

УДК 621.91:678.5

## Прогнозування параметрів якості отворів в полімерних композиційних матеріалах

Б.В. Лупкін<sup>1</sup>, К.В. Майорова<sup>1</sup>, О.В. Андрєєв<sup>2</sup>, В.С. Антонюк<sup>3</sup>

1 – Національний аерокосмічний університет “ХАІ”, Харків, Україна

2 – ДП “Антонов”, Київ, Україна

3 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

***Анотація.** В статті розглянуто аналіз кінематики переміщення різального клину свердла відносно розміщення волокон наповнювача полімерних волоконних композиційних матеріалів. Виконано аналіз кінематики переміщення різального клину свердла відносно схеми розміщення волокон наповнювача полімерних волоконних композиційних матеріалів. На основі аналізу встановлено наявність зон циклічних зміни сил різання, що впливають на якість обробленої поверхні і зношення інструмента. Експериментальні і виробничі випробування проводились на зразках з вугле-скло-органопластиків, як з однонаправленими, так і з рівномірними багатшаровими, з метою визначення різних геометричних форм свердла. Експериментальні випробування проводились на зразках з вугле-скло-органопластиків, як з однонаправленими, так і з рівномірними багатшаровими, з метою визначення різних геометричних форм свердла. Вимірювання точності, шорсткості і усадки отворів проводились на приладах: Faro Fusion Arm, Abrus МП-7 і растровому електронному мікроскопі Zeis Твохур-450. Показано фрактографічні особливості руйнування волокон полімерних композиційних матеріалів після процесу свердління. Результати досліджень розраховані на широке коло користувачів, які спеціалізуються на питаннях механічного оброблення ПКМ при використанні інноваційних матеріалів конструкційного і поліфункціонального призначення.*

***Ключові слова:** полімерні композиційні матеріали, отвір, свердло, різальний клин, свердління, шорсткість, усадка.*

Сучасні полімерні композиційні матеріали такі, як вуглепластики та склопластики, широко використовуються в різних галузях машинобудування, зокрема в авіаційному виробництві. Це викликано унікальними їх властивостями – високою питомою міцністю, жорсткістю, стійкістю до корозії, низьким коефіцієнтом теплового розширення, електроізоляційними властивостями та анізотропією властивостей та іншими фізико-механічними характеристиками, що дозволяє створювати елементи конструкцій із заздалегідь прогнозованими властивостями виробу, що найбільш повно відповідають характеру та умовам роботи авіаційно-космічної техніки [1].

Механічне оброблення композиційних матеріалів є складним процесом внаслідок неоднорідності матриці та волокон, абразивності армуючих компонентів та анізотропній структурі. Крім того матеріали на основі вуглепластика, мають низьку теплопровідність та питому теплоємність, що призводить до підвищення температури в процесі механічного оброблення та розм'якшення матеріалу і термічної деградації. Таким чином, механічне оброблення композиційних матеріалів, особливо процеси свердління, пов'язані з дефектами поверхневого шару отриманої деталі та підвищеним зносом різального інструмента. [2].

Свердління є одним з найбільш доступних методів механічного оброблення отворів і в той же час найбільш складною операцією, тому що відбувається у закритій зоні оброблюваного матеріалу, а від подачі та головної і допоміжної різальних кромок формується шорсткість поверхні отвору. [3].

При обробленні отворів осьовими інструментами в волокнистих композиційних матеріалах Від деформаційних зусиль і тертя в зоні різання накопичується тепло в інструменті (65..80 %), яке потім передається в оброблюваний матеріал виникають значні складнощі, пов'язані із забезпеченням якості поверхні. Від деформаційних зусиль і тертя в зоні різання накопичується тепло в інструменті, яке потім передається в оброблюваний матеріал, а під дією

сил різання у поверхневих шарах отворів утворюються розшарування матеріалу, перерізання волокон, утворення ворсу та припали за рахунок деструкції матричного матеріалу.

З метою виявлення впливу процесу свердління отворів в полімерних композиційних матеріалів на параметри якості їх поверхонь у роботі проведено експериментальні дослідження на матеріалах з вуглепластику та склопластику (ANTONOV Company, Ukraine)/

Досліджувалися відкриті отвори в зразках полімерних композиційних матеріалів з вуглепластика ЕЛУР-П-01 і склопластика Т-10-14 товщиною  $2,0 \pm 0,2$  мм і шириною  $15 \pm 0,2$  мм з отвором 5 мм. Матеріал обрано з міркувань його розповсюдженості використання у авіаційному виробництві.

