

Матюшин О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вислоух С.П.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СВЕРДЛІННЯ ОТВОРІВ У ДЕТАЛЯХ З ВУГЛЕПЛАСТИКУ

Високоякісне оброблення отворів у деталях із композитних матеріалів залишається дуже складним виробничим завданням. Правильний вибір параметрів різання для поточного шару оброблюваного матеріалу дозволяє отримати необхідну якість поверхні з максимальною продуктивністю і при цьому задані режими можуть призвести до дефектів наступного шару матеріалу. Тому є доцільним використання автоматизованої системи керування процесом різання (АСК).

У статті представлено АСК процесом свердління отворів у деталях із вуглепластику. Наведено її структурну і функціональну схеми, а також загальний алгоритм її роботи. Розроблено математичні залежності осьової сили від режимів свердління та діаметра отвору, коефіцієнта розширення від осьової сили, шорсткості від режимів свердління та кута при вершині свердла, а також шорсткості від осьової сили. При цьому пропонується загальна математична модель процесу свердління деталей із вуглепластику, критерієм оптимальності якої є максимальна продуктивність оброблення отворів з обмеженнями за параметрами якості.

Запропонована система використовує алгоритм керування за поточною інформацією шляхом застосування технічних засобів автоматизації та відповідного програмного забезпечення. За вимірним значенням осьової сили в режимі реального часу з інтервалом опитування 50 мс виконується прогнозування значень коефіцієнта розширення та шорсткості поверхні отвору за розробленими математичними залежностями. При цьому за допомогою програмованого логічного контролера (ПЛК) підтримується оптимальне значення кількості обертів шпинделя за допомогою привода головного руху та керування подачею з використанням привода подач.

Використання АСК процесом свердління дозволить підтримувати оптимальні значення режимів різання, що забезпечують отримання необхідних параметрів коефіцієнта розширення отвору та шорсткості його поверхні.

Ключові слова: композиційні матеріали, вуглепластики, свердління, розширення отворів, шорсткість, автоматизована система керування, режими свердління, осьова сила, оптимальні режими, продуктивність.

Постановка проблеми. На сьогодні в авіабудівній, аерокосмічній, машинобудівній та приладобудівній галузях особливого поширення набувають композиційні матеріали. Це викликано їх високими показниками міцності та жорсткості по відношенню до маси. Також композитні матеріали мають високу стійкість до корозії.

Основною операцією механічного оброблення даних матеріалів є свердління. Проте на відміну від традиційних конструкційних матеріалів даний процес супроводжується наступними дефектами: розширенням поверхні отвору, термодеструкцією матриці, вивівами та висмикуванням волокон, усадкою і великою шорсткістю оброблених поверхонь [1].

Дефекти в композиційних матеріалах, зокрема в вуглепластиках, можуть суттєво впливати на їхню якість та механічні властивості деталей, з яких вони виготовлені. Одним із основних дефектів, що часто виникає у вуглепластиках, є розширення поверхні отвору, що полягає у відокремленні шарів матеріалу поблизу отвору, яке може виникнути в процесі свердління внаслідок недостатньої адгезії між шарами. Розширення призводить до зниження несучої міцності деталі та негативно впливає на довговічність матеріалу внаслідок зниження його структурної цілісності, що призведе до погіршення експлуатаційних характеристик виробу. Формально розширення поверхні отвору характеризується його коефіцієнтом, що визначається

як відношення максимального діаметра отвору до його номінального значення [2].

На практиці реалізовано різні шляхи зменшення розшарування отворів. Так, використання опорної пластини під заготовкою при свердлінні отвору зменшує коефіцієнт розшарування. Проте оптимальним варіантом вирішення цієї задачі є керування режимами різання. Поєднання високої швидкості різання (кількості обертів шпинделя), малої подачі та використання свердла з невеликим значенням кута при вершині ефективно мінімізує фактор розшарування при свердлінні отворів в композитах [3].

