовують азбестові волокна.

На основі *фуранових смол*: кислотостійкий азбест, просочений фурановими смолами.

На основі *кремнійорганічних смол*: матриця - прес-порошок К-41-5, наповнювач – азбестові волокна та інші добавки. Тривалий час роботи при $t_{\text{екс}} = 300^{\circ}\text{C}$. Технологія – гаряче пресування.

На основі *фенольних смол*: гетинакс електротехнічний листовий – папір, просочений фенолформальдегідними смолами. Робоче середовище: трансформаторне масло, вологість до 95%, $t_{\text{екс}} = -70 \dots +120^{\circ}\text{C}$. Технологія – пряме пресування.

Для зниження маслопоглинання як наповнювач рекомендується глина і карбонат кальцію. Введення у композит невеликої кількості тальку покращує плинність композиту.

2.2.8 Деталі авіа-космічного призначення

Вироби на основі *поліамідів* можуть мати такий склад: а) поліамід і 65...70% рубленого скловолокна довжиною 6...7мм; $t_{\text{екс}}$ до 340°C (деталі авіаційних двигунів, літаків і ракет); пряме пресування; б) поліамід і 60% односпрямованих скловолокон; $t_{\text{екс}}$ до 290°C (деталі літаків і вертолетів); технологія - намотування; в) поліамід і 40% вуглецевих волокон; $t_{\text{екс}}$ до 250°C (деталі ракетних двигунів); пряме пресування, лиття під тиском; г) поліамід і 70% рублених вуглецевих волокон довжиною 6...7 мм (конструктивні деталі ракет і літаків); $t_{\text{екс}}$ до 340°C , пресування; д) поліамід і 57...61% односпрямованих вуглецевих волокон (конструктивні деталі літаків і вертолетів, США); $t_{\text{екс}}$ до 260°C , намотування, пресування.

На основі *епоксидних смол*: наповнювач – 50% односпрямованих борних волокон (конструктивні деталі літаків і вертолетів). Епоксидна смола зі скляною або вуглецевою стрічкою або волокнами з додаванням арамідних і борних волокон використовується для виготовлення корпусів вертолетів, літаків та великих лопатей несучого гвинта. Епоксидні смоли дуже повільно просочують скловолокна.

На основі *фенольних смол*: а) наповнювач – тканина з поліамідних волокон; $t_{\text{екс}} = -100 \dots +150^{\circ}\text{C}$ (авіа- і ракетобудування); пряме пресування, намотування; б) вуглепластики з наповнювачем – вуглецева або графітова тканина (високотемпературні деталі ракет); пряме пресування, автоклавне формування. Як армувальні елементи у вуглепластиках використовуються неперервні вуглецеві волокна, нитки, джгути, тканини або односпрямовані стрічки. Вони використовуються для виготовлення різних конструктивних елементів ракет.

Ракетні ерозійностійкі вуглепластики: а) матриця – отверднений полімерний зв'язник (фенольні, фенолформальдегідні, фенолфурфурольні смоли), наповнювач – вуглецеві волокна з підвищеною стійкістю до окиснення; б) вуглець-вуглецеві композиційні матеріали: матриця – щільний кокс або графіт, наповнювач – вуглецеві волокна. При цьому вуглець-вуглецеві волокна можуть бути у вигляді повсті, тканин, стрічок.

2.2.9 Суднобудування і плавзасоби

Вироби на основі *ненасичених полієфірів*: а) полієфірна смола, наповнювач - фенолформальдегідні мікросфери; суміш заливається у форму і твердіє при температурі +80...120⁰С; б) полієфірна смола і наповнювач - скловолкна (25...35%) або тканий ровінг (35...45%), або до 50% склотканини (скломати). Використовують для виготовлення корпусів суден; технологія - ручне викладання. Для виготовлення човнів, малих суден використовують той же композит, але технологія – вакуумне формування і наплення. Там, де потрібні більші жорсткість і міцність, як наповнювач застосовують вуглецеві або борні волокна. Для крупних суден корпуси можуть виготовлятися багатошаровими на основі стільникових конструкцій. в) обтічники й кожухи для підводних човнів виготовляють з полієфірної смоли і склотканини; технологія - вакуумне формування; г) буї, поплавки - половинки з полієфіру і склотканини виготовляють окремо вакуумним формуванням, потім середина між ними заповнюється пінопластом, і половинки склеюються.

На основі *епоксидних смол*: наповнювач – скляні мікросфери (глибоководні буї та інші подібні плавзасоби); суміш заливається у форму і твердіє при температурі +80...120⁰С під тиском. Епоксидні смоли можуть використовуватися в усіх попередніх випадках, коли потрібні кращі механічні, фізичні і хімічні властивості. Епоксіпластики стійкі до руйнування морськими мікроорганізмами.

На основі *фенольних смол*: наповнювач – склотканина (корпусні елементи суден); технологія - пряме пресування, ручне викладання.

2.2.10 Металеві композиційні матеріали (МКМ)

У МКМ матрицею найчастіше служить алюміній – сплави АД-1, АМг6, Д16, 2024 та інші; армувальні елементи – волокна зі сталі, бору, борсику, вуглецю. Розроблені МКМ на основі алюмінію з волокнами з W, Mo, Be, Ti і SiO₂. Вирби виготовляють рідинно- і

твердофазними методами та процесами осаджування матричного матеріалу на волокна (дріт).

МКМ на основі алюмінію досить коштовні, можуть використовуватися при температури до $+450^{\circ}\text{C}$.

Один з прикладів волокнистих МКМ - композиційні матеріали на основі алюмінію, магнію та їх сплавів. Для зміцнення цих сплавів застосовують волокна: борні ($\sigma_b = 2500\dots3500$ МПа, $E = 380\dots420$ ГПа) і вуглецеві ($\sigma_b = 1400\dots3500$ МПа, $E = 160\dots450$ ГПа), а також волокна з тугоплавких сполук (карбідів, нітридів, боридів і оксидів). Нерідко як волокна використовують дріт з високоміцних сталей. Для армування титану і його сплавів застосовують молібденовий дріт, волокна сапфіру (різновид мінералу корунду (Al_2O_3)).

Металеві волокна використовують і у тих випадках, коли потрібні високі тепло- і електропровідність. Перспективними зміцнювачами для високоміцних і волокнистих високомодульних МКМ є ниткоподібні кристали з оксиду і нітриду алюмінію, карбїду і нітриду кремнію, карбїду бору та інші, які мають $\sigma_b = 15000\dots28000$ МПа і $E = 400\dots600$ ГПа.

Література до розділу 2.2:

Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн. / М.: Машиностроение, 1988. Кн. 2 / под ред. Дж.Любина. – 584 с.

Крыжановский В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д. Производство изделий из полимерных материалов: учеб. пособие. СПб: Профессия, 2004. 464 с.

Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: підручник / Є.О.Джур, Л.Д.Кучма, Т.А.Манько та ін. К.: Вища освіта, 2003. 399 с.

Композиционные материалы: справочник / под ред. проф. Д.М.Карпиноса. К.: Наук. думка, 1985. 502 с.

2.3 Форма і розміри елементів виробів з композиційних матеріалів

Проектуючи конфігурацію виробу, необхідно завжди уявляти майбутню технологію його виготовлення. Тому виріб повинен мати гранично просту конфігурацію, забезпечувати мінімальну матеріалоемність (при достатній міцності й жорсткості), зручне видалення з формувального інструменту, однаковість фізико-механічних властивостей в усіх частинах виробу та інше.

У зв'язку з цим при проектуванні деталей з ПКМ треба дотримуватися таких правил:

- виріб за можливістю повинен мати рівнотовщинні стінки;
- випіб повинен мати технологічні нахили;
- жорсткість деталі повинна створюватися не збільшенням товщини стінки, а раціональним використанням ребер жорсткості та інших елементів;
- виріб повинен мати плавні сполучення (заокруглення) стінок та інших елементів, які сполучуються з ними;
- конфігурація виробу повинна забезпечувати плавне заповнення форми композиційним матеріалом під час виготовлення та легке видалення його з форми;
- при наявності у виробі металевих армувальних елементів його конструкція повинна виключати виникнення залишкових напружень під час формування та експлуатації;
- вироби на основі малопластичних термореактивних полімерів повинні бути невисокі, без тонких стінок і ребер, наскрізної арматури тощо;
- конфігурація виробу повинна забезпечувати одночасно як її функціональні, так і естетичні властивості.

Нижче наведені рекомендації щодо певних елементів виробів, виготовлених з ПКМ.

2.3.1 Товщина стінок і дна

Мінімальна товщина стінок орієнтовно може бути визначена за такими емпіричними формулами:

$$\text{- для термопластів: } S_{\min} \approx 0,8 (\sqrt[3]{h-2,1}); \quad (2.1)$$

$$\text{- для реактопластів: } S_{\min} \approx 2h/(L_R - 20), \quad (2.2)$$

де h – висота стінки, мм; L_R – плинність за Рашигом (за пенетрометром), мм.

Формула для реактопластів дає добрий результат при h до 160...200 мм і L_R от 50 до 200 мм.

Товщина стінки деталі залежить від її довжини (висоти), плинності полімеру, міцності матеріалу і конфігурації окремих елементів виробу. Збільшення товщини призводить до збільшення часу витримки деталі у формі, а також може бути причиною

утворення утяжки, розтріскування чи жолоблення виробу. Рекомендовані товщини стінок виробів з різних композиційних матеріалів наведені у табл. 2.1.

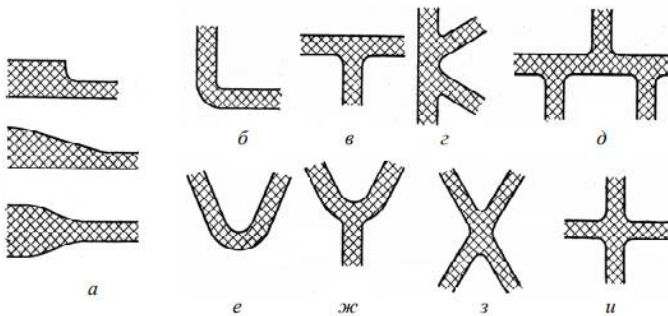
Таблиця 2.1 - Товщина стінок виробів з ПКМ

Матеріал	Габаритні розміри заготовки, мм				
	До 20	20...50	50...100	100...250	Понад 250
Прес-порошки: - фенопласти - амінопласти	0,8...1,0	1,0...1,5	1,5...3,0	3,0...5,0	5,0...6,0
	0,5...0,8	0,8...1,0	1,0...2,5	2,5...4,0	4,0...6,0
Волокнисті прес-матеріали	0,4...0,5	0,5...1,0	1,0...3,5	3,5...6,0	6,0...8,0
Термопласти	0,4...0,5	0,5...1,0	1,0...1,5	1,5...2,0	2,0...3,0

Загалом для штучних деталей з термопластів рекомендується максимальна товщина 4...5 мм, для реактопластів допускається до 50 мм.

2.3.2 Сполучення (перетинання) стінок

Сполучення (перетинання) стінок повинні бути плавними, не містити ділянок, які значно відрізняються за товщиною від товщини стінок. Типові сполучення наведені на рис. 2.1.



а – лобове; б – кутове; в – Т-подібне; г – К-подібне; д – К-подібне (шахматне); е – V-подібне; ж – виделкоподібне; з – Х-подібне; и – хрестоподібне

Рисунок 2.1 - Типові сполучення стінок

У вузлах перетину можливе збільшення кількості полімеру у порівнянні з товщиною стінок, що збільшує ймовірність утворення у цьому місці усадкових раковин. Оцінити збільшення маси у

сполученні дозволяє метод «вписаних кіл» (співвідношення площ кіл, вписаних у вузол перетину і стінку), як показано на рис. 2.2.

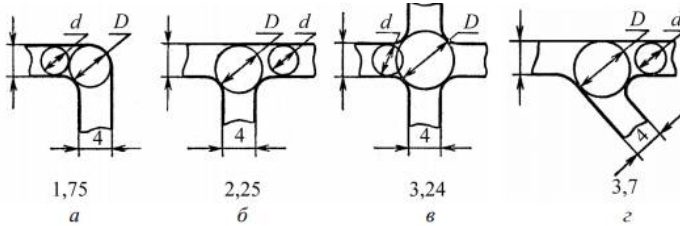


Рисунок 2.2 - Збільшення маси у вузлі перетину, %: а – на 75; б – на 125; в – на 224; г - на 270

Для подолання впливу збільшення об'єму матеріалу у сполученнях стінок і дна, стінок зребрами і між собою застосовуються певні конструктивні заходи: збільшення радіусу заокруглення, збільшення кута перетину, розташування ребер перетину у шаховому порядку тощо.

2.3.3 Ребра жорсткості

Ребра жорсткості служать для підвищення міцності і жорсткості виробів, локального зміцнення особливо навантажених елементів виробів, а також для рівномірнішого розподілу усадки та напружень по об'єму виробу. Ребра жорсткості дозволяють зменшити поперечний переріз окремих елементів деталі. Бажано проектувати тонкостінні вироби, але з ребрами жорсткості. Самі ребра жорсткості повинні мати рівномірну товщину, конусність у напрямку плинину матеріалу у формі, заокруглення вершини ребра і плавний перехід до стінки. Товщина ребер не повинна бути більше товщини стінки S , з якою вони сполучуються (рекомендується $(0,6 \dots 0,8)S$). Висота ребер залежить від їх кількості та конструкції виробу, звичайно приблизно у 2 рази більше ширини їх основи. Висота ребер на внутрішній поверхні виробу повинна бути принаймні на 0,5 мм менше загальної висоти виробу для покращення умов наступного оброблення або складання; не досягати габаритної або опорної поверхні на 1...2 мм. Бажано плавне примикання ребер жорсткості до стінки.

Рекомендовані форми ребер жорсткості наведені на рис. 2.3.

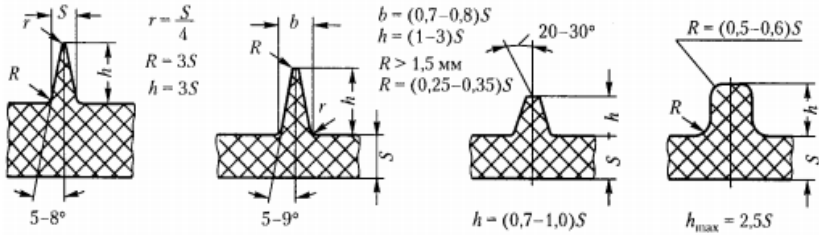


Рисунок 2.3 - Рекомендовані форми перерізів ребер жорсткості

2.3.4 Технологічні нахили

Технологічні нахили служать для полегшення виштовхування готового виробу з форми. Вони призначаються на поверхні, які паралельні напрямку зусилля замикання форми. Іноді нахили мають конструктивне призначення. Внутрішні кути α обираються більше зовнішніх залежно від співвідношення h/N (рис. 2.4).

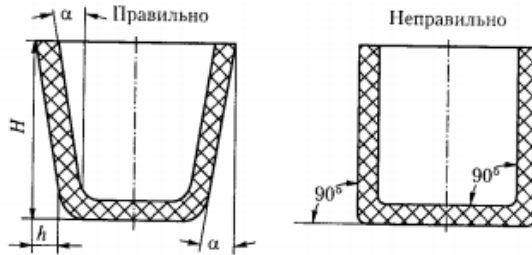


Рисунок 2.4 - Схема технологічних нахилів

Величина однобічного кута нахилу α залежить від висоти стінки H , виду полімеру і способу виштовхування. Величина нахилу нерідко задається співвідношенням лінійних розмірів h/N (рис. 2.4), як показано у табл. 2.2.

Рекомендовані кути нахилу α на різні поверхні композиційних виробів з полімерів:

зовнішні поверхні	$30^\circ; 45^\circ; 1^0; 1,5^0;$
внутрішні поверхні і отвори глибиною понад $1,5d$ (d – діаметр отвору)	$45^\circ; 1^0; 2^0;$
отвори глибиною до $1,5d$	$30^\circ; 45^\circ;$
ребра жорсткості, виступи і т.п.	$1^0; 2^0; 5^0; \text{до } 10^0.$

Таблиця 2.2 - Технологічні нахили виробів

Висота деталі Н,	Нахил h/H	
	зовнішній	внутрішній
До 10	1,0:100	1,5:100
10...50	0,8:100	1,2:100
50...100	0,6:100	1,0:100
100...200	0,5:100	0,8:100
Понад 200	0,3:100	0,6:100

Мінімальні допустимі нахили для виробів з полістиролів, етролів, поліамідів становлять 30° і 45° , а для виробів з поліетилену – 45° і 1° (для зовнішніх і внутрішніх поверхонь відповідно).

