

УДК 621.924.93.001.76

**О.М. Мана, канд. техн. наук**

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського*

*вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Україна, 39600*

*tonchik82@mail.ru*

## **ПЕРЕДУВАННЯ РОЗШАРУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ ПЛАСТИН ПРИ ПЕРФОРУВАННІ ГІДРОАБРАЗИВНИМ ПРИСТРОЄМ**

*Проаналізовано особливості виконання операції гідроабразивного прошивання отворів малого діаметра, в композиційних пластинах, виконаний пошук раціональних технічних рішень засобів для перфорування, на основі морфологічного аналізу розроблено нове технічне рішення у вигляді пристрою для механічного переривання струменя для прошивання отворів малого діаметра.*

**Ключові слова:** *гідроабразивне прошивання, композит, отвори, перфорування.*

**Вступ.** Розвиток конкурентоспроможної продукції машинобудування, авіаційної та космічної галузей нерозривно пов'язаний із розширенням впровадження особливого класу матеріалів – конструкційних композитів, що володіють підвищеними фізико-механічними характеристиками.

Стільникові одно- або двокамерні панелі з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) володіють спроможністю ефективно гасити шум, що супроводжує роботу турбоагрегатів, і нині знаходять застосування в літаках, перекачувальних агрегатах газокompресорних станцій. Завдяки цим властивостям, з вуглепластиків виготовляють звукопоглинаючі панелі для авіадвигунів.

Звукопоглинаючі панелі (ЗПП), що нині виробляються серійно, мають високу вартість, оскільки є нетехнологічними у виготовленні. Конструктивно ЗПП являють собою одно-, дво-, або тришарові оболонки у вигляді кожухів, обтікачів, діафрагм та т.п. ЗПП мають значну кількість отворів невеликого діаметра (біля 1,6...2,0 мм), які виконані із кроком 10 мм x 10 мм по всій площині оболонки і призначені для підвищення шумопоглинаючих властивостей, і отворів діаметром 6,5...10,0 мм, виконаних для кріплення ЗПП до несучої системи літака або встановлення додаткових елементів.

Отвори зазвичай виконують механічним способом – свердлуванням свердлами зі спеціально загостреними крайками. Однак механічна обробка деталей із ПКМ стикається із рядом складнощів, обумовлених вираженою анізотропією властивостей, низьким адгезійним зчепленням наповнювача зі зв'язником, низькою теплопровідністю матеріалу, інтенсивним абразивним впливом наповнювача, тощо.

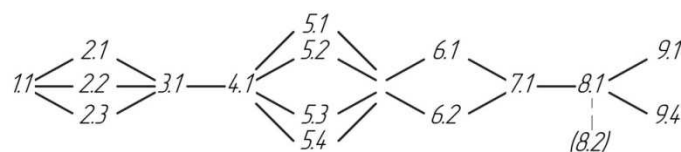
Виконання отворів гідроабразивним струменем ефективно для однорідних матеріалів, однак у випадку обробки ПКМ картини дефектів можуть бути різними: спучення, розшарування, водопоглинення, відшарування та сколювання на отриманих торцях, тощо. Задача отримання якісних отворів у стільникових панелях ускладнюється обмеженою жорсткістю заготовки, виникненням деструктованих зон з імовірністю їх злиття при виконанні масиву отворів і пошкодження заготовки.

Незважаючи на зазначені недоліки, саме гідроабразивна обробка отворів малого діаметра прошиванням є найбільш перспективним методом, оскільки володіє високою продуктивністю та відтворюваністю.

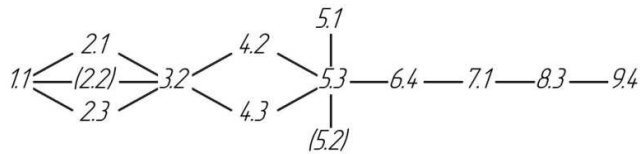
**Метою роботи** є розробка технологічних засобів, що попереджують розшарування композитних пластин при перфоруванні.

**Основний зміст роботи.** Для розробки ефективного технологічного забезпечення операції гідроабразивного прошивання отворів малого діаметра скористаємося підходами морфологічного аналізу. З цією метою подамо таблицю 1, ряд ознак  $O_i$  оснащення та зазначимо варіанти їх якісної реалізації  $W_{ij}$ , де  $i$  – номер ознаки,  $j$  – номер варіанту якісної характеристики. При цьому додатковою ознакою введемо і опис предмета обробки, яку подамо у двох варіантах: тонкі листові заготовки (1.1) та стільникові (1.2) багат шарові панелі.