В [4] встановлено, що при свердлінні отворів у вуглепластику значення розшарування отвору перевищуватиме допустиму величину, якщо осьова сила різання буде більше критичного значення, особливо в місцях входу та виходу свердла із композитного матеріалу. Також неконтрольоване свердління може спричинити пошкодження навколо отвору через розшарування волокон на вході та виході свердла з оброблюваного матеріалу [3].

Крім того, поширеним дефектом свердління отворів в композитах є підвищена шорсткість поверхні, що виникає внаслідок анізотропії властивостей оброблюваного матеріалу, неправильно вибраних режимів оброблення, зносу різального інструменту та властивостей оброблюваного матеріалу. Велика шорсткість поверхні отвору зазвичай негативно впливає на експлуатаційні характеристики виробу, що складається із вуглепластикових деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При свердлінні отворів в композитних матеріалах Hocheng і Dharan запропонували теорію, що базується на механіці руйнування, яка дозволяє виконувати прогнозування критичної осьової сили різання, що викликає пошкодження від розшарування при свердлінні композиційних ламінатів [5]. Основними параметрами в цій методиці є властивості оброблюваного матеріалу, а саме: модуль пружності та в'язкість міжшарового руйнування.

Критичне значення осьової сили ($P_{крит}$) за цією теорією визначається за наступною формулою [5]:

$$P_{крит} = \pi \left[\frac{8G_{lc}E_1h^3}{3(1-\nu_{12}^2)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

де G_{lc} – в'язкість міжшарового руйнування, Дж/м²;

E_1 – модуль пружності, Н/м²;

h – товщина необробленого матеріалу під інструментом, мм;

ν_{12} – коефіцієнт Пуассона.

У роботі [4] на основі моделі критичного значення осьової сили розроблено інтелектуальну систему, яка може автоматично підтримувати осьову силу різання менше критичних значень в процесі оброблення композиційних матеріалів.

Експериментальні дослідження [6] показали, що розшарування відбуваються як на виході свердла з оброблюваного матеріалу, так і на вході в нього. Тобто потрібно враховувати дві величини розшарування або використовувати максимальне значення, яке пропонується у даній роботі.

Більшість попередніх досліджень з питань адаптивного керування процесами оброблення базуються на вимірюванні сили, потужності та/або крутного моменту [7]. Для композитів акустичну емісію використовували для виявлення початку виникнення мікротріщин в процесі різання і вважають її корисним параметром для моніторингу пошкоджень у композитах [4]. Іншими параметрами, що використовуються для моделювання процесу обробки, моніторингу та контролю, є значення струму шпинделя, температура інструменту та вібрації заготовки.

На рис. 1 зображена загальна схема інтелектуальної системи, що пропонується авторами [4], мета якої полягає в тому, щоб отримати отвір з максимальною продуктивністю, забезпечуючи при цьому відсутність розшарування. Функції контролера у системі включають безперервний моніторинг сили, сигналів акустичної емісії та/або вібрації та розташування свердла для визначення етапу свердління. Тут найкращою стратегією є максимізація подачі для скорочення часу циклу в процесі оброблення. В момент контакту інструменту з матеріалом та виходу з нього подачу необхідно обмежити для уникнення розшарування. Подача на етапі нормального свердління (без розшарування) також має контролюватися для уникнення утворення розшарування.

У роботі [1] проведено моніторинг акустичної емісії (АЕ) в режимі реального часу для контролю якості свердління заготовок із склопластика, щоб вивчити вплив параметрів оброблення (швидкості різання та подачі) на осьову силу та знос інструменту по задній поверхні, що впливає на усадку отвору, а також для оцінки зв'язку між контрольованими параметрами. Тут АЕ використовується як активний інтелектуальний індикатор для моніторингу стану процесу. АЕ, що утворюється в процесі свердління композитних матеріалів, здебільшого викликана деформацією матриці, різанням волокна, механізмами тертя, розшаруванням та зносом інструменту.



