

ВИЯВЛЕННЯ ЕТАПНОСТІ РУЙНУВАННЯ НЕМЕТАЛЕВОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**Мана О. М.**

Доведено твердження про виражену етапність процесу гідроабразивного прошивання отворів, що дозволило установити, що у початковий момент часу виникаючих напружень недостатньо для активного руйнування заготовки у центрі гідровпливу. Також приведені результати моделювання напруженого стану заготовки та виконане їх порівняння із даними експерименту, запропоновані шляхи усунення негативних наслідків гідродинамічного впливу струменя до моменту початку активного руйнування. Запропоновано створювати підтиснення кільцевим індентором, що дозволяє частково перерозподілити навантаження у шарах оброблюваної заготовки, забезпечивши тим самим поширення меж виникнення можливої деструкції на відстань до 0,2–0,25 мм від периферії впливу.

Доказано утверждение о выраженной этапности процесса гидроабразивной прошивки отверстий, что позволило установить, что в начальный момент времени возникающих напряжений недостаточно для активного разрушения заготовки в центре гидровлияния. Также приведены результаты моделирования напряженного состояния заготовки и выполнено их сравнение с данными эксперимента, предложены пути устранения негативных последствий гидродинамического воздействия струи до момента начала активного разрушения. Предложено создавать поджим кольцевым индентором, что позволяет частично перераспределить нагрузки в слоях обрабатываемой заготовки, обеспечив тем самым распространение границ возникновения возможной деструкции на расстояние до 0,2–0,25 мм от периферии влияния.

The assertion on the expression of the process of phasing water jet firmware holes that revealed that at the initial time of the stresses is insufficient for the active destruction of the work piece in the center hydroplane. Also shows the results of modeling the stress state of the work piece and performed their comparison with experimental data, suggest ways to combat the negative impact of the hydrodynamic effects of the jet before the start of the active destruction. Proposed create pressing ring indenter, which allows partially redistribute the load in the layers of the work piece, thus ensuring the spread of the possible occurrence of the boundaries of destruction at a distance of 0.2–0.25 mm from the periphery of influence.

Мана О. М.

канд. техн. наук КрНУ,
monchik82@mail.ruКрНУ – Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського
м. Кременчук.

УДК 621.924.93.001.76

Мана О. М.

ВИЯВЛЕННЯ ЕТАПНОСТІ РУЙНУВАННЯ НЕМЕТАЛЕВОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Полімерні композиційні матеріали (ПКМ), володіючи заданими властивостями, знаходять все більше застосування в авіаційній промисловості. Очевидність їх переваг зумовлює постійне збільшення елементів літальних апаратів, виготовлених із ПКМ. Однак поряд із тим, виготовлення кінцевих виробів традиційними методами механічної та фізико-технічної обробки стикається із рядом складнощів, обумовлених структурою матеріалу та анізотропією властивостей. Так, будь-який метод обробки ПКМ викликає появу на утворених на крайках деструктованого шару [5], фізико-механічні властивості якого суттєво відрізняються від властивостей матеріалу в момент виготовлення.

Конструкції з ПКМ володіють спроможністю ефективно гасити шумовий фон, що супроводжує роботу турбоагрегатів, які нині знаходять застосування в сучасних літаках, в перекачувальних агрегатах газокompресорних станцій [4]. Шумопоглинання значно підвищується у випадку, коли із ПКМ виготовляють стільникові ненаповнені дво- або п'ятикамерні панелі. Завдяки цим властивостям, зазвичай з ПКМ (вуглепластиків марок КМУ-4э, КМУ-11э або склопластиків марок СВМ), виготовляють звукопоглинаючі панелі для авіадвигунів (ЗПК).

ЗПК, що нині виробляються серійно, мають високу вартість, оскільки є нетехнологічними у виготовленні. Конструктивно ЗПК являють собою одношарові, тришарові або п'ятишарові оболонки складної конфігурації, і виконуються у вигляді кожухів, обтікачів, діафрагм та ін. ЗПК мають значну кількість отворів невеликого діаметра (біля 1,6–2,0 мм), які виконані із кроком 10 мм×10 мм по всій площині оболонки і призначені для підвищення шумопоглинаючих властивостей, і діаметром 6,5–10,0 мм, виконаних із забезпеченням високої точності до взаємного розташування і з витримкою квалітетних розмірів від комплекту технологічних баз. Останні призначені для кріплення цих елементів до несучої системи літака або встановлення додаткових деталей та пристроїв.

