

ХАВІН Г. Л., ЧЖИВЕНЬ Х.

ВПЛИВ КУТУ ОРІЄНТАЦІЇ АРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ЗНОШУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ОБРОБЦІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Відносний кут між напрямком волокон армування і вектором швидкості різання, що визначається як кут орієнтації елементів армування, значно впливає на режим формування стружки, сили різання і підсумкову якість поверхні. При механічній обробці полімерних композиційних матеріалів має місце надзвичайно інтенсивне зношування по задній поверхні. У цій роботі представлений аналіз проблеми впливу кута орієнтації волокон у полімерному композиті на інтенсивність зношування ріжучого інструменту. Для запропонованої раніше спадково-старіючої моделі втрати ваги інструментом за рахунок зношування, запропоновано враховувати вплив кута армування через залежність контактної тиску та коефіцієнта тертя від цього параметра. У статті розроблено узагальнюючу модель практичного урахування відомого заздалегідь кута армування для прогнозування зношування інструменту та його стійкості при механічній обробці полімерних композиційних матеріалів.

Ключові слова: кут армування, інтенсивність зношування, спадково-старіюча модель, обробка полімерних композитів.

KHAVIN G., ZHIVEN H. THE ORIENTATION ANGLE OF REINFORCING ELEMENTS INFLUENCE ON TOOL WEAR INTENSITY IN PROCESSING POLYMER COMPOSITES

The relative angle between the direction of the reinforcing fibers and the cutting speed vector, defined as the angle of the reinforcing elements orientation, has a significant impact on the chip formation mode, cutting forces and the final surface quality. During machining of polymer composite materials, high-intensity wear occurs along the flank surface. This paper presents an analysis of the problem of the orientation fibers angle influence in a polymer composite on the cutting tool wear rate. For the previously proposed hereditary-aging model of tool weight loss due to wear, it is proposed to take into account the influence of the reinforcement angle through the dependence of the contact pressure and friction coefficient on this parameter. The article develops a generalizing model for practical consideration of the known in advance angle of reinforcement to predict tool wear and tool life during of polymer composite materials machining.

Key words: reinforcement angle, wear intensity, hereditarily-aging model, polymer composites processing.

Вступ. Композитні матеріали, завдяки своїм високим механічним властивостям, переважні в галузях промисловості, де потрібна мала вага і висока міцність. Виробники прагнуть виготовити деталі з композитів за одну операцію (формування, загартування, обробка тиском). Однак часто потрібна подальша механічна обробка, для складання або використання. Виробляються такі операції, як видалення залишків і надлишкового матеріалу, згладжування поверхонь, що сполучаються і виготовлення отвору для складання компонентів. Як правило, ці післявиробничі потреби задовольняються за допомогою традиційних методів механічної обробки, таких як звичайне точіння, свердління, гвинтове фрезерування, гвинтове фрезерування під кутом, фрезерування з коливанням, бічне фрезерування або обрізка кромки.

Різання вугле- та склопластикових композиційних матеріалів складна та дорога операція. Через неоднорідність та анізотропію матеріалу виникають характерні геометричні похибки, викликані механічною обробкою та механізмами стружкоутворення, які істотно залежать від напрямку обробки. Армуючі елементи мають сильний абразивний ефект зносу, який слід враховувати при виборі різального інструменту і верстата. Відведення тепла також проблематичне через низьку теплопровідність полімерів та небезпеку використання мастильно-охолоджуючих рідин (затікання полімеру). Ці властивості породжують безліч мікро- та макрогеометричних дефектів матеріалу, таких як розшарування, нерозрізані волокна, вигорання матриці, витягування волокна, виходи або мікротріщини.

Аналіз основних досягнень та літератури. З численних експериментальних досліджень відомо, що відносний кут між напрямком волокна і вектором швидкості різання, що визначається як кут орієнтації волокна, має основний вплив на режим формування стружки, сили різання та підсумкову якість поверхні. Наприклад, у процесі токарної обробки вектор швидкості різання ріжучої кромки щодо заготівлі завжди стосується кола різання в площині, перпендикулярної осі обертання і залишається незмінним. Таким чином, кут орієнтації волокон при токарній обробці залежить від способу укладання волокон, використаного при виготовленні композитної циліндричної деталі.