Рис. 1. Загальна схема інтелектуальної системи керування процесом свердління [4]

Автори [3] використовують оптимальне керування для моніторингу осьової сили та корегування її значення шляхом зміни подачі. При цьому як заготовка використовується склопластиковий ламінат. У цій роботі динаміка свердління в склопластикових ламінатах зафіксована у формі моделі простору станів третього порядку між осьовою силою та подачею. Потім на основі розробленої передатної функції застосовується оптимальне керування осьовою силою в процесі свердління.

Таким чином, дослідниками [3] експериментально доведено, що в композитних матеріалах можна просвердлити отвори з мінімальним розшаруванням, якщо осьова сила під час операції свердління не перевищує критичного значення.

Методи керування з використанням нечіткої логіки [2] та штучних нейронних мереж [8] дозволяють отримати добрі результати за відсутності математичної моделі процесу. Осьовою силою також можна керувати за допомогою простого пропорційно-інтегрального (ПІ) або пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) контролера [3]. Пропорційне підсилення допомагає швидко досягти опорної сили, а інтегратор забезпечити нульові помилки зміщення.

У роботах [9, 10] автори пропонують виконувати свердління вуглепластику з використанням зворотного зв'язку на основі осьової сили для зменшення розшарування отвору. Дану систему представлено на рис. 2.

З досліджень [3] встановлено, що шорсткість поверхні та коефіцієнт розшарування вуглепластику залежить від подачі, кількості обертів шпинделя (швидкості різання), діаметра свердла та кута при вершині свердла.

Таким чином, встановлено, що можна визначити режими різання, що забезпечують мінімальне розшарування в процесі свердління вуглепластику, але при цьому задача свердління з максимальною продуктивністю та допустимим розшаруванням залишається невирішеною.



Рис. 2. Структура системи керування осьовою силою [9]

В цих роботах не враховується шорсткість поверхні отвору, що також є важливим фактором для забезпечення експлуатаційної надійності деталі в складальному виробі. Основним недоліком запропонованих систем керування є те, що вони враховують лише коефіцієнт розшарування отвору та в них відсутня інформаційна база даних композиційних матеріалів з відповідними математичними моделями та режимами оброблення.

Метою роботи є підвищення ефективності процесу оброблення деталей з композиційних матеріалів шляхом керування процесом свердління з використанням автоматизованої системи, що дозволить отримати необхідні параметри якості поверхонь отворів з максимальною продуктивністю. Для функціонування автоматизованої системи керування необхідно розробити методику керування процесом свердління, створити її структурну і функціональну схеми та отримати математичну модель процесу свердління з використанням відповідних математичних моделей параметрів якості оброблюваних поверхонь отворів в деталях з вуглепластику.

Виклад основного матеріалу. На основі аналізу використовуваних автоматизованих систем керування процесів свердління отворів запропонована система керування, структурна схема якої представлена на рис. 3.

У розробленій АСК заготовку із вуглепластику закріплено в жорсткому пристосуванні, прикріпленому до п'єзоелектричного динамометра Kistler 9257B, який призначений для вимірювання значення осьової сили у процесі свердління. На підсилювач поступає значення напруги, що генерується динамометром пропорційно прикладеній осьовій силі. Отриманий сигнал підсилюється для отримання аналогового сигналу осьової сили, звідки надходить до АЦП (аналогово-цифровий перетворювач), де перетворюється у цифровий сигнал. Для підсилення та перетворення сигналу використовувався 8-канальний підсилювач-перетворювач типу 5070A01110 фірми Kistler. Після перетворення цифровий сигнал подається на вхід персонального комп'ютера. На комп'ютері встановлено програмне забезпечення DupoWare фірми Kistler, яке призначене для аналізу сигналу осьової сили. У блоці обробки вимірювань обчислюється значення коефіцієнта розшарування та шорсткості поверхні за вимірним значенням осьової сили та порівнюється із заданим у базі даних. При цьому