Дослідження виконані на електронному мікроскопі Zeiss ZEISS EVO 50 XVP (Carl Zeiss, ФРН), фрагменту поверхні після свердління вуглепластика УОЛ 300-2А свердлом з Р6М5К5 діаметром 5 мм з швидкістю різання  $V = 70$  м/хв; подача  $S = 0,1$  мм/об. Фрактографічні особливості руйнування волокон полімерних композиційних матеріалів після процесу свердління продемонстрували циклічність двох зон різання: світла – витянутих волокон, темна – втиснуті волокна задньою гранню різального клина (рис. 1) [4].

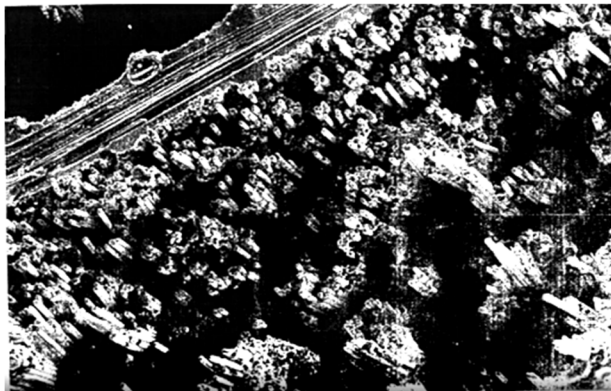


Рис. 1. Фрагмент поверхні після свердління вуглепластика УОЛ 300-2А свердлом діаметром 5 мм з Р6М5К5 (режим різання  $V = 70$  м/хв;  $S = 0,1$  мм/об)

При свердлінні отвору полімерних композиційних матеріалів під дією деформаційних зусиль, створюваних різальним клином свердла, на поверхні отвору в волокнах наповнювача виникають різні циклічні напруження: стискаючі у зоні кутів  $\varphi$  від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  (аналогічно від  $180^\circ$  до  $270^\circ$ ); розтягувальні в зоні кутів  $\varphi$  від  $90^\circ$  до  $180^\circ$  (аналогічно від  $270^\circ$  до  $360^\circ$ ), а в зоні кутів  $\varphi = 0^\circ$  та  $\varphi = 180^\circ$ , відбувається зміна зусиль з розтягуючих на стискаючі; у зоні кутів  $\varphi = 90^\circ$  і  $\varphi = 270^\circ$  відбувається дія зсуву волокна [3].

В процесі обертання свердла в монослої композиційного матеріалу різальний клин контактує з однонаправленими волокнами композиту, при цьому відбувається циклічна зміна сил різання.

Аналізуючи вплив кінематики руху інструмента на сили різання, з врахуванням того, що зусилля різання у композиті сприймаються, в основному, волокнами наповнювача визначимо характерні ділянки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  в процесі свердління. В процесі обертання свердла в монослої різальний клин контактує з однонаправленими волокнами композиту, при цьому відбувається циклічна зміна сил різання. В точках з кутами  $\varphi = 0^\circ$  ( $360^\circ$ ) і  $\varphi = 180^\circ$  відбувається зміна розтягувальних зусиль на зусилля стискання. (Рис. 2).

На ділянках кутів  $\varphi$  близьких до  $90^\circ$  і  $270^\circ$  розтягуючі нормальні сили  $N$  стиску знижуються, а стискаючі збільшуються, при цьому відбувається зсув волокон перпендикулярно їх розташуванню.

Така зміна сил різання позитивно впливає на процес різання, тому що зменшуються зусилля на відокремлення зрізаного припуску.

На таких ділянках отвору інструмент контактує з мінімальною площиною наповнювача, яка дорівнює площі зсуву по діаметру волокна, що сприяє підвищенню точності заданих розмірів, покращується шорсткість поверхні в порівнянні з іншими ділянками отвору.