Особливість різання інструментом, що обертається, наприклад, при фрезеруванні, свердлінні і абразивному різанні, на відміну від лінійної ортогональної обробки, полягає в тому, що кут орієнтації волокон θ не є постійним, а безперервно змінюється в залежності від положення ріжучої кромки ріжучого інструменту. При фрезеруванні та абразивному різанні товщина стружки також залежить від положення ріжучої кромки. Виникає знос інструменту пов'язаний з взаємодією інструменту із заготовкою у зоні контакту ріжучого інструменту, який за даними [1], істотно варіюється від орієнтації волокон. Тому аналізу параметрів зносу інструменту залежно від орієнтації волокон було приділено особливу увагу [2–4].

Такі фундаментальні дослідження зазвичай виконуються з використанням ортогональних операцій обробки у зв'язку із зменшеною складністю кінематики та її придатністю для диференційованого експериментального аналізу.

Процес поздовжньої торцевої токарної обробки з різною орієнтацією волокон для дослідження характеристик зносу різальних інструментів без покриття залежно від кута різання волокна θ , який визначається як кут між орієнтацією волокна та напрямом швидкості різання, представлений у [2].

Враховуючи дослідження в [5], у роботі [2] виявлено сильну залежність зносу інструменту від кута зрізу волокна θ . При цьому найбільш інтенсивне зношування по задній поверхні спостерігалось при кутах зрізу волокна від $\theta = 30^\circ$ до $\theta = 90^\circ$, а при $\theta = 0^\circ$ і $\theta = 150^\circ$, спостерігалася лише невелика зміна геометрії ріжучої кромки, пов'язана зі зносом. Цей факт став наслідком істотної різниці у процесі формування стружки. Таким чином, обробка волокна під кутом $\theta = 30^\circ$ і $\theta = 60^\circ$ пов'язана з найвищими загальними осьовими зусиллями та найвищим пружним відтисканням матеріалу, що в поєднанні призводить до найвищих загальних навантажень на інструмент і, таким чином, інтенсивного зносу. Відповідно до [6], кути різання волокна між $\theta = 0^\circ$ і $\theta = 90^\circ$ можна розділити на три інтервали, в яких мають місце подібні механізми утворення стружки і, отже, основні характеристики зносу: $0^\circ \leq \theta < 15^\circ$ (інтервал I), $15^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ (інтервал II) та $75^\circ < \theta \leq 90^\circ$ (інтервал III).

У роботі [7] проаналізовано вплив кута зрізу волокна на коефіцієнт тертя та питому швидкість зношування. Встановлено, що починаючи з $\theta = 0^\circ$ коефіцієнт тертя і питома швидкість зношування збільшуються зі збільшенням кута зрізу волокна. Крім того, авторами встановлено, що питома швидкість зношування при $\theta = 90^\circ$ приблизно втричі вище, ніж при $\theta = 0^\circ$.

Щоб проаналізувати знос по задній поверхні, округлення радіусу ріжучої кромки та кількість зношеного матеріалу інструменту для максимальної довжини різання 8 м, в [3] були виконали операції обрізки кромки. Для цих експериментів були використані чотири різні кути зрізу волокна $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\theta = 135^\circ$, дві швидкості різання 19,9 м/хв. та 119,7 м/хв, при постійній подачі 0,3 м/хв. Згідно з представленими результатами найбільш інтенсивне зношування по задній поверхні припадає на $\theta = 45^\circ$, а найбільший радіус ріжучої кромки у зношеному стані при $\theta = 90^\circ$.

Процес контактної взаємодії інструменту та елементів армування найбільш істотно визначається взаємною орієнтацією напряму армування та руху інструменту. Це поєднання також визначає характер руйнування та утворення стружки, і, як наслідок, силу різання, коефіцієнт тертя та температуру в зоні контакту, а отже, і інтенсивність зношування.

