

## АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕСУ СВЕРДЛІННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВУГЛЕПЛАСТИКУ

Механічне оброблення композитних матеріалів, включаючи вуглепластики, є актуальною темою для проведення досліджень. Операції свердління в цих матеріалах використовуються для отримання заклепкових і болтових з'єднань при складанні виробів. Для отримання з'єднань деталей з високою міцністю у вуглепластику необхідно просвердлити високоточні отвори без пошкоджень. Однак даний процес непростий в порівнянні з процесом свердління традиційних конструкційних матеріалів. Внаслідок притаманній багатофазності вуглепластику цей процес є більш складний. Тут свердло має проходити по черзі через матрицю і волокно (наповнювач), які мають різні властивості. Це ускладнює протікання даного процесу. Через високу швидкість деформації неоднорідного матеріалу в процесі свердління вуглепластику розподіл навантаження між матрицею та волокном є нерівномірним, що призводить до серії руйнувань у композитному матеріалі. Тому визначення оптимальних параметрів різання є одним з найважливіших завдань у дослідженні оброблюваності вуглепластиків.

У контексті розвитку масового та серійного виробництва параметрична оптимізація при свердлінні деталей із вуглепластику є надзвичайно важливою для досягнення балансу між вартістю, якістю та точністю. Дана технологічна операція характеризується наступними вхідними даними: кількість обертів свердла (або швидкість різання), подача, геометрія свердла (кут при вершині свердла або кут нахилу гвинтової канавки) та діаметр свердла. В якості параметрів процесу різання використовуються осьова сила, крутний момент та вихідні параметри – розшарування на вході в матеріал та виході з нього, а також ексцентриситет. При цьому важливо отримати оптимальні режими оброблення, які забезпечать максимальну продуктивність, тобто параметр швидкості знімання матеріалу потрібно максимізувати. В свою чергу, показники якості (розшарування та шорсткість поверхні) та параметри, що на них впливають, (осьова сила та крутний момент) потрібно мінімізувати. Із попередніх досліджень [1] встановлено, що особливу увагу потрібно приділяти саме розшаруванню, оскільки це є основним дефектом при свердлінні вуглепластику. Розшарування зазвичай визнається основною причиною зниження жорсткості та міцності деталей з композиту.

Вимірювання розшарування є складним процесом, і його можна виконати кількома методами. Зазвичай для вимірювання розшарування використовують цифрову обробку зображень, С-сканування, ультразвук, рентгенівське опромінення і лазерну візуалізацію. Через це даний параметр напряму вимірювати в процесі оброблення досить неефективно, тому доцільно отримати математичну залежність коефіцієнта розшарування від осьової сили. Для мінімізації розшарування, спричиненого свердлінням, використовували різні методи. Дослідники [1-3] намагалися оптимізувати робочі параметри, геометрію та матеріал інструменту, теоретичне моделювання сил свердління та використати деякі нетрадиційні методи просвердлювання отвору без пошкоджень у матеріалі.

Для підвищення ефективності процесу свердління отворів в деталях з вуглепластику пропонується використовувати систему автоматизованого керування (АСК). При цьому попередні дослідники [1] шляхом використання дисперсійного аналізу (ANOVA) визначали відсотковий внесок параметрів свердління та встановили, що подача є найбільш впливовим фактором при свердлінні деталей із вуглепластику, тому даним параметром доцільно керувати в АСК.

Метою використання АСК є отримання отвору з великою продуктивністю з забезпеченням необхідних параметрів якості, в тому числі й розшарування. Відповідними етапами процесу контролю є: запуск процесу із наперед визначеними (рекомендованими) 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 розшарування, в разі перевищення критичної осьової сили починається 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.