На ділянках кутів  $\varphi = 0^\circ$  ( $360^\circ$ ) та  $\varphi = 180^\circ$  різальний клин інструмента контактує задньою поверхнею по максимальній площині (еліпсоїдній) зі зрізаємими волокнами композита, які

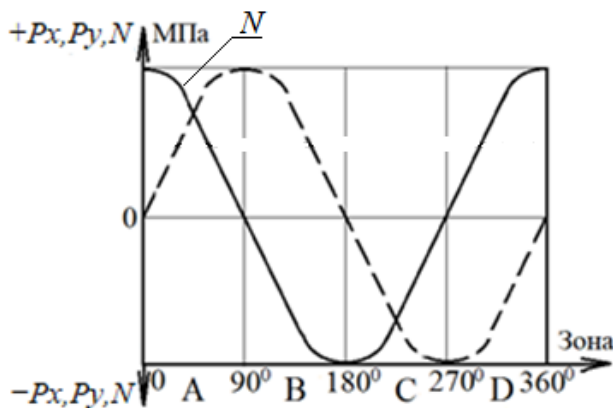


Рис. 2. Умовна схема сил різання при свердлінні композиційних матеріалів:  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $N$  – зовнішні сили різання

мають абразивні властивості (особливо склопластик). Відбувається процес “стругання”, що впливає на шорсткість та збільшує інтенсивність зносу різального клину.

На цих ділянках отвору, відбувається зміна з розтягувальних сил різання в волокнах наповнювача на стискаючі. Така зміна діючих сил різання призводить до руйнування поверхневого шару композита, а на поверхневих шарах композиту виникає розшарування і тріщини (граничний ефект).

На таких ділянках різальний клин контактує з матеріалом, розвиваються високий контактний тиск і температура.

Внаслідок чого, виникають великі дотичні напруження, які здатні визивати руйнування між волокон та матрицею.

У межах ділянок  $A$  і  $C$  кутами ( $\varphi = 0^\circ \div 90^\circ$  і  $\varphi = 180^\circ \div 270^\circ$ ) на волокна наповнювача діють зовнішні зусилля стиснення, при цьому різальний клин задньою поверхнею вдавлює волокна в матрицю. За такою схемою контакту інструмента складові сили різання зменшуються, покращуються такі показники якості поверхні, як шорсткість поверхні, збільшується точність оброблення.

На ділянках  $B$  та  $D$  в межах кутів від  $\varphi = 90^\circ$  до  $180^\circ$  та від  $270^\circ$  до  $360^\circ$  передбачається невисока якість поверхні після оброблення різанням. Під впливом сил різання, діючих на витягування волокон наповнювача відбувається в зменшені дійсних виконавчих розмірів отвору, збільшується утворення тріщин і шорсткості, порівняно із зонами різання  $A$  і  $C$ .

Прийняте припущення на ділянках  $B$  і  $D$  ґрунтуються на збільшені нормальних сил різання ( $N$ ), що діють вздовж волокон. Діючі сили різання  $N$  порівняно з адгезійними та тангенціальними силами зчеплення значно більші ( $N \geq P_{адз}$ ), а також з урахуванням теплового фактору в зоні контакту відбувається “витягування” волокон наповнювача із матриц.

В зонах кутів  $\varphi = 90^\circ$  і  $\varphi = 270^\circ$  нормальне зусилля  $N$  співпадає з зусиллям складової сили різання  $P_y$  і діє на зсув волокна.

Шорсткість поверхні циліндричної частини отвору створюється за рахунок кінематики одночасного обертання і подачі свердла. Формоутворюючими цієї поверхні є різальні клини (кромки), яка утворюється за рахунок пересікання конусних різальних кромки забірної частини свердла і бокових різальних кромки циліндричної частини свердла.

За рахунок обертання і подачі різальний клин забірної частини свердла, який проходить попередньо, створює на циліндричній поверхні отвору “первинну” шорсткість. З подальшою подачею і обертанням свердла за допомогою бокових різальних кромки формується остаточна геометрична шорсткість, без урахування в’язкопружних властивостей конкретного матеріалу і його усадки.

З урахуванням викладеного висота геометричної шорсткості після свердління композиційного матеріалу дорівнює[3]:

$$Rz = \frac{S}{2 \left( \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi} + \frac{1}{\operatorname{tg}\omega} \right)},$$

де  $S$  – подача свердла, мм/об;  $\varphi$  – кут крайки забірної частини свердла;  $\omega$  – кут бокової спіральної частини свердла.

Отримана залежність ґрунтується на основі аналізу кінематичної схеми контактування, при переміщенні в структурованому полімерному композиті різального клину, встановлення характерних ділянок зони контакту, а також на теоретичних розрахунках сил різання і визначенні шорсткості поверхні при свердлінні.

Комплексні експериментальні дослідження проводились на верстаті 2Б-108, а також на верстаті з ЧПК – 2К13502 в яких можлива зміна чисел обертів.