У роботі [8] представлені експерименти з обрізки кромки на односпрямованих ламінатах з різною орієнтацією волокон, які виявили три основних механізми утворення стружки: злам уздовж межі розділу волокно-матриця при різанні ламінату під кутом орієнтації 0° ; злам перпендикулярно осі волокна при різанні ламінату з волокном орієнтацією між 30° та 75° ; міжшарова тріщина зсуву і перпендикулярна тріщина осі волокна при різанні з орієнтацією волокна 90° і вище. Аналогічні дослідження були представлені в [9,10] з кутами шарів 0, 30, 60, 90, 120 та 150° . Механізми були поділені на вигин волокна, відшарування волокна від матриці та короблення волокон.

Незважаючи на численні роботи, присвячені стружкоутворенню при обробці, механізми зношування інструменту під час процесу ще не повністю встановлені. В даний час відомо, що режим зношування при різанні вуглепластику сильно відрізняється від типових режимів зношування, виявлених при різанні металевих сплавів, тобто поверхневий та кратерний знос. Так в [11] прийнято як основний вид зносу при обробці вуглепластику задане закруглення ріжучої кромки (CER). У [12] вивчали вплив орієнтування наповнювача через зв'язок між зносом інструменту і шорсткістю поверхні шляхом проведення експериментів з попутного фрезерування ламінату з кутами 0° , 90° і $0^\circ/90^\circ$ при швидкості різання 30 м/хв, подачі 0,05 мм/об та глибині різання 2 мм при використанні твердого сплаву без покриття та полікристалічного алмазного (PCD) інструменту. Були визначені різні параметри зношування, і один із цих параметрів, визначений як висота ріжучої кромки, тісно пов'язаний з якістю обробки поверхні.

У роботах [13–15] вивчали знос кінцевих твердосплавних фрез при обрізанні кромки і фрезеруванні вуглепластику в присутності СОЖ та умовах сухого різання, щоб знайти вплив цих процесів на шорсткість поверхні та знос інструменту. Було показано, що при нижчій подачі інструмент з алмазним покриттям набагато краще з точки зору зношування та чистоти поверхні. Однак при більш високій подачі перевага алмазного покриття зникає через сколи та відшарування.

У [16,17] вивчався вплив різних кутів нахилу спіралі при кінцевому фрезеруванні шарів 0° , 90° , 45° , 135° . Основна відмінність від ортогонального різання під кутом (косого, коли кут підйому спіралі $\neq 0^\circ$) полягає в присутності зусилля по осі інструменту, що викликає підвищений знос.

В [18] отримані результати про найбільше зношування по задній поверхні в шарах 45° і 90° , що набагато більше, ніж 0° і -45° , при фрезеруванні вуглепластику. З іншого боку, у [19,20] задекларований максимум зносу під кутом 30° і 60° при ортогональному точінні на 0° , 30° , 60° , 90° , 120° і 150° шарів, оскільки ці зразки вуглепластику вимагали більш високої сили різання.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою даної роботи є обґрунтування і створення теоретичної моделі для обліку впливу орієнтації (кута армування) наповнювача на інтенсивність зношування вершини інструменту.

Фактично йдеться про можливий кількісне урахування фактору різної орієнтації волокон на зношування інструменту.

Матеріали дослідження. Численні експериментальні дослідження з вивчення впливу орієнтації (кута армування) наповнювача [21–25] дозволили зробити ряд якісних висновків:

- прогресуюче зношування інструменту характеризується, перш за все, безперервним зменшенням заднього кута, і одночасно зростанням довжини контакту через посилене пружне відновлення зрізаного шару матеріалу;
- знос інструменту по задній поверхні крім силового навантаження визначається орієнтацією волокон і початковим заднім кутом, а вплив початкового переднього кута незначний;
- висота пружного відновлення зрізаного шару сильно залежить від кута зрізу волокон і початкового заднього кута, причому висота тим вище, чим менше початковий задній кут і зменшується, якщо кут зрізу волокна збільшується;
- залежність інструментального матеріалу, що втрачається, від часу контактної взаємодії майже лінійна, і це означає, що швидкість зносу не залежить від зміни геометрії ріжучої кромки;
- найінтенсивніша втрата матеріалу спостерігається при різанні композитів з кутом армування 30° і 60° і з малим початковим заднім кутом;
- сила різання збільшується із збільшенням кута орієнтації до значення 90° для більшої подачі, але знижується вище 65° для меншої подачі.

