

ЗАПОБІГАННЯ ДЕСТРУКЦІЇ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИКОНАННІ ОПЕРАЦІЙ СТРУМИННО-АБРАЗИВНОГО ПРОШИВАННЯ МАЛИХ ОТВОРІВ

Досліджено можливості використання швидкоплинного струминно-абразивного потоку для отримання якісних отворів у стільникових панелях без значної деструкції матеріалу. Вирішено проблему адгезійного руйнування матеріалу під час струминного впливу. Спроектовано, виготовлено та випробувано конструкцію спеціального пристрою для перфорування отворів у панелях, випробування якого довело високу ефективність та продуктивність обробки.

Possibilities of the use of fleeting stream-abrasive stream are in-process investigational for the receipt of the quality opening in cellular panels without considerable destruction of material. The decided problem of adgezinogo destruction of material is during stream influence. It is projected, the construction of the special device is made and tested for the perforation of opening in panels, the test of that led to high efficiency and productivity of treatment.

Аналіз попередніх досліджень

Перфорування стільникових панелей, що складаються з трьох листів неметалевого композитного матеріалу (скло- або вуглепластика – далі ПКМ) та оребернені вертикальними ребрами тієї ж товщини, з метою поліпшення їхніх шумопоглинаючих властивостей – це одна з найбільш складних і відповідальних операцій, яка обумовлює надійність роботи виробу в подальшому, і яка є однією з найбільш трудомістких та тривалих. Отвори перфорації діаметром 1,2-2,0 мм виконують з рядковим кроком 10x10 або 15x15 мм, причому перфорованим має бути тільки один бік панелі (зазвичай зовнішній лист, інколи – зовнішній і середній).

Традиційно стільникові панелі перфорують механічним способом – свердлуванням свердлами малих діаметрів (1,15-1,95 мм), робочі крайки та смужки яких мають раціональні кути заточення [1]. Рідше використовують трубчасті порожнисті свердла з нанесеним полікристалічним алмазним шаром, які мають дещо меншу продуктивність, однак забезпечують вищу якість обробки [2]. Перспективною вважається також технологія лазерного прошивання отворів малого діаметра [3], ударно-імпульсна обробка [4] та гідроабразивна.

Шарувато-волокниста структура матеріалу призводить до того, що будь-який вплив на оброблювану заготовку спричиняє її внутрішні пошкодження, обумовлені умовами силового навантаження, тепловим та іншими ефектами, які зазвичай супроводжують різання композитів. На оброблюваній крайці утворюється деструктивний шар, а з верхнього та нижнього торців можливе часткове розшарування матеріалу на значну відстань [5].

Подібними недоліками володіють як процеси різання, так і імпульсного прошивання заготовки механічним інструментом: отримувані отвори є задовільними з геометричної точки зору, однак деструкція матеріалу сягає кількох міліметрів, що при рядковому виконання отворів на

відстані 10x10 мм веде до практично повного пошкодження верхнього шару стільникової панелі.

Аналіз сукупності робіт щодо обробки полімерних неметалевих композиційних матеріалів, зокрема [6], доводить, що гідроабразивне прошивання отворів є одним із найбільш перспективних методів перфорування стільникових панелей поряд із свердлуванням отворів спеціально заточеними свердлами із переривчастою подачею [1].

Дослідження особливостей протікання гідроабразивного різання [7] довело, що руйнування матеріалу гідроабразивним струменем протікає за двома механізмами: механічного зношення (або процесами мікрорізання окремими частинками абразиву) в результаті ударів абразивних зерен, що прямують до оброблюваної поверхні під малими кутами, та деформаційним зношенням в результаті ударів частинок, що натікають на поверхню під значно більшими кутами. Схему технологічного налагодження зображено на рисунку 1.

При цьому перший механізм різання призводить до отримання поверхні розрізу з рівномірною, а другий – з нерівномірною розподіленою глибиною. Вважається також, що відносний вклад кожного механізму в отриманні сумарної глибини залежить від швидкості подачі, причому, якщо швидкість подачі перевищує певне значення, то різання здійснюється тільки за рахунок деформаційного зношення.