З огляду на кодування ознак та позначення їх якісного виразу, традиційне технологічне оснащення, що складається із упорів (які здійснюють орієнтування та базування оброблюваної заготовки) із затискними прихватами і стандартної струменеформуєчої системи може бути представлено у вигляді  $C_j$ :



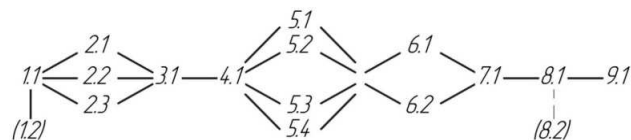
Варіантів виконання технологічного оснащення може бути кілька. Наприклад, використання кількох затискних механізмів без приводів (наприклад, із гвинтовим механізмом) веде до утворення нової структури  $C_2$ :



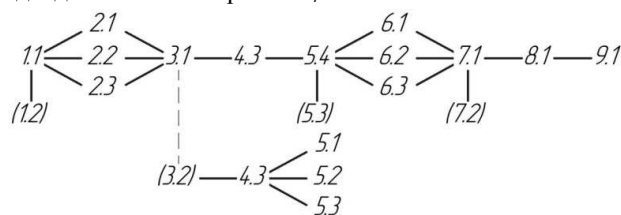
Таблиця 1 – Морфологічна матриця технологічного оснащення для гідроабразивної обробки отворів

Заготовка		Технологічне оснащення						
Тип $O_1$	Матеріал $O_2$	Місце розташування $O_3$	Тип виконання $O_4$	Функції $O_5$	Привод $O_6$	Час роботи $O_7$	Налагодження $O_8$	Керування струменем $O_9$
1.1. Листова	2.1. Склопластик	3.1. На рухомому блоці	4.1. Сполучений	5.1. Базування	6.1. Індивідуальний внутрішній	7.1. Впродовж операції	8.1. З ручним керуванням	9.1. На рухомому блоці
1.2. Стільникова	2.2. Карбон С-49	3.2. На базовому блоці	4.2. Рознесений	5.2. Орієнтування	6.2. Індивідуальний зовнішній	7.2. Впродовж циклу	8.2. Автоматичним режимом	9.2. Пристроєм
	2.3. Низькоміцний		4.3. Сукупність окремих елементів	5.3. Закріплення	6.3. Від рухомих блоків		8.3. Нема	9.3. Спільно
				5.4. Створення напруженого стану або змінних умов впливу	6.4. Нема			9.4. Нема

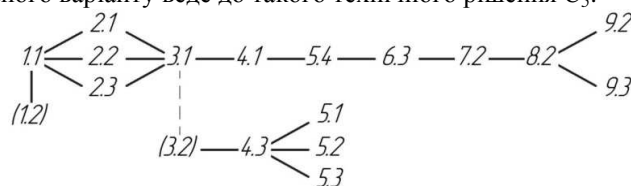
Таке технічне рішення дозволяє регулювати товщину затискуваної заготовки у значних межах, відтоді з'являється можливість обробки стільникових панелей (ознака 1.2). Додавання системи приводу (6.1 або 6.2) дозволяє обробляти стільникові панелі різної товщини та технологічного призначення; при цьому потрібний напружений стан (5.4) створюється додатковим приводом (6.1 або 6.2),  $C_3$ :



Перехід до нового місця розташування затискних пристроїв дозволяє створити дві силові ланки – позиціонування (5.1, 5.2) та затиску (5.3) і ланки зміни напруженого стану оброблюваної заготовки (зони струминного впливу (5.4)). Відтоді матимемо варіант  $C_4$ :

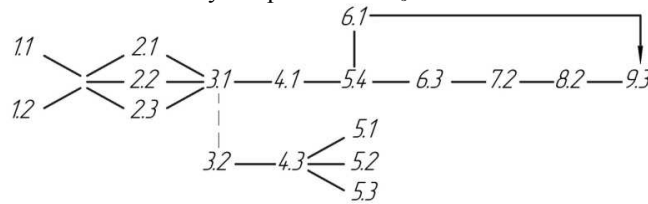


Удосконалення даного варіанту веде до такого технічного рішення  $C_5$ :



При цьому остання ознака дає змогу продублювати засіб керування струменем, створивши умови для забезпечення раціональних умов його натікання на оброблювану заготовку. Використання виключно стандартних засобів (ознака 9.1) такої можливості не надає.