У роботі [26] запропоновано спадково-старіючу модель втрати ваги інструментом у процесі зношування, згідно з якою швидкість зносу визначається співвідношенням

$$\frac{dv(t)}{dt} = K_{wear} \cdot \frac{\mu \cdot F_n}{[\tau_{sh}]} \cdot \frac{HV_{fill}}{HV_{tool}} \cdot V \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}}, \quad (1)$$

де dv/dt – швидкість видалення об'єму матеріалу вершини інструменту, m^3/c , F_n – нормальна складова сили різання в контакті (може бути визначено експериментально), Н; μ – коефіцієнт тертя у контакті; $[\tau_{sh}]$ – допустима напруга зрізу матеріалу наповнювача, N/m^2 ; HV_{fill}, HV_{tool} – твердість матеріалу наповнювача (елемента армування) та матеріалу ріжучого інструменту, N/m^2 ; V – відносна швидкість ковзання (руху вершини інструменту), m/c ; Q – енергія активації, Дж/моль; R – універсальна газова постійна, Дж/(моль \cdot °C); T – температура в зоні різання, °K; t – час, с; K_{wear} – коефіцієнт об'ємного зношування, що визначає форму та інтенсивність зношування поверхні інструменту в часі.

Встановлено [1], що сили різання (дотична і нормальна) в першу чергу залежать від орієнтації волокон, а умови експлуатації та геометрія інструменту мають значно менший вплив. Сила різання (головна) зазвичай поступово збільшується з орієнтацією волокна приблизно 60° , та був значно збільшується при обрізанні кромки з орієнтацією волокна 90° . Потім головна сила зменшується з подальшим збільшенням орієнтації волокна, при цьому значне зменшення між орієнтаціями 100° і 165° . Про зсув максимальної головної сили свідчать дані [27]. Можлива причина такого зсуву – мала глибина різання та великий позитивний передній кут, що використовується у цьому експерименті. Спостережуване значне відтискання пов'язане з малою глибиною різання, а різке збільшення/зменшення основних сил, ймовірно, пов'язане зі зміною режиму формування стружки.

В роботі [1] запропоновано параметр орієнтації результуючої сили по відношенню до напрямку різання, що визначається виразом $\lambda = \tan^{-1}(F_c/F_t)$. Результуюча орієнтація означає відношення величин F_c та F_t . Осьова сила більша за силу різання для результуючих орієнтацій більше 45° . На відміну від різання металу, це співвідношення зберігається для орієнтацій волокон $0^\circ < \theta \leq 75^\circ$, за винятком даних [28,30]. В цілому, осьова сила показує складнішу поведінку, ніж сила різання. Збільшення осьової сили спостерігається при різанні невеликих волокон з позитивною орієнтацією, потім осьова сила зменшується з подальшим збільшенням орієнтації волокон, рис.1. Високі значення осьової сили, ймовірно, пов'язані з пружним відновленням контактного шару, що зазнав деформації перед руйнуванням. Пружна енергія волокон вивільняється після того, як волокна розірвані, створюючи осьову силу на задній поверхні інструменту та забезпечуючи цим її знос.