Прошивка отворів гідроабразивним струменем ефективна для однорідних матеріалів [3], однак у випадку обробки ПКМ картини дефектів можуть бути різними: спучення, розшарування, водопоглинення, відшарування та сколювання на отриманих торцях, тощо. Задача отримання якісного отвору в стільникових панелях ще більш ускладнюється: кінцева жорсткість заготовки, що вільно розташовується на робочому столі, значний час релаксації матеріалу веде до значного зростання розмірів деструктованої зони, що при необхідності виконання масиву отворів може призвести до повного пошкодження оброблюваної заготовки. Окрім того, шари у такій заготовці розташовані на відстані один від одного, порівняно із розмірами поперечного перетину струменя у відповідних його перерізах, внаслідок чого отримані отвори мають значне розсіювання діаметральних розмірів.

Незважаючи на зазначені недоліки, саме гідроабразивне прошивання отворів малого діаметра є найбільш перспективним методом перфорування стільникових панелей, оскільки цей метод володіє високою продуктивністю та відтворюваністю.

Метою роботи є встановлення етапності руйнування неоднорідного матеріалу та пошук засобів локалізації деструкції в межах впливу.

Для визначення зон поширення деформацій в шарах композиційного матеріалу при моделюванні поведінки три- та п'ятишарової пластин досліджували композиційні заготовки розміром 100 мм×100 мм, товщина шару листа – 2,5 мм. При цьому вважали, що заготовки мають повне просочення перед формуванням, тобто порожнини між шарами відсутні. Міцність та пружні характеристики шарів наповнювача (скляних та вуглецевих волокон), матриці відрізняється; між шарами існує адгезійне зчеплення з певною межею приведеною в табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-технічні характеристики оброблюваного матеріалу

	Е, Па	Коеф. Пуас.	Мод. зсуву, Па	$[\sigma]$, Па	σ_m
Верхній шар	$2,42 \cdot 10^{10}$	0,38	$8,6 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^8$	$0,98 \cdot 10^8$
Армувальні волокна					
Нижній шар	$2,6 \cdot 10^{10}$	0,34	$9,7 \cdot 10^9$	$1,42 \cdot 10^8$	$1,08 \cdot 10^8$
Границя	Адгезійне зчеплення, Па $5 \cdot 10^7$				

Навантаження задавали у вигляді впливу жорстким індентором при відсутності робочої подачі. В початковий момент часу на перпендикулярно встановлену заготовку діє зростаюче від нуля короткотермінове навантаження, що дорівнює величині гідроудару:

$$R = \left[p_1 + \frac{\rho(v_0 \pm \varpi)^2}{2} \right] f_0 \sin \alpha = \rho Q_0 v_0 \sin \alpha, \quad (1)$$

де p_1 – тиск витікання рідини; ρ – густина рідини; v_0 – швидкість витікання рідини з сопла; Q_0 – витрата рідини; α – кут встановлення заготовки відносно осі струменя, $\alpha = \pi/2$.

Уявлення струменя у вигляді коаксально розташованого компактного ядра з досить розвинутою зовнішньою оболонкою (периферійною частиною струменя), в якій швидкість руху v_n елементарного обсягу рідини dw значно менша за швидкість v_c в ядрі, а, відтоді, під дією якого менше гідродинамічне навантаження поверхні становить:

$$p_i = 0,5 \rho v_i^2 + \rho v_i^2 dQ, \quad (2)$$

що дозволяє виконати моделювання взаємодії як занурення жорсткого циліндричного стрижня в оброблювану заготовку до моменту лавиноподібного зростання високоеластичних незворотніх деформацій.

Наповнення струменя різальними частинками відбувається з чітко вираженим коливальним характером (рис. 1, 2), коливальний процес спостерігається від моменту відкриття голкового дроселя та початку наповнення до соплової камери, а початок наповнення відбувається із затримкою 10–15 мс, та досягає свого максимуму після 100–200 мс.