Спрощена формула, яку запропонували автори [8] для визначення глибини різання h , така:

$$h = c \sqrt{\frac{m_a v}{8\sigma u_c}} + \frac{2m_a(1-c)v^2}{\pi u_c \varepsilon d_j},$$

де m_a – витрата абразиву, S – усереднена швидкість струменя, c – коефіцієнт пропорційності, Γ – межа міцності, u_c – критичне значення швидкості подачі, d_j – діаметр струменя на площині контакту.

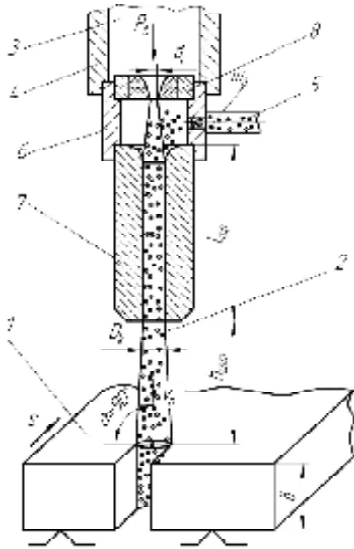


Рисунок 1 — Схема технологічного налагодження гідрорізального верстата та зони різання: 1 — оброблюваний матеріал; 2 — швидкоплинний струмінь; 3 — рідина високого тиску; 4 — канал високого тиску; 5 — абразив; 6 — змішувальна камера; 7 — калібрувальна трубка; 8 — сопло.

При цьому перший механізм різання призводить до отримання поверхні розрізу з рівномірно, а другий — з нерівномірно розподіленою глибиною. Вважається також, що відносний вклад кожного механізму в отриманні сумарної глибини залежить від швидкості подачі, причому, якщо швидкість подачі перевищує певне значення, то різання здійснюється тільки за рахунок деформаційного зношення.

Перша складова поданого рівняння визначає механічне руйнування, друга — деформаційне. Критичне значення швидкості подачі u_c , при якому максимально проявлятиметься механізм деформаційного руйнування та буде майже відсутнє механічне руйнування запропоновано визначати за формулою

$$u_c \equiv \frac{m_a v^2}{20 \sigma d_j^2}$$

При цьому вважається, що відокремлення заготовки від тіла матеріалу відбуватиметься у випадку, якщо струмінь зруйнує канавку трикутного перетину з вершиною на нижній крайці заготовки.

Взагалі, перебіг різних процесів, з яких складається різання гідроабразивним струменем, на думку автора роботи [6] залежить від параметрів струменя, а також від типу, геометрії та властивостей оброблюваного матеріалу.

Відсутність систематизованих відомостей стосовно прошивання отворів у листових заготовках із полімерних композитів та методологічного підґрунтя для вибору раціональної схеми процесу обумовило необхідність проведення ретельного аналізу взаємодії швидкоплинного

струминно-абразивного потоку із листовою заготовкою, яка покоїться на нежорсткій основі.

Мега роботи — дослідження особливостей прошивки отворів, діаметр яких співпадає із діаметром струменя, у панелях із ПКМ, та виявлення умов передування деструкції стільникових панелей із ПКМ.

Зміст роботи

На кафедрі процесів і обладнання механічної та фізико-технічної обробки Кременчуцького національного університету ім. М.Остроградського досліджено можливості використання швидкоплинного струминно-абразивного потоку для отримання якісних отворів у стільникових панелях без значної деструкції матеріалу.

Перші досліди щодо вивчення картин отворів, прошитих гідроабразивним струменем, показали, що дана технологія ефективна для однорідних матеріалів, а у випадку обробки ПКМ дефекти можуть бути різними (рисунки 2,в,г). На рисунку 2,в чітко видне спучування матеріалу (обробці піддавали матеріал СВА завтовшки 10 мм, прошивання відбулося за 0,9 с), а на рисунку 2,г — відшарування волокон на нижній крайці.

Зрозуміло, що якщо потрібно виконати обробку певного масиву елементів, які вимагають прошивання, накопичені деструкції можуть злитися й призвести до повної руйнації оброблюваної заготовки.