Нахили не призначаються, якщо:

- сама конфігурація виробу сприяє легкому видаленню з форми;
 - товщина плоских виробів не перевищує 6 мм;
 - висота буртів і заглиблень не перевищує 1...5 мм;
 - вироби тонкостінні ($S < 2\text{мм}$), порожнисті, а їх висота не перевищує 30 мм;
 - зовнішня поверхня виробу кінчна або сферична.
- Деякі приклади таких поверхонь наведені на рис. 2.5.

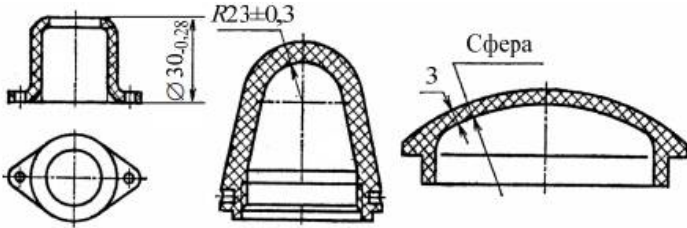


Рисунок 2.5 - Приклади виробів без нахилів

2.3.5 Радіуси заокруглень

Радіуси заокруглень поверхонь, які утворюють *внутрішній* кут виробу, сприяють рівномірному плину композиту і повинні бути досить великими. Величина внутрішнього радіуса узгоджується з висотою стінки - $R \approx 0,05h$, а також з товщиною і матеріалом форми.

Будь-які гострі кромки також повинні бути заокруглені. Мінімальний радіус *зовнішнього* заокруглення залежить від

властивостей полімеру матриці: чим більше твердість і крихкість пластика, тим більшим має бути радіус. Загалом зовнішній радіус лежить у межах 0,3...1,6 мм. Радіуси не передбачаються лише на кромках поверхонь, які знаходяться у площині різниці форми.

Стінку і дно виробу бажано сполучувати радіусами таким чином, щоб радіуси зовнішньої і внутрішньої поверхонь були взаємозв'язані і описувалися з одного центра (рис. 2.6).

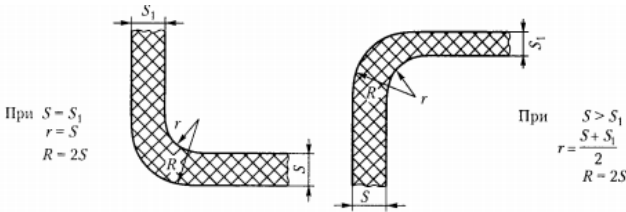
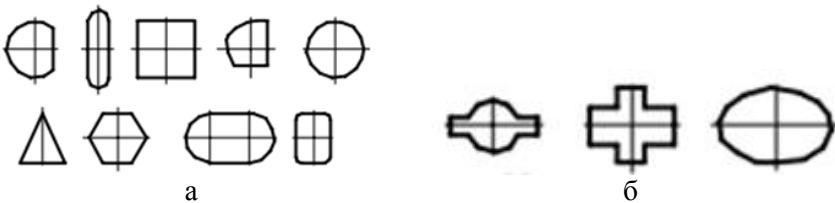


Рисунок 2.6 - Радіуси заокруглень

2.3.6 Отвори, заглиблення і виступи

Отвори у виробих з ПКМ виготовляються в процесі формування за допомогою стрижнів. Конфігурація отворів може бути різноманітною, але небажані отвори з гострими кутами (рис. 2.7).



а – технологічні, б – нетехнологічні
Рисунок 2.7 - Приклади форм отворів

Отвори можуть бути гладкими і різевими, наскрізними і глухими, східчастими по діаметру, конічними тощо (рис. 2.8).

Отвори часто розташовують у стовщеннях або бобишках. Глибина l наскрізного отвору має бути $l \leq 10d$, глухого - $l \leq 4d$. Стінка глухого отвору повинна мати конусність всередину не менше 1° .

Відстань між дном глухого отвору і торцевою поверхнею виробу повинна бути не менше $1,5d$.

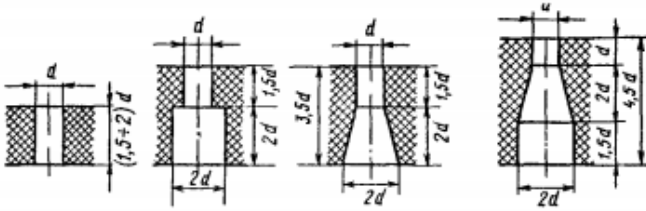


Рисунок 2.8 - Конфігурація і співвідношення розмірів наскрізних отворів

Відстань між сусідніми отворами має бути не менше $2,5 \dots 5,0$ мм (рис. 2.9).

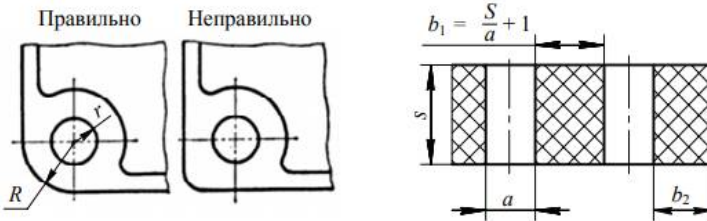
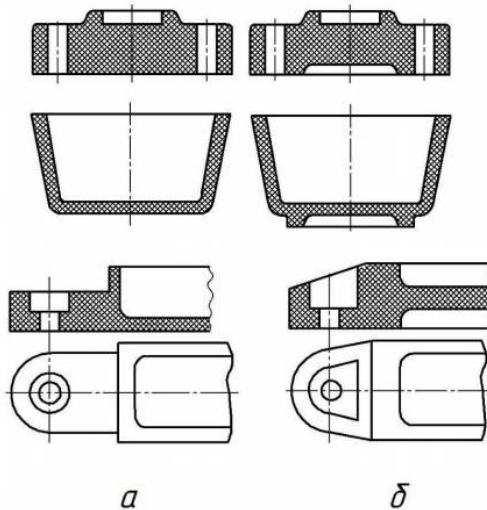


Рисунок 2.9 - Розташування отворів у бобишках та суміжних отворів

Отвори на *бічній* поверхні оформляються бічними стрижнями. Співвідношення діаметра стрижня і довжини отвору l/d залежить від діаметра отвору, способу закріплення стрижня і способу формування виробу. Але треба пам'ятати, що вони значно утруднюють процес виготовлення виробу, тому таких отворів бажано уникати.

Заглиблення використовуються для зменшення товщини стінок і дна, зменшення маси виробу. Якщо не можна створити відповідні елементи на пуансоні, вони утворюються різними вставками, знаками, які вимагають закріплення на формувальному інструменті. Поверхня заглиблення повинна бути на відстані від краю виробу не менше його товщини. Внутрішні кути і кромки заглиблення повинні бути заокруглені. Не допускаються заглиблення на поверхнях, перпендикулярних напрямку пресування.

Приклади оформлення заглиблень наведені на рис. 2.10.



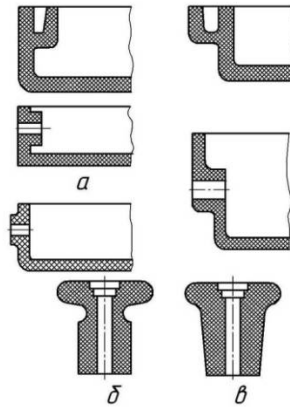
а – нетехнологічно; б – технологічно

Рисунок 2.10 - Приклади оформлення заглиблень і опорних поверхонь

Якщо необхідні *виступи*, вони не повинні бути значної висоти. Якщо без виступів значної висоти не обійтися, треба передбачити підтримку їх ребрами жорсткості. Недопустимі виступи з піднутріннями, які перешкоджають розніманню прес-форми. Виступи на зовнішніх бічних поверхнях допускаються при наявності додаткового вертикального розніму. Приклади рекомендованих форм виступів наведені на рис. 2.11.

2.3.7 Торці виробів

Торці (або буртики) виробів проходять по периметру деталі, запобігаючи полумкам та жолобленню її країв, і можуть бути різноманітним за формою. Товщина буртиків має бути у межах рекомендованої різностінності і не перевищувати товщину стінки більше, ніж у 1,5...2 рази. Надмірне стонщення країв призводить до утворення тріщин і деформування виробу. Буртики повинні бути суцільними (без розривів), однакової товщини і мати плавний перехід до стінки.



а, б – нетехнологічно; в – технологічно
Рисунок 2.11 - Приклади усунення зовнішніх і внутрішніх піднурінь

Приклади оформлення торців виробів наведені на рис. 2.12.

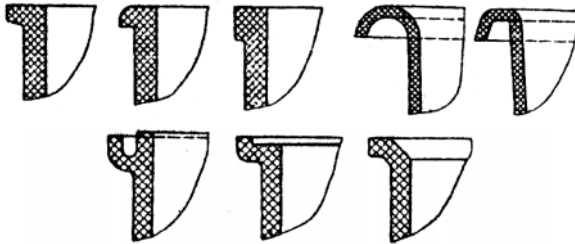


Рисунок 2.12. - Приклади оформлення торців виробів

2.3.8 Різи на виробах з ПКМ

Різь на виробах з ПКМ можна отримувати під час формування як на зовнішній, так і на внутрішній поверхнях діаметром 2,5...3,0 мм (для виробів з волокнистим наповнювачем – 4 мм) і більше з кроком не менше 0,7 мм. Профіль різи може бути будь-яким, але найкращою є метрична різь. Різи формуються за допомогою формувальних різевих знаків (внутрішні) і кілець (зовнішні).

Довжина різи на полімерних виробах призначається звичайно у 1,5...2,0 рази більше номінального діаметра d . Відстань між різевими отворами або отвором і краєм виробу слід збільшити приблизно у 1,5 рази у порівнянні з гладкими отворами. Західна і кінцева частини різи

повинні бути гладкими на довжині не менше $(0,7 \dots 1,0)$ кроку різі (рис. 2.13). На вході внутрішньої різі робиться заглиблення діаметром $d_1 = d + 0,5$ мм і глибиною $1,0 \dots 1,5$ мм, але допускається й наявність фаски.

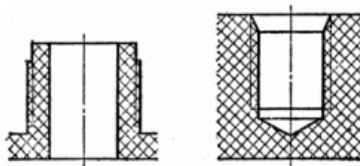


Рисунок 2.13 - Конструкція зовнішньої і внутрішньої різей, які формуються при пресуванні

Глухі різеві отвори необхідно проектувати так, щоб між кінцем різі і дном отвору була відстань не менше $2 \dots 3$ кроків даної різі. Не варто проектувати глухі різі довжиною більше, ніж 4 номінальні діаметри з-за можливого розтріскування.

Не можна проектувати різевий отвір паралельно шарам наповнювача.

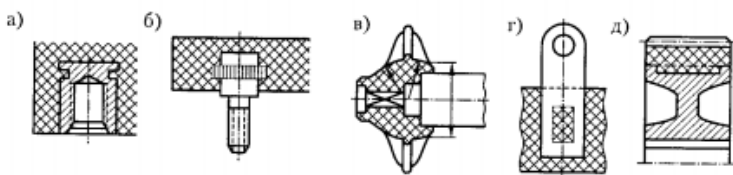
2.3.9 Металева арматура у виробах з ПКМ

Металева арматура вводиться у склад виробів з ПКМ з метою надання певним їх частинам особливих властивостей: більшої міцності, зносостійкості, електропровідності і т.п. Арматура утворює з виробом нерознімне ціле. Це досягається тим, що вона розташовується у формі вже у процесі виготовлення виробу.

Вимоги до арматури:

- матеріал арматури має бути достатньо міцним, з високою теплостійкістю, оскільки у процесі виготовлення деталі арматура піддається механічним навантаженням і нагріванню до високих температур;
- необхідно забезпечити надійне поєднання арматури з полімерною матрицею;
- необхідно передбачити унеможливлення повертання та виймання арматури з полімеру;
- арматура повинна бути по можливості простою у виготовленні.

За розташуванням арматура поділяється на втулкову, стрижньову і листову, або плоску (рис.2.14). Причому, для будь-якого з цих видів – вона може бути глухою, наскрізною, кутовою або однобічною.



а – втулкова; б – стрижнева рифлена; в – стрижнева квадратна;
г – плоска; д – кільцева

Рисунок 2.14 - Варіанти закріплення металеві арматури

Трубчаста та дрютяна арматура закріплюється за рахунок сплющування або створення буртика (розплющування торця трубки), згинання; прохідну дрютяну арматуру закріплюють згинанням під кутом (рис. 2.15).

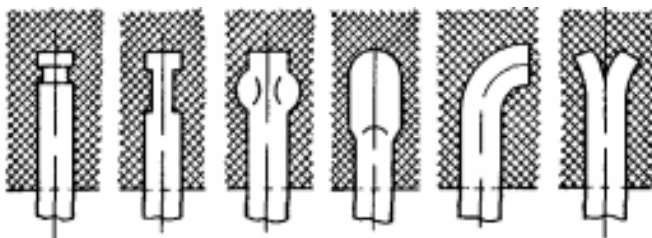
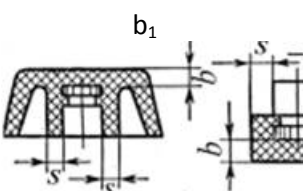


Рисунок 2.15 - Варіанти закріплення дрютяної арматури

Відношення глибини занурення арматури у полімер до її діаметра повинно бути у межах (1...4). Товщина стінки під арматурою має бути не менше (0,7...1,0) від товщини самої арматури, але не менше 2 мм при діаметрі арматури до 5 мм для попередження утворення спучування на зовнішній поверхні. Для арматури більшого діаметра товщина матеріалу навколо арматури наведена у табл. 2.3.

Указані у табл. 2.3 мінімальні товщини можна зменшити приблизно на 30% за рахунок застосування арматури з конусом на торцевій поверхні, наприклад, як показано на рис. 2.16.

Таблиця 2.3. - Середня товщина полімеру навколо металевої арматури

	Діаметр арматури, що опресовується, мм	Товщина шару пластмаси, мм:		
		між арматурою і стінкою, b_1	від арматури до краю виробу, S	над арматурою, b
	До 3 вкл.	1,5	2,0	2,0
	3...6	2,5	3,0	3,0
	6...10	3,5	4,5	4,0
	10...18	5,0	5,5	5,0
	18...30	6,0	7,0	6,0

Указані у табл. 2.3 мінімальні товщини можна зменшити приблизно на 30% за рахунок застосування арматури з конусом на торцевій поверхні, наприклад, як показано на рис. 2.16.

Як правило арматура встановлюється врівень з поверхнею деталі; допускається заглиблення її поверхні відносно поверхні виробу приблизно на 0,5 мм з метою попередження спучування полімера над арматурою.

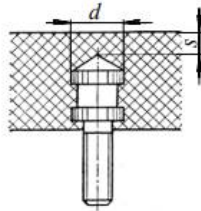


Рисунок 2.16 - Арматура з конусом

Металева арматура може бути причиною тріщин і залишкових напружень у зв'язку зі значною різницею коефіцієнтів лінійного теплового розширення металів і полімерів, тому, застосовуючи металеву арматуру в полімері, їх коефіцієнти лінійного теплового розширення треба узгодити.

Література до розділу 2.3:

Крыжановский В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д. Производство изделий из полимерных материалов: учеб. пособие. СПб: Профессия, 2004. 464 с.

Ревяко М.М., Касперович О.М. Расчёт и конструирование пластмассовых изделий и форм: учебник. Минск: БГТУ, 2012. 432 с.

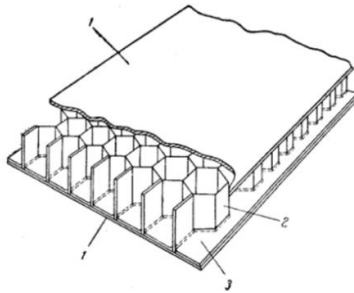
Плескач В.М., Акімов І.В., Міт'яєв О.А. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин: підручник/ за заг. ред. доц. В.М.Плескача. Запоріжжя: Просвіта, 2013. 372 с.

2.4 Проектування стільникових конструкцій (СтК)

Стільникові конструкції ефективно працюють при стисканні, віддунювих навантаженнях, як звуко- і теплоізолюючий матеріал тощо. Також важливою їх перевагою є низька густина при достатній міцності в експлуатації.

Конструктивно стільникова конструкція становить тришарову панель, яка складається з двох тонких міцних зовнішніх тримких пластини (верхньої і нижньої - обшивки), товстого легкого осердя (заповнювача) і адгезійних шарів, які зв'язують пластини з заповнювачем (рис. 2.17).

Перед початком проектування СтК необхідно проаналізувати: призначення виробу; його конфігурацію і розміри; умови, в яких доведеться працювати виробу (температура, робоче середовище, плановий термін експлуатації); величину і характер навантажень, їх розподіл по виробу та інші можливі додаткові вимоги.