Час наповнення струменя різальними частинками суттєво впливає на інтенсивність та тривалість навантаження оброблюваного матеріалу – композитної заготовки чи стільникової панелі. Тривалість досягнення максимуму навантаження визначали, виходячи із припущення, що вплив сягає максимального значення в момент виникнення поперечно розтікаючої хвилі у струмені, тобто протягом часу

$$t_m = \frac{2rK_c v}{C^2}, \quad (3)$$

де C – швидкість звуку в рідині; v – швидкість витікання струменя; K_c – поправковий коефіцієнт, що потребує визначення; $2r = d_c$.

Після виконання відповідних підстановок і перетворень був отриманий розподіл напружень в області гідродинамічного впливу на заготовку та побудована крива його зростання з плином часу. Перехідний процес, що виник під час формування гідроабразивного струменя після відкриття клапану, обумовив зміну навантаження оброблюваної пластинки і дозволив відобразити зростання напружень на нижній та верхній поверхнях листа (рис. 3), з якого видно, що напруження на верхньому шарі зростають більш стрімко у порівнянні з нижнім, на якому зростання відбувається із затримкою біля 0,05–0,1 с.

Отже, за результатами моделювання стає очевидним, що навантаження шарів відбувається із зсувом фаз часу біля 30–50 мс, що веде до виникнення дотичних напружень і до прояву явищ адгезійного розшарування, тобто деструкції матеріалу на ділянках, близько розташованих із зоною струминного впливу.

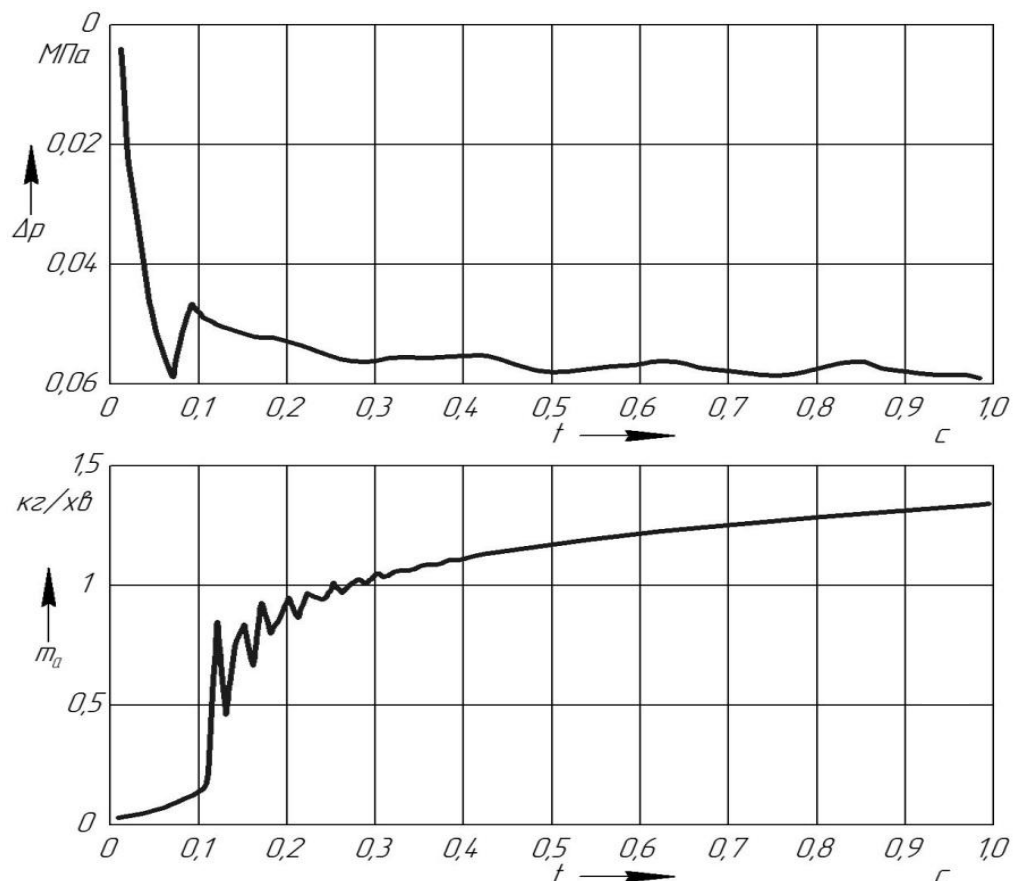


Рис. 1. Перехідний процес наповнення струменя частинками абразиву в момент відкриття клапану-відсікача (по вісі абсцис – час 1 с, по вісі ординат – розрідження у камері змішування): а – абсолютний тиск у Па $\times 10^5$; б – витрата абразиву у кг/хв