У подальшому зусилля були направлені на виявлення можливості стабільного одержання масиву отворів малого діаметра в заготовках з листових ПКМ (армованих вугле- або скловолокнами), у тому числі, що представляють собою трьох і п'ятишарові шаруваті конструкції, методами струминного впливу. Оскільки при гідроабразивному різанні профіль калібрувальної трубки може бути виконаний у відповідності із профілем одержуваного отвору, а сам метод має найбільшу продуктивність у порівнянні з іншими фізико-технічними й механічними методами, перспективність гідроабразивного прошивання для виконання перфорації ПКМ, особливо для випадку, коли діаметр отвору не перевищує 2,0 мм, а допуск на виконуваний розмір грубіше 12 квалітету, не викликає сумнівів.

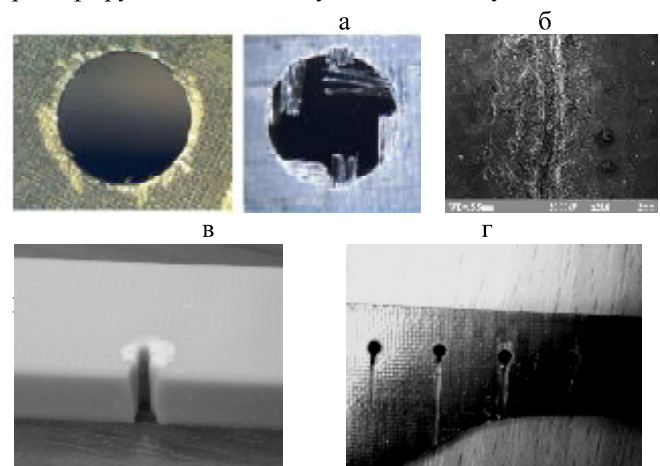


Рисунок 2 — Приклади деструкції оброблюваних матеріалів: а) при механічній обробці (свердлування, Delkam inc.); б) лазерне різання; в, г) при гідроабразивному прошиванні

Додатково завдання ускладнили тим, що одержувати отвори потрібно було тільки в окремих листах шаруватих конструкцій, наприклад, у двох верхніх або одній нижній; інші елементи стільникової панелі повинні залишатися неушкодженими.

Для експериментальних досліджень було відібрано елементи виробів у вигляді фрагментів панелей (заготовок) розмірами від 100x100 до 250x250 мм з вугле- і склопластиків. Заготовки були у вигляді як окремого листа, так і шаруватої конструкції завтовшки до 25 мм. При цьому товщина листів панелі становила 2,5–3,5 мм.

Для досліджень використовували вітчизняний лазерно-струминний комплекс ЛСК-400-5 виробництва НПФ «РОДЕНЬ» (м. Черкаси). Особливістю цього комплексу [7] є те, що він дозволяє виконувати операції розкрою струменем високого тиску, гідроабразивним струменем, лазерним променем потужністю до 500 Вт, а також комбінацією струменя й променя лазера.

Попередньо було виконано нескладні прорізання елементів і отримані прості геометричні фігури, які довели гарну оброблюваність матеріалів і можливість забезпечення перемичок між двома отворами розміром в 0,1 мм.

Мікроскопічне дослідження отриманих крайок показало, що найкраща якість обробки була досягнута на пластинках з вуглепластику: деструктивний шар (тобто шар, у якому відбулися зміни структури або адгезії) на них практично був відсутній. Також він практично був відсутній і на пластинках зі склопластику, за винятком пластинки, що відробила свій експлуатаційний термін. Порівняння усередненої по 10 вимірах величини порушення цілісності матеріалу, що представляє собою деструктивний шар, показав практично повний збіг з його величиною, що становить 0,1–0,15 мм і теоретично визначений за формулою

$$h_d = \frac{D_0 - D_a}{2} + \frac{a_0}{n/2 - 1} \sqrt{1 - \frac{2.182 C_p C \sqrt{D_0^2/2 - D_a^2/2}}{s_r K \left(\frac{p}{p_b}\right)^{0.5}}} - x_c \quad (1)$$

де x_c — товщина шару наповнювача; N — кількість циклів навантаження, обумовлена масовою витратою абразивних зерен через перетин трубки, що калібрує; a_0 — початкова довжина мікрodefекту; a_c — розмір тріщини (критичний до моменту втрати адгезійного зчеплення); ρ — густина матеріалу; n, c — константи; σ — мікронапруження у вершині тріщини, обумовлені гідродинамічним тиском; D_a — діаметр активної частини струменя; D_0 — діаметр зрізу сопла.