Врахування можливості керування струменем та сполучення із приводом дозволяє записати ряд структур, серед яких найбільш повною та універсальною є  $C_6$ :



Визначимо окремі переваги кожного з технічних рішень та затрати на їх реалізацію. Загальна кількість парних порівнянь при  $m = 5$  варіантах становить:

$$M = \frac{m(m-1)}{2} = 10 \tag{1}$$

Тоді матимемо ранги варіантів, що відповідають таблиці 2.

Таблиця 2 – Ранги варіантів за матрицею суміжності

$j \setminus i$	$C_6$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_6$	$\sum a_i, \sum a_{ij}$	$P_i(1)$	$P_i(2)$	$P_i^{\delta}(2)$	Ранг
$C_{61}$	1	0,5	0,5	0	0	2	0,08	5	0,049	4
$C_2$	1	0	2	0	0	3	0,12	20,5	0,23	3
$C_3$	2	0	2	2	0	6	0,24	1	0,011	5
$C_4$	2	1	2	1	0	6	0,24	24,75	0,28	2
$C_6$	2	1,5	2	1,5	1	8	0,32	38,25	0,43	1
	$m^2 = 5^2 =$					25	1,00	89,5		

Отже, в результаті рангування варіантів виконання технологічного оснащення стає очевидним, що найбільш перспективним є рішення  $C_6$ . Це дає змогу визначити основні вимоги до технологічного оснащення, зокрема, струминного пристрою:

- пристрій повинен мати елементи відслідковування товщини заготовки
- забезпечувати потрібний рівень підтиснення шарів матеріалу для передупинення деструкції внаслідок прояву ефекту адгезійного руйнування матеріалу;
- забезпечувати мінімальний час перехідного процесу, тобто час зростання гідродинамічного навантаження повинен наближатися до нуля;
- забезпечувати чітку тривалість гідродинамічного впливу;
- виконувати обробку з максимальним використанням абразивних домішок, за можливістю, знизивши час та рівень гідродинамічного впливу.

Сукупність властивостей матеріального об'єкту можна подати у вигляді певного масиву елементарних складових, серед яких є корисні, суміжні, безкорисні, шкідливі та інші властивості (функції).

Позначимо матрицю функцій як:

$$W = \left\{ \begin{matrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \\ \Phi_6 \\ \Phi_7 \end{matrix} \right\}, \tag{2}$$

де  $\Phi_i$  – елемент, який забезпечує потрібні властивості пристрою:

- $\Phi_1$  – обробка отворів у пласких виробах постійної невеликої товщини із наданням контурної подачі (оброблюваний отвір перевищує діаметр калібрувальної трубки і становить понад  $2,5 D_k$ ;
- $\Phi_2$  – отримання початкового отвору в листових заготовках діаметром, що відповідає  $D_k$ ;
- $\Phi_3$  – обробка виробів, що мають певну кривизну або зміну товщини (без зупинки та переналагодження систем верстата або технологічного оснащення);

$\Phi_4$  – точність і стабільність відтворення контуру (за умови відмінності властивостей заготовок однієї партії)

$\Phi_5$  – якість різки, передування деструкції та виникненню просторових похибок;

$\Phi_6$  – продуктивність та ефективність різки шляхом підтримання оптимальних умов протікання процесу струминної ерозії у зоні натікання струменя;

$\Phi_7$  – обробка стільникових матеріалів та отримання отворів малого діаметра у одній площині стільника.

Для виконання функцій  $\Phi_1$ – $\Phi_7$  пристрій має мати визначені матеріальні носії  $M_i$  (у вигляді елементів, блоків або модулів), кожен з яких самостійно або шляхом сполучення (наприклад,  $\Phi_1 = \{(M_1 \wedge M_2) \wedge M_4\}$ ) із іншими носіями забезпечував би виконання заданої функції із мінімальними затратами (матеріальними, енергетичними та ін.).