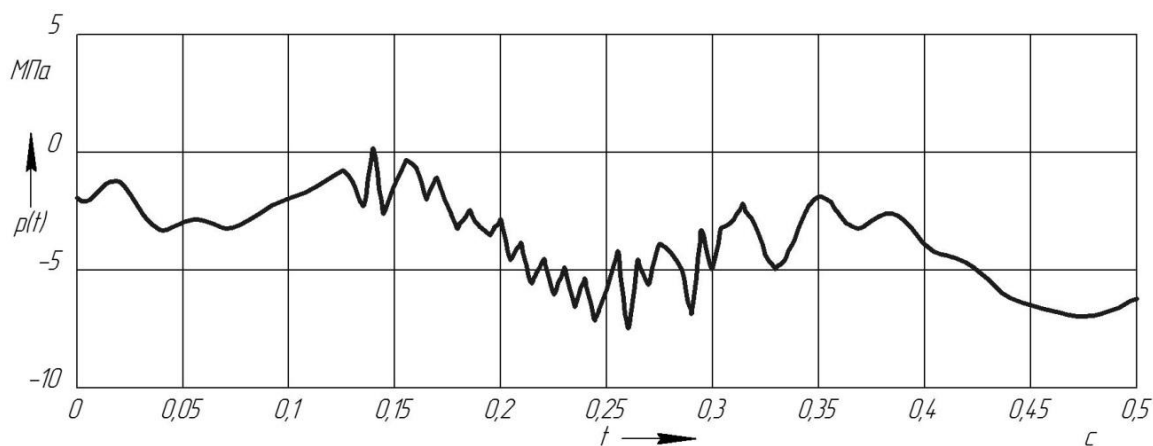


Рис. 2. Коливальні явища у каналі перед дроселем

Відкриття дроселя здійснюється у початковий момент часу, рівень тиску – в МПа

Зона поширення деформації значно перевищує зону струминного навантаження (рис. 3, б, в), що дає змогу припустити виникнення пошкоджень та мікродфектів заготовки за межами впливу до моменту перевищення розтяжних напружень на поверхні впливу і виникнення зон початкового руйнування.

Крутизна зростання навантаження порівняна із часом релаксації матеріалу матриці, тобто спрацювання клапану-відсікача в початковий момент часу не дозволяє вважати навантаження оброблюваної заготовки динамічним ударом твердого (квасіттвердого) індентора.