1 – тримкі пластини (обшивка); 2 – заповнювач; 3 – клейовий шар

Рисунок 2.17 - Панель сотової конструкції

2.4.1 Порядок проектування

Спочатку треба обрати матеріал тримких пластин і можливого заповнювача, задовільні форму і розміри чарунок заповнювача, а також тип клею, врахувати сумісність цих матеріалів. Далі обирають товщину тримких пластин і заповнювача. У більшості СтК товщина заповнювача 1,5...150 мм, а тримких пластин – від часток до декількох мм.

Після цього необхідно розробити остаточне оформлення конструкції виробу, для чого:

- виявити необхідність і конструкцію вставних металевих елементів;
- намітити конструкцію закріпів (запакування) країв і кутів та місць передачі зосереджених навантажень.

Коли форма і розміри виробу відомі, визначають розрахункову схему навантажень виробу як панелі, балки або стрижня і проводять необхідний розрахунок на міцність.

У деяких випадках необхідно визначити масимальний прогин виробу в експлуатації і порівняти його з допустимим. Для більшості конструкцій граничний прогин не перевищує $L/360$ (де L – максимальна габаритна довжина виробу). У деяких випадках залежно від призначення виробу великі прогини є нормальними (наприклад, лижі).

2.4.2 Основні матеріали стільникових конструкцій

Тримкі пластини служать для забезпечення жорсткості всієї конструкції на згин та для передачі навантаження вздовж пластин. Матеріал тримких пластин має бути міцним, жорстким, некрихким. Кожна пластина повинна бути однорідною за товщиною і матеріалом. Тримкі пластини можуть бути металевими і неметалевими. У деяких випадках матеріал верхньої і нижньої з тримких пластин може бути різним, якщо робоче середовище або інші умови експлуатації будуть різними ззовні і зсередини виробу.

Для виготовлення тримких пластин найчастіше використовуються такі матеріали.

Склопластики виготовляються на базі різних полімерів. Склопластики на основі поліефірних смол, армовані скломатами, мають границю плинності 224 МПа, армовані тканинами з ровінгу –

608 МПа. Маса такого листа товщиною 1 мм – 1,35...1,92 кг/м². Вони порівняно дешеві, але мають низьку теплостійкість. Склопластики на основі фенольних і поліімідних смол мають границю міцності 770...960 МПа і масу такого ж листа 1,61...1,83 кг/м²; високу теплостійкість і невисоку вартість. Епоксидні смоли дають склопластикам вищу міцність (границя міцності 990...1000 МПа), помірну масу листа – 1,69...1,83 кг/м², високі тепло- та хімічну стійкість, але коштують значно більше.

Алюмінієві сплави (АМг2, АМг6-Н, Д16АТВ, АК4 та ін.) мають границю плинності при розтягу/стисканні у межах 500...800 МПа, маса листа товщиною 1 мм – 2,69 кг/м². Вони міцні, достатньо корозійностійкі; добре переробляються, ціна помірна.

Сталь вуглецева (типу сталі 08...20) з границею плинності при розтягу/стисканні 800 МПа, має масу листа товщиною 1 мм – 7,68 кг/м². Міцність пластин висока, ціна низька. Для виготовлення тримких пластин використовуються також жароміцні сталі ВНС-2, ЭПЗ5, ЭИ654.

Иноді використовують *титанові сплави* ОТ4, ОТ4-2, ВТ1, ВТ15 та інші.

Вуглепластики з тканим наповнювачем мають границю плинності 1280 МПа, з односпрямованими волокнами – 3500 МПа. Маса листа товщиною 1 мм – 1,54 кг/м². Тобто їх міцність дуже висока, але й ціна теж.

Пластик на основі *фанери* (при ефективній товщині не менше 4 мм) мають значно меншу границю плинності - 36...42 МПа при масі листа товщиною 1 мм 0,41...0,58 кг/м².

Порівняння згаданих вище матеріалів показує, що металеві матеріали значно міцніші, але мають велику питому масу. Пластики з різними наповнювачами мають приблизно однакову питому масу, проте кращу міцність дають вуглецеві наповнювачі та епоксидні смоли. Але вони суттєво збільшують вартість виробу. Фанера як основа пластика може використовуватися для виробів з невеликими навантаженнями.

Заповнювач виготовляється з легких і міцних матеріалів, сформованих у вигляді стільників. Він служить для створення об'єму конструкції виробу, який має малу густину і високу міцність на стискання. Фізико-механічні характеристики заповнювача залежать від великої кількості чинників, серед яких головними є матеріал

стрічки, з якої вона виготовляється, її товщина, а також форма і розміри чарунок.

Матеріал стрічок може бути металевим і неметалевим.

Металева фольга для стрічок виготовляється з алюмінієвих сплавів АМг2-Н, А5Т, титанових сплавів ОТ4, ВТ1-10, ВТ15, ВТ6-4, сталей СН-3, ЭП35, ЭИ654, 12Х18Н10Т та ін. Звичайно металева фольга має товщину 20...80 мкм.

Металеві стрічки можуть бути з дренажними отворами і без них. Дренажні отвори призначені для вирівнювання тиску між порожнинами стільникових чарунок і доквіллям, а також для видалення газів, які утворюються при твердінні клеїв. Діаметр дренажних отворів - не більше 0,5 мм.

Неметалеві стрічки виготовляють з бавовняних (бязь) та скляних тканин (марок Т, Т-13, Э, ЭСТБ), синтетичних полімерних матеріалів (ПСП, НРН, НРР), технічного паперу (крафт-папір, кабельний папір) тощо. Всі неметалеві матеріали просочуються різними сполучниками для надання необхідної міцності і жорсткості. Заповнювачі на основі полімерного паперу у 1,5...2,0 рази легше заповнювачів на основі склотканин.

Форми чарунок можуть бути досить різноманітними - шестигранними, квадратними, овальними та іншими, але найчастіше це правильна (ізотропна) шестигранна форма. Заповнювач такої форми має найбільшу площу склеювання з обшивкою. Форма чарунок найчастіше залежить від матеріалу заповнювача, технології виготовлення та очікуваного напрямку дії основних сил в експлуатації. Вона може бути спотворена у процесі як виготовлення заповнювача, так і власне всієї конструкції. Неточність форми чарунки у якому-небудь напрямку може зменшити міцність виробу на 30%.

Розмір чарунок суттєво впливає на основні фізико-механічні властивості конструкції. При інших однакових характеристиках збільшення розмірів чарунок призводить до зменшення міцності заповнювача, але й до зменшення його густини. Розміри чарунок з металевих матеріалів, як правило, знаходяться у межах 2,5...8,0 мм, з «м'яких» матеріалів (наприклад, з крафт-паперу) – у межах 6...20 мм. Розмір чарунок впливає також на рівень напружень у клейовому шарі між торцями чарунок і тримкими пластинами.

Найпоширеніші заповнювачі на основі склопластиків мають густину 40...60 кг/м³ і великі чарунки (5 мм і більше). Збільшення товщини стрічки збільшує міцність заповнювача, але значно менше, ніж зменшення розміру чарунки, проте одночасно збільшує його густину.

Товщина заповнювача звичайно знаходиться у межах 8:1...10:1 до товщини тримких пластин. Зайве збільшення товщини заповнювача не йде на користь конструкції. Товщина заповнювача обирається головним чином залежно від призначення виробу і узгоджується з товщиною і властивостями тримких пластин таким чином, щоб забезпечити необхідну працездатність виробу.

У таблиці 2.4 наведено механічні властивості деяких стільникових заповнювачів.

Як заповнювачі у деяких випадках можуть використовуватися пінопласти ПВ-1, ПХВ-1, ПУ-101 та інші з густиною 50...500 кг/м³. Суть їх використання полягає у тому, що розплав полімера заповнює під тиском порожнину між тримкими пластинами з наступним охолодженням. Ефект теплової усадки розплава приводить до високої щільності заповнювача і якісної адгезії з тримкими пластинами. Тобто, якісний піновірний матеріал є одночасно і заповнювачем, і адгезивом.

Клеї у стільникових конструкціях використовуються двічі: для склеювання між собою сформованих стрічок і для склеювання заповнювача з тримкими пластинами. Головна вимога до клеїв: наявність високих адгезійних властивостей стосовно матеріалу тримких пластин і заповнювача, щоб забезпечити надійне їх з'єднання.

Клеї (найчастіше – синтетичні) поділяються на рідкі й плівкові, термопластичні та термореактивні. Для виготовлення стільникових конструкцій застосовують клеї на основі модифікованих фенолформальдегідних, фенолкаучукових та епоксидних композицій, а також поліуретанові, поліамідні та інші.

Фенолформальдегідні клеї БФ-2, БФ-4 і МПФ-1 рідкі, призначені для склеювання металів і неметалів, а також їх між собою. Робоча температура від - 60 до +80^oС. При випробуванні на розшарування ці клеї показують міцність, яка наближається до міцності алюмінієвої фольги. Клей БФ-2 термостійкіший, ніж БФ-4, але менш еластичний. Клей МПФ-1 має високу динамічну стійкість до вібрації.

Таблиця 2.4 - Механічні властивості стільникових наповнювачів на основі алюмінієвої і вуглецевої стрічок

Марка фольги – розмір чарунки, мм – товщина фольги, мкм	Питома маса, кг/м ³	Границя міцності, МПа, не менше			Модуль пружності ГПа, не менше	
		При стисканні	При зсуві		Паралельно клейовим смугам	Перпендикулярно клейовим смугам
			Паралельно клейовим смугам	Перпендикулярно клейовим смугам		
Алюмінієва фольга АМг-2Н, 5052						
АМг-2Н-2,5-20	32...37	0,99	0,60	0,45	0,1541	0,0866
АМг-2Н-3,0-20	29...31	0,71	0,52	0,36	0,1208	0,0788
АМг-2Н-3,5-20	24...27	0,62	0,44	0,30	0,1010	0,0569
(5052)-3,5-30	35...40	1,07	0,79	0,51	0,1548	0,0927
(5052)-5,0-30	24...27	0,88	0,45	0,28	0,0883	0,0510
АМг-2Н-5,0-40	31...36	0,95	0,70	0,45	0,1460	0,0877
АМг-2Н-6,0-50	32...34	1,07	0,75	0,51	0,1525	0,0806
Алюмінієва фольга 5056						
5056-2,5-23	35...40	1,40	1,06	0,65	0,1663	0,0894
5056-3,0-23	32...37	1,11	0,80	0,54	0,1400	0,0902
5056-3,5-23	27...31	0,91	0,68	0,46	0,1227	0,0842
5056-5,0-23	20...21	0,45	0,37	0,28	0,0914	0,0421
5056-6,0-23	16...17	0,30	0,27	0,20	0,0583	0,0293
Вуглецева стрічка						
УСП-5-17 ЭЛУР+ЭНФБ 2x0,13	11,7· ·10 ⁻⁵	10,1	6,586	4,076	0,6504	0,3662
УСП-5-40 IMS65+ЭНФБ 4x0,02	4,0·10 ⁻⁵	2,3	2,40	1,34	0,2704	0,1736

Фенолкаучукові клеї використовують тільки для конструкцій з перфорованими металевими заповнювачами, оскільки в процесі їх твердіння виділяються газоподібні продукти. Клеї типу ВК-3, ВК-32-200 – плівкові клеї з підшаром з рідкого клею, мають одночасно високі міцність, теплостійкість та еластичність. Інтервал робочих температур - від - 60 до +150^оС. Використовуються для склеювання пакетів з нежорсткої металевої фольги.

Епоксидні клеї мають чимало переваг перед фенольними. Внаслідок їх здатності до термоусадки утворюється якісне з'єднання

стілки чарунки з обшивкою при невеликих витратах клею. Клеї типу ВК-31, ВК-36...ВК-41, ВК-46 (ТУ 1-596-380-96) – плівкові епоксидні клеї гарячого твердіння ($t = 120...180^{\circ}\text{C}$), захищені з двох боків антиадгезійними прокладками. Клеї ВК-31 і ВК-36 використовуються для склеювання стільникових конструкцій з температурою експлуатації від -60 до $+80^{\circ}\text{C}$ і від -60 до $+150^{\circ}\text{C}$ відповідно. Клеї ВК-46, ВК-46А використовуються для склеювання металевих і неметалевих пластин і заповнювачів при виготовленні стільникових конструкцій зі зниженою горючістю.

2.4.3 Міцність і руйнування стільникових конструкцій

Стільникові конструкції використовуються, як правило, у вигляді панелей, балок або стрижнів. У зв'язку з тим, що стільникові вироби мають тришаровий склад з заповнювачем специфічної конструкції усередині, вони мають в експлуатації такі види навантажень:

- балка з опорою на кінцях або з консольним закріпленням; навантаження може бути зосередженим або розподіленим;
- колона (стрижень) із закріпленими або незакріпленими кінцями; навантаження – уздовж колони.

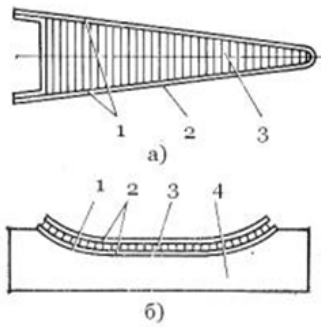
У першому випадку балка зазнає поперечний згин. Початок руйнування може статися у верхній або нижній пластинах внаслідок недостатньої товщини або недостатньої їх міцності. При зосередженому навантаженні можливе місцеве поперечне руйнування через недостатню міцність заповнювача на зсув. У цьому випадку також можливе локальне зім'яття у зв'язку з недостатньою міцністю заповнювача при стисканні.

У другому випадку колона (стрижень) працює на поздовжній згин. Найтипівіший варіант руйнування - повна втрата стійкості з-за недостатньої товщини панелей або мала міцність заповнювача на зсув. Може виникнути місцева втрата стійкості, якщо зовнішні пластини недостатньо пружні або у якомусь місці виявилася недостатня міцність заповнювача при стисканні. Можливе утворення гофр на поверхні внаслідок недостатньої міцності клею на зсув.

2.4.4 Остаточне оформлення конструкції виробу

Заповнювач виготовляють у вигляді пластини постійної товщини. Для того, щоб надати заповнювачу ту чи іншу необхідну форму перед склеюванням з обшивкою, є два підходи: або пластина заповнювача обробляється на металорізальних верстатах до надання

необхідної форми, або готовий тришаровий блок деформується на відповідному шаблоні (болванці). У деяких випадках конфігурація виробу виконується одним листом обшивки, а утворена ним порожнина заповнюється якісним піноутвірним заповнювачем (рис. 2.18).



1 – базова поверхня; 2 – обшивка; 3 – заповнювач; 4- шаблон

Рисунок 2.18 - Формування виробу по стільниковому заповнювачу (а) і по шаблону (б)

Якщо на бічній поверхні виробу залишається відкритим заповнювач між двома пластинами, його треба закрити (запакувати). Найпростіше запакування – відкриту частину заповнювача закривають згинанням зовнішньої пластини, яку з'єднують з внутрішньою клеєм. Можна у простір між пластинами вставити достатньо міцну закладну деталь, яку потім прикрити декоративною стрічкою (рис. 2.19).

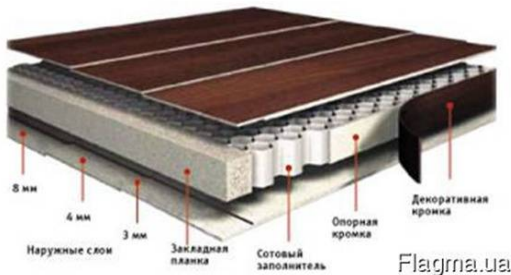
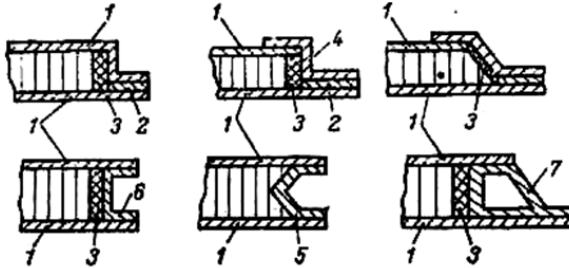


Рисунок 2.19 - Приклад використання закладної планки і декоративної стрічки

Один з найпоширеніших способів закування бічної поверхні заповнювача – використання металевих профілів (рис. 2.20).

Якщо конструкція допускає стоншення краю, то спочатку плавно зменшують товщину заповнювача, а края зовнішніх пластин з'єднуються клеєм. У деяких випадках крайня частина заповнювача і тримкі пластини сплющуються, а простір між краями тримких пластин заповнюється пінотвердим сполучником.



