УДК 621.91:678.5
О.В. Глоба, доцент, канд.техн. наук ,
І.О. Булах, аспірант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Борщагівська 115, к.611, м. Київ, Україна, 03056
itm@kpi.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ОТВОРІВ ПРИ ОБРОБЦІ ВУГЛЕПЛАСТИКА РІЗНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Отримані математичні моделі методом групового урахування аргументів на основі експериментальних даних. Величину зношування інструменту отримано шляхом запису та комп'ютерної обробки віброакустичного сигналу в процесі свердління полімерного композиційного матеріалу (вуглепластика) за допомогою двохступінчатого свердла та інструменту з новою геометрією з використанням осцилюючого руху.

Ключові слова: *математична модель, метод МГУА, зношування, ПКМ, віброакустичний сигнал.*

У сучасних умовах розвитку технологій обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), різноманітності інструменту і матеріалу, свердління отворів є однією з найбільш поширених технологічних операцій при обробці ПКМ різанням.

Полімерні композиційні матеріали широко поширені в різних галузях промисловості, зокрема в авіабудуванні, завдяки винятковому поєднанню механічних, фізичних і хімічних властивостей. Через особливості ПКМ процеси механічної обробки, зокрема свердління, як один з найпоширеніших методів [1], вимагає удосконалення для досягнення заданої точності і якості (H9-H11).

Проблемою є реалізація контролю отворів у ПКМ після обробки, так як зустрічаються великогабаритні деталі, для яких вимірювання отворів за допомогою приладів ускладнений. Тому актуальним є забезпечення при обробці такої точності отворів, щоб заздалегідь забезпечувати високу якість поверхні.

У сучасному виробництві спостерігається постійне виникнення нових видів матеріалів, які володіють своїми характерними особливостями. Це призводить до необхідності пошуку нових більш оптимальних конструкцій інструменту та методів обробки отворів у ПКМ, а також необхідності забезпечення високої якості отворів для надійного композиційних деталей між собою. В сучасній промисловості необхідне прогнозування результатів процесу різання з урахуванням характерних особливостей вже створених матеріалів, а також матеріалів, що розробляються. Фундаментальним для отримання такого прогнозу є математичне моделювання.

Метою даної статті є отримання та порівняння результатів різних методів свердління на основі аналізу експериментальних даних шляхом запису та обробки вібросигналу, а також побудова математичних моделей процесу свердління ПКМ.

Особливістю свердління анізотропних матеріалів є періодичний характер зміни осьової сили та радіальної сили P_Y, яку необхідно враховувати через пружне відновлення матеріалу і спричинене цим відхилення осі інструменту, а також крутного моменту протягом часу одного оберту свердла, що призводить до прикладення різного навантаження на ріжуче лезо (перо) свердла, а також те, що міцність наповнювача (армуючих волокон) на порядок більше міцності зв'язуючого. Головним чином саме анізотропія властивостей ПКМ призводить до зміни силових характеристик. Це викликає появу власних коливань інструменту. Тому необхідно підібрати такі умови свердління, при яких силові характеристики будуть стабільними у часі.

У роботі викладені результати дослідження зношування свердла та відхилення від округлості отворів у ПКМ при обробці інструментом з різною конструкцією з подальшим математичним моделюванням процесу свердління. Подана математична модель, в якій враховано кілька параметрів процесу для обробки ПКМ інструментом з новою геометрією, що дає можливість більш точного прогнозування.

Досліджувався композиційний матеріал, а саме вуглепластик товщиною 6 мм, перехресно (з викладенням 0-90 °) армований органічною сіткою.

Для обробки отворів використовувалося трипере, двохступінчасте свердло, а також свердло з новою конструкцією (рисунок 1). Конструкція двоступінчастого свердла була змодельована з урахуванням методики розрахунку навантаження Tsao [1] в НТУУ «КПІ», де були проведені розрахунки та експериментальне випробування для визначення оптимальної геометрії даного інструменту з врахуванням точності отворів та величини зношування інструменту [2]. Конструкція третього

інструменту була розроблена для обробки композиційних матеріалів з використанням осцилюючого руху інструменту.