Наступні спроби одержати якісні отвори бажаного результату не дали (рисунок 3): варіювання тиском робочої рідини в межах 250–350 МПа, часом впливу (від 0,25 до 1,5 с), витратою абразиву дозволило одержати ряд отворів з істотними дефектами — відколами, спучуванням, деструкцією. Якщо дефекти на нижній стороні панелі були зв'язані переважно з тим, що струмінь натікав на ребро опорної сітки (рисунок 3,а), і для виключення цього дефекту досить було забезпечити вільне стікання відпрацьованої рідини, то розшарування за перетином — дефект,

пов'язаний з гідродинамічними явищами в місцях неоднорідного просочення полімерних сполучних джгутів армувальних волокон.

Проведеними раніше дослідженнями було встановлено, що процес початкового заглиблення (прошивки) струминно-абразивного потоку в матеріал та процес різання із поздовжньою подачею значно відрізняється: у першому випадку відсутність вільного стікання струменя веде до утворення гідродинамічного демпфуючого шару та зворотних течій уздовж каналу заглиблення, а хвильові процеси, що діють впоперек струменя, створюють орієнтоване по нормалі навантаження поверхні каналу. В умовах, коли адгезійна міцність шарів є меншою за когезійну міцність, замість формування початкової вирви виникає розшарування на значну відстань, що призводить до псування оброблюваної заготовки.

У момент натікання на перепону (заготовку) навантаження на оброблюваній поверхні визначається залежністю

$$F_g = \rho A_1 V_1^2 - C_f \rho z V_1^2 \sqrt{A_c} \quad (2)$$

де ρ — густина; A_1 — обсяг рідини між зрізом сопла та оброблюваною поверхнею; V_1 — початкова швидкість струменя; z — глибина утвореного уступу; A_c — площа вирізу; C_f — коефіцієнт сумарного опору тертя на поверхні.

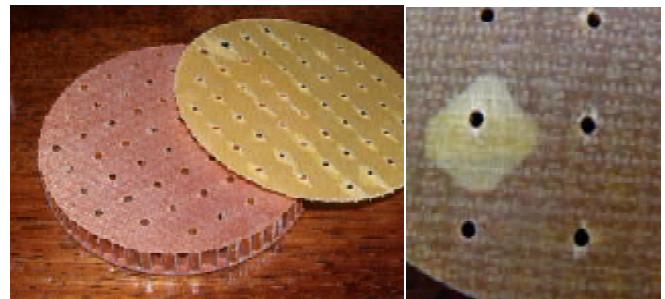


Рисунок 3 — Дефекти отриманих гідроабразивним прошиванням отвори. Спостерігаються сколювання по поверхні (а) та спучення (б).

Одразу після удару протягом часу

$$t_d = \frac{2r_c K v_c}{C^2},$$

де S_c — швидкість струменя, виникне розтічна хвиля і бокові поверхні отримають навантаження

$$p = 0.5 \rho u_r^2 + \rho Q u_i \quad (3)$$

де u_r — швидкість витікання рідини з сопла діаметром

$$d = 2r_c, \quad u_i = \sqrt{\frac{2p_c}{K_c \rho}} - \text{швидкість поперечного розтікання,}$$

K — поправковий коефіцієнт, що визначається формою струменя, $K=1-4$, C — швидкість поширення ударної хвилі в рідині, K_c — коефіцієнт стиснення; ρ — густина рідини, Q — витрата. У цьому випадку адгезійна міцність, обумовлена зчепленням волокон з полімером, буде знач-

но нижчою, а виникаючі при навантаженні напруження – вищими. Таким чином, імовірність розшарування стає очевидною, оскільки навіть зовсім малий дефект спроможний сприймати гідродинамічне навантаження із зростанням площ контакту, і, відповідно, деформуючих навантажень на окремий шар.