1 – обшивка; 2 – клеєвий шар; 3 – пінозаповнювач; 4...7 – металеві профілі
Рисунок 2.20 - Приклади закування бічної поверхні виробу

Найпростіше закування кутів – також згинання зовнішньої пластини і закріплення її клеєм або заклепкам, але міцність його не велика. Міцніше з'єднання отримують з використанням стандартних кутиків. Останні з'єднуються наскрізними металевими деталями (шпильками, заклепками). Таку ж роль можуть виконувати спеціальні пресовані профілі, призначені саме для цього виробу.

Література до розділу 2.4:

Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн. / М.: Машиностроение, 1988. Кн. 2 / под ред. Дж.Любина. 584 с.

Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: підручник / Є.О.Джур, Л.Д.Кучма, Т.А.Манько та ін. К.: Вища освіта, 2003. 399 с.

Панин В.Ф, Гладков Ю.А. Конструкции с наполнителем: справочник. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.

2.5 Міцність виробів з композиційних матеріалів

Як відомо, конструкції з КМ відрізняються тим, що виріб і матеріал виготовляють одночасно. На міцність та експлуатаційні властивості виробу впливають склад композиту, властивості матриці й

наповнювача, їх кількісне співвідношення та взаємне розташування, а також технологія виготовлення виробу. Тому теоретично розрахунок на міцність має ґрунтуватися на механічних властивостях складників саме цього матеріалу. Оскільки за логікою проектування виробів з КМ вибір матеріалу виробу, його форми і розмірів передреує розрахунок міцності, визначення міцності спроектованого виробу за довідковими даними носить оціночний або перевірочний характер.

2.5.1 Механізм руйнування КМ

КМ складається з пластичної матриці (найчастіше – полімерної) та міцно пов'язаного з нею високоміцного досить крихкого наповнювача (дисперсних включень, волокон, тканин тощо). При навантаженні першою пластично деформується матриця, і навантаження починає сприйматися наповнювачем (напр., волокнами). Уже при достатньо низькому рівні розтягувальних напружень зв'язок між матрицею і наповнювачем починає руйнуватися, але монолітність композиту внаслідок цього в цілому ще не порушується. Тому менша міцність матриці на цьому етапі не буде проявлятися за рахунок високої міцності наповнювача. Чим більше вміст наповнювача у КМ, тим вище його міцність, але тим слабше виявляються пластичні властивості.

Роль матриці в армованому КМ зводиться до ролі «диспетчера», який розподіляє навантаження між волокнами. Поступово навантаження переходить на волокна. Чим більше вміст наповнювача у КМ, тим вище його міцність, але тим слабше виявляються його пластичні властивості [2].

При руйнуванні волокон або ушкодженні межі розділу між ним і матрицею відбувається перерозподіл напружень таким чином, що ушкодження локалізуються у відносно малому об'ємі пластичної матриці. Завдяки цьому поки що ефективна міцність КМ практично не знижується.

Зі збільшенням навантажень у композиті відбувається накопичення розсіяних *мікропошкоджень*. У певний момент вони можуть призвести до руйнування деяких волокон, які мають більшу кількість дефектів. У матриці на окремих ділянках поступово накопичується критична щільність мікротріщин, яка може призвести до утворення або певної кількості множинних мікротріщин одночасно, або стійкої *макротріщини* при збереженні цілісності композиту.

Фінальне руйнування відбувається в момент, коли розміри однієї або декількох макротріщин досягнуть певної критичної величини [3 - 6].

Високі механічні властивості КМ досягаються лише тоді, коли забезпечується одночасна робота обох компонентів композиту під час його експлуатації. А це значною мірою визначається фізико-хімічними процесами на межі розподілу матриця-наповнювач. Зазвичай такими процесами є змочування, адгезія та інші, які створюють міцність на межі матриця-волокно.

Механізм руйнування композиту, армованого односпрямованими безперервними волокнами під дією навантаження F під кутом Θ до напрямку волокон (рис. 2.21), визначається напруженнями розтягу, які одночасно діють у поздовжньому і поперечному напрямках, а також зсувним напруженням у площині контакту волокно-матриця.



Рисунок 2.21 – Навантаження односпрямованого композиту навантаженням F під кутом Θ до напрямку волокон

Це суттєво змінює механізм руйнування, який визначає міцність виробу. Залежно від величини кута Θ можливі три механізми руйнування КМ [1, 3, 7].

При малих значеннях Θ матеріал руйнується внаслідок руйнування волокон від нормальних напружень. Границя міцності композиту $\sigma_{вк}$ у цьому випадку можна розрахувати за рівнянням:

$$\sigma_{\text{BK}} = \sigma_{\text{B}} / \cos^2 \Theta, \quad (2.4)$$

де σ_{B} – границя міцності волокна, МПа.

При невеликому збільшенні кута Θ можливе деяке збільшення міцності композиту, але величина цих кутів не перевищують декількох градусів (рис. 2.22, крива 1).

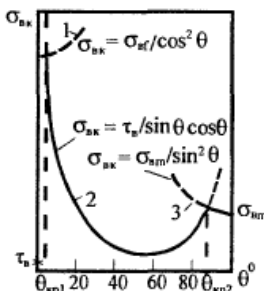


Рисунок 2.22 – Залежність міцності односпрямованого композиту від орієнтації волокон

При подальшому збільшенні кута вступає в дію інший механізм руйнування – руйнування матриці на межі розділу матриця-волокно внаслідок зсуву по площинах, паралельних волокнам. Міцність композиту у такому випадку розраховується за формулою:

$$\sigma_{\text{BK}} = \tau_{3ч} / (\sin \Theta \cdot \cos \Theta), \quad (2.5)$$

де $\tau_{3ч}$ – границя міцності зсуву на межі матриця-волокно, МПа.

Міцність композиту при даному механізмі руйнування має мінімум при куті $\Theta = 45^\circ$ (рис. 2.22, крива 2). Значення кута $\Theta_{\text{кр2}}$ (рис. 2.22), при якому другий механізм руйнування переходить у наступний, визначається співвідношенням границі міцності матриці на розтяг $\sigma_{\text{ВМ}}$ і міцності на зсув $\tau_{3ч}$. Він розраховується за формулою:

$$\text{tg } \Theta_{\text{кр2}} = \sigma_{\text{ВМ}} / \tau_{3ч}. \quad (2.6)$$

Чим більше розривна міцність матриці перевищує її міцність на зсув, тим більше значення кута $\Theta_{\text{кр2}}$.

При значеннях кута Θ , близьких до 90^0 , руйнування контролюється міцністю матриці на розтяг у напрямку, перпендикулярному волокнам, і міцністю зчеплення матриці і волокон (рис.3, крива 3). Міцність композиту у цьому випадку можна оцінити за формулою:

$$\sigma_{BK} = \sigma_{BM} / \sin^2 \Theta. \quad (2.6)$$

2.5.2. Оцінювання міцності КМ

Загальний підхід до оцінювання міцності КМ.

При оцінюванні міцності композитних матеріалів використовуються два підходи.

При *структурному* підході передбачається, що композит макронеоднорідий і складається з окремих шарів. Кожен шар мікрооднорідний, його характеристики визначаються експериментально. Властивості системи шарів встановлюються розрахунковим шляхом на основі аналізу їх взаємодії. При цьому аналітичним шляхом треба врахувати можливе взаємне розташування шарів, їх поведінку і взаємодію при навантаженні, а також дію різних зовнішніх чинників. Для цього використовують дуже складні формули, для розв'язання яких потрібне знання великої кількості конкретних даних.

При *феноменологічному* підході передбачається, що матеріал є умовно однорідним і має деякі усереднені властивості, які можуть бути визначені експериментально на зразках кінцевих розмірів. Це значно спрощує задачу, якщо згадані вище зразки виготовлені за тією ж технологією, що й виріб.

Оцінювання працездатності виробу з ПКМ при дії механічних навантажень в експлуатації складається з таких основних стадій:

- визначення діючих навантажень, необхідної довговічності виробу, температурних умов експлуатації, а також характеру взаємодії з довкіллям і робочим середовищем деталі;
- складання спрощеної розрахункової схеми розподілу навантажень по виробу, виявлення його найнебезпечніших перерізів та визначення у них трьох головних напружень σ_1 , σ_2 , σ_3 (по осях x , y і z);

- розрахунок головного еквівалентного напруження, яке відповідає напруженості, що створюється спільною дією трьох головних напружень:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{0,5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}; \quad (2.7)$$

- визначення для обраного матеріалу та заданих умов експлуатації допустимого напруження $[\sigma]$ та порівняння його з $\sigma_{\text{екв}}$.

Вид і величина діючих напружень залежать від розрахункової схеми навантажень. Наприклад, для бруса (балки) згідно з розрахунковою схемою у кожному перерізі може діяти поперечна сила, згинальний момент або осьова сила; для стрижня (колони) переважаючий вид навантаження - розтягування або стискання. Якщо у виробі виникає складнонапружений стан, як розрахункове напруження використовується еквівалентне напруження $\sigma_{\text{екв}}$.

Умовою тривалої експлуатаційної надійності виробу буде:

$$\sigma_{\text{екв}} \leq [\sigma], \tau \leq [\tau], \varepsilon \leq [\varepsilon]. \quad (2.8)$$

Значення допустимих напружень знаходять як частку від ділення границі міцності матеріалу виробу - відповідно напружень $\sigma_{\text{в}}$ чи $\tau_{\text{в}}$ - на коефіцієнт запасу міцності n .

Величина коефіцієнта запасу міцності n відбиває неповноту знань конструктора про діючі навантаження та інші умови експлуатації, які можуть вплинути на надійність виробу. При конструюванні виробів з ПКМ часто для визначання коефіцієнта запасу міцності n використовують так званий диференціальний метод:

$$n = SkTM, \quad (2.9)$$

де $S = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$; $k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$; $T = T_1 \cdot T_2$; $M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3$.

Рекомендовані значення складових елементів коефіцієнта запасу міцності наведені у табл.2.5.

Значення границі міцності для деяких КМ можна знайти у довідковій літературі, а у складних випадках – експериментально з матеріалу саме цієї деталі. Крім того, при оцінюванні граничного стану виробу треба враховувати зміни міцності матеріалу під час тривалої експлуатації під дією коливань навантажень і температури, внаслідок неоднорідності структури і міцності самого матеріалу, впливу вологи та агресивного середовища тощо.

З часом у виробі виникають необоротні деформації, пов'язані з повзучістю. Можливе крихке руйнування деталі під дією залишкових напружень внаслідок релаксації. Для КМ з орієнтованим волокнистим наповнювачем необхідно враховувати кут між напрямом діючого навантаження і орієнтацією волокон. Неврахування цих чинників може викликати зміни форми чи розмірів виробу під дією напружень, менших гранично допустимих.

Таблиця 2.5.- Складові елементи коефіцієнта запасу міцності

S_1 – загальний запас	для термопластів для реактопластів	1,05...1,10 1,15...1,20
S_2 - вид навантаження	статичне пульсуюче знакозмінне	1,00 1,20 1,30...1,50
S_3 – наявність агресивного середовища		1,00...1,20
k_1 – точність розрахунку	точний наближений	1,00 1,40...1,60
k_2 – наявність концентрації напружень		1,00...2,20
k_3 – складність виробу		1,00...1,15
T_1 – спосіб виготовлення	лиття під тиском пресування намотування	1,05...1,10 1,05...1,15 1,10...1,15
T_2 – умови складання	без посадок посадки з натягом	1,00 1,70...2,60
M_1 – вид деформування виробу	згинання розтягування стискання зрізання скручування	1,00...1,1- 1,40...1,75 0,65...1,10 1,25...1,50 1,40...1,60
M_2 – зміна властивостей у часі	лиття під тиском пресування намотування	1,05...1,10 1,05...1,15 1,10...1,15
M_3 – будова матеріалу	ненаповнений наповнений армований	1,05...1,10 1,10...1,15 1,00

Значення допустимої величини прогину виробу (як балки, стрижня, стінки і т.п.) $[\varepsilon]$ задається за конструктивними або експлуатаційними міркуваннями.

2.5.3 Розрахунок міцності за рівнянням адитивності

Рівняння адитивності не враховують всі особливості взаємодії матриці та наповнювача, механізму руйнування, але завдяки простоті та зручності його використовують при оціночних розрахунках.

Границя міцності двокомпонентного КМ, який складається з матриці й волокон, за правилом адитивності, або «правилом суміші»:

$$\sigma_{\varepsilon}^{KM} = \sigma_{\varepsilon}^{\varepsilon} \cdot V_B + \sigma_{\varepsilon}^M \cdot (1 - V_B), \quad (2.10)$$

де - $\sigma_{\varepsilon}^{\varepsilon}$ - границя міцності волокон; σ_{ε}^M - напруження в матриці в момент руйнування волокон; V_B - об'ємна частка волокон у композиті.

Границя міцності композиту при розтягу визначається головним чином максимальною об'ємною часткою волокон. Об'ємна частка волокон рідко перевищує 65...70%, тому що при перевищенні цього рівня відбувається їх надмірне руйнування. Практика показує, що при звичайному вмісті волокон внесок полімерної матриці у міцність КМ не перевищує 2...5%, тому загальна міцність КМ достатньо точно визначається виразом $\sigma_{\varepsilon}^{KM} \parallel \approx \sigma_{\varepsilon}^{\varepsilon} \cdot V_B$ (де $\sigma_{\varepsilon}^{KM} \parallel$ - границя міцності КМ, армованого волокнами, при навантаженні паралельно напрямку розташування волокон).

Для матриці, здатної деформуватися пластично (напр., металевої), більш підходящою для розрахунків міцності є границя плинності σ_T .

Аналогічно модуль нормальної пружності для двокомпонентного КМ:

$$E_{KM} = E_B V_B + E_M \cdot (1 - V_B), \quad (2.11)$$

де E_B , E_M - модулі пружності волокон і матриці відповідно; V_B - об'ємна частка волокон у композиті.

Жорсткість елемента конструкції у загальному випадку визначається добутком $E \cdot I$, де I – момент інерції поперечного перерізу, що розглядається. Для багатошарової конструкції:

$$E \cdot I = \sum_{i=1}^n E_i I_i, \quad (2.12)$$

де $E_i I_i$ – жорсткість i -того структурного елемента відносно нейтральної осі згинання; n – кількість шарів КМ.

Підвищення жорсткості конструкції досягається орієнтацією волокон композиту вздовж розрахункових силових ліній. Недостатність механічних властивостей деяких частин конструкції виробу компенсується конструктивним підкріпленнями – стрингерами, шпангоутами, ребрами і т.п.

Теоретичну оцінку міцності виробів з КМ можна дати лише окремим елементам конструкції. Оцінка міцності виробу в цілому, як правило, ґрунтується на власних експериментальних даних і досвіді проектування та експлуатації.

2.5.4 Вплив на міцність схеми армування КМ

Як *дисперсні наповнювачі* використовують порошки з розміром частинок від 2...4 до 200...300 мкм (найчастіше ≈ 40 мкм). Вміст їх може змінюватися від декількох відсотків до 70...80% (мас). Такі ПКМ, як правило, ізотропні. При збільшенні вмісту дисперсних частинок до певної межі міцність ПКМ дещо збільшується. При перевищенні цієї межі (це приблизно 60...70% мас.) міцність на розтяг різко падає. Одночасно, як правило, знижується відносне видовження і погіршуються ударні характеристики.

Таким чином, дисперсні частинки безпосередньо не впливають на міцність композиту. Внесок таких частинок у формування міцнісних характеристик визначається фізико-хімічними процесами на межі полімер-наповнювач (змочування, адгезія, пористість та інше).

Композит, що складається з пластичної матриці та міцних, але крихких односпрямованих *неперервних волокон*, має чітко виражену анізотропію властивостей, а його міцність визначається не лише міцністю самих волокон, а також їх діаметром і об'ємним вмістом

волокон у композиті. Збільшення діаметра волокон у складі КМ призводить до зниження їх міцності, але різною мірою, залежно від природи волокон. Вважається, що при збільшенні діаметра волокон їх міцність різко падає, а при діаметрі d понад 15 мкм асимптотично наближується до певної мінімальної величини (рис. 2.20).

Об'ємний вміст волокон (звичайно $60 \pm 10\%$) створює вирішальний вплив як на механічні, так і на службові властивості КМ (тепло- і звукопровідність, тепло- і зносостійкість) та інше. Переважаючий вплив властивостей волокон у порівнянні з полімерною матрицею нерідко має наслідком те, що приблизний розрахунок КМ на міцність проводиться без урахування властивостей матриці.