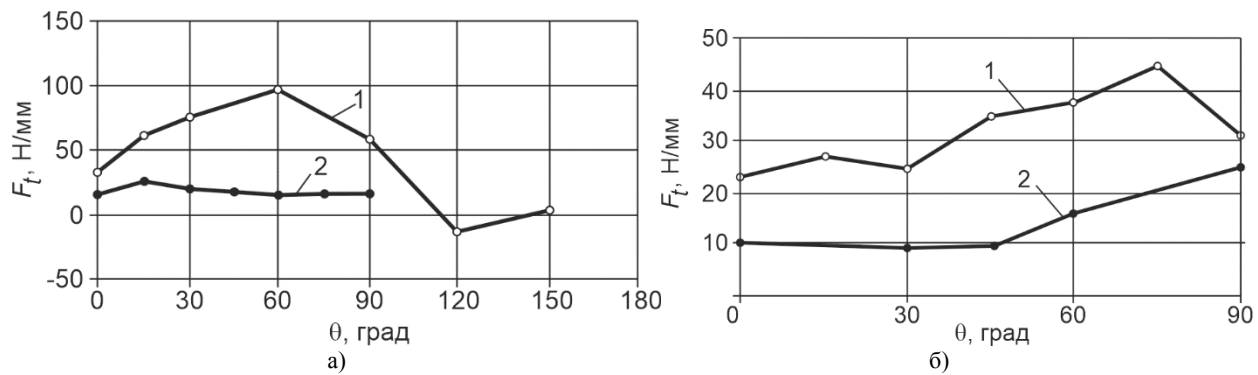


Рис. 1 – Напрямок та величина результуючої сили при ортогональній обробці різних армованих композитів: а) углепластик: 1 – [28], 2 – [27]; б) склопластик: 1 – [29], 2 – [30].

При обробці армованих композитів спостерігається високий рівень коливання сил різання. Коливання основної сили або сили різання вищі, ніж коливання осьової сили. Ступінь флуктуації залежить насамперед від орієнтації волокон і значною мірою корелює зі способом утворення стружки, що переважає при різанні волокон з певною орієнтацією. При різанні паралельно волокнам з позитивним переднім кутом флуктуації сили вказують на відшаровування та згинання/руйнування волокон розташованих на передній поверхні. При різанні волокон з позитивним кутом орієнтації, ріжуча сила відображає зміни в процесі зсуву та руйнування волокон і матриці матеріалу зі зміною орієнтації волокон. Осьова сила відображає взаємодію між оброблюваною та задньою поверхнею інструменту. Ступінь флуктуації сили зменшувалась із збільшенням кута орієнтації волокон, а потім збільшувалась при різанні волокон під кутом 90° і вище. Відзначено, що характер флуктуації сили при перерізанні волокон з великими кутами (більше 90°) помітно відрізняється від такої при перерізанні волокон із малою позитивною орієнтацією (0–75°). При різанні волокон з великою позитивною орієнтацією сильні коливання пов'язані з пресуванням, потім зрізанням волокон і розтріскуванням матриці.

З іншого боку експериментальні дослідження зношування показали яскраво виражену залежність коефіцієнта тертя від кута орієнтації волокон у композиті та їхнього об'ємного вмісту.

В роботі [31] представлені результати зміни величини коефіцієнта тертя від орієнтації волокон. Загальна орієнтація значень у діапазоні кутів нахилу волокон від 0 до 90° має характер, близький до лінійного.

Пропонується прийняти наступний пріоритет впливу різних факторів на величину коефіцієнта тертя: орієнтація волокон, загальний вміст волокон, температура в зоні контакту та швидкість взаємодії. На першому етапі пропонується розрахувати коефіцієнт тертя μ із співвідношення

$$\mu = (k_{\mu} \cdot \theta / \theta_{90} + \mu_0) \cdot K_{vr}, \quad (2)$$

де $\theta = 0$ – поздовжнє армування, $\theta_{90} = 90$ – нормальне армування, град, не більше 90 в абсолютному значенні); k_{μ} – постійний коефіцієнт, який визначається з експериментів або дослідів; K_{vr} – коефіцієнт, що враховує вплив величини об'ємного вмісту елементів армування у композиті на коефіцієнт тертя; μ_0 – прийняте вихідне значення коефіцієнта тертя, для умов поздовжнього армування ($\theta = 0$). Для армування при $\theta > 90$ співвідношення (2) запишеться у вигляді $\mu = (k_{\mu} \cdot (180 - \theta) / \theta_{90} + \mu_0) \cdot K_{vr}$.

Коефіцієнт, що враховує вплив величини об'ємного вмісту елементів армування у композиті на коефіцієнт тертя, пропонується прийняти у вигляді $K_{vr} = \mu_{x\%} / \mu_{n\%}$, де $\mu_{x\%}, \mu_{n\%}$ – коефіцієнти тертя для композиту з об'ємним вмістом елементів армування $x\%$ та $n\%$, обчислених з використанням закону змішування; $\mu_{n\%}$ – нормуючий коефіцієнт тертя, при об'ємному вмісті наповнювача для якого є дані залежності коефіцієнта тертя від кута армування θ° . Іншими словами, якщо ми маємо дані про залежність коефіцієнта тертя від кута армування для деякого змісту наповнювача, то значення коефіцієнта тертя для цього змісту буде нормуючим.