Раніше були проведені дослідження впливу геометрії інструменту, зокрема подвійного головного кута в плані свердла на якість отворів у ПКМ. Були проведені порівняння спірального, двоперого та триперого свердел з двохступінчастим та показано, що застосування триперого та двохступінчастого свердел значно підвищують якість оброблених отворів. Для дослідження впливу геометрії триперого та двохступінчатого свердел були взяті чотири свердла з різними головними подвійними кутами в плані широкого ступеня (далі зразки 1, 2, 3, 4) [4]. Після проведених розрахунків були отримані найбільш оптимальні кути 2φ, для яких була отримана краща якість отворів. З врахуванням проведених досліджень було спроектоване свердло зображене на рисунку 1. Було взято три зразки інструменту (з подвійним головним кутом в плані 110º, 120º та 130º) – діаметр свердла 8 мм, матеріал – Р18, твердість – HRC 60. При свердлінні додатково застосовувався осцилюючий рух, частота якого змінювалась відповідно до частоти обертання шпинделя верстата.

Обробка отворів інструментом з різною геометрією проводилася на частотах 480-1200 об/хв., та визначався оптимальний режим різання. Зокрема було визначено, що оптимальною частотою для триперого та двохступінчатого свердел є частота 880 об/хв., тоді як для нової геометрії інструменту з застосуванням осцилюючого руху оптимальна частота 480 об/хв. Це означає, що застосування осцилюючого руху інструменту дозволяє знизити частоту обертання шпинделя верстата, тобто затрати на обробку отворів.

Осцилюючий рух інструменту застосовується також через те, що однонапрямлене свердління, яке застосовується при обробці ПКМ, призводить до появи розшарування матеріалу, що значно знижує якість отворів. Двонапрямлене свердління дозволяє уникнути міжшарового розшарування матеріалу, та значно підвищити якість отвору.

Рисунок 1 – Зображення інструменту з новою геометрією

Швидкість і величина зношування інструменту аналізувалася шляхом обробки вібраційного сигналу, використання комп'ютерних програм, які на основі експериментальних даних дозволили обчислити ці величини і побудувати математичні моделі процесу для отримання поправочних коефіцієнтів.

На рисунку 2 показаний вигляд експериментальної установки.

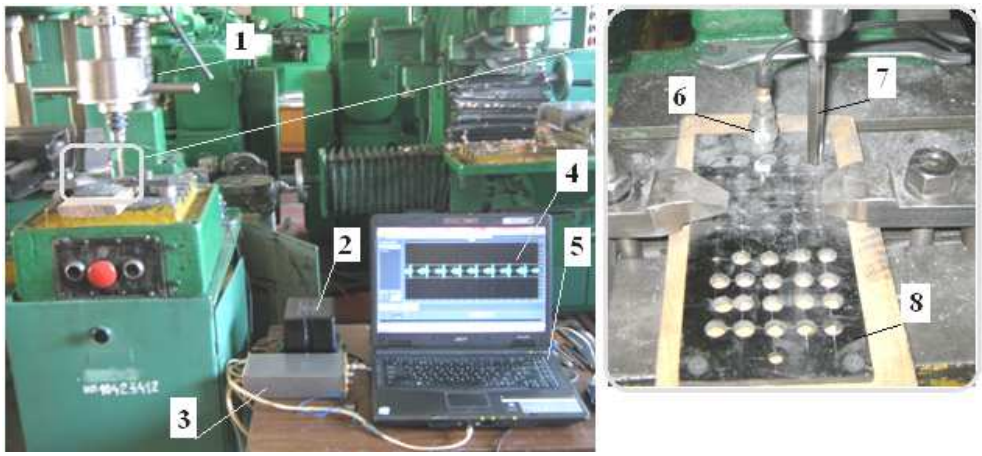

Рисунок 2 – Вигляд експериментальної установки

1–Пристосування для отримання осцилюючих коливань; 2– Підсилювач; 3– Перетворювач; 4– Вигляд зафіксованого вібросигналу; 5– Комп'ютер; 6– Віброакустичний датчик; 7– Свердло; 8– Зразок вуглепластику