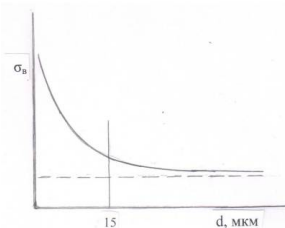


Рисунок 2.20 – Залежність міцності волокон від діаметра

Міцність КМ, армованих *дискретними волокнами*, залежить від співвідношення їх довжини l та діаметра d . Чим більше співвідношення l/d , тим міцніший матеріал. При аналізі його впливу на міцність композиту використовується поняття *критичної довжини* волокон $l_{кр}$ [1, 4, 6]:

$$l_{кр} = \sigma_v d / 2\tau_{зч}. \quad (2.13)$$

Тобто лише якщо довжина волокна l більше за критичну довжину $l_{кр}$, то волокно руйнується при розтягу відповідно до своєї міцності, і при цьому чим більше l , тим більшу міцність має КМ в цілому.

Залежно від міцності волокон і типу матриці $l_{кр}/d$ може бути у межах 10...200, тобто при $d \approx 10$ мкм $l_{кр} = 0,15 \dots 2,0$ мм. Для сучасних КМ з полімерною матрицею $l_{кр}$ найчастіше становить 50 діаметрів волокна.

Дискретні волокна можуть розташовуватися у композиті орієнтовано і хаотично. Теоретично ефективність зміцнення КМ, армованих орієнтованими дискретними волокнами, може досягати 90% від рівня зміцнення неперервними волокнами. Порушення співвідношення дискретних волокон усередині КМ більше, ніж на декілька градусів, викликає зниження їх ефективності до рівня 50...70%.

Поняття критичної довжини волокон стосується й неперервних волокон, оскільки їх кінцеві частини довжиною $l_{кр}/2$ працюють неефективно. Особливо цей ефект проявляється тоді, коли волокна починають руйнуватися, і кількість неефективних ділянок збільшується.

Масштабний фактор. Збільшення і довжини, і діаметра волокон у складі КМ призводить до зниження їх міцності, але різною мірою. Наприклад, збільшення діаметра скловолокна з 2,5 до 19 мкм зменшує міцність у 10 разів, а збільшення довжини з 5 до 1660 мкм (при діаметрі 13 мкм) здатне знизити міцність при розтягу лише у два рази.

2.5.5 Вплив на міцність способу навантаження та зовнішніх умов

Вплив кута між напрямками навантаження і односпрямованими безперервними волокнами у КМ.

Як показано у підрозділі 2.5.1, зусилля, яке діє під кутом Θ до напрямку волокон, суттєво змінює механізм руйнування, який визначає міцність виробу. При збільшенні кута Θ до 15...30⁰ ефективність армування може зменшитися у 2...3 рази і значно більше при $\Theta = 90^0$.

Дискретні волокна можуть розташовуватися як односпрямованою так і хаотично. Теоретично ефективність зміцнення КМ, армованих односпрямованими дискретними волокнами, досягає 90% від рівня зміцнення неперервними волокнами. Порушення співвідношення дискретних волокон усередині КМ більше, ніж на декілька градусів, викликає зниження ефективності до рівня 50...70%.

Міцність деяких шаруватих ПКМ є порівняною з міцністю конструкційних сталей, але їх модуль пружності значно нижче. Це необхідно враховувати у першу чергу при проектуванні виробів, для яких потрібна достатня жорсткість. Гнучкі конструкції з шаруватих композитів можуть втрачати свою стійкість значно раніше, ніж буде вичерпана міцність матеріалу.

Причиною руйнування КМ з армуванням односпрямованими волокнами при поперечному розтягу (стисканні) вважається або руйнування матриці, або границі розділу волокно-матриця. Умову забезпечення міцності можна записати:

$$\sigma_M^{\max} \geq \sigma_{\epsilon}^M \text{ або } \epsilon_M^{\max} \geq [\epsilon_M]. \quad (2.14)$$

Видовження КМ у поперечному напрямку складається з деформації волокон і матриці. Модуль пружності у поперечному напрямку E_{\perp} можна розрахувати за формулою:

$$1/E_{\perp} = V_V/E_V + V_M/E_M, \quad (2.15)$$

де E_V , E_M – модулі пружності матриці і волокон (у поперечному напрямку) відповідно; V_V , V_M – об'ємна частка волокон і матриці в композиті.

При цьому треба зважати на те, що модуль пружності волокон у поперечному напрямку співпадає з модулем пружності у поздовжньому напрямку лише для ізотропних волокон (скляні, борні); для вуглецевих і органічних волокон він значно менше поздовжнього.

Вплив пористості.

Одним з найважливіших чинників, які впливають на міцність КМ, армованих волокнами, є мікрodefекти структури: пори, мікротріщини, розшарування, порожнини тощо. Такі defекти є концентраторами напружень. Аналітичні залежності тут мають лише кореляційний характер. При звичайних технологіях пористість, як правило, обмежується 5%. При використанні спеціальних заходів її можна знизити до 0,5...1,0%. Але й при такому рівні не можна нехтувати впливом пористості та інших концентраторів напружень; вони можуть помітно вплинути на міцності КМ.

Тріщиностійкість ПКМ корелює з тріщиностійкістю матриці. Зростання тріщини, а потім і руйнування, починається, коли напруження у вершині тріщини досягає границі міцності матриці. Розподіл напружень у вершині тріщини залежить від того, чи є матриця пружною, чи пластичною. Оптимальне значення границі плинності матриці зменшується при збільшенні модуля пружності

волокон. Використання матриці з підвищеними міцністними та адгезійними характеристиками призводить до крихкого руйнування.

Концентратори напружень в елементах конструкцій з шаруватих пластиків особливо небезпечні, оскільки резерв пластичності цих матеріалів, як правило, дуже малий. Небезпека впливу концентраторів напружень на міцність виробів з шаруватих пластиків посилюється неминучими дефектами структури матеріалу. Значне збільшення концентраторів напружень в елементах конструкцій може виникнути при різкому збільшенні числа шарів армувальних матеріалів. Цього можна уникнути шляхом поступового зменшення довжини цих шарів на края виробу.

Вплив способу навантажування.

Границя міцності при тривалому статичному навантаженні у 8...10 разів більше границі міцності при короточасному навантаженні. При короточасному динамічному навантаженні допустиме напруження для термореактивних пластмас у 1,2...1,5 рази, а для термопластичних – у 2 рази менше їх значень при статичному розтягу. Для ударних навантажень рекомендується знижувати допустимі напруження для термопластів на 10...30%, для реактопластів – на 50...60%.

Полімерна матриця фактично має нульову границю витривалості σ_r . Тому при циклічному навантаженні опір втомі обмежується граничною кількістю циклів навантаження. Звичайно вона встановлюється у межах 10^6 ... 10^7 .

Вплив технологічних факторів.

Технологічні чинники (наприклад, сухе чи мокре намотування; автоклавне чи вакуумне формування і т.п.) можуть у 1,5...2,0 змінити міцнісні характеристики виробу. Зокрема, вакуумування може збільшити міцність КМ на основі скловолокон у 1,8...2,0 рази, а наявність вологи - зменшити у 1,5...1,8 рази.

У крупногабаритних виробках спостерігаються різкі відмінності механічних властивостей в окремих їх елементах, а відносно великий розкид цих показників може зробити виріб малонадійним.

Властивості волокон можуть змінюватися не лише під дією матриці, але й під дією інших технологічних операцій. Наприклад, високоміцні вуглецеві волокна, окиснюючись, у перші часи нагрівання втрачають 10% міцності, а при кислотному обробленні для

покращення адгезії з матрицею – 20%. Аналогічно оброблення скловолокон до контакту з матрицею суттєво змінює їх механічні властивості. Внаслідок розпушування, набухання, часткового розчинення поверхні волокон при взаємодії з матрицею також погіршуються їх механічні властивості.

Література до розділу 2.5:

Корнілов О. Опір матеріалів: підручник. [Текст]/– К.: Логос, 2002. - 562 с.

Крыжановский В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В., Паниматченко Производство изделий из полимерных материалов: учеб. пособие. СПб: Профессия, 2004. 464 с.

Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л.Кербер, В.М.Виноградов, Г.С.Головкин и др.; под ред. А.А.Берлина. СПб: Профессия, 2008. 560 с.

Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн. / М.: Машиностроение, 1988. Кн. 2 / под ред. Дж.Любина. 584 с.

2.6 Точність виробів з композиційних матеріалів

Точність виробу визначається призначеними допусками. Вибір конструкторських допусків має забезпечувати зручність виготовлення і складання, а також взаємозамінність виробів при ремонті та експлуатації. Базою для визначення допусків і граничних відхилень для виробів є допуски і посадки за системою ISO, які визначаються ДСТУ ISO 286-1-2002 (основні відхилення і посадки) і ДСТУ ISO 286-2-2002 (граничні відхилення отворів і валів).

Стосовно виробів на основі полімерів вибір допусків робиться на підставі методу прецедентів (однотипні варіанти) або аналогій (подібні варіанти). Після проведення необхідних функціональних розрахунків цей вибір остаточно узгоджують з вимогами ГОСТ 25349-88 (СТ СЭВ 179-87) „Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков деталей из пластмасс“, який частково доповнює основні ДСТУ. Стандарт встановлює поля допусків і граничні відхилення для гладких елементів сполучуваних і несполучуваних елементів виробів з полімерів з номінальними розмірами від 1 до 3150 мм. Зазначені у

ньому поля допусків відносяться до розмірів виробів при температурі 20⁰С і відносній вологості навколишнього повітря 50%.

Для сполучуваних розмірів у гладких циліндричних сполученнях поля допусків розташовують відповідно до знаків відхилень, встановлених для вибраної посадки.

Для несполучуваних розмірів поля допусків повинні розташовуватися "в тіло" або симетрично (в останньому випадку вони дорівнюють половині величини поля допуску і проставляються зі знаками \pm).

2.7 Забезпечення технологічності виробу

Завданнями відпрацювання на технологічність конструкції окремих деталей є: раціональний вибір конструкційних баз, які забезпечують можливість використання їх також як бази технологічні; забезпечення однотипності форм оброблюваних поверхонь; побудова раціональних розмірних ланцюгів, що дають необхідну точність функціональних параметрів; забезпечення чіткої приналежності конструкції деталі до визначеної класифікаційної групи, на представника якої складається типовий технологічний процес (ЕСТД ГОСТ 3.1409-74 "Правила оформлення документів на виготовлення деталей из пластмасс").

Відпрацювання конструкцій на технологічність - це доведення їх до відповідності певній системі вимог, що забезпечують мінімальні терміни і вартість підготовки виробничих виробів, мінімальні витрати матеріалу і мінімальну трудомісткість виготовлення при високих експлуатаційних якостях виробу. Відпрацювання повинно робитися незалежно від наміченої серійності виробництва виробів.

ГОСТ 14.202-73 «ЕСТПП Правила вибору показателів технологічності конструкції изделий» встановлює правила вибору показників технологічності конструкції: за трудомісткістю виготовлення (у тому числі - за видами робіт); за підготовкою до функціонування, технічного обслуговування та ремонту; за технологічною собівартістю; за уніфікацією (виробу в цілому і окремих конструктивних елементів); за стандартизацією - оптимальне використання стандартів, коефіцієнтів повторюваності та застосовності; за витратами матеріалу - загальна маса, коефіцієнти використання матеріалу; за оброблюваністю - коефіцієнт точності оброблення, досягнення заданої якості поверхні; за складом

конструкції - коефіцієнт ефективності складання, коефіцієнт перспективності використання та інші.

Конфігурація виробу має бути такою, щоб він легко формувался і видалявся з форми; був простим у виготовленні і зручним в експлуатації. Іноді замість одного складного виробу доцільне виготовлення двох і більше простіших виробів з подальшим складанням їх у вузол. До спрощення виробу завжди слід дотримуватися технологічних, експлуатаційних і економічних міркувань: чим виріб простіше, тим дешевше прес-форма, вище продуктивність праці, точність і якість виробу і нижче його собівартість. З іншого боку, деяке ускладнення конфігурації, наприклад, введення ребер жорсткості, забезпечує більшу міцність виробу при зменшенні маси. Загальна і поелементна (тобто окремих типових конструктивних елементів) технологічність виробу має бути спрямована на забезпечення: раціональних умов заповнення розплавом формувальної порожнини, підвищення міцності і зменшення залишкових напружень у виробах (чи раціональне керування ними), підвищення точності розмірів і точності геометричної форми поверхонь виробів; зменшення або повне усунення подальшого механічного оброблення й зачищення виробу після формування. Внесок загальної конфігурації і окремих типових конструктивних елементів виробів у рішення перерахованих вище завдань різний і залежить від призначення виробу, виробничих можливостей підприємства, програми випуску та інших техніко-економічних чинників.

На вибір конфігурації виробів передусім впливає плинність, або в'язкість, матеріалу матриці. Вона повинна забезпечити найшвидше заповнення прес-форм. Це головним чином потрібно при литті під тиском будь-яких виробів, особливо різнотовщинних. Умови плину композиту впливають на характер і величину залишкових напружень, усадку і орієнтацію складників матеріалу, анізотропію міцнісних і точнісних характеристик виробу.

При проектуванні виробів, які виготовляються пресуванням (штампуванням), слід прагнути до створення таких геометричних форм, при яких можливості утворення тріщин, зморщок і розшарувань були б мінімальними. Найтехнологічнішою конфігурацією плоских виробів з ПКМ є кругла, овальна або будь-яка інша, але з плавними контурами.

Конфігурація виробу має принципово важливе значення для вибору площини розніму формувального інструмента, яка має бути розташована по найбільшому розміру так, щоб не було утруднень для видалення виробу після формування. Від положення площини розніму може залежати точність деяких елементів виробу. Тому бажано, щоб форма виробу забезпечувала можливість застосування нерознімних матриць і пуансонів; рознімні елементи прес-форми різко підвищують їх вартість і збільшують трудомісткість процесу їх виготовлення.

Нарешті, останній етап - освоєння спроектованого виробу виробництвом - проводиться відповідно до ГОСТ 15.001-73, де передбачені правила розробляння і постановки продукції на виробництво, а також види перевірки якості та випробувань готових виробів.

3 ПРОЕКТУВАННЯ ВИРОБІВ З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Завдання на проектування та його аналіз

Завдання на проектування передбачає отримання таких відомостей:

- призначення виробу; його роль у механізмі в цілому; характер сполучення з іншими деталями механізму;
- орієнтовні конфігурація і розміри виробу, потрібна точність виробу;
- величина і характер навантажень на виріб;
- умови експлуатації виробу;
- особливі вимоги до виробу (наприклад, висока корозійна стійкість чи зносостійкість, певні антифрикційні або декоративні властивості і т.п.);
- обсяг замовлення на виготовлення виробу та пов'язаний з цим тип виробництва;
- чи нема додаткових вимог щодо використання певної технології виготовлення.

При аналізі завдання передусім встановлюють функціональні вимоги до виробу (призначення, спосіб функціонування, точність і т. п.). Ці функціональні вимоги визначають його конструкцію в цілому, а також окремих елементів та сполучень. Розробляючи конструкцію

якої-небудь деталі, необхідно не лише визначити її матеріал і конфігурацію, розрахувати розміри, які визначають довговічність виробу, встановити необхідність механічного або термічного оброблення після спікання, але й правильно вибрати допуски і посадки для сполучуваних розмірів.

3.2 Порошкові матеріали для виготовлення виробів

Залежно від призначення деталі необхідно обрати *оптимальний порошковий матеріал*.

На сьогодні існує велика кількість розроблених і закріплених стандартами порошкових сумішей для найрізноманітніших областей використання. Вони наводяться у досить поширених довідниках, монографіях, підручниках та навчальних посібниках.

Більшість джерел розглядає готові порошкові матеріали залежно від області застосування. У них даються як рекомендації з використання, так і таблиці хімічного складу, фізико-механічних властивостей існуючих марок матеріалів. При проектуванні деталей більший інтерес становлять таблиці фізико-механічних властивостей, оскільки їх можна використовувати для розрахунків на міцність.

3.2.1 Порошкові конструкційні матеріали

Це наймасовіший вид продукції порошкової металургії. З них виготовляють різноманітні деталі високої міцності, твердості та зносостійкості.

Хімічний склад, основні властивості, маркування та призначення різноманітних порошкових конструкційних матеріалів визначає ГОСТ 28378-89 «Материалы конструкции порошковые на основе железа». Він охоплює матеріали найрізноманітнішого призначення від матеріалів з помірною міцністю до корозійностійких і жароміцних.

Умовне маркування цих матеріалів складається з букв і цифр. Букви ПК показують, що це порошковий конструкційний матеріал. Двозначна цифра після них – вміст вуглецю у сотих частках відсотка. Якщо матеріал легований, далі йдуть букви і цифри, які показують вид і вміст легувального елемента за загально прийнятою системою. Через дефіс вказується мінімальна густина пресовки з даного матеріалу.

Наприклад, порошкова конструкційна сталь із середнім вмістом вуглецю 0,4%, нікелю 2%, міді 2% і мінімальною густиною 6,4 г/см³ має таке маркування:

ПК40Н2Д2-64 ГОСТ 28378-89.