Зниження гідродинамічного навантаження бічних стінок можна досягти зменшенням швидкості потоку, що для гідроабразивного потоку пов'язано з насиченням потоку абразивними частками, оскільки в цьому випадку швидкість руху потоку становитиме

$$v = \frac{2p_b f_b}{f_b \sqrt{2p_b / \rho + M_a}}$$

де M_a – масова витрата абразивних зерен, p_b – тиск у предсопловій камері, f_b – площа натікання струменя на оброблювану поверхню. При цьому більше насичення обумовлюватиме виконання більшої роботи руйнування.

Зміна напруженого стану заготовки в місці впливу суттєво змінює умови поширення деструкції. Оскільки час прошивання становить частки секунди, на якість обробки впливають й перехідні процеси в засопловому просторі, тобто у змішувальній камері та калібрувальній трубі.

Через те, що більшість існуючих систем подачі абразиву працюють за принципом ежекції абразиву з бункера, то, розглядаючи рух абразиву в трубі подачі під дією потоку повітря, що виникає внаслідок падіння тиску в змішувальній камері, імпульс зовнішніх сил визначиться як

$$[F \cdot (p - \Delta p) - F_p] \cdot \Delta t = \Delta p \cdot F \cdot \Delta t, \text{ де } F - \text{ площа поперечного перетину трубки подачі абразиву, а зміна кількості руху маси двофазного потоку на деякій ділянці } \Delta l \text{ визначитиметься співвідношенням}$$

$$\Delta P = [\varepsilon \cdot \rho_T + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_B] \cdot [F \cdot v_{cm} \cdot u_{yd} \cdot \Delta t + F \cdot v_{cm}^2 \cdot \Delta t] \quad (4)$$

де ρ_T, ρ_B – густина твердих (абразивних) частинок та повітря відповідно; μ – об'ємна маса твердих частинок в аеросуміші; $(1 - \mu)$ – об'ємна частина повітря в суміші;

$\varepsilon \cdot \rho_T + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_B = \rho$ – густина двофазного потоку; S_{cm} – швидкість струменя; u_{yd} – швидкість поширення удару в двофазному потоці.

Якщо враховувати, що в момент відкриття клапана-відсікача подачі рідини високого тиску наростання швидкості витікання рідини відбувається не миттєво, а протягом деякого часу, стає очевидним, що й зміна кількості руху двофазного потоку наростатиме ще повільніше (рисунк 4).

Тоді можна припустити, що процес різання відбувається у декілька етапів, відмінних від описаних дослідниками раніше: у початковий момент часу оброблюваний матеріал випробує максимальне гідродинамічне навантаження, і після досягнення критичних напружень формується початкова лунка; надалі починають активізуватися явища розшарування, обумовлені хвилею, що розтікається згідно (3); далі кількості абразивних часток стає досить для виконання деформаційного або зношувального руйнування, і відбувається подальше формування лунки з утворенням каналу відтоку відпрацьованої рідини.

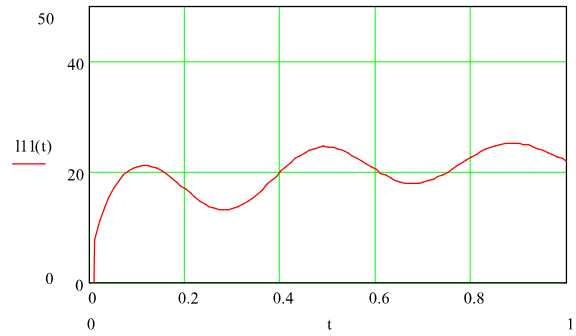


Рисунок 4 – Перехідний процес наповнення струменя частками абразиву в момент відкриття клапана-відсікача (по осі ординат – масова витрата абразиву, г/с; час – 1 с).

Таким чином, поліпшення якості одержуваних отворів можливе:

- 1) за рахунок зміни умов формування гідроабразивного потоку, тобто забезпечення наповнення потоку абразивом у початковий момент часу, до моменту натікання на перешкоду (це досить важко для систем, що працюють на основі ежекції абразивних часток потоком рідини в змішувальній камері);
- 2) за рахунок створення такого напруженого стану заготовки в місці впливу, при яким виникаючі напруги не перевищуватимуть меж міцності, у першу чергу, адгезійної;
- 3) за рахунок забезпечення оптимальних умов спливання відпрацьованого потоку рідини.