Із загальних міркувань можна припустити, що на коефіцієнт тертя впливатиме не тільки напрям укладання елементів армування, а й їх об'ємний зміст. Проте будь-які систематичні відомості з цього приводу відсутні, як і достовірні експериментальні дані. Логічно припустити лінійний характер цієї залежності з якісною характеристикою типу, чим більше волокон у контакті, тим сильніше вплив наповнювача. Наприклад, для нормального армування можна припустити, що при 60% вмісті волокон армування число контактів інструменту буде в два рази більше, ніж при 30% армуванні. Однак, швидше за все це не так, тому що в процесі взаємодії беруть участь продукти руйнування, і елементи, що армують, зрізуються не на однаковій висоті.

Тому для врахування впливу цього фактору при обчисленні коефіцієнта тертя, що враховує вплив величини об'ємного вмісту елементів армування, було запропоновано використовувати закон змішування у вигляді [32]

$$\mu_{x\%} = (V_r/\mu_r + V_b/\mu_b)^{-1}, \quad (3)$$

де V_r, V_b – об'ємний вміст наповнювача і сполучного, причому $V_r + V_b = 1$; μ_r, μ_b – коефіцієнти тертя матеріалу елементів армування і сполучного.

Висновки. Облік кута орієнтації елементів армування при обробці композиційних матеріалів є необхідною умовою якісної обробки виробів, що за значимістю не поступається вибору геометричних параметрів інструменту. Величина кута армування визначає характер стружкоутворення та інтенсивність зношування по задній поверхні ріжучої частини інструменту. Було встановлено, що найінтенсивніша втрата матеріалу спостерігається при різанні композитів з кутом армування 30° та 60° та з малим початковим заднім кутом. Сила різання збільшується зі збільшенням кута орієнтації до 90° для більшої подачі, але знижується вище 65° для меншої подачі.

Для абразивного зношування вершини інструменту при механічній обробці полімерного композиту пропонується розширений закон спадково-старіючого зношування в контакті, що дозволяє точніше описувати процес зношування вершини інструменту і прогнозувати його працездатність.

Урахування впливу кута армування у формулюванні закону спадково-старіючого зношування відбувається через величину нормальної сили, що діє на задній поверхні вершини різця та коефіцієнта тертя, що залежить від орієнтації волокон, загального їх вмісту волокон, температури в зоні контакту та швидкості взаємодії.