Матеріали однакового складу можуть мати різну задану мінімальну густину. Вона залежить від технологічних умов: питомого тиску та умов спікання.

Найпоширеніші з порошкових конструкційних матеріалів – *порошкові сталі*. У деяких випадках у літературі вони мають дещо інше маркування

Перші букви (СП) вказують на те, що сталь отримана методами порошкової металургії. Наступна двозначна цифра (10, 30 або 70) вказує середній вміст вуглецю у сотих частках відсотка. Букви і цифри після них (ДЗ, НЗ, М і т.п.) означають легувальний елемент і його середній вміст у відсотках. Відсутність цифри означає, що вміст елемента менше 1%.

Цифра після дефісу позначає підгрупу густини (їх чотири):

1 – пористість 16...26%, густина $\rho = 6,0 \dots 6,6 \text{ г/см}^3$;

2 - пористість 10...15%, густина $\rho = 6,7 \dots 7,1 \text{ г/см}^3$;

3 - пористість 9...12%, густина $\rho = 7,2 \dots 7,7 \text{ г/см}^3$;

4 - пористість не більше 2%, густина ρ більше 7,7 г/см³.

Нижче у табл. 3.1 наведені механічні властивості деяких порошкових сталей.

Конструкційні деталі машин виготовляються з порошків на основі заліза, вуглецевих та легованих сталей. Залежно від хімічного складу та швидкості охолодження вони можуть мати феритну, перлітну, аустенітну або мартенситну структури. Для підвищення механічних властивостей вони можуть піддаватися термічному, хіміко-термічному та термомеханічному обробленню.

Виготовляють деталі машин й з порошків нержавіючих сталей. Останні характеризуються високим вмістом шкідливих домішок водень, кисень, азот). Для запобігання подальшого насичення ними відповідних виробів при спіканні застосовують додаткові заходи: спікання у вакуумі або у присутності засипок з титану чи хрому.

Для виготовлення деталей машин використовуються також порошкові матеріали на основі міді, алюмінію, титану та інші.

Таблиця 3.1. - Механічні властивості порошкових сталей СП загального призначення

Марка сталі	Границя міцності при розтягу σ_b , МПа	Віднос -не видо-вження δ , %%	Ударна в'язкість KCV, кДж/м ²	Твердість НВ
СП10-1	100	6	200	50...70
СП10-2	120	8	350	70...80
СП10-3	150	12	500	80...90
СП10-4	250	18	700	90...130
СП-30-1	120	6	200	50...70
СП30-2	160	8	350	70...80
СП-30-3	200	12	500	80...90
СП30-4	250	18	700	90...130
СП70-1	120	5	15	50...70
СП70-2	200	8	300	70...90
СП70-3	280	10	400	90...110
СП70-4	350	15	600	110...150
СП30ДЗ-2	220	4	300	70...90
СП30ДЗ-3	280	6	400	90...100
СП30ДЗ-4	360	10	600	100...140
СП70ДЗ-2	260	3	200	80...100
СП70ДЗ-3	360	5	300	100...120
СП70ДЗ-4	450	8	450	120...160
СП30ДЗП-2	300	3	200	90...110
СП30ДЗП-3	360	4	300	110...130
СП30ДЗП-4	450	6	400	130...180

3.2.2 Антифрикційні матеріали

Структура антифрикційного порошкового матеріалу повинна бути гетерогенною і складатися з твердих зерен, рівномірно розподілених у пружнопластичній металевій матриці. У деяких випадках, коли на вузол тертя діють незначні навантаження, у склад порошкового матеріалу вводять змащувальні речовини, які створюють на поверхні тертя розділовий шар.

Антифрикційні матеріали виготовляються головним чином на основі міді, заліза та деяких кольорових металів.

Як антифрикційні порошкові матеріали на основі міді використовуються: пориста олов'яна бронза, легована пориста бронза, бронзографіт, пористі бронзові матеріали на сталевій підкладці та інше.

Пориста олов'яна бронза, яка містить 6...12% олова, застосовується у підшипниках, що працюють у легких умовах (напр., у приладах). Вони можуть просочуватися мастилом після спікання.

Бронзографіт може містити від 1 до 25% графіту. Графіт у них відіграє роль твердого мастила. Бронзографітові матеріали можуть працювати у парі з тілами, які мають грубу поверхню, у незмащувальних рідинах (вода, водомасляні суспензії) при підвищених навантаженнях.

Легована пориста бронза виготовляється з різним хімічним складом як за легувальними елементами (Ti, Ni, , Co, Fe), так і за їх вмістом і використовується при значних навантаженнях на підшипники. Оцінка працездатності підшипника за таких умов характеризується фактором pv – добутком питомого тиску p (МПа) і колової швидкості v (м/с). Залежно від хімічного складу пористих бронз їх фактор pv змінюється у широких межах. Наприклад, свинцева бронза (40...60% Pb) має порівняно низький допустимий фактор pv , а бронза, легована 0,2% P, 3% Zn, 3% Ni, може працювати у важких умовах.

Антифрикційні матеріали на основі заліза – це пористе залізо, залізографіт та велика кількість сумішей на основі заліза і графіту, легованих міддю, фосфором, молібденом, сульфідами тощо.

Пористе залізо – найпростіший антифрикційний матеріал - має 15...30% (об.) пор. При достатньо стабільній подачі змащування пористе залізо здатне витримувати навантаження з порівняно високим фактором pv .

Залізографіт з вмістом графіту понад 1,5% має кращі антифрикційні властивості. Допустимий для нього критерій pv суттєво залежить від умов змащування. Мідь, молібден, нікель підвищують міцність та опір навантаженням, а введення сульфідів підвищує зносостійкість та припрацьовуваність залізографіту.

Проте всі основні характеристики працездатності можуть змінюватися у широких межах і визначаються для кожного матеріалу експериментально.

Залізоокисні зносостійкі матеріали ПС5ГШ, КЖ4Ф використовують для виготовлення важко навантажених вузлів тертя (зубчастих коліс, ущільнювальних кілець, кулачків тощо).

Антифрикційні матеріали на основі нікеля, кобальта та деяких тугоплавких металів використовуються для виготовлення підшипників, які працюють без змащування або у режимі самозмащування при високих навантаженнях і температурах.

Для виготовлення підшипників, які працюють при підвищених температурах, навантаженнях і швидкостях у вакуумі та різних газових середовищах, застосовують *порошкові матеріали, які містять тверде мастило*. Основу таких матеріалів становлять порошки Co, Ni, Ag, Cu, Mo, а твердим мастилом у них служать свинець, дисульфід молібдену і диселенід вольфраму.

3.2.3. Фрикційні матеріали

Завдання фрикційних матеріалів – створити великий коефіцієнт тертя між сполучуваними деталями. Основні механізми, де використовуються фрикційні матеріали, - гальмівні механізми та механізми зчеплення, які передають крутний момент.

Компоненти, які входять у склад фрикційних матеріалів, поділяються на три групи:

- компоненти основи – мідь (для роботи в умовах рідинного тертя при температурах до 300...400^{°C}) і залізо (для роботи в умовах сухого тертя при температурах в момент гальмування до 1000...1100^{°C});

- компоненти, які містять змащувальні матеріали (свинець, графіт, сульфід молібдену, заліза, сірчанокислі солі барію, заліза) для запобігання зношуванню;

- компоненти, які надають матеріалу високі фрикційні властивості (азбест, кварцовий пісок, оксиди хрому, заліза, карбід кремнію, титану, вольфраму та ін.).

Як матричні компоненти використовуються порошки міді (ПМС-1, ПМС-2, ПМА, ПМС-К) та заліза (ПЖ1, ПЖ2, ПЖ3). Рекомендується застосовувати дуже дрібні залізні порошки, оскільки зі збільшенням дисперсності покращуються фрикційні характеристики. Як фрикційна добавка у матеріали на основі міді і заліза найчастіше використовується кварцовий пісок.

Перевага змащувальних фрикційних пристроїв полягає у плавності включення, більшій довговічності та надійності

охолодження після зняття навантаження. Але при цьому суттєво зменшується фрикційна ефективність.

3.2.4 Спечені тверді сплави та інструментальні сталі

Тверді сплави та порошкові інструментальні сталі використовуються там, де вимагаються високі міцність, твердість, теплостійкість та зносостійкість. З них виготовляють пластини для металорізальних інструментів, зуби бурів, волоки, штампи і т.п.

Сплави групи ВК виготовляють з карбідів вольфраму і кобальту (1...30% мас.) як зв'язки. Чим більше кобальту, тим сплав міцніший, але менш зносостійкий. Однотипні сплави типу ТК і ТТК при однаковій з ВК твердості мають більшу міцність і теплостійкість, але меншу ударну в'язкість. Склад твердих сплавів визначається відповідними стандартами.

Заміною їм може служити безвольфрамовий сплав на основі карбіду ТiC (20% мас.) та карбонітриду титану, зв'язкою в якому служить суміш нікелю і молібдену (до 10% мас.).

Порошкові швидкорізальні сталі мають однорідну дрібнозернисту структуру, яка забезпечує високі механічні властивості і підвищення експлуатаційної стійкості у 1,5...3,0 рази у порівнянні з відповідними литими сталями. Інструменти з порошкових швидкорізальних сталей додатково піддають термообробленню.

3.2.5. Високопористі матеріали

Високопористі матеріали використовуються для виготовлення фільтрів для очищення повітря, агресивних газів і рідин, мастил і палива, розплавів металів, а також для виготовлення демпферів, полум'ягасників, матеріалів для пористого охолодження («відпотівання») та інше. Залежно від призначення виробляють і спікають з порошків металів і сплавів, металевих волокон, сіток різноманітного складу – від заліза і міді до титана та різних тугоплавких сполук.

Для виготовлення фільтрів застосовуються сферичні та несферичні порошки металів і сплавів та тонкий металевий дріт. Застосування сферичних порошків забезпечують найвищі показники очищення та вищу механічну міцність тіла фільтрів. Для забезпечення рівномірної пористості у всіх частинах виробу важливе значення має рівномірність фракційного складу порошку, що застосовується. Для виготовлення фільтрів найчастіше застосовують металеві порошки на

основі заліза, нержавіючої сталі, нікелю, фосфористої міді та олов'янистої бронзи.

3.2.6. Спечені електричні контакти

Матеріал електричних контактів повинен бути тугоплавким, мати високі твердість, тепло- і електропровідність, високу корозійну стійкість та інше. Електроконтактні матеріали – псевдопорошки, утворені з компонентів, які не розчиняються один в одному ні в твердому, ні у рідкому стані (напр., W-Cu, W-Ag, Mo-Cu, Mo-Ag, Ag-C, Ag-Ni, Ag-CdO і т.п.). Вони складаються з тугоплавких і твердих та одночасно також відносно легкоплавких і електропровідних компонентів. Як тугоплавкі компоненти використовують метали (W, Mo, Pd, Ni, Ta, Cr та ін.), деякі неметали (C, B та ін.), оксиди (CdO, WO₅, MoO₃, Ta₂O₅, Fe₂O₃ та ін.), карбіди (WC, MgC та ін.). Легкоплавкими компонентами звичайно служать мідь, срібло та їх сплави.

Матеріал обирається залежно від призначення контактів: для великої сили струму та підвищених температур (напр., контактне зварювання), для слабкострумової апаратури, ковзних контактів тощо.

Контакти зі срібла та вольфраму відрізняються високим опором зношуванню, сплавленню в умовах сильного дугоутворення. Збільшення вмісту вольфраму покращує дугостійкість, але погіршує електропровідність.

Контакти зі срібла і молібдену добре опираються зношуванню і сплавленню, мають низький електричний опір і достатню твердість.

Контакти з міді і вольфраму за зносостійкістю і опором сплавленню кращі срібно-вольфрамових, але за електричним опором вони перевищують останні у півтора рази.

Срібно- і мідно-графітові контакти відрізняються високою електропровідністю і добрим опором сплавленню.

Срібно-нікелеві контакти при високому опорі електричному зношуванню мають високу пластичність: їх можна виготовляти прокатуванням, волочінням.

Література до розділу 3.2:

Порошковая металлургия: справочник / отв. ред. И.М.Федорченко К.: Наук. думка, 1985. 624 с.

Радомышельский И.Д., Ясь Д.С., Павлеко В.И. Производство и использование порошковых деталей в лёгкой промышленности. К.: Техніка, 1982. 175 с.

Либенсон Г.А. Производство порошковых изделий М.: Металлургия, 1990. 240с.

3.3 Принципи проектування порошкових виробів

ГОСТ 29278-92 «Изделия порошковые. Конструктивные элементы. Общие требования» встановлює наступні загальні вимоги до конструктивних елементів порошкового виробу, які у першу чергу треба враховувати при проектуванні.

1. Види та розміри конструктивних елементів повинні відповідати функціональному призначенню виробу.

2. Вибір конструктивних елементів повинен забезпечувати рівномірний розподіл щільності по об'єму виробу.

3. При формуванні конструктивних елементів порошкового виробу треба визначитися з найвигіднішим для нього напрямом пресування таким чином, щоб весь поперечний переріз підпадав під площу прикладання тиску при мінімальній товщині і максимальному спрощенні конструкції майбутньої прес-форми. Якщо деталь має вісь обертання, зусилля пресування мають прикладатися вздовж осі. Якщо деталь не має осі обертання, то треба планувати її пресування у такому положенні, при якому товщина зазнає під час пресування мінімальні зміни.

4. Одним з найголовніших показників, які характеризують можливість виготовлення деталі методами порошкової металургії, є відношення її висоти до поперечного розміру, яке впливає на передбачуваний спосіб виготовлення виробу. При однобічному пресуванні для отримання рівномірної щільності оптимальним є відношення 1:1. Проте при двобічному пресуванні це відношення можна збільшити до 3:1, а при ізостатичному або мундштучному формуванні й ще більше.

5. При проектуванні складних виробів слід забезпечити найменшу кількість переходів по висоті. Ширина кожного переходу має бути не менше 0,8 мм.

6. Бурти, що переходять у тонкі стінки (з відношенням довжини до товщини понад 10:1), рекомендується підсилювати ребрами

жорсткості, розташованими вздовж осі пресування. Переходи від бурта до стінки повинні бути оформлені радіусами не менше 0,5 мм.

7. Для покращення умов випресовування виробу слід застосовувати технологічні нахили до $1,5^0$.

8. При виготовленні виробів з отворами перевага має надаватися циліндричним отворами, хоча можливі й отвори інших форм. Кути в отворах треба закругляти радіусом не менше 0,3 мм.

9. У порошкових виробів бажано застосовувати виступи замість пазів і не застосовувати вузьких та видовжених виступів або пазів.

Іноді додаткові вимоги до конструкції деталі накладають умови експлуатації. Наприклад, електричні контакти повинні мати поверхні, які одночасно забезпечують як якісне закріплення у сполучуваних конструкціях, так і добру електропровідність. Корозієстійкі деталі не повинні мати на поверхні відкритих пор. Якщо подібна деталь за умов міцності або технологічності виготовляється пористою, то ці пори мають бути закриті речовинами, які не реагують з агресивним робочим середовищем (скло, полімери, смоли) і не створюють гальванічних пар з основним металом.

Складність виготовлення інструмента для пресування, його стійкість і вартість у багатьох випадках змушує визначитися з доцільністю виготовлення деталі методами порошкової металургії. У деяких випадках, особливо в умовах масового виробництва, доцільно змінити конфігурацію деталі з метою пристосування її до оптимальних умов виробництва. Тому розроблена низка детальних рекомендацій щодо формування конструкції виробу з метою полегшення процесу її виготовлення.

3.4 Класифікація порошкових виробів

При проектуванні порошкового виробу треба надати йому таку конфігурацію, яка забезпечить отримання пресовок заданої форми, розмірів та щільності з достатньо рівномірним розподілом щільності за перерізом при високій продуктивності та низькій вартості виробництва. Це досягається за рахунок використання тих чи інших технологій. З метою уніфікації вимог до виробів і технологій їх виготовлення всі пресовані порошкові вироби за складністю поділяються на сім груп (рис. 3.1).









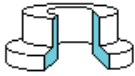




I			
II - III			
IV - V			
VI			
VII		шестерни	шестерни со ступицами

Рисунок 3.1. - Поділ порошкових виробів за групами складності

1 група – деталі без отворів з незмінним перерізом по висоті, обмежені двома паралельними площинами, які перпендикулярні напрямку пресування.

2 група – деталі з незмінним перерізом по висоті, обмежені двома паралельними площинами, з одним або декількома отворами у напрямку пресування та з відношенням висоти виробу h до мінімальної товщини стінки S_{\min} у межах $h/S_{\min} \leq 8 \dots 10$.

3 група – деталі, які відносяться до 2 групи, але з відношенням $h/S_{\min} > 8 \dots 10$.