Для експериментів використовували свердла з швидкорізальних сталей Р6М5, а також з твердого сплаву ВК8 діаметрами свердл від 4 до 10 мм. Свердла з підрізаючою кромкою, стандартні і перові заточувались у відповідності міжгалузевим рекомендаціям .

Для перевірки гіпотези впливу кута розміщення різального клину відносно орієнтації структурного наповнювача в композиційному матеріалі, були виготовлені зразки з вуглепластика на зв’язуючих 5-211-БН, товщиною  $\approx 1$  мм (10 шарів вугленаповнювача ЕЛУР-П-01 з симетричною схемою укладки  $[90^\circ; \pm 45^\circ; 0^\circ; 0^\circ; \pm 45^\circ; 90^\circ]_s$ ); з склопластика Т-10-14 і органопластика Т-42/1-76 товщиною 1,8 мм (8 шарів наповнювача зі схемою укладки  $[90^\circ; 0^\circ; 0^\circ; 90^\circ]_s$ , товщиною  $\approx 2.8$  мм.) з орієнтацією моношарів волокон наповнювача в зразках  $\pm 0^\circ$ .

На установці Faro Fusion Arm виконували замір номінальних розмірів отворів в експериментальних зразках, а шорсткість та усадка поверхні на профілометрі моделі “Абрус МП7” з цифровим відліком, а також на растровому електронному мікроскопі Zeiss EVO 50 ХУР з аналізатором рентгенівських спектрів INCA ENERGY 450/

## Висновки

Аналізуючи отримані результати замірів в характерних ділянках отвору можна зробити наступні висновки:

1. Експериментально отримана висота шорсткості підтверджує адекватність розрахунків в межах похибки 10...15 %.
2. Найбільша величина усадки, з орієнтацією волокон відносно різального клину, відбувається в зонах  $B$  і  $D$ , менша в зонах  $A$  і  $C$ ;
3. Свердлами з підрізаючими кромками отримано найбільш точні отвори по діаметру з меншою величиною усадки.

## Список літератури

1. Seo J. Predictive modeling and experimental analysis of the drilling process of Carbon Fiber Reinforced Polymer composite laminates: doctoral thesis. 2021. 120 p. <https://m2.mtmt.hu/api/citation/30322226?&labelLang=eng>
2. Altın Karataş M., Gökkaaya H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. Defence Technology. 2018. Vol. 14, no. 4. P. 318–326. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.02.001>
3. Formation of the quality of holes obtained by drilling in aviation structures made from polymer composite materials. Lupkin, B., Andriev, O., Maiorova, K., Antonyuk, V., Vysloukh, S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023, 3(1(123)), pp. 59–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.279618>.
4. Experimental Studies of the Holes Quality Parameters in Polymer Composite Materials / Lupkin, B., Andriev, O., Maiorova, K., Antonyuk, V., Tolstoi, S. // *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2024, 1069 LNNS, pp. 589–602. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-66268-3\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-031-66268-3_60).

## Prognostication studies of the holes quality parameters in polymer composite materials

B. Lupkin<sup>1</sup>, K. Maiorova<sup>1</sup>, O. Andrieiev<sup>2</sup>, V. Antonyuyk<sup>3</sup>

1 – National Aerospace University “KAI”, Kharkiv, Ukraine

2 – State Enterprise “Antonov”, Kyiv, Ukraine

3 – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The article considers the analysis of the drill's cutting wedge movement kinematics relative to the filler fibers placement of polymer fiber composite materials. The analysis of the drill's cutting wedge movement kinematics relative to the filler fibers placement of polymer fiber composite materials was performed. Based on the analysis, the presence of cyclic change zones in cutting forces was established, which affects the machined surface quality and tool wear. Experimental and production tests were carried out on samples of carbon-glass-organic plastics, both with single-directional and with equal-strength multilayer, in order to determine different geometric shapes of the drill. Experimental tests were carried out on carbon-glass-organic plastics samples, both with single-directional and with equal-strength multilayer, in order to determine different geometric shapes of the drill. Measurements of accuracy, roughness and shrinkage of holes were carried out on the following devices: Faro Fusion Arm, Abrus MP-7 and scanning electron microscope Zeis Tvoxyp-450. Fractographic features of polymer composite materials fiber fracture after the drilling process are shown. The results of the research are designed for a wide range of users specializing in the issues of mechanical processing of PCM when using innovative materials of structural and multifunctional purpose.

**Keywords:** polymer composite materials, hole, drill, cutting wedge, drilling, roughness, shrinkage.