Величина зношування розраховувалась шляхом комп'ютерного аналізу віброакустичного сигналу. За допомогою датчика 6, встановленого на зразку вуглепластика 8, був отриманий сигнал, що пройшов через підсилювач 2 та перетворювач 3 на комп'ютер. Далі отриманий сигнал фільтрувався у програмі Cool edit pro 2.0, що дозволяє обробляти сигнал, записаний з мікрофона чи іншого пристрою (в нашому випадку з датчика), а потім представляти сигнал у вигляді текстового файлу. Отриманий файл оброблявся у програмі в середовищі Math Cad, що дала можливість розрахувати величину та швидкість зношування свердла. Дана програма була запропонована Кокаровцевим В.В. [3], що досліджував процес металообробки, та потім адаптована для композиційних матеріалів.

За результатами розрахунку були отримані графіки залежності швидкості і величини зношування інструменту від шляху, пройденого свердлом (рисунок 3, 4). При обробці сигналу свердла нової конструкції (рисунок 1) з застосуванням осцилюючого руху проводився запис холостого ходу пристосування. Це необхідно було зробити для підвищення точності отриманих результатів.

Якість отриманих отворів

Свердління ПКМ проходило з однаковим зусиллям різання (P_0 = const) [4]. У результаті проведення експерименту були виявлені відмінності по якості створених отворів, а також у самому процесі свердління. Після об'єктивної оцінки якості поверхні і вимірювань відхилення від округлості отворів можна зробити висновок, що зразок двохступінчастого свердла № 2 (з кутом у плані 120°) дає найбільше відхилення отворів і гіршу якість як на вході, так і на виході інструменту. І сам процес свердління цим зразком важче, ніж трьома іншими. Найменше відхилення отворів, згідно вимірювань і розрахунків дає свердло № 3 (подвійний кут в плані 130°). У зразків 1 і 4 (відповідно з кутами 110 ° і 140°) показники якості отворів близькі за значенням. Було відмічено, що при обробці зразком інструмента №3 відбувається нагрівання свердла і матеріалу. Температура інструменту вимірювалась безпосередньо після свердління отвору. Для більш точного отримання ступеня нагрівання, перспективним є вимірювання температури в зоні різання під час свердління.

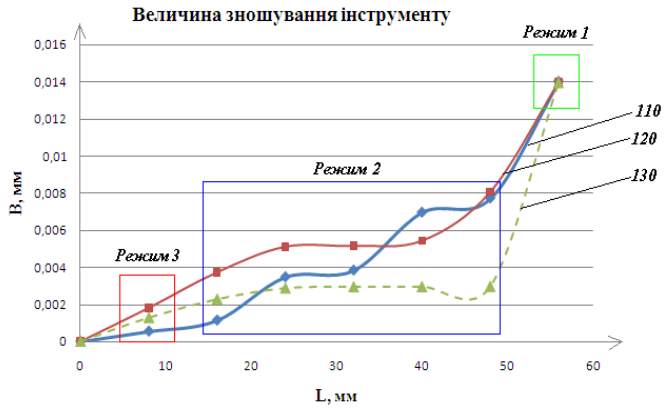

Рисунок 3 – Результати досліджень експериментальних зразків інструменту з новою геометрією (режим 1 – *n*=480 об/хв.; режим 2 – n=480 об/хв з застосуванням осцилюючого руху інструменту; режим 3 – *n*=880 об/хв з застосуванням осцилюючого руху інструменту)

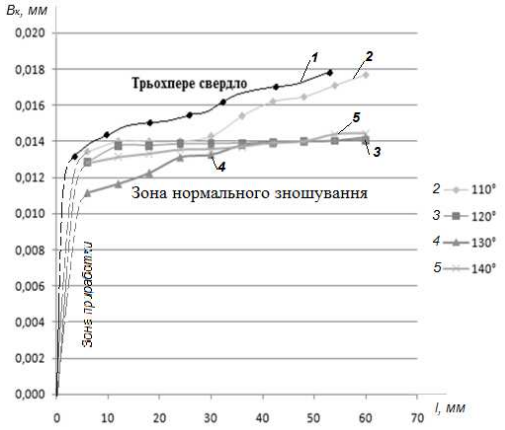

Рисунок 4 – Графіки, отримані після дослідження триперого та двоступінчатих свердел