Визначимо необхідну сукупність матеріальних носіїв заявлених функцій  $\Phi_1$ – $\Phi_6$ . З цією метою складемо таблицю 3, в якій в один із стовпчиків занесемо усі необхідні модулі (складові) технологічного обладнання без особливої конкретизації, які б забезпечували виконання певних функцій.

Таблиця 3 – Основні функції верстата та їх матеріальні носії

№ п/п	Функція верстата	Матеріальний носій	Додаткові функції	Засоби верстата
1	$\Phi_1$ – обробка отворів у плоских виробах постійної невеликої товщини із наданням контурної подачі	$M_1$ $M_2$ $M_3$ $M_4$	Обробка будь-яких контурів	Привод X Привод Y Сист. керув. Струм. головка
2	$\Phi_2$ – отримання початкового отвору в листових заготовках діаметром, що відповідає $D_k$ ;	$M_5$ калібрувальна трубка певного діаметру		
3	$\Phi_3$ – обробка виробів, що мають певну кривизну або зміну товщини (без зупинки та переналагодження систем верстата або технологічного оснащення);	$M_6$ $M_7$ – слідкуюча система	Обробка виробів змінної товщини	Привод Z
4	$\Phi_4$ – точність і стабільність відтворення контуру (за умови відмінності властивостей заготовок однієї партії)	Зворотний зв'язок по координатам $M_8$		Датчики верстата, система ЧПК
5	$\Phi_5$ – якість різки, передування деструкції та виникненню просторових похибок	$M_9$ – Система створення певних умов початкового стану (підтиснення) $M_{10}$ – привод або система передачі руху $M_{11}$ – стіл із приймальним соплом		Привод Z1, або засоби передачі руху
6	$\Phi_6$ – продуктивність та ефективність різки шляхом підтримання оптимальних умов протікання процесу струминної ерозії у зоні натікання струменя	Система моніторингу $M_{12}$ Алгоритм оптимізації $M_{13}$	Можливість отримання отворів із високою продуктивністю	Система ЧПК верстата
7	$\Phi_7$ – обробка стільникових матеріалів та отримання отворів малого діаметра у одній площині стільника	Система відсікання потоку $M_{14}$ Алгоритм керування $M_{15}$ Привод $M_{16}$	Виконання вибору пазів	Система ЧПК верстата

Таблиця 3 складена за умови, що функція забезпечується мінімальною кількістю матеріальних носіїв, причому ті, які вже входять до складу верстата у явному вигляді або до складу струминно-формуєчого пристрою, при описі подальших функцій опускаються. Цим виключається початкове перебільшення кількості дубльованих складових, необхідних для забезпечення функцій пристрою для виконання ефективного гідроабразивного прошивання отворів.

Відповідно до таблиці 3 отримано сукупність (множину) модулів, які необхідні для забезпечення множини функцій (2):

$$M_{\phi_i} \in \{M_1; M_2 \dots M_j\} \tag{3}$$

Сукупність (3) складається із ряду компонент, які можна уявити у вигляді підмодулів нижчого рівня, причому ступінь розчленування (поділу) не може обмежуватися деталями пристрою; таким під модулем може бути елемент, поверхня або сукупність поверхонь деталі.

Кожен модуль може забезпечувати функцію або самостійно, або разом із іншими модулями; один із модулів може створювати умови для функціонування іншого, певні модулі можуть дублювати функції один одного.

Таким чином, можна записати, що виконання функції наприклад  $\Phi_1$  обумовлене роботою приводів подач разом із системою керування:

$$\Phi_1 = \{(M_1 \wedge M_2 \wedge M_3) \wedge M_4\} - \text{обробка отвору із контурною подачею};$$

$$\Phi_2 = \{M_1 \wedge M_2\} + \{(M_4) \wedge M_5\} - \text{прошивання отвору заданого діаметра}.$$

Аналогічно для інших функцій:

$$\Phi_3 = \{(M_1 \wedge M_2) \wedge M_4 \wedge M_3 \wedge M_6 \wedge M_7\};$$

$$\Phi_4 = \{(M_1 \wedge M_2 \wedge M_3 \wedge M_8) \wedge M_4\};$$

$$\Phi_5 = \{(M_1 \wedge M_2) \wedge M_4 \wedge M_3 \wedge M_6 \wedge M_7\} \wedge M_9 \wedge M_{10} \wedge M_{11};$$

$$\Phi_6 = \{(M_1 \wedge M_2 \wedge M_3) \wedge M_4 \wedge M_{11} \wedge M_{12}\};$$

$$\Phi_7 = \{M_1 \wedge M_2\} + \{(M_4) \wedge M_5\} \wedge M_{14} \wedge M_{15} \wedge M_{16}.$$

Подані рівняння дають змогу побудувати граф забезпечення функцій матеріальними носіями рисунок 1.