4 група – деталі, близькі за формою до деталей 2 групи, але які мають зовнішній або внутрішній бурт і відношення $h/S_{\min} \leq 6 \dots 8$.

5 група - деталі, які відносяться до 4 групи, але з відношенням $h/S_{\min} > 6 \dots 8$.

6 група – деталі без отворів, які мають по висоті декілька неоднакових перерізів і переходів.

7 група – деталі з отворами, які мають декілька зовнішніх або внутрішніх переходів у напрямку пресування, а також деталі, які обмежені непаралельними площинами або криволінійними поверхнями, що перетинають напрямок пресування.

Віднесення деталі до тієї чи іншої групи складності впливає на вибір технології її виготовлення. Чим вище група складності, тим складніше конструкція оснастки і вся технологія виготовлення. Залежно від групи складності у довідниках даються рекомендації щодо найвідповіднішої конструкції та технології виготовлення прес-форм.

Нині основний обсяг порошкових виробів становлять деталі першої – п'ятої груп складності.

3.5 Форма і розміри елементів порошкових виробів

3.5.1 Рекомендації щодо загальної конфігурації виробу.

При проектуванні виробів з порошкових матеріалів слід уникати таких конструктивних елементів, які заважатимуть заповненню прес-форми порошком або можуть бути перешкодою вільному їх виштовхуванню з прес-форми (різних виступів і заглиблень, розташованих під кутом до осі пресування, косих ребер та ін.). Приклади деяких таких конкретних рекомендацій наведені на рис. 3.2.

Слід максимально зменшити кількість змін товщини або діаметра деталі вздовж її осі, якщо вони не викликані конструктивною необхідністю (рис. 3.2, поз.1). Також треба уникати різких змін товщини деталі (рис. 3.2, поз.2). Вироби з великими та різкими переходами за товщиною стінок або з нерівномірним перерізом стінок погано піддаються пресуванню. Значна різнотовщинність стінок призводить до різкого розширення елементів пресовки при випресовуванні з прес-форми, а при спіканні у місцях різкого переходу перерізів з'являються тріщини.

Товщина стінок деталей діаметром $D = 10 \dots 15$ мм і висотою $H = 15 \dots 20$ мм повинна бути не менше $1,2 \dots 1,5$ мм. У більших деталей мінімальна товщина стінки S_{\min} зростає (орієнтовно по $0,8$ мм на кожні 25 мм довжини). При $D > H$ мінімальна товщина стінки $S_{\min} = 1,6$ мм. Товщина донної частини глухих отворів повинна бути не менше $2 \dots 3$ мм.

При товщині стінок до $2,5$ мм їх гострі кромки заокруглюють, а при більших товщинах на них виконують фаски. При сполученні поверхонь передбачають радіус заокруглення не менше $0,25$ мм для внутрішніх і не менше $2,5$ мм для зовнішніх поверхонь.

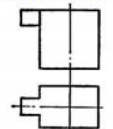
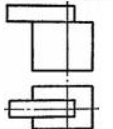
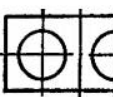
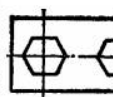
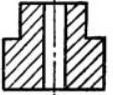
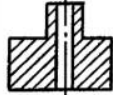


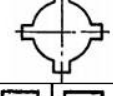
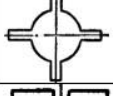
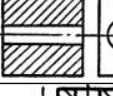
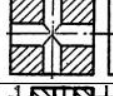
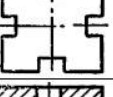
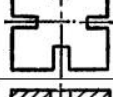
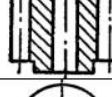
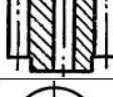
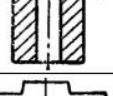
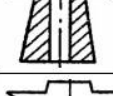






	технологічно	нетехнологічно	технологічно	нетехнологічно	
1			7		
2			8		
3			9		
4			10		
5			11		
6			12		

Рисунок 3.2. - Приклади конструкції порошкових виробів

Необхідно уникати вузьких і видовжених виступів (рис. 3.2, поз. 3) та виїмок (рис. 3.2, поз. 4), зворотньої конусності (рис. 3.2, поз. 5), гострих кутів (рис. 3.2, поз. 6).

Якщо циліндрична деталь має фланець (подібно до рис. 3.2, поз. 5), то діаметр фланця для деталей висотою $H > 20$ мм не повинен перевищувати зовнішній діаметр основної частини виробу більше, ніж у 1,5 рази. Фланець, віддалений від краю деталі на більшу відстань, виготовляється двобічним пресуванням з використанням складеного пуансона. Виступ на торці такого фланця рекомендується проектувати висотою $h \leq 1,2s$ (де s – товщина стінки на торці) з кутом $\alpha \geq 7^\circ$, а заглиблення невеликої глибини - з нахилом стінки з кутом $\alpha \geq 3^\circ$ і внутрішнім радіусом переходу не менше 0,25 мм.

Рекомендується заміняти фігурні отвори в деталях на круглі (рис. 3.2, поз. 7), що здешевлює та спрощує конструкцію прес-форми. У прямокутних отворах для полегшення руху порошку кути

виконують заокругленими. Слід уникати декількох близько розташованих отворів у середині деталі, оскільки це вимагає встановлення у прес-формі декількох близько розташованих стрижнів, а така конструкція робить прес-форму громіздкою і коштовною.

Канавка для виходу шліфувального круга має робитися не за рахунок заглиблення у тіло деталі по радіусу (радіальна канавка), а за рахунок заглиблення канавки у товщину фланця (рис. 3.2, поз. 8).

Слід уникати проектування отворів, розташованих перпендикулярно до осі пресування (рис. 3.2, поз. 9). При необхідності їх виготовляють механічним обробленням після спікання пресовок. Аналогічно виготовляють також внутрішню і зовнішню різі.

Діаметр маточин шестерень слід виконувати на 2...3 мм менше діаметра кола западин зубчастої поверхні (рис. 3.2, поз. 10).

Для зручності пресування заглиблення доцільно замінити на виступи (рис. 3.2, поз. 11). а кільцеві (опорні) виступи – на заглиблення (рис. 3.2, поз. 12).

Замість косокутної насічки на зовнішній поверхні виробу слід проектувати крупну прямокутну, яку легше виконати у прес-формі.

Де це можливо, криволінійні та непаралельні поверхні бажано замінити на плоскі та паралельні.

Ребра жорсткості повинні розташовуватися вздовж осі виробу, а перехід від ребра до стінки виробу треба виконувати з достатньо великим внутрішнім радіусом.

Виріб, що проектується, повинен мати задану пористість. Вона залежить від матеріалу порошкової шихти, питомого тиску, форми і розміру частинок, швидкості деформування та іншого. Теоретично проблема залежності пористості від питомого тиску не вирішена. Тому на практиці найчастіше бажану пористість при проектуванні та виготовленні досягають дослідним шляхом на матеріалах, передбачених для даного виробу.

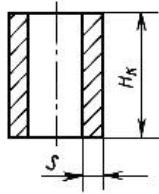
3.5.2 Рекомендації щодо окремих елементів виробу.

ГОСТ 29278-92 «Изделия порошковые. Конструктивные элементы. Общие требования» додатково дає такі рекомендації щодо окремих елементів деталей для різних за призначенням виробів при тих чи інших умовах виготовлення.

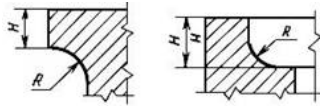
1. Стінка виробів типу порожнистого циліндра.

Однобічне пресування пористих виробів вимагає $s \geq 0,8$ мм при $H_k/s \leq 1$, а при двобічному – при $1 < H_k/s \leq 10$. При штампуванні

високощільних виробів з пористих заготовок рекомендується $s \geq 2$ мм при $1 < H_K/s \leq 2$ з деяким розширенням меж відношення H_K/s залежно від конкретної технології виготовлення.

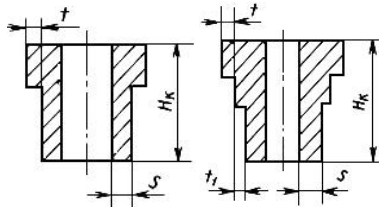


2. Радіус переходу між сполучуваними поверхнями.



Радіус переходу на зовнішній поверхні рекомендується $R \geq 0,25$ мм, а на внутрішній (у поглибленні) - $R = (0,3 \dots 0,5) H$ мм.

3. Бурт на зовнішній поверхні.



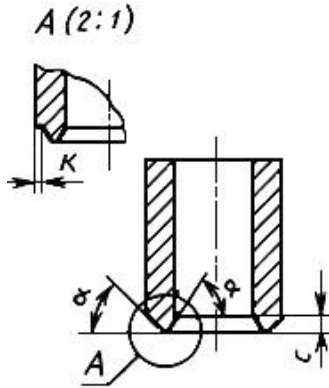
Для одиночного бурта на зовнішній поверхні при двобічному пресуванні пористих виробів рекомендується $t \geq 0,8$ мм, а при штампуванні високощільних виробів з пористих заготовок - краще $t > 3$ мм при $H_K/s \leq 2$.

Якщо заготовка має два або більше переходів по висоті на зовнішній поверхні, то при двобічному пресуванні пористих виробів рекомендується t і $t_1 \geq 0,8$ мм, а при штампуванні високощільних виробів з пористих заготовок - у більшості випадків $t > 3$ мм при $H_K/s \leq 2$, а t_1 не регламентується.

4. Фаски.

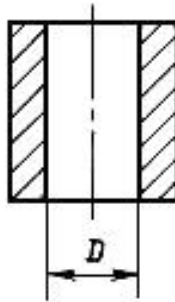
Для виробів будь-якої форми, якщо вони отримані пресуванням

з пористих матеріалів, рекомендується лише двобічна фаска $0^{\circ} < \alpha < 90^{\circ}$.



При штампуванні високощільних виробів розмір фаски має бути $0,15 \leq c \leq 0,5$ мм при двобічній фасці $0^{\circ} < \alpha < 90^{\circ}$. Зовні фаска відділяється від краю виробу циліндричною поверхнею шириною $K \leq 0,3$ мм.

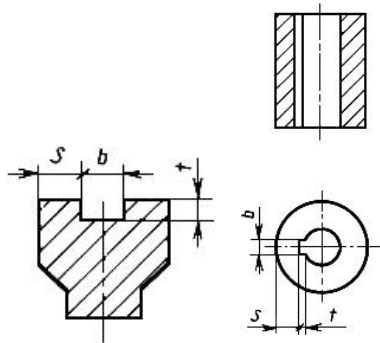
5. Отвори.



Для виробів будь-якої форми, виготовлених пресуванням, діаметр $D \geq 1$ мм, у штампованих – $D \geq 10$ мм.

6. Пази.

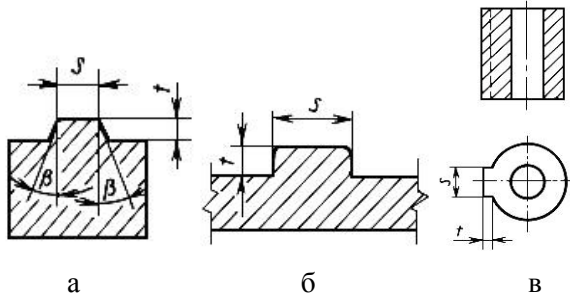
На плоскій поверхні: для пористих виробів відстань від краю s і ширина паза b мають бути не менше 2 мм, глибина t не регламентується. Для штампованих високощільних виробів з попередньо виконаним пазом s і $b \geq 2$ мм, глибина t не регламентується, а якщо без попередньо виконаного паза, то $s \geq 2$ мм, $b \geq 5$ мм, а $t \leq 3$ мм.



На внутрішніх і зовнішніх бічних поверхнях незалежно від способу виготовлення $s \geq 2$ мм, b і t не регламентуються.

7. Виступи.

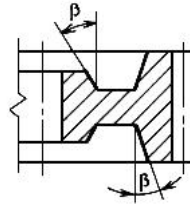
Виступи на торці виробів, виконані пресуванням цілним пуансоном або штампуванням високощільних виробів з пористих заготовок без попередньо виконаного виступу, мають конфігурацію, яка відповідає рис. а. При цьому для пресованих виробів рекомендується ширина виступу $s \geq 2$ мм і висота $t \leq 0,5$ мм і $\beta \geq 3^{\circ}$, а для штампованих виробів - $s \geq 3$ мм і $t \leq 3$ мм і $\beta > 5^{\circ}$.



Виступи на торці виробів, виконані пресуванням складеним пуансоном або штампуванням високощільних виробів з попередньо виконаним виступом, мають стінки, перпендикулярні торцю (рис. б). При цьому для пресованих виробів рекомендується ширина виступу $s \geq 2$ мм і висота $t \geq 0,5$ мм, а для штампованих - $s \geq 5$ мм і $t \geq 3$ мм (рис. а).

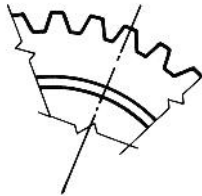
Виступи на внутрішніх та зовнішніх бічних поверхнях виробів (рис. в) рекомендуються шириною $s \geq 2$ мм, а t не регламентується.

8. Нахили.



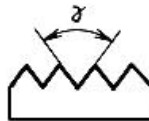
У виробів типу шестерень, шківів перехід від маточини або обода до диска рекомендується робити з нахилом $\beta \geq 5^\circ$.

9. Зуби циліндричних шестерень.



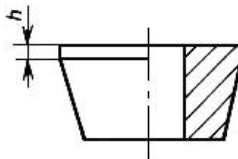
Циліндричні шестерні з модулем $m \geq 0,5$ мм виготовляють пресуванням порошкових сумішей, з модулем $0,5 \leq m < 2$ - штампуванням заготовок без попередньо виконаних зубів, а з модулем $m \geq 2$ - штампуванням заготовок з попередньо виконаними зубами.

10. Ріфлена поверхня.



Ріфлення на поверхні виробів виготовляється з кутом западини $\gamma \geq 30^\circ$.

11. Край конічних поверхонь виробів.



У виробів з конічною поверхнею гостра кромка більшого діаметра притуплюється пояском $h \geq 1$ мм.

Література за розділу 3.5:

ГОСТ 29278-92. Изделия порошковые. Конструктивные элементы. Общие требования. [Дата введения 1993-01-01] М.: ИПК изд. стандартов, 2004. 11 с.

Плескач В.М., Акімов І.В., Міт'єв О.А. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин: підручник/ за заг. ред. доц. В.М.Плескача. Запоріжжя: Просвіта, 2013. 372 с.

3.6 Міцність виробів з порошкових матеріалів

3.6.1. Оцінка міцності порошкових виробів

Коли встановлені матеріал, форма і розміри виробу, треба перевірити його на міцність.

Практика проектування та експлуатації показує, що оцінка міцності конструкції в цілому добре узгоджується із забезпеченням опору руйнуванню у небезпечних перерізах. Стосовно порошкових виробів їх міцність прийнято перевіряти на стискання та згин, оскільки міцність на розтяг, як правило, дуже мала.

Досвід проектування та експлуатації порошкових виробів свідчить про суттєвий вплив пористості на їх механічні властивості. У зв'язку з цим за навантаженістю і пористістю порошкові вироби прийнято ділити на чотири групи (табл. 3.2).

Таблиця 3.2. - Характеристика навантаженості порошкових виробів залежно від пористості

Група щільно - сті	Характеристика навантаженості	Пористість матеріалу, %	Відносні властивості пористих матеріалів (% від властивостей компактних)	
			Границя міцності	Пластичність і ударна в'язкість
1	Малонавантажені	25...16	30...45	15...30
2	Помірнонавантажені	15...10	46...65	31...45
3	Середньонавантажені	9...2	66...90	46...85
4	Важконавантажені	< 2	91...100	86...100

Практика показує, що для навантажених порошкових виробів необхідно обмежити граничну пористість 25%, оскільки при більшій пористості механічні властивості стають мінімально допустимими для конструкційних деталей.

Якщо за умов експлуатації або за технологією виготовлення виріб відноситься до групи *малонавантажених*, то міцність і жорсткість таких деталей не розраховують. Їх розміри обирають з конструктивних або технологічних міркувань. Такі деталі, як правило, все одно мають завеликий запас міцності, а отже й завищену масу. Тому при їх виготовленні використовуються стандартні дешеві порошки. Такі вироби, як правило, не піддаються термообробленню.

До *помірнонавантажених* відносять деталі, працездатність яких під час експлуатації забезпечують порошкові конструкційні матеріали з границею міцності при статичному навантаженні 46...65% відповідних характеристик компактного матеріалу аналогічного складу. Більшість помірно навантажених виробів також не піддаються розрахункам на міцність і жорсткість. Їх розміри також обирають з конструктивних або технологічних міркувань. Вироби цієї групи можуть піддаватися термічному обробленню.