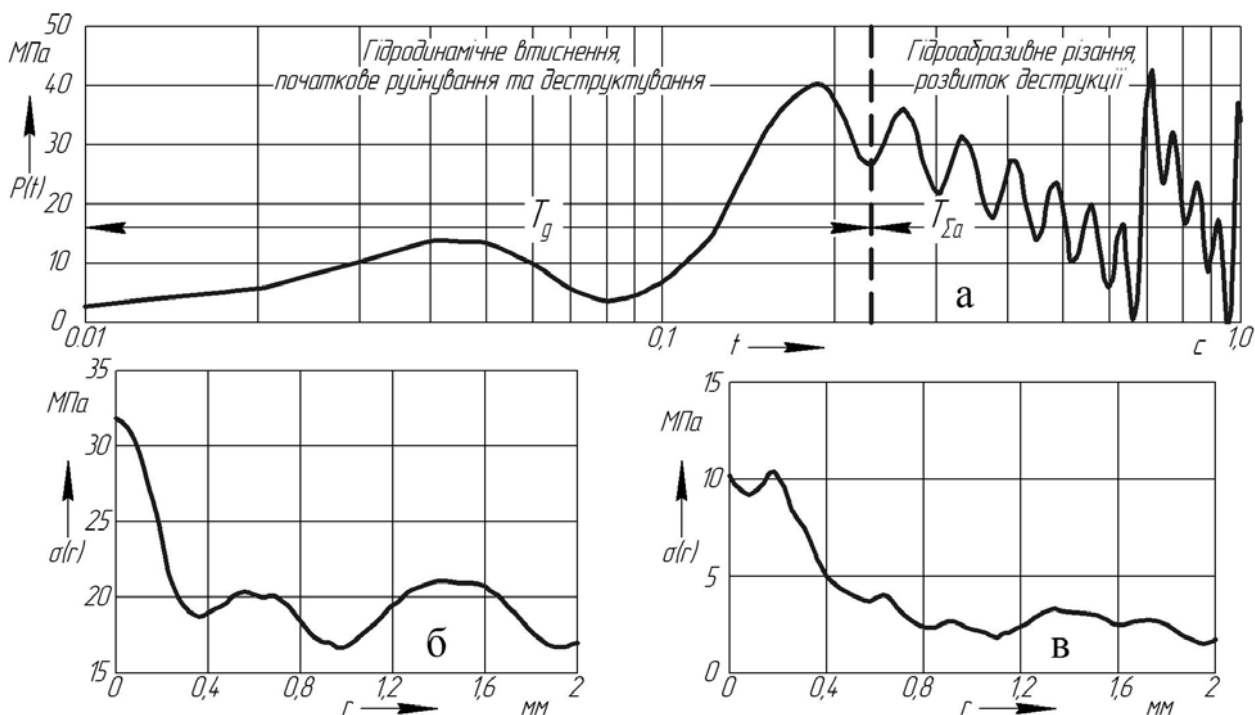


Рис. 3. Гідродинамічне навантаження оброблюваної поверхні (а) та поширення виникаючих напружень від периферії гідровпливу на верхній (б) та нижній (в) площинах

Досліджуваний час – 1 с, дискретність лінійних розмірів – 0,02 мм. Діаграми (б, в) побудовані для часу 0,1 с.

Тож стає очевидною необхідність введення додаткових елементів у струминний пристрій, які б забезпечували скорочення часу перехідного процесу. При цьому ймовірність виникнення дефектів за межами струминного впливу буде зменшена.

Для визначення закономірності зміни інтенсивності руйнування оброблюваної заготовки при відкритті клапану струминної головки проведено моделювання розвитку ерозії окремих площин стільникової заготовки швидкоплинним потоком, який поступово насичується абразивними частинками. Швидкість руйнування оцінювали за швидкістю занурення характерних точок (точки 1–6) фронту утвореної вирви (рис. 4), що дозволило встановити усереднену швидкість руху фронту руйнування, незважаючи на зміну геометрії вирви:

$$\bar{v}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{|x_{i-1} - x_i|}{\Delta t}, \quad (4)$$

де N – кількість контрольованих точок; Δt – дискрета часу розрахунку; $\Delta t = 0,005$ с; i – номер точки.

В результаті моделювання встановлено наступне. Максимальна швидкість для зазначених умов (тиск витікання рідини – 200 МПа, максимальна миттєва витрата абразивних зерен в момент повного відкриття дроселю – 0,6 кг/хв, товщина пластин стільника коробчастої форми – 3,5 мм, міжплощинний простір $l = 10$ мм, матеріал – СВМ) становить 0,027 м/с; при прошиванні першої площини чітко спостерігається зона струминного втиснення та гідроабразивного руйнування (рис. 5), загальний час T_1 є меншим у порівнянні із часом T_2 (прошивання другої пластини) та T_3 (прошивання третьої пластини). У той же час суттєвих відмінностей вони не мають: $T_1 = 0,24$ с, $T_2 = 0,25$ с та $T_3 = 0,29$ с.