база даних містить критичне значення осьової сили, що розраховано за параметрами оброблюваного матеріалу, а також задані відповідно до технічних вимог значення коефіцієнта розшарування та шорсткості поверхні. При необхідності в обчислювальному блоці виконується визначення коригуючих значень подачі та кількості обертів шпинделя за створеними математичними залежностями. Після цього програмований логічний контролер формує керуючі впливи та вносить корективи до програми верстата з ЧПК. Керування процесом свердління виконується за подачею, а кількість обертів шпинделя встановлюється та підтримується оптимальним постійним значенням для конкретного діаметра свердла. Керуюча програма формує скореговані керуючі сигнали по зміні значень подачі на виконавчі механізми (привод подач) верстата з ЧПК. Привод механізму подач складається із двигуна (M_2) та коробки подач, що відповідно змінюють подачу на нове розраховане значення. Для підтримання значення кількості обертів подається значення керуючого сигналу на привод головного руху, що складається з двигуна (M_1) та коробки швидкостей. Закінчення циклу свердління виконується за програмою при досягненні заданої глибини свердління. При цьому динамометр підключений до ПК за допомогою інтерфейсу RS-232.

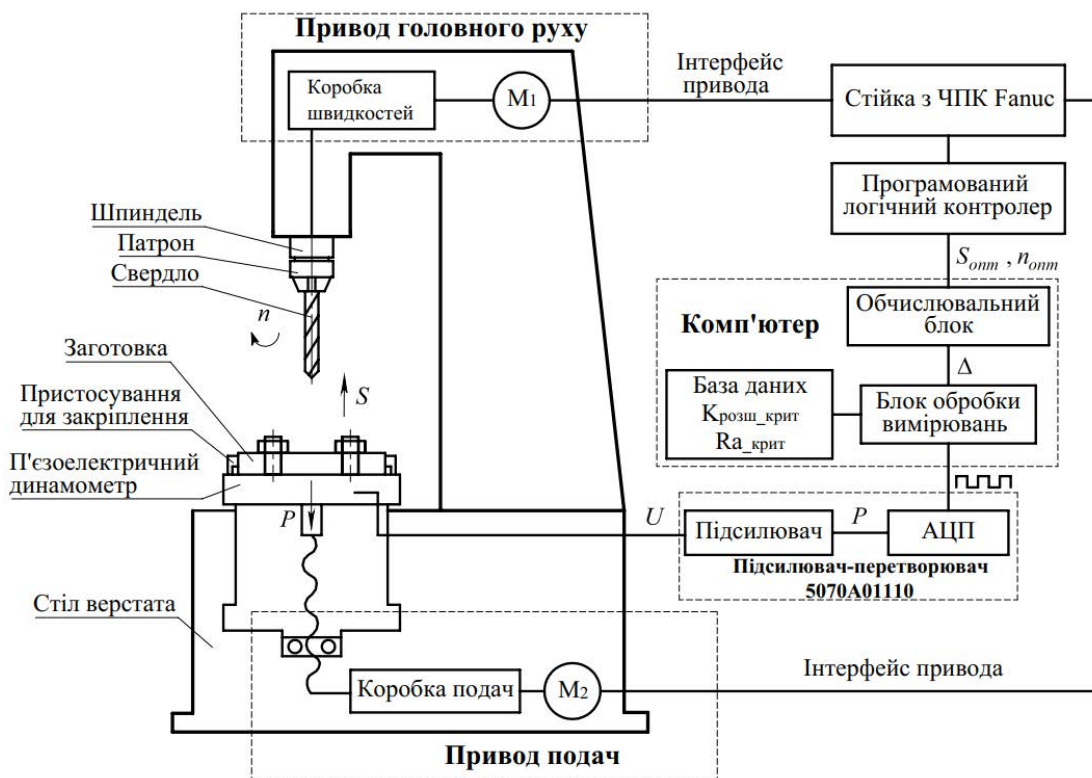


Рис. 3. Структурна схема АСК процесом свердління деталей із вуглепластику

Процес керування виконується в такій послідовності: запуск процесу із наперед визначеними (рекомендованими, оптимальними) режимами оброблення; підхід, де свердло виконує переміщення до заготовки; контакт, коли наконечник свердла контактує з матеріалом заготовки; нормальне свердління, тобто свердління без розшарування (або в межах допустимого); ініціація (непряме визначення) розшарування шляхом вимірювання осьової сили різання, у випадку перевищення критичної осьової сили, коли настає підвищення розшарування; коригування режимів оброблення з використанням зворотного зв'язку шляхом зменшення значення подачі; вихід свердла, коли наконечник свердла виходить наскрізь із заготовки; завершення процесу свердління, коли отвір вже отримано; відведення свердла, тобто свердло необхідно відвести із заготовки та перемістити назад в нульову точку.

Розроблена система є замкненою із зворотним зв'язком. Інтервал опитувань динамометра 9257В становить 50 мс. При цьому із паспортних даних обладнання встановлено, що верстати на базі системи з ЧПК Fanuc відпрацьовують керуючий вплив приблизно за 20 мс.

На основі структурної схеми системи керування отримано її функціональну схему, що зображена на рис. 4.

В наданій замкненій технологічній системі основним є процес свердління отвору в композиційному матеріалі. Вхідним керуючим впливом в системі є подача, а вихідним – регульована осьова сила.