До *середньонавантажених* відносяться деталі, які знаходяться під дією значних статичних або помірних динамічних навантажень. Їх міцність або жорсткість розраховують за загально прийнятими методиками. Вироби цієї групи можуть піддаватися термічному або хіміко-термічному обробленню.

На *важконавантажені* вироби діють статичні або динамічні навантаження великої інтенсивності. Необхідний рівень міцності забезпечує порошковий матеріал, відносна міцність якого після пресування близька до міцності компактного матеріалу. Їх міцність або жорсткість також розраховують за загально прийнятими методиками. З метою підвищення механічних властивостей важконавантажені вироби можуть піддаватися термічному, хіміко-термічному або термо-механічному обробленню.

Надійність виробу, як відомо, забезпечується за умови, що діючі навантаження нижче гранично допустимих, при яких спостерігаються руйнування або занадто велика необоротна деформація.

Допустимі навантаження (або напруження) встановлюються за допомогою *коефіцієнта запасу міцності*. Він визначається залежно від достовірності визначення діючих навантажень та характеру їх дії,

стабільності механічних властивостей порошкового матеріалу, ступені відповідальності деталі, розрахункового часу її експлуатації та інше.

Діючі навантаження у малонавантажених або помірно навантажених деталях невеликі, тому й деформації у них є чисто пружними. Під час експлуатації у середньо- та важконавантажених деталях можуть виникнути невеликі пластичні деформації. В умовах тривалої експлуатації або при циклічних навантаженнях накопичення невеликих залишкових деформацій може призвести до втомного руйнування.

Для розрахункової оцінки міцності деталі треба знати принаймні границю міцності її порошкового матеріалу. Краще використати стандартний порошковий матеріал з відомими фізико-механічними властивостями. Якщо використовується порошковий матеріал, якому є компактний відповідник аналогічного хімічного складу, його границя міцності може бути орієнтовно оцінена залежно від пористості виробу.

Теоретично зв'язок між міцністю і пористістю порошкового виробу не встановлений. На сьогодні існує значна кількість пропозицій встановити математичну залежність між міцністю і пористістю. Всі вони носять емпіричний характер. Одна з найвідоміших таких залежностей запропонована М.Ю.Бальшиним:

$$\sigma_{вп} = \sigma_{вк}(1 - П)^n, \quad (3.1)$$

де $\sigma_{вп}$ і $\sigma_{вк}$ – границі міцності при розтягу пористого і компактного матеріалів відповідно; $П$ – пористість виробу у частках одиниці; n – константа, яка залежить від природи порошкового матеріалу і неоднорідності розподілу напружень по перерізу зразка ($n = 3 \dots 10$).

Наявність декількох запропонованих залежностей виду $\sigma_v = f(П)$ пояснюється, з одного боку, складністю проблеми, яка вимагає урахування великої кількості різноманітних факторів (напр., форма і розміри порошинок, наявність або відсутність пластифікаторів і т.п.), а з іншої – можливою неспівставністю дослідних даних для зразків з різною пористістю, оскільки форма пор, величина зерна, вміст домішок для мало- і високопористих матеріалів можуть суттєво відрізнятися.

3.6.2. Залежність міцності порошкових виробів від технологічних властивостей порошкового матеріалу

Міцність порошкових виробів залежить від великої кількості різноманітних факторів. Серед них одними з вирішальних є технологічні властивості порошкового матеріалу.

Найважливішою технологічною характеристикою металевих порошків є їх пресованість.

Пресованість – це здатність металевих порошків утворювати під дією тиску тіло (пресовку), що має певні розміри, форму і щільність. Вона є функцією пластичності металу порошку, розміру і форми частинок. Міцність пресовок з дрібних порошків, особливо при їх сильно розвиненій поверхні, виявляється значно вищою, ніж міцність пресовок, виготовлених із крупного порошку того ж металу. Порошки, складені з різних за величиною частинок, мають велику насипну щільністю і забезпечують максимальну міцність пресовок. Оптимальне співвідношення між дрібними і великими частинками визначається розрахунковим або дослідним шляхом.

Фактично пресованість опосередковано залежить від здатності порошку до обтискання і ущільнення у процесі пресування (тобто від *ущільнюваності*), а також від здатності пресовки зберігати форму після виштовхування з прес-форми (тобто від *формованості*).

Ущільнюваність називається здатність металевих порошків зменшувати свій об'єм під дією тиску чи вібрації. На ущільнюваність суттєво впливає пластичність металу порошку і в меншому ступені - форма та розміри його частинок. Чим пластичніше метал, тим при меншому тиску починається ущільнення за рахунок деформування частинок. Частинки крихких металів при стисканні подрібнюються, і їх сумарна поверхня збільшується. Чим менше частинки і чим більше розвинена їх поверхня, тим гірше їх ущільнюваність. Добра ущільнюваність порошків полегшує пресування, оскільки при цьому потрібний менший тиск для досягнення заданої щільності, але не завжди сприяє підвищенню міцності виробу. Порошки правильної форми з гладкою поверхнею частинок мають хорошу ущільнюваність, але не забезпечують доброї формованості і достатньої міцності. Так, карбонільні порошки (незважаючи на їх високу дисперсність) мають хорошу ущільнюваність, але пресовки з них виходять маломіцними.

Формованість називається здатність виробу з металевих порошків зберігати форму, надану йому під дією тиску, у певному

інтервалі значень пористості. Формованість характеризує щільність, при якій пресовка після видалення з прес-форми не осипається і не має розшарувань. Вона залежить від форми, розміру і стану поверхні частинок порошку. Порошки з дендритною і неправильною формою мають кращу формованість. При хорошій формованості виходять міцніші заготовки, що не обсипаються. Як правило, порошки з доброю формованістю мають не дуже добру ущільнюваність і навпаки.

Для покращення пресованості порошку у деяких випадках використовують пластифікатори і мастила.

Пластифікатори, найчастіше це поверхнево активні речовини (ПАР), змінюють фізичні та механічні властивості частинок порошку: знижують міцність тонких приповерхневих шарів частинок, що полегшує їх деформування, сприяють ущільненню та запобігають сегрегації порошку перед пресуванням. Як пластифікатори використовують стеаринову кислоту та її солі (стеарати цинку, свинцю та ін.), парафін, олеїнову кислоту, полівініловий спирт, гліцерин тощо.

Мастила служать для полегшення взаємного переміщення частинок порошку одна відносно одної, а також відносно формувальної поверхні інструмента. Мастила можна вводити у склад порошку, що пресується, можна змащувати ними стінки інструмента, а можна використовувати комбінацію цих методів. Чим більше висота виробу при даному поперечному перерізі, тим більше треба вводити мастила. Як мастила застосовують технічні масла, дисульфід молібдену, графіт, камфору та інше.

Література до розділу 3.6:

Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия, 1991. 432 с.

Радомышельский И.Д., Щербань Н.И. Конструкционные порошковые материалы. К.: Техніка, 1985. 152 с.

Осокин Е. Н. О-72 Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : курс лекций / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева. – Электрон. дан. (5 Мб).– Красноярск : ИПК СФУ, 2008.

Цыркин А.Т., Михайлов А.Н., Петров М.Г., Головатинская В.В. Формирование структуры и свойств порошковых материалов. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – 162 с.

3.7. Точність виробів з порошкових матеріалів

Особливість порошкових виробів полягає у тому, що їх точність залежить від використаної технології, а вона, як правило, досить складна і коштовна. Тому на спроектовану деталь не можна призначати занадто високий клас точності, якщо партія замовлених деталей мала, і виробник збирається використовувати спрощену технологію виготовлення.

Точність холоднопресованих брикетів відповідає 12...14 квалітетам за висотними розмірами і 6...8 – за діаметральними. Схема пресування «за тиском» забезпечує вищу точність діаметральних розмірів, натомість схема пресування «з обмежувачем» – вищу точність висотних.

Спікання призводить до зниження точності на 1...2 квалітети.

Для підвищення точності пористих конструкційних виробів застосовують калібрування після спікання у калібрувальних прес-формах при наявному припуску 0,5...1,0% відповідного розміру. Пружне розширення пресовки після калібрування може досягати 0,1%. Відхилення діаметральних розмірів каліброваних виробів від відповідних розмірів матриці або стрижня калібрувальної прес-форми звичайно не перевищує 5...10 мкм.

Шорсткість поверхонь спечених холоднопресованих виробів становить $R_a = 2,50...0,08$ мкм.

Точність лінійних розмірів виробів після гарячого штампування визначається точністю прес-інструмента.

ЛІТЕРАТУРА

1. Боженко Л.І. Технологія машинобудування. Проектування і виробництва заготовок: підручник. Львів: Світ, 1996. 368 с.
2. Волчок, І.П., Плескач В.М, Шестаков І.А. Сучасні виробничі технології у машинобудуванні та металургії: навч. посібник/ за заг. ред. проф. І.П.Волчка. Запоріжжя: ЗНТУ, Дике Поле, 2006. 360 с.
3. Дрозденко О. С., Леренко О.Н. Порошкова металургія: лекція [для студентів і спеціалістів ракет.-косміч. техніки]. – Дніпро: Домінанта Прінт, 2021. – 32 с.
4. ДСТУ ISO 286-1-2002 Допуски і посадки за системою ISO. Частина 1. Основи допусків, відхилів та посадок. [Чинний від 01.10.2003]. К.: Держспоживстандарт України, 2003. 41 с.
5. ДСТУ ISO 286-2-2002 Допуски і посадки за системою ISO. Частина 2. Таблиці квалітетів стандартних допусків і граничних відхилів отворів і валів [Чинний від 2004-10-1]. Київ: РВВ ДП «УкрНДНЦ», 2004. 43 с.
6. ДСТУ ISO 1101:2009 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Геометричні допуски. Допуски форми, орієнтації, розташування та биття. – [Чинний від 01.07.2011] К.: Мінекономрозвитку України, 2013. 32 с.
7. ДСТУ ISO 4287:2012 Технологічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні, профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури. [Чинний від 01.03.2013]. К.: Мінекономрозвитку України, 2013. 19 с.
8. ДСТУ 2201-93 Полотна текстильні. Види. Дефекти. Терміни та визначення. [Чинний від 01.01.1994]. К.: Держстандарт України, 1993. 60 с.
9. ДСТУ 2136-93 Волокна та нитки текстильні. Види, дефекти. Терміни та визначення. [Чинний від 01.07.93]. К.: Держстандарт України, 1993. 62 с.
10. ДСТУ 2242-93. Склопластики. Конструкційні типи, технологія, властивості. Терміни та визначення: Стеклопластики. Конструкционные типы, технология, свойства. Типы и определения. [Чинний від 1994-01-07]. Офіц.вид. К.: Держстандарт України, 1993. 64с.

11. Інженерне матеріалознавство: підручник / О.М. Дубовий, Ю.О. Казимиренко, Н.Ю. Лебедева, С.М. Самохін. – Миколаїв: НУК, 2009. – 444 с.
12. Комар Р.В., Паньків М.Р., Сенчишин В.С. Технологія та устаткування машинобудівних виробництв. Виробництво заготовок. Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2023. 152 с.
- 13.. Копань В. Композиційні матеріали. К.: унів. вид. «Пульсари», 2004. 198 с.
14. Корнілов О. Опір матеріалів: підручник. [Текст]. – К.: Логос, 2002. - 562 с.
15. Нові матеріали та технології їх отримання: підручник / Е. С. Геворкян, Г. Д. Семченко, Л. А. Тимофеева, В. П. Нерубацький. Харків: Діса плюс, 2015. 344 с.
16. Богуслаєв В.О., Качан О.Я., Калініна Н.Є., Мозговий В.Ф., Калінін В.Т. Авіаційно-космічні матеріали та технології. Запоріжжя: вид. ВАТ «Мотор Січ», 2009. 383 с.
17. Сизоненко О. М., Івлієв А. І., Баглюк Г. А. Перспективні процеси виготовлення порошкових матеріалів: підручник : Миколаїв. НУК. 2014. – 374 с.
18. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів: підручник / за ред. Г.С.Писаренка. К.: Вища шк., 2004. 655 с.
19. Плескач В.М., Акімов І.В., Міт'яєв О.А. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин: підручник / за заг. ред. доц. В.М.Плескача. Запоріжжя: Просвіта, 2013. 372 с.
- 17 Попович В., Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: підручник.-Львів: Світ, 2006.624 с.
18. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: підручник / Є.О.Джур, Л.Д.Кучма, Т.А.Манько та ін. К.: Вища освіта, 2003. 399 с.
20. Савчук П.П., Кашицький В.П., Мельничук М.Д., Садова О.Л. Композиційні та порошкові матеріали. Луцьк: Видавець: ФОП Теліцин О.В., 2017. – 368 с.
21. Мікульонок І.О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 292 с.
22. Степанчук А. М. Теорія і технологія пресування порошкових матеріалів : навч. посібник. – К. : Центр учбової л-ри, 2020. – 335 с.

23. Солнцев Ю.П., Беліков С.Б., Волчок І.П., Шейко С.П. Спеціальні конструкційні матеріали: підручник – Запоріжжя: «ВАЛПІС-ПОЛІГРАФ», 2010. 536 с.
24. Суберляк О.В., Баштанник П.І. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. К.: 2005. 270 с.
25. Шваб'юк В.І. Опір матеріалів: підручник. К.: Знання, 2016. 407 с.
26. Якимчук Г.К., Адаменко Ю.І., Плівак О.А. Допуски і посадки: довідник. – Частина 1. – К.: Основа, 2011. – 96 с.

Додаток А
Експлуатаційні властивості матриць

Полімерні композиційні матеріали
<i>Терморективні матриці</i>
<p>Феноласти використовуються з наповнювачем до 60%; характеризуються високими тепло- (до 200°C), водо- і кислотостійкістю, а у поєднанні з наповнювачами мають високі механічну міцність, діелектричні та фрикційні властивості.</p>
<p>Аміноласти – міцні, практично негорючі матеріали, стійкі до дії води, слабких кислот і розчинів лугів, органічних розчинників, змашувальних мастил; мають високі електроізоляційні властивості</p>
<p>Епоксіласти мають високі механічні властивості та електричні характеристики у широкому температурному інтервалі (до 200°C), високі масло-, водо- і хімічну стійкість. Для отримання монолітних виробів і конструкцій дозволяють використовувати різноманітні технологічні прийоми.</p>
<p>Поліефірні смоли надають виробам високу міцність, маслобензостійкість, а також стійкість до зношування та органічних розчинників; робочий інтервал від - 60 до + 130°C.</p>
<p>Кремнійорганічні смоли надають виробам високі діелектричні властивості, хімічну інертність, високу термо- та вологостійкість</p>
<i>Термопластичні матриці</i>
<p>Поліетилен має високу міцність і хімічну стійкість стосовно органічних розчинників та агресивних середовищ; виключні діелектричні властивості. Діапазон робочих температур – від - 50 до +70°C. З часом розкладається на повітрі (термостаріння).</p>
<p>Полістирол – жорсткий, крихкий аморфний матеріал з невисокою міцністю; має відмінні діелектричні властивості, невисоку хімічну стійкість (крім розбавлених кислот, спиртів та лугів). Морозостійкість до - 40°C. Легко переробляється екструзією, литтям під тиском.</p>
<p>Поліаміди мають високу термостійкість і механічні властивості при підвищених температурах, стійкі до органічних розчинників, масел, радіації. Діапазон робочих температур від - 200 до +250°C. Прес-матеріали на основі поліамідів з додаванням дрібнодисперсних порошків (графіт, дисульфід молібдену, оксиди металів та ін.) мають низькі водопоглинання, коефіцієнт тертя.</p>

Продовження додатку А

Металеві композиційні матеріали

Алюміній при звичайній температурі на повітрі не окиснюється (завдяки плівці оксиду Al_2O_3 на поверхні). Але у сплавів, легованих Na, Si, Cu, Ca, міцність оксидної плівки падає, і її захисні властивості знижуються. Алюміній легко взаємодіє з розбавленими азотною і сульфатною (сірчаною) кислотами; розчиняється у розчинах сильних лугів (NaOH, KOH).

Магній практично не взаємодіє з холодною водою, у морській воді піддається корозії; легко розчиняється у всіх розведених мінеральних кислотах, але стійкий у гасі, бензині, мінеральних маслах, спирті, фреоні. Луги на магній не діють. При нагрівання легко загоряється.

Титан відрізняється високою корозійною стійкістю на повітрі, в морській воді; не реагує з холодними соляною і сірчаною кислотами; має високу жаростійкість. На повітрі при температурі $1200^{\circ}C$ запалюється. Титан і його сплави надійно і тривало експлуатуються в багатьох хімічних агресивних середовищах в діапазоні температур від наднизьких до $500...600^{\circ}C$ і вище.