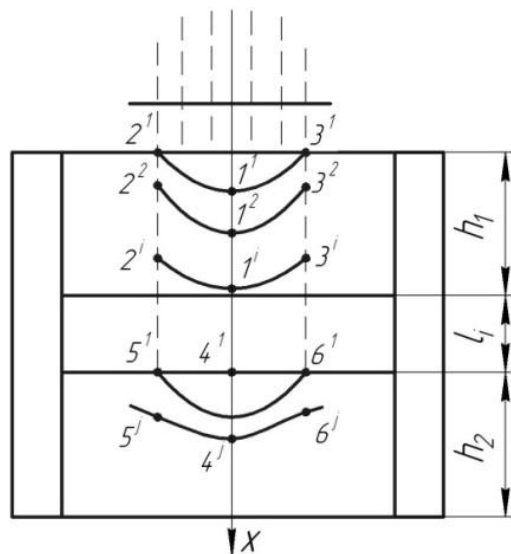


Рис. 4. Контрольовані точки фронту вирви руйнування

Також слід зазначити, що руйнування наступної пластини відбувається одночасно із руйнуванням попередньої, оскільки форма фронту вирви руйнування наближена до півсферичної (цим також можна пояснити і зменшення усередненої швидкості руху фронту при виході струменя).

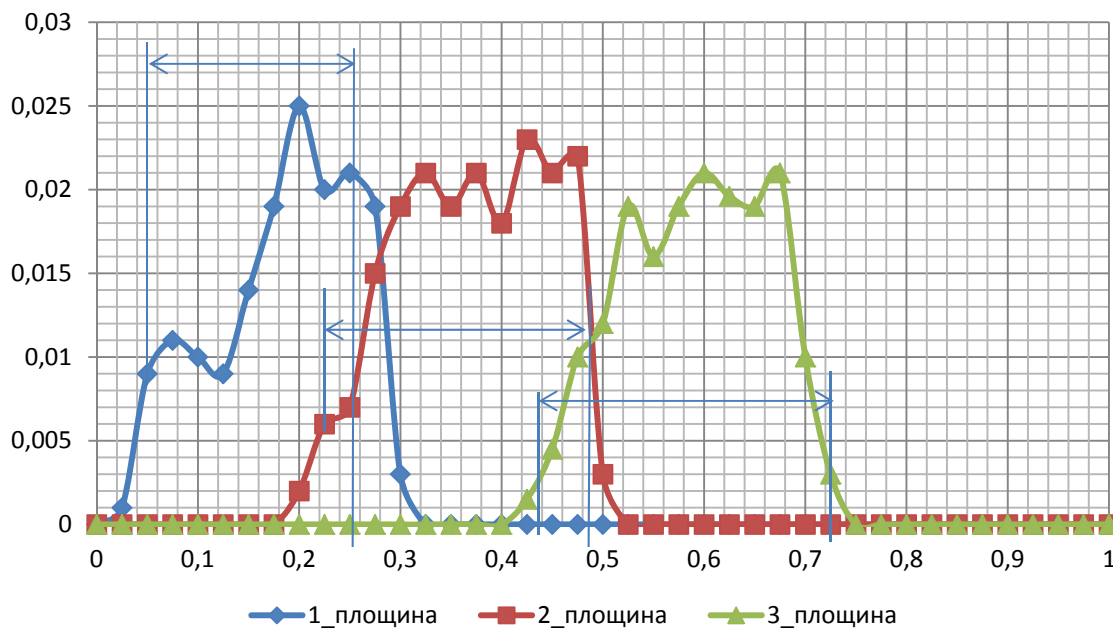


Рис. 5. Порівняння усереднених швидкостей руху (м/с) фронту вирви руйнування на кожній із трьох площин стільника (приклад моделювання – пластик СВМ, товщина площин – 3,5 мм, відстань між площинами – 10 мм)

Також спостерігається певне уповільнення швидкості на кожній наступній пластині:
 $\bar{v}_{c_1} = 0,025$ м/с; $\bar{v}_{c_2} = 0,023$ м/с; $\bar{v}_{c_3} = 0,022$ м/с.

Прийнявши до уваги, що формування струменя відбувається протягом початкових 0,1–0,15 с, можна зробити висновок, що перша пластинка стільника (або листовка заготовка) сприйматиме двоетапний вплив: гідродинамічне навантаження, яке спроможне виконати початкове пружне деформування матеріалу із лавиноподібним його роззміцненням

та формуванням початкової вирви за час $T_{c1} \approx 0,10$ с та наступне руйнування гідраабразивним уповільнюючим потоком із часом перехідного процесу $T_{a1} \approx 0,08$ с. Час перехідного процесу руйнування наступних пластин практично однаковий і дорівнює $T_{a1} \approx 0,14-0,15$ с.