Згідно з наданою схемою динамометр в процесі оброблення деталі виконує функції перетворювача сили P , що через підсилювач підключений до входу пристрою порівняння. Рух подачі стола передається через ходовий гвинт (гвинтову пару) та редуктор, що має кутову швидкість ω_p , від регульованого двигуна. Двигун постійного струму містить вбудований тахогенератор, напруга на виході якого (U_d) пропорційна кутовій швидко-

сті двигуна. Для живлення двигуна використовується підсилювач-перетворювач. На вхід суматора подається сигнал U_z , що відповідає необхідному значенню осьової сили. На інший вхід суматора надходить сигнал U_0 , що виробляється перетворювачем сили (п'єзоелектричним динамометром) та підсилювачем. Цей сигнал відповідає реальному значенню осьової сили. Помилка $\Delta U = U_z - U_0$ надходить на вхід підсилювача-перетворювача, який виробляє напругу для живлення двигуна U_{II} , що визначає величину подачі так, щоб звести неузгодженість до мінімуму. Таким чином, АСК шляхом керування подачею стола здійснює стабілізацію осьової сили на заданому рівні. В якості об'єкта керування в АСК входить процес свердління деталей із вуглепластику та пружна система верстата, вихідною величиною якої є деформація x .

Реалізація АСК процесу свердління отворів у деталях з вуглепластику можлива на основі застосування математичних моделей параметрів якості оброблених поверхонь, що пов'язують коефіцієнт розшарування і їх шорсткість з режимами та умовами різання.

Для отримання відповідних математичних моделей використано результати експериментальних досліджень, що надано в [2]. Як заготовки в цих дослідженнях використовували прутки з вуглепластику діаметром 50 мм і товщиною 10 мм. Щільність оброблюваного матеріалу становила 1,1 г/см³. Методом формування є ручна укладка із орієнтацією волокон 0/90°. Операції свердління виконували на свердлильному верстаті з ЧПК (3-осьовий верстат з ЧПК MAXMILL з контролером FANUC OiMate MC, номер моделі CNC 2000EG). Для свердління використовували твердосплавні свердла з покриттям TiAlN діаметрами 6, 8 і 10 мм з кутом при вершині 118° [2].

На основі результатів експериментальних досліджень отримано математичну залежність осьової сили від режимів свердління та діаметра свердла методом групового врахування аргументів з використанням програми GMDH Shell DS,



Рис. 4. Функціональна схема АСК процесом свердління

яка була спрощена шляхом підстановки коефіцієнтів в загальну формулу:

$$P = 0,17563 \cdot n - 374,454 \cdot d - 7,72357 \cdot S + 573,98 \cdot S^{1/3} + 4672,8693 \cdot d^{1/3} - 126,7096 \cdot n^{1/3} - 6567,829, \quad (2)$$

де P – осьова сила, Н;

n – кількість обертів свердла, об/хв;

d – діаметр свердла, мм;

S – подача свердла, мм/хв.