Після обробки свердлом нової конструкції було виявлено, що при обробці з частотою 480 об/хв., зразок 1 (110º) нагрівається лише по перемичці та ріжучій кромці (20-30ºС), у зразку 2 (120º) нагрівання розповсюджувалось вище по довжині свердла (35-40ºС), у зразку 3 (130º) спостерігалось більш сильне нагрівання ближче до осі свердла (50-60ºС). Також було встановлено, що при підвищенні частоти обертання шпинделя верстата температура нагрівання інструмента підвищувалась.

Щодо зношування інструменту та якості отворів, то було помічено, що на кожному режимі різання найкращий результат дає свердло з різною геометрією. Найменше відхилення по якості отвору дає зразок інструменту 2 при обробці з використанням осцилюючого руху з частотою обертання шпинделя верстата 480 об/хв. При підвищенні частоти обертання шпинделя (до 880 об/хв) і, відповідно, частоти осцилюючого руху, якість отвору на виході зменшується, хоча величина зношування менша. При відсутності осцилюючого руху інструменту зношування свердла зростає, а якість отворів погіршується.

Велике підвищення температури є небажаним, тому важливо контролювати цей процес для знаходження методів його уникнення. Тому для більш точного прогнозування результатів експерименту планується скласти математичну модель процесу різання з урахуванням ступеня нагріву зразка

(введенням ще одного параметра процесу в математичну модель). Це дозволить збільшити час обробки та зменшить затрати.

Математичне моделювання.

За результатами дослідження були побудовані емпіричні залежності зношування свердла від кількості отворів з використанням однофакторного експерименту. Залежність планувалося отримати у вигляді степеневої функції виду:

$$h = C \cdot N^{Y}$$

де h – величина зношування інструменту, N – кількість отворів, C і Y – невідомі постійний коефіцієнт і показник степеня.

Для побудови залежностей був застосований метод логарифмічних шкал. У таблиці 1 показані отримані емпіричні залежності для 4 зразків двохступінчастого свердла і похибка по кожній з них.

Таблиця 1 – Вид отриманої емпіричної залежності і похибка моделі

Номер зразка	Отримана емпірична залежність	Похибка моделі (%)
1	$h = 0{,}013553 \cdot N^{0{,}077272}$	7,098
2	$h = 0{,}013531 \cdot N^{0{,}013344}$	1,186
3	$h = 0{,}011005 \cdot N^{0{,}115064}$	1,203
4	$h = 0{,}012684 \cdot N^{0{,}049943}$	0,812

Адекватність отриманих математичних моделей була перевірена з використанням критерію Пірсона, що являється універсальним критерієм перевірки адекватності відхилення отриманих даних шляхом експерименту та математичної моделі.

Не дивлячись на те, що похибка наведених моделей мала і адекватність моделей підтверджена, метод логарифмічних має деякі недоліки. Такий метод не враховує фізики процесу і є чисто математичним отриманням залежності.

Більш прийнятне моделювання процесу різання проводиться за допомогою методу групового урахування аргументів (МГУА). Цей метод є найбільш оптимальним на даний момент методом індуктивного моделювання і одним з найбільш ефективних методів структурно-параметричної ідентифікації складних об'єктів, процесів і систем за даними спостережень. За отриманими даними програма будує деяку сукупність моделей виду:

$$y_f = f(X, \theta_f)$$

Далі проводиться пошук оптимальної моделі за умовою мінімізації деякого критерію якості моделей:

$$f^* = arg\ min\ C(y, f(X, \theta_f))$$

При чому для оцінки оптимальності параметрів потрібно вирішити ще одну екстремальну задачу виду:

$$\theta_f^* = arg\ min\ Q(y, X, \theta_f)$$

Q - критерій якості розв’язку ідентифікації кожної окремої моделі.