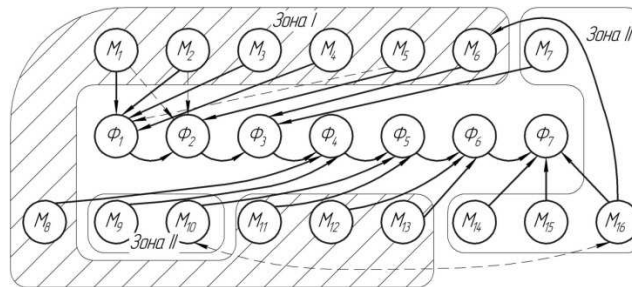


Рисунок 1 – Забезпечення функцій пристрою для гідроабразивного виконання отворів матеріальними носіями

Граф дає змогу відразу виявити певні зв'язки, які показують дублювання функцій та які можна поєднати в одну ланку. Так, зокрема, елементи  $M_{10}$  і  $M_{16}$  можуть бути об'єднані в один виконуючий пристрій, а окремі елементи, віднесені до верстат та до струминного пристрою – об'єднати конструктивно в зони № I та № II.

Виходячи з того, що сукупність властивостей  $\Phi_i$  забезпечується сукупністю матеріальних носіїв  $M_j$ , кожен з яких представлений окремим модулем (складовою), сукупність  $W$  визначиться:

$$W = \sum_j \sum_i M_j(\Phi_i). \tag{4}$$

Це дає змогу записати рівняння, що визначає склад технологічного налагодження та елементів із врахуванням забезпечення окремих функцій визначеними складовими без їхньої деталізації. Після перетворення отримано рівняння:

$$W = \sum M(\Phi_i) = [\{M_1 \wedge M_2\} + \{(M_4) \wedge M_5\} \wedge M_{14} \wedge M_{15} \wedge M_{16}] + [\{(M_1 \wedge M_2) \wedge M_4 \wedge M_3 \wedge M_6 \wedge M_7\} \wedge M_9 \wedge M_{10} \wedge M_{11}] \tag{5}$$

Конструктивне виконання даного схемного рішення при розчленуванні носіїв між існуючими засобами верстата та створюваного технологічного пристрою дозволило за рівнянням

$$W = \sum M(\Phi_i) = M_7 \wedge M_9 \wedge M_{10} \wedge M_{14} \wedge M_{15} \wedge M_{16} \tag{6}$$

запропонувати таке рішення, рисунок 2.

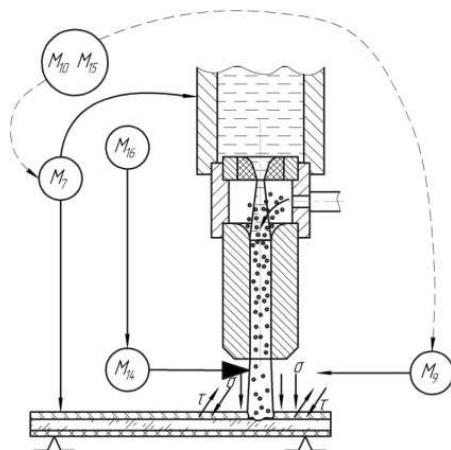


Рисунок 2 – Технологічний пристрій для виконання операцій гідроабразивного прошивання

Проаналізовано можливі конструктивні варіанти виконання системи стеження для забезпечення потрібного рівня підтиснення оброблюваної поверхні [1] та зроблено висновок про доцільність використовуваного слідкуючого приводу вертикальних переміщень.