Під час свердління вуглепластику встановлено, що зі збільшенням кількості обертів шпинделя підвищується температура в зоні оброблення, що призводить до розм'якшення матеріалу матриці, тим самим зменшуючи ймовірність розшарування [1]. Збільшення кількості обертів свердла також забезпечує підвищення продуктивності оброблення. В свою чергу, розшарування починається, коли осьова сила перевищує критичне порогове значення. Слід зазначити, що осьова сила є ключовим елементом для опису оброблюваності композитних матеріалів, оскільки вона безпосередньо впливає на якість просвердлених отворів. Крім осьової сили, крутний момент також впливає на розшарування отворів. Оскільки осьова сила є основним фактором, що впливає на розшарування, кілька дослідників [3] намагалися зменшити дану силу під час свердління або якимись засобами підвищити критичну осьову силу. Наприклад, критична осьова сила може бути збільшена шляхом використання опорної плити під заготовкою. Встановлено, що використання спеціальних сверدل порівняно зі звичайними спіральними свердлами підвищує загальну ефективність процесу та забезпечує кращий контроль

розшарування. При цьому збільшення діаметра свердла збільшує площу контакту просвердленого отвору, що має тенденцію до збільшення осьової сили та, як наслідок, збільшення розшарування. З іншого боку, збільшення подачі також призводить до збільшення розшарування через збільшення осьової сили. Отже, у найгіршому випадку розшарування відбувається при найвищій подачі та низьких обертах шпинделя.

Таким чином, для мінімізації пошкодження отвору, пропонується контролювати параметри процесу та виконувати їх корегування в режимі реального часу. Тоді АСК на основі використання математичної моделі коефіцієнта розшарування може підтримувати значення осьової сили нижче критичного під час свердління вуглепластику. Вимірювання осьової сили рекомендується виконувати за допомогою п'єзоелектричного динамометра з подальшою обробкою його результатів.

Для створення математичної моделі пропонується провести комп'ютерний експеримент з використанням навченої штучної нейронної мережі (ШНМ) прямого розповсюдження. Коефіцієнт розшарування є функцією подачі, кількості обертів шпинделя, а також певного параметра свердла. Для навчання ШНМ доцільно використовувати алгоритм зворотного поширення помилки. При цьому структура нейронної мережі представлена на рис. 1. Вхідний шар містить 3 нейрони, на які поступають дані з кількістю обертів, подачею та діаметром свердла. Вихідний шар містить 1 нейрон, який прогнозує коефіцієнт розшарування отвору. Також структура даної нейронної мережі включає один прихований шар із певною кількістю нейронів, яка визначається методом проб і помилок.

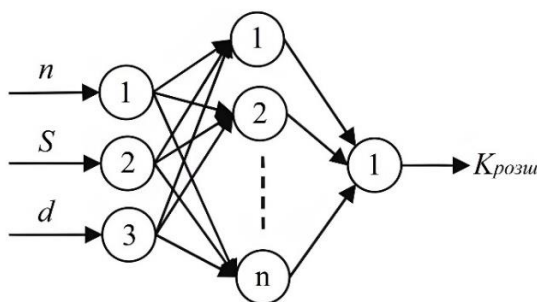


Рис. 1. Архітектура ШНМ для прогнозування коефіцієнта розшарування отвору

Загалом навчання нейронної мережі полягає в знаходженні оптимальних значень синаптичних ваг, що дозволить спрогнозувати вихідний параметр із бажаною точністю.

Таким чином, на основі спрогнозованих даних створюється математична модель процесу свердління отворів в будь-якому композиційному матеріалі. Отримана математична модель є основою для розв'язання задачі визначення оптимальних параметрів оброблення, які будуть початковими даними для роботи АСК.

Отже, механічна обробка без дефектів, що забезпечує високу продуктивність, справді є складним завданням при свердлінні вуглепластику. Це вимагає відповідних знань щодо поведінки процесу обробки, а також оптимізації параметрів обробки. Описана автоматизована система керування дозволить максимізувати продуктивність, забезпечуючи при цьому відсутність дефектів у деталі.

#### Література:

1. Bhushi U., Suthar J., Teli S. N. Performance analysis of metaheuristics optimization techniques for drilling process on CFRP composites. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 28. P. 1106–1114. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.091>.
2. Матошин О.В., Вислоух С.П. Моделивання шорсткості поверхонь, отриманих свердлінням композиційних матеріалів // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2023: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ – 2023); Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 19 квітня 2023 р. – с. 77 – 78.
3. Phapale K., Ahire A., Singh R. Experimental characterization and finite element modeling of critical thrust force in CFRP drilling. *Machining Science and Technology*. 2017. Vol. 22, no. 2. P. 249–270. URL: <https://doi.org/10.1080/10910344.2017.1337134>.