Отримана залежність показує, що діаметр отвору має найбільший вплив на осьову силу. Це очевидно, оскільки зі збільшенням діаметра отвору осьова сила також зростає. Оскільки загальний вплив швидкості обертання шпинделя менший, ніж подачі, то в запропонованій системі використано керування подачею для отримання необхідної якості поверхні отвору.

Для реалізації зворотного зв'язку в АСК використовується залежність максимального коефіцієнта розшарування від осьової сили різання. Для її отримання використано результати експериментальних досліджень [2], де максимальний коефіцієнт розшарування визначали як максимальне значення від значень розшарувань на вході та виході свердла з оброблюваного матеріалу. При цьому використано поліноміальну регресію 4 порядку (рис. 5) у середовищі Matlab:

$$K_{розш} = -5,231685e-12P^4 + 1,046342e-08P^3 - 7,016552e-06P^2 + 0,0018712P + 0,8805905 \quad (3)$$

При цьому відносна похибка розробленої математичної моделі не перевищує 1,27%.

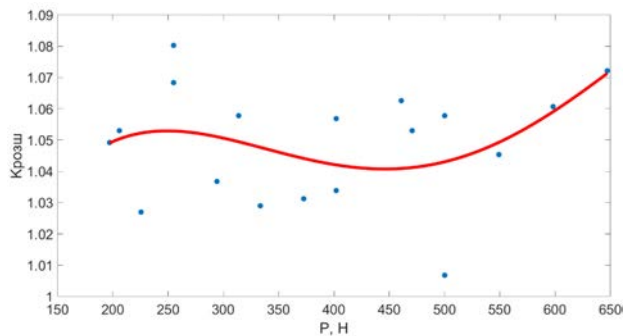


Рис. 5. Графік отриманої залежності коефіцієнта розшарування від осьової сили

Оброблення результатів експериментальних досліджень [11] за методом групового врахування аргументів дозволило отримати математичну залежність величини шорсткості поверхні отвору Ra від кількості обертів свердла n , подачі S та кута при вершині свердла ($angle$) $Ra = f(n, S, angle)$ із коефіцієнтом R-квadrat, що становить 0,955:

$$Ra = -0,604141 - 1,72594e - 07 \cdot n \cdot S + 0,00186921 \cdot S + 0,0293639 \cdot angle - 0,000148889 \cdot angle^2 \quad (4)$$

Для отримання даної залежності використано вуглепластик, що складається із 50% вуглецевого волокна за вагою з орієнтацією 0/90°. В якості матриці використана епоксидна смола. Композитний матеріал мав товщину $8 \pm 0,1$ мм та складався із 32 шарів. Використовуваний матеріал заготовки був у формі листа $160 \text{ мм} \times 160 \text{ мм} \times 8 \text{ мм}$, а потім розрізаний у формі брусків шириною 20 мм для подальшої механічної обробки. Процес свердління виконувався на вертикально-фрезерному верстаті з ЧПК (SMG-300) із використанням твердосплавних свердл діаметром 5 мм з кутами при вершині 60, 100 і 140 градусів. При цьому режими обробки варіювались в таких межах: кількість обертів n – від 1250 до 4000 об/хв та подача S – від 50 до 800 мм/хв [11].

Для реалізації процесу свердління в АСК з контролем параметра шорсткості обробленої поверхні за результатами експериментів [11] отримано математичну модель залежності шорсткості від осьової сили, візуальне представлення якої показано на рис. 6.