Чим менша інформативність введених даних, тим більш грубою буде математична модель. За допомогою такого моделювання з'являється можливість спрогнозувати результат експерименту при зміні деякого параметра процесу. Важливим фактором при використанні методу МГУА є можливість отримання математичних моделей різного виду при одних і тих же вихідних параметрах, а також можливість вибору виду подачі параметра, умови оптимізації отриманого безлічі моделей (наприклад, вибір оптимальної моделі з найменшою похибкою) тощо.

Можливість застосування методу МГУА для процесів обробки матеріалів була доведена в дослідженнях проф. Равської Н.С., проф. Остаф’єва В.А., Ковальової Л.І., Кикотя В.С., Глоби О.В. та ін. Експерименти по використанню методу МГУА для процесів фрезерування, свердління різноманітних матеріалів показали високу точність і працездатність отриманих математичних моделей і можливість прогнозування результатів експерименту.

Тому для отримання математичної моделі був узятий метод групового урахування аргументів. Після обробки отриманих експериментальних результатів у програмі, що працює за методом МГУА була отримана математична модель і поправочні коефіцієнти.

Формула моделі, отримана в результаті обробки результатів:

$$h = 4{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot N + (-0.000{,}33 \cdot 10^{-3}) \cdot N^2$$

де N – кількість отворів, h – величина зношування інструменту

Поправочні коефіцієнти математичної моделі:

Поправочний коефіцієнт за кількістю отворів – 0,004624.

Поправочний коефіцієнт по працездатності моделі – 0,029417.

Поправочний коефіцієнт по зносу (constant term) – 0,01313.

Точність отриманої за методом МГУА моделі близька з точністю математичних моделей в таблиці 1. Але моделі МГУА більш глибоко враховують фізику процесу різання.

В процесі дослідження процесу свердління інструментом з новою геометрією, метою було отримання математичної моделі, яка б враховувала кілька параметрів процесу для підвищення точності прогнозування результату.

Отримана математична модель по результатам експерименту:

$$\boldsymbol{B} = 0{,}4244\cdot(3{,}410^{-3}+ 1{,}00308\cdot(\boldsymbol{L}*0{,}1\cdot10^{-3}- \boldsymbol{t}*0{,}4\cdot10^{-3})+1{,}306\cdot(9{,}8\cdot10^{-3}- \boldsymbol{k}*9{,}72\cdot10^{-3})+0{,}7076\cdot (21{,}04\cdot10^{-3}- \boldsymbol{n}*1{,}2\cdot10^{-5}-\boldsymbol{f}*7{,}564\cdot10^{-5}))+ 0{,}577\cdot ((4{,}4210^{-3}-\boldsymbol{t}*0{,}571\cdot10^{-3}+1{,}015\cdot(13{,}9\cdot10^{-3}-\boldsymbol{k}*10{,}1\cdot10^{-3})* 1{,}357\cdot ((4{,}78\cdot10^{-3}- \boldsymbol{t}*0{,}62\cdot10^{-3}-0{,}3711)+ 1{,}29\cdot(\boldsymbol{L}*9{,}95\cdot10^{-5}-4{,}66\cdot10^{-3})+ 1{,}01\cdot (17{,}7\cdot10^{-3}-\boldsymbol{n}*0{,}76\cdot10^{-5}-\boldsymbol{k}*9{,}7\cdot10^{-3}))$$

де L – шлях, пройдений свердлом; t – час обробки; k – коефіцієнт, що вказує на наявність (1) або відсутність (0) осцилюючих коливань; n – частота обертання шпинделя; f – подвійний головний кут в плані свердла; B – величина зношування; Коефіцієнт працездатності моделі: k*= 0,086944.

Висновки. В результаті проведеного дослідження була показана залежність величини зношування інструменту і відхилення від округлості отворів в композиційному матеріалі (вуглепластика) при свердлінні (ступінчастим свердлом а також свердлом з новою конструкцією з застосуванням осцилюючого руху) від геометрії свердла на підставі аналізу вібраційного сигналу і подальшого математичного моделювання.