Саме в початковий момент часу активізується руйнування матеріалу, що перешкоджає поширенню деструкції на значну відстань від центру додатка навантаження, а забезпечення каналу відводу відпрацьованого потоку перешкоджатиме утворенню закритих порожнин, що сприймають гідродинамічне навантаження, і знижують інтенсивність абразивного зношування там, де це необхідно – у центрі струминного впливу.

Слід відзначити, що при прошиванні канал формується, як правило, у вигляді зворотного, співосного струменю конуса, і його чітко видно на електронних мікрофотографіях оброблених зразків (рисунк 5).

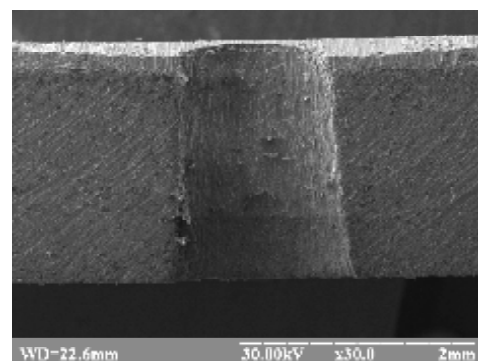
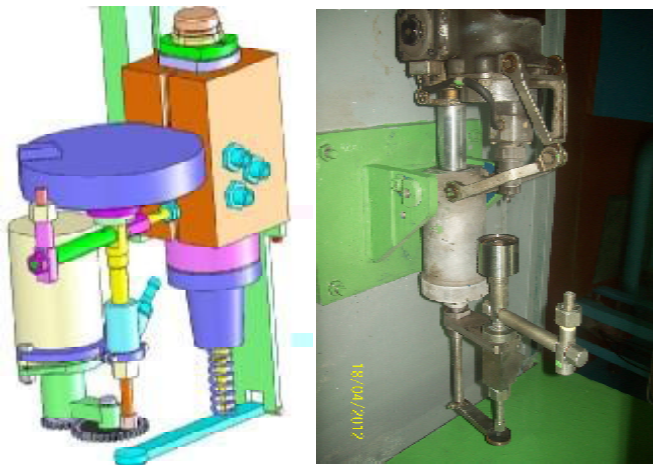


Рисунок 5 – Формування каналу виходу зворотного потоку рідини.



а)

б)

Рисунок 6 – Пристрій для виконання перфорувань із механічним відсікачем (а) та його загальний вигляд (б)

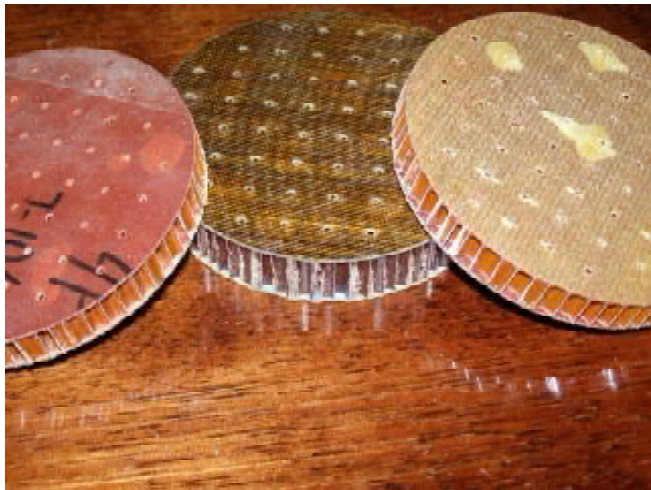


Рисунок 7 – Отвори, отримані за допомогою пропонованого пристрою.

Очевидним вирішенням проблеми адгезійного руйнування матеріалу протягом струминного впливу є створення такого напруженого стану зони прошивки, при якому гідродинамічне навантаження не викликає активного розростання мікрodefektів уздовж армувальних волокон. З цією метою було спроектовано, виготовлено та випробувано конструкцію спеціального пристрою для перфорування отворів у панелях, показаного на рисунку 6.