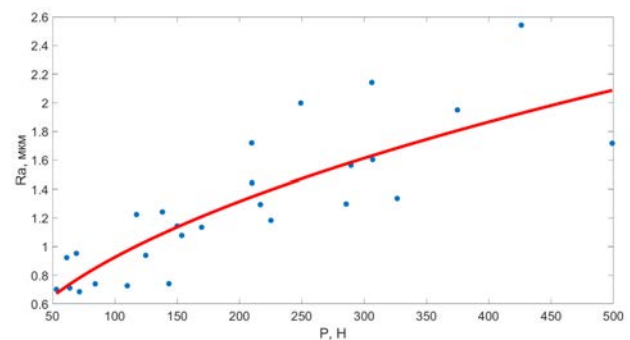


Рис. 6. Графік отриманої залежності шорсткості від осьової сили

У середовищі SPSS Statistics за допомогою модуля «Регресія» використано порівняння критичних для отримання залежності, що найкраще описує вхідні дані. Встановлено, що степеневий вид рівняння регресії найбільш точно апроксимує дану залежність (5) із зкорельованим коефіцієнтом R-квadrat, що становить 0,732.

$$Ra = 0,09P^{0,506} \quad (5)$$

В результаті статистичної обробки інформації можна стверджувати, що при підвищених обертах шпинделя, найменша подача та найменший діаметр свердла можуть забезпечити мінімальне значення осьової сили, мінімальний коефіцієнт розшарування та добру шорсткість обробленої поверхні.

Для реалізації свердління з максимальною продуктивністю N для розробленої АСК пропонується розв'язати оптимізаційну задачу, що ґрун-

тується на математичній моделі швидкості вида-лення матеріалу.

Необхідно визначити режими різання (швид-кість V і подачу S), що забезпечують

$$\max N = f(V, S), \quad (6)$$

в області допустимих рішень:

$$K_{розш} = f_1(V, S) \leq K_{розш, \max};$$

$$Ra = f_2(V, S) \leq Ra_{дон};$$

$$P \leq P_{крит};$$

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max};$$

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}.$$

При цьому кількість обертів свердла (n , об/хв) визначається через швидкість різання як:

$$n = \frac{1000V}{\pi \cdot d}, \quad (7)$$

де d – діаметр свердла, мм;

V – швидкість різання, м/хв.

Таким чином, шляхом розв'язання цієї оптимі-заційної задачі визначаються оптимальні режими різання, що мають найбільшу продуктивність про-цесу з забезпеченням заданих параметрів якості оброблених поверхонь (розшарування і шор-сткості) з врахуванням параметрів використовува-ного обладнання, різального інструменту і обро-блюваного матеріалу. За отриманими значеннями режимів різання виконується процес свердління з використанням АСК.

Висновки. Для реалізації раціонального про-цесу свердління деталей із вуглепластику запро-поновано використовувати автоматизовану сис-тему керування зі зворотним зв'язком на основі вимірювання осьової сили, оскільки її зна-чення безпосередньо пов'язане з параметрами якості – розшаруванням та шорсткістю обробле-ної поверхні.

Запропонована АСК дозволяє забезпечити задані параметри якості поверхні отвору, зміню-ючи подачу та підтримуючи оптимальне значення кількості обертів на основі значення осьової сили, що вимірюється п'єзоелектричним динамометром.

Створені математичні залежності розшару-вання і шорсткості обробленої поверхні від режи-мів різання дозволяють сформувавши математичну модель процесу свердління отворів у вуглепла-стику із максимальною продуктивністю.

Розроблена АСК може бути використана для оптимізації та контролю процесів оброблення широ-кого спектра композитних матеріалів, включаючи вуглецеві, арамідні та скловолокнисті матеріали.

Впровадження даної системи при виготов-ленні деталей із композиційних матеріалів сприяє збільшенню продуктивності, підвищенню його ефективності та якості виробів. Завдяки своїй гнучкості та рівню автоматизації, ця система є перспективним рішенням для сучасних вироб-ничих підприємств, що прагнуть оптимізувати свої процеси та підняти конкурентоспроможність на ринку готових виробів.