Було показано, що з чотирьох зразків інструменту, оптимальним є двохступінчате свердло з подвійним кутом в плані 2φ = 130° (зразок № 3). Це свердло дає найкращу якість отворів в ПКМ, відхилення отворів від округлості при свердлінні цим свердлом є найменшим (0,8925 мм). Для зразків триперих свердел, оптимальним виявилося свердло з кутом 120º.

Порівняно з дослідженнями триперого та двохступінчастих свердел, температура інструменту з новою геометрією після обробки знизилася на 10 %. При використанні осцилюючого руху свердла було виявлено зниження величини зношування інструменту на 8 %. При свердлінні цим інструментом найкращу якість та найменшу величину зношування дає свердло з подвійним кутом в плані 120º при частоті обертання шпинделя 480 об/хв.

Проведене математичне моделювання процесу різання методом логарифмічних шкал і методом МГУА. Похибка обох моделей мала, але метод МГУА дає більш глибоку модель з урахуванням фізичних особливостей процесу і поправочні коефіцієнти як до параметрів процесу, так і до працездатності самої моделі. Це дає перевагу саме методу МГУА при використанні в технологічних процесах різання.

Була отримана математична модель для інструменту з новою геометрією з застосуванням осцилюючого руху свердла, яка враховує декілька параметрів процесу. Це дозволило підвищити точність прогнозування результату при зміні певного параметру процесу.

Перспективним напрямком дослідження є врахування ступеня нагрівання свердла шляхом додавання параметра нагріву в математичну модель, розрахунок оптимального режиму різання для нього. Після проведення досліджень, було показано, що застосування осцилюючого руху інструменту дозволяє знизити частоту обертання шпинделя верстата, що знижує нагрівання та зношування інструменту, а також затрати на обробку. Тому перспективним напрямком дослідження є більш точний підбір геометрії інструменту та режиму різання, враховуючи результати проведених досліджень.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Tsao C.C. Influence of Geometry in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics / C.C. Tsao // — Advanced in machining and Manufactoring Technology IX. — Swizerland, 2008. — P. 236–240.

2. Глоба О.В. Аналітичний розрахунок критичного зусилля розшарування при обробці композиційних матеріалів ступінчатими свердлами та визначення оптимальної величини ступені / О.В. Глоба, О.В. Кухановський // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць. — Краматорськ, 2011. — Вип. № 28. — С. 51–54.

3. Кокаровцев В.В. Методы контроля и управления процессом металлоообработки на основе виброаккустического сигнала: дисс. канд. техн. наук: 05.03.01: защищена 21.03.1994: утв. 1994 / Кокаровцев Валерий Васильевич. — Киев, 1994. — 139 с.

4. Глоба О.В. Вплив геометрії свердла на його стійкість і точність виконання отворів при свердлінні композиційних матеріалів / О.В. Глоба, І.О. Булах, С.М. Милокост // Технічна модернізація авіабудівного виробництва – ключ до успіху на ринках авіаційної техніки: матер. 2 технічної конференції українського відділення SAMPE — 2012, Київ, АО УкрНДІАТ, 15 листопада 2012 р. — Київ, 2013. — С. 23–29.

Надійшла до редакції 23.04.2013 р.

Глоба А.В., Булах И.А. Исследование качества отверстий при обработке углепластика разными конструкциями режущего інструмента

Получены математические модели методом группового учёта аргументов на основе экспериментальных данных. Величина износа инструмента получена путём записи и компьютерной обработки виброакустического сигнала в процессе сверления полимерного композиционного материала (углепластика) при помощи двухступенчатого сверла и инструмента с новой геометрией и использованием осциллирующего движения.

Ключевые слова: математическая модель, метод МГУА, износ, ПКМ, виброакустический сигнал.

Globa A.V., Bulakh I.A. The research of the holes quality during the carbon fibre composite material processing by the cutting tools with different construction

The mathematical models using the group method of data handling based on the experimental data were obtained. Tool wear value was received by the record and computer processing of vibroacoustic signal during drilling polymeric composite material (carbon fibre) using a two-step drill and the tool with a new geometry and using an oscillating motion.

Keywords: mathematical model, the method of GMDH, wear, PCM, vibroacoustic signal.