Виконавши моделювання явищ у потоці, насиченому абразивними частинками (у середовищі FlowVision), отримали епюри розподілу тиску на поверхні у кожний конкретний момент часу. За результатами дослідження було визначено, що підтиснення оброблюваної заготовки із

силою 15-17 Н при дії гідроструминного навантаження не триваліше 0,4 с дозволяє отримувати наскрізне просічення без суттєвої деструкції (рисунку 7).

Застосування пристрою для механічного відсікання струменя дозволило суттєво підвищити якість одержання отворів, що підтверджується як візуальним, так і інструментальним (мікроелектронним) контролем оброблюваних заготовок. Практично на всіх отриманих отворах не виявлено істотних дефектів обробки, при цьому діаметр отворів був майже тотожним, з допуском по 11 квалітету точності. Перевищення зазначеного допуску відбулося після тривалої роботи пристрою, і є наслідком явищ зношування проточної частини, що калібрує трубки.

Висновки

Проведений комплекс теоретико-експериментальних досліджень дозволив виявити умови передування деструкції стільникових панелей із ПК і встановити, що поліпшення якості одержуваних отворів можливо при забезпеченні наступних вимог:

- відповідного формування гідроабразивного потоку з метою забезпечення наповнення потоку абразивом у початковий момент часу, до моменту натікання на перешкоду, що досить важко для систем, що працюють на основі ежекції абразивних часток потоком рідини в змішувальній камері;

- за рахунок створення такого напруженого стану заготовки в місці впливу, при яким виникаючі напруги не перевищуватимуть меж міцності, у першу чергу, адгезійної;

- за рахунок забезпечення оптимальних умов стікання відпрацьованого потоку рідини.

Застосування функціонально орієнтованих технологій з аналізом матеріальних носіїв засобів забезпечення функцій елемента або виробу в цілому, дозволило запропонувати нове технічне рішення інструменту для виконання перфорації у стільникових панелях, випробування якого довело високу ефективність та продуктивність обробки.

Література

1. Konig, W. Machine of fibre Reinforced Plastics / W. Konig, Ch. Wulf // Annals of CIRP. — 1985. — vol.34/2. — PP. 537—548.
2. Степанов, А.А. Обработка резанием высокопрочных композитных полимерных материалов / А.А. Степанов. — Л.: Машиностроение, 1987. — 176 с.
3. Везуб, Н.В. Механическая обработка волокнистых полимерных композитов / Н.В. Везуб, А.П. Тарасюк, Г.Л. Хавин, А.А. Гетманов. — Харьков, ХНАДУ (ХАДИ). — 2001. — 180 с.
4. Саленко, А.Ф. Качество обработки материалов гидроабразивной струей / А.Ф. Саленко, А.В. Фомовская // Международный информационно-технический журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов». — Харьков, 2009. — №1 (109)/2009. — С. 45—52.

5. Salenko, A. The energetic approach for analysis of form-building at hidro abrasive engraving / A. Salenko, O. Fomovska, V. Dudyuk, O. Mana // Известия на технически университет. — Габрово, 2009. — т. 37. — 2009. — С. 56—69.
6. Саленко, О.Ф. Визначення поверхневого деструктивного шару при обробці конструкційних неметалевих композитів і його впливу на механічні властивості виробів / О.Ф. Саленко, В.В. Драгобецький, О.В. Фомовська, В.О. Дудюк, О.М. Мана // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. — Вип. 1/2010(60) частина 1. — С. 82—90.
7. Саленко, А.Ф. Надежность процесса струйного резания (начало) / А.Ф. Саленко, В.А. Дудюк // Металлообработка. Международный информационно-технический журнал. Оборудование и инструмент для профессионалов. — Харьков, 2010. — №5/2010. — С. 22—26.
8. Саленко, А.Ф. Надежность процесса струйного резания (продолжение) / А.Ф. Саленко, В.А. Дудюк // Металлообработка. Международный информационно-технический журнал. Оборудование и инструмент для профессионалов. — Харьков, 2010. — №6/2010. — С. 22—23.
9. Саленко, О.Ф. Поліпшення стабільності процесу гідорізання конструктивними засобами / О.Ф. Саленко, В.О. Дудюк // Вісник СевНТУ: Машинобудування та транспорт: зб. наук. пр. — Вип. 107. — С. 197—202.

Надійшла 2.04.2012 року