Подальше удосконалення конструкції пристрою дозволило отримати нове технічне рішення. Пристрій складається із (рисунок 3) силового циліндра 1, на якому співвісно жорстко закріплена струминна головка 14, що являє собою клапан-відсікач 2, жорстко з'єднаний із підводною трубою високого тиску 3, змішувальної камери 4 із встановленим сопловим насадком та закріпленою калібрувальною трубою 5, яка додатково оснащена додатковою механічною ланкою 11 – поворотно-прямолінійно рухомим елементом 6, який з одного боку безпосередньо контактує із підтиску вальною пружиною 12, а з іншого – жорстко зв'язаний із п-подібною пластиною 7, встановленою так, що її отвір співпадає із отвором калібрувальної трубки і становить два її діаметра, а виконаний на калібрувальній трубці стопор 13 контактує із криволінійним пазом елемента 6 надаючи при русі вниз пластині 7 поворотно-поздовжнього руху. При цьому між зрізом калібрувальної трубки 5 та поверхнею пластини 7 змонтований із можливістю повороту переривач потоку 8 у вигляді обертового диску, рух якому надається від окремого джерела механічної енергії 9. Додатково пластина 7 контактує із слідкуючим золотником 10, сполученим із силовим циліндром 1 гідравлічним магістралями, що дозволяє забезпечити стабільне підтиснення крайки матеріалу під час обробки.

Швидкість обертового руху переривача 8 від джерела 9 синхронізована із роботою клапана-відсікача 2 так, що відкриття отвору переривача відбувається із затримкою від часу спрацювання клапану 2 на 50...100 мс, а діаметр отвору і швидкість обертового руху визначають час струминно-абразивного впливу на оброблювану поверхню.

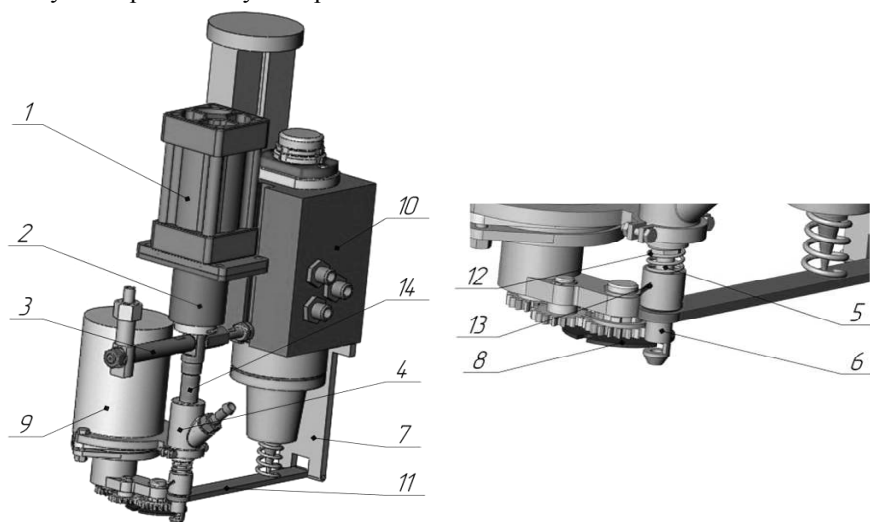


Рисунок 3 – Пристрій для виконання отворів малого діаметра гідроабразивним прошиванням

Таке технічне рішення дозволяє забезпечити чітко встановлений час впливу, що при обробці стільникових панелей знижує пошкодження на нижніх елементах стільника і дозволяє виконувати вибірккову перфорацію [5].

Оскільки при механічному перериванні потоку заслінка екранує оброблювану поверхню, здійснюючи обертовий рух, можливе викривлення потоку та отримання отвору поза очікуваними межами. З метою перевірки інтенсивності руйнування матеріалу під дією швидкоплинного потоку виконано моделювання поведінки переривача. Результати моделювання представлені на рисунку 4.

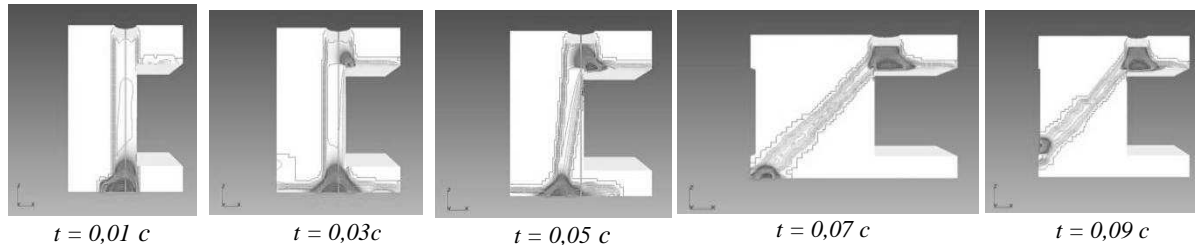


Рисунок 4 – Результати моделювання переривання струменя за допомогою механічного переривача