Таким чином, використання методів математичного моделювання довело твердження про виражену етапність процесу гідраабразивного прошивання отворів та дозволило установити, що у початковий момент часу виникаючих напружень недостатньо для активного руйнування заготовки у центрі гідровпливу (стискуючі напруження у зоні впливу не перевищують 35–38 МПа, і є значно меншими на нижній крайці); у той же час зона поширення напружень сягає 2–3 мм за межами струминного впливу з поступовим перетворенням у нуль. У той же час напруження можуть спричинити адгезійне пошкодження композиту, що у подальшому стане причиною явищ деструкції та розшарування. Оскільки протягом 100 мс йде поступове наповнення струменя абразивом, власне різання матеріалу спостерігатиметься тільки після цього періоду, підвищення якості обробки може бути досягнуте або виключенням гідродинамічного впливу потоком рідини (без абразиву), або створенням за допомогою додаткових засобів такого напруженого стану, який би забезпечував виникнення початкових магистральних тріщин на межі стискувальних та розтяжних напружень.

Накладання на зону струминного впливу додаткового навантаження, спроможного викликати появу дотичних напружень на межі дії гідродинамічного потоку значно активізує процес руйнування матеріалу. Таке навантаження також передуює розкриттю виниклих тріщин. На рис. 6 подано результати моделювання стану матеріалу із дотичними напруженнями, створеними на зовнішній поверхні кільцевою ділянкою з $R = 1,6$ мм та $\tau = 10$ МПа поза зоною гідродинамічного впливу. При цьому вважається, що оброблювана заготовка оперта на жорстку плиту із отвором у центрі, діаметр якого відповідає діаметру струменя. У порівнянні з результатом рис. 3, б, в, маємо значне зростання напружень у зоні гідровпливу та зміну епюри розподілу напружень, що дозволяє зробити висновок про можливість передування адгезійного пошкодження матеріалу на відстані від впливу.

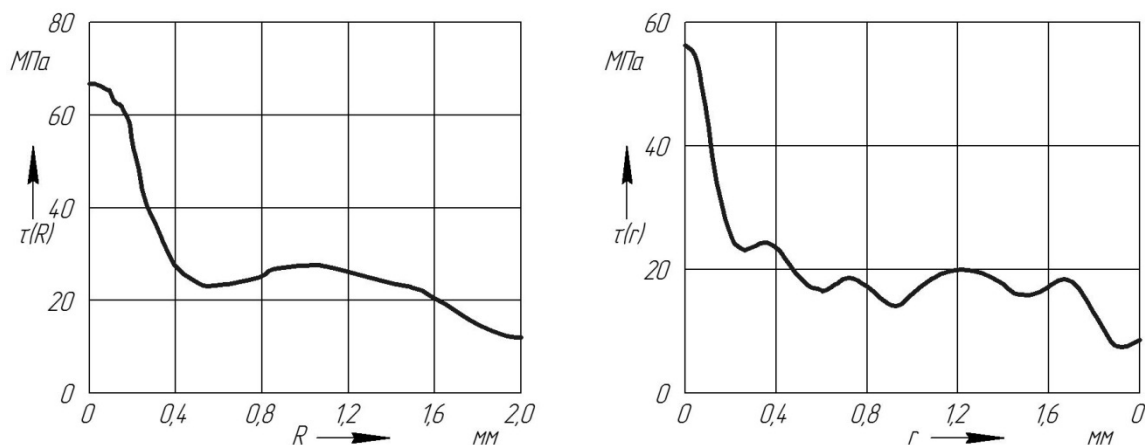


Рис. 6. Напружений стан (у МПа) досліджуваного зразка (на поверхнях матеріалу) при створенні дотичних напружень $\tau = 10$ МПа кільцевим силовим елементом з $R = 1,6$ мм та $r = 0,6$ мм, встановленим співвісно зі струменем

Спостерігається підвищення напружень у центрі гідровпливу, а також на нижній крайці (підтиснення до жорсткої плити)

Для ілюстрації виникаючих деформувань та напружень при дії додаткового механічного навантажувача скористалися пакетом Solid Works та відтворили поведінку матеріалу для зазначених вище умов рис. 7.