Список літератури:

1. Arul S., Vijayaraghavan L., Malhotra S. K. Online monitoring of acoustic emission for quality control in drilling of polymeric composites. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 185, no. 1–3. P. 184–190. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.114>.
2. Abhishek K., Datta S., Mahapatra S. S. Optimization of thrust, torque, entry, and exist delamination factor during drilling of CFRP composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 76, no. 1-4. P. 401–416. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6199-3>.
3. Singh A. P., Sharma M., Singh I. Optimal control of thrust force for delamination-free drilling in glass-fiber-reinforced plastic laminates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016. Vol. 231, no. 13. P. 2396–2407. URL: <https://doi.org/10.1177/0954405416629864>.
4. Dharan C. K. H., Won M. S. Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000. Vol. 40, no. 3. P. 415–426. URL: [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(99\)00065-6](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(99)00065-6).
5. Ho-Cheng H., Dharan C. K. H. Delamination During Drilling in Composite Laminates. *Journal of Engineering for Industry*. 1990. Vol. 112, no. 3. P. 236–239. URL: <https://doi.org/10.1115/1.2899580>.
6. Матошин О. В., Вислоух С. П. Прогнозування коефіцієнта розшарування отворів в деталях із вуглепла-стику. *XIX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефектив-ність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні»*, м. Київ, 20–21 груд. 2023 р. С. 122–126.
7. Петраков Ю. В. Стан і перспективи розвитку САМ-систем в машинобудуванні. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць*. 2013. № 2(68). С. 44–54.
8. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model / S. R. Karnik et al. *Materials & Design*. 2008. Vol. 29, no. 9. P. 1768–1776. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.03.014>.

9. Ohzeki H., Hoshi H., Arai F. Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites with Feedback Control Based on Cutting Force. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 2012. Vol. 6, no. 1. P. 52–64. URL: <https://doi.org/10.1299/jamdsm.6.52>.

10. Dobrinski A., Dudarev A. Intelligent automated drilling in the laminate composites and hybrid materials. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38, no. 4. P. 1980–1983. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.723>.

11. Shahrajabian H., Farahnakian M. Modeling and multi-constrained optimization in drilling process of carbon fiber reinforced epoxy composite. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2013. Vol. 14, no. 10. P. 1829–1837. URL: <https://doi.org/10.1007/s12541-013-0245-1>.

Matoshyn O.V., Vysloukh S.P. SYSTEM OF AUTOMATED CONTROL OF THE PROCESS OF DRILLING HOLES IN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER PARTS

High-quality machining of holes in parts made of composite materials remains a very difficult production task. The correct selection of cutting modes for the current layer of the processed material allows you to obtain the necessary surface quality with maximum productivity, and at the same time, the specified modes can lead to defects in the next layer of material. Therefore, it is advisable to use an automated cutting process control system (ACS).

The article presents an ACS for the process of drilling holes in carbon fiber reinforced polymer (CFRP) parts. Its structural and functional schemes, as well as the general algorithm of its operation, are presented. Mathematical dependences of thrust force on drilling modes and hole diameter, delamination factor on thrust force, roughness on drilling modes and point angle, as well as roughness on thrust force were developed. At the same time, a general mathematical model of the process of drilling CFRP parts is proposed, the optimality criterion of which is the maximum productivity of processing holes with limitations on quality parameters.

The proposed system uses a control algorithm based on current information through the use of technical automation tools and appropriate software. Based on the measured value of the thrust force in real time with a polling interval of 50 ms, the values of the delamination factor and the roughness of the hole surface are predicted according to the developed mathematical dependencies. At the same time, with the help of a programmable logic controller (PLC), the optimal value of the number of revolutions of the spindle is maintained using the main motion drive and feed control using the feed drive.

The use of ACS in the drilling process will allow maintaining the optimal values of the cutting modes, which ensure obtaining the necessary parameters of the hole delamination factor and the roughness of its surface.

Key words: *composite materials, carbon fiber reinforced polymer, drilling, delamination, roughness, automated control system, drilling modes, thrust force, optimal modes, productivity.*