При моделюванні вважали, що діаметр потоку складає 1,2 мм, отвір у пластині з надміцного матеріалу має діаметр 5,0 мм, пластина рівномірно обертається зі сталюю кутовою швидкістю, час експозиції – 0,25 с, а з моменту контакту торця пластини до повного переривання потоку проходить час 0,08 с. У подальшому ці умови змінили, застосувавши мальтійський механізм переривчастого повороту, який дозволив значно зменшити час повного відкриття та перекриття струменя.

Результати моделювання показали, що подібне відсікання на деякий час (близько 0,03–0,04 с) змінює центр максимального гідроструминного впливу, тобто замість правильної циліндричної форми зі сторони натикання струї отвір буде мати деякий заборний конус.

Аналіз отриманих результатів довів, що викривлення потоку є суттєвим, і залежить від товщини заслінки переривача. Однак час викривлення становить 30–40 мс. За цей час виникає певний заборний конус, причому суттєвого погіршення круглості отвору можна уникнути, якщо використовувати пластинки, товщина яких перевищує діаметр отвору.

**Висновки.** На основі синтезу етапності взаємодії неусталеного гідроабразивного струменя з обробним матеріалом визначено орієнтований граф забезпечення показників якості, та із використанням турніру графів синтезовано нове технічне рішення для виконання операцій прошивання отворів, у полімерних пластинах. Доведено, що залучення до конструкції механічного переривача потоку дозволяє суттєво поліпшити якість обробки та передувати деструкції пластин.

#### **Бібліографічний список використаної літератури**

1. Саленко О.Ф. Дослідження перехідного процесу формування гідроабразивного струменя, використовуваного для перфорації / О.Ф. Саленко, О.М. Мана, Є.С. Коваль, Ю.О. Павлюченко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 5/2012 (76). – С. 93–98.
2. Salenko A.F. About experience of application of functionally focused technologies at processing of products from fibrous composite materials / A.F. Salenko, U.P. Gluchov, O.V. Fomovska, O.M. Mana // Unitex-11: International scientific conference. – Gabrovo, 2011. – P. 151–156.
3. Саленко А.Ф. О возможности гидроабразивной прошивки отверстий в заготовках из функциональных материалов / А.Ф. Саленко, А.Н. Мана, В.С. Петропольский и др. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збір. наук. праць. – Краматорськ, 2011. – Вип. 29. – С. 107–118.
4. Саленко О.Ф. Поліпшення стабільності процесу гідроабразивного різання конструктивними засобами / О.Ф. Саленко, В.О. Дудюк // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. праць – Севастополь: СевНТУ, 2010. – Вип. 107. – С. 197–202.
5. Пат. України на корисну модель №80609 Пристрій для виконання отворів малого діаметра в стільникових панелях із неметалевих композиційних матеріалів В24В41/00, F16C32/06 / Саленко О.Ф., Дудюк В.О., Мана О.М., Коваленко С.В.; №u201212570; опуб. 10.06.2013. Бюл. №11/2013. – 8 с.

*Надійшла до редакції 23.01.2014 р.*

**Мана А.Н. Предотвращение расслоения композитных пластин при перфорировании гидроабразивным устройством**

Проанализированы особенности выполнения операции гидроабразивного прошивания отверстий малого диаметра, в композиционных пластинах, выполнен поиск технических решений средств для перфорации, на основе морфологического анализа разработано новое техническое решение в виде устройства для механического прерывания струи для прошивания отверстий малого диаметра.

**Ключевые слова:** гидроабразивная прошивка, композит, отверстия, перфорирование.

**Mana O.M. Prevention of stratification of composite plates at perforation a hydroabrasive device**

The features of implementation of operation of the hydroabrasive sewing of openings of small diameter are analysed, in composition plates, executed search of technical decisions of facilities for a perforation, on the basis of morphological analysis a new technical decision is developed as a device for the mechanical breaking of stream for sewing of openings of small diameter.

**Keywords:** hydroabrasive sewings, compo, hole, perforation.