В результаті було встановлено, що епюри розподілу навантажень практично відповідають поданим на рис. 6.

Отже, здійснення підтиснення кільцевим індентором дозволяє частково перерозподілити навантаження у шарах оброблюваної заготовки, забезпечивши тим самим поширення меж виникнення можливої деструкції на відстань до 0,2–0,25 мм від периферії впливу. Однак таке підтиснення також стримує розвиток порушення адгезійного зчеплення, передуючи розкриттю тріщини при гідродинамічному впливі розтічного потоку на бокові стінки борозенки різа. Тобто можна зробити висновок про те, що використання засобів зміни напруженого стану заготовки в момент виконання обробки суттєво зменшує зону поширення деструкції.

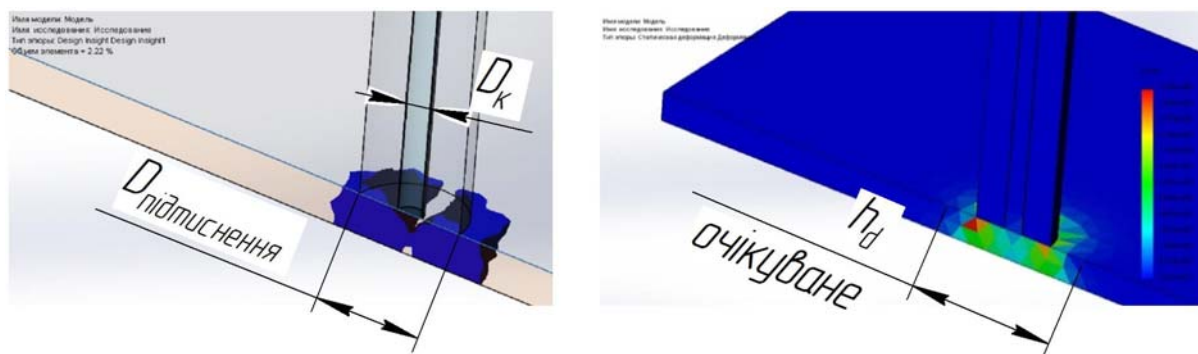


Рис. 7. Напруження та деформації заготовки при прошиванні отворів із підтисненням жорстким індентором

ВИСНОВКИ

Використання методів математичного моделювання довело твердження про виражену етапність процесу гідроабразивного прошивання отворів та дозволило установити, що у початковий момент часу виникаючих напружень недостатньо для активного руйнування заготовки у центрі гідровпливу. Поширення гідродинамічного навантаження за межі безпосереднього впливу, необхідність залучення додаткових засобів для передування деструкції матеріалу дозволяють зробити висновок про те, що при розробці технологій обробки отворів малого діаметра, що формуються під час початкового прошивання у листових виробках з ПКМ використання функціонально орієнтованого підходу є найбільш доцільним, оскільки дозволяє виявити раціональні умови ведення обробки та створити нове прогресивне технологічне оснащення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Саленко О. Ф. Поліпшення стабільності процесу гідроабразивного різання конструктивними засобами / О. Ф. Саленко, В. О. Дудюк // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт : збір. наук. праць – Севастополь : СевНТУ, 2010. – Вип. 107. – С. 197–202.
2. 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.
3. О возможности гидроабразивной прошивки отверстий в заготовках из функциональных материалов / А. Ф. Саленко, А. Н. Мана, В. С. Петропольский, М. В. Стариков, А. В. Андреев // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2011, – вип. № 29. – С. 107–118.
4. Саленко О. Ф. Гідро- та гідроабразивна обробка: Теорія, технологія та обладнання / О. Ф. Саленко, І. В. Петко, О. В. Третьяков. – Київ : ІЗМН, 1999. – 484 с.
5. До питання моделювання процесу гідроабразивного прошивання отворів у заготовках полімерних матеріалів / О. Ф. Саленко, О. М. Мана, Є. С. Коваль, Ю. О. Павлюченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2012, – вип. № 30. – С. 431–442.
6. 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.