Список літератури

1. Sheikh-Ahmad J.Y. Machining of polymer composites / J.Y. Sheikh-Ahmad. – Springer, 2009.– 315 p. <https://citations.springernature.com/book?doi=10.1007/978-0-387-68619-6>
2. Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces / M. Henerichs, R. Voss, F. Kuster, K. Wegener // CIRP J Manuf. Sci. Technol., 2015.– 9. – P. 136–145.
3. The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates / D. Nguyen, M.S.B. Abdullah, R. Khawarizmi etc. // Wear, 2020. – 450. – P. 203–213.
4. Fiber orientation angle effects in machining of unidirectional CFRP laminated composites / V. Madhavan, G. Lipczynski, B. Lane, E. Whintont // Manufactory Process, 2015. – 20. – P.431–442.
5. Davim J.P. Machining composite materials / J.P. Davim.– John Wiley & Sons, Hoboken, 2009. <https://www.wiley.com/en-us/Machining+Composites+Materials-p-9781848211704>.
6. Analytical force model for orthogonal machining of unidirectional carbon fibre reinforced polymers (CFRP) as a function of the fibre orientation / R. Voss, I. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // J Material Process Technology, 2018.– 263.– P.440–469.
7. Sharma M., Rao I.M., Bijwe J. Influence of fiber orientation on abrasive wear of unidirectionally reinforced carbon fiber– polyetherimide composites / M. Sharma, I.M. Rao, J. Bijwe // Tribology Int., 2010.– 43(5).– P.959–964.
8. Wang D.H., Ramulu M., Arola D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate / D.H. Wang, M. Ramulu, D.Arola//International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995. – 35.– P.1623–38. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00014-O](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00014-O).
9. Pwu HY, Hocheng H. Chip Formation Model of Cutting Fiber-Reinforced Plastics Perpendicular to Fiber Axis. Journal of Manufacturing Science and Engineering 1998;120:192. <https://doi.org/10.1115/1.2830100>.
10. Zhang L.C., Zhang H.J., Wang X.M. A force prediction model for cutting unidirectional fibre-reinforced plastics / L.C. Zhang, H.J. Zhang, X.M. Wang // Machining Science and Technology, 2001.– 5.– P. 293–305. <https://doi.org/10.1081/MST-100108616>.
11. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009. – 49.– P.1185–1196. <https://doi.org/10.1016/j.jmachtools.2009.08.002>.
12. Effects of fiber orientation direction on tool-wear processes in down-milling of carbon fiber-reinforced plastic laminates / S. Maegawa, Y. Morikawa, S. Hayakawa etc. // International Journal of Automation Technology, 2015.– 9. – P.356–364. <https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0356>.
13. Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic / M.K. Nor Khairussihma, C.H. Che Hassan, A.G. Jaharah etc. // Wear 2013, – 302. – P.1113–1123. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.043>.
14. Muhamad Khairussaleh N.K., Che Haron C.H., A. Ghani J. Study on wear mechanism of solid carbide cutting tool in milling CFRP / N.K. Muhamad Khairussaleh., C.H. Che Haron, A. Ghani J. // Journal of Materials Research, 2016. –31. – P.1893–1899. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.21>.
15. Inoue T., Hagino M. Cutting Characteristics of CFRP Materials with Carbon Fiber Distribution / T. Inoue, M. Hagino // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P. 285–291. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0285>.
16. Inoue T., Hagino M. Cutting Characteristics of CFRP Materials with Carbon Fiber Distribution / T. Inoue, M. Hagino // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P. 285–291. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0285>.
17. Hagino M., Inoue T. Effect of Carbon Fiber Orientation and Helix Angle on CFRP Cutting Characteristics by End Milling / M. Hagino, T. Inoue // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P.292–299. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0292>.
18. High-quality machining of CFRP with high helix end mill / A. Hosokawa, N. Hirose, T. Ueda, T. Furumoto // CIRP Annals, 2014. – 63. – P.89–92. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.084>.
19. Analytical force model for orthogonal machining of unidirectional carbon fibre reinforced polymers (CFRP) as a function of the fibre orientation / R. Voss, L. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // Journal of Materials Processing Technology, 2019. –263. – P.440–469. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.001>.
20. Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP / R. Voss, L. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2017. –18. – P.75–91. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.10.002>.
21. Tool wear and spring back analysis in orthogonal machining unidirectional CFRP with respect to tool geometry and fibreorientation / L. Seeholzer, F. Kneubühler, F. Grossenbacher, K. Wegener // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021. – 115. – P. 2905–2928. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07222-z>

22. Fiber orientation angle effects in machining of unidirectional cfrp laminated composites / V. Madhavan, G. Lipczynski, B. Lane, E. Whitenon // Proceedings of NAMRI/SME, 2014. – 42. – P.1–13.
23. Geier N. Influence of fibre orientation on cutting force in up and down milling of UD-CFRP composites / N. Geier // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. – 111. – P.881–893. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06163-3>
24. Effects of Fiber Orientation Direction on Tool-Wear Processes in Down-Milling of Carbon Fiber-Reinforced Plastic Laminates / S. Maegawa, Y. Morikawa, S. Hayakawa etc. // Int. J. of Automation Technology, 2015. –9 (4). – P.356–364. <https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0356>
25. The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates / D. Nguyen, M. S. B. Abdullah, R. Khawarizmi etc. // Journal Pre-proof, Wear, 2020. – P.1–35. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203213>
26. Хавин Г.Л. Формулировка закона изнашивания инструмента при резании полимерных композитов / Г. Л. Хавин // Інтегровані технології та енергозбереження Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – №.3.– С.36–45.
27. Wang X.M., Zhang L.C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fiber reinforced plastics / X.M. Wang, L.C. Zhang // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003. – 43, – P.1015–1022.
28. Kaneeda T. CFRP cutting mechanism / T. Kaneeda // Tran. of North American Manufacturing Res. Institute of SME, 1991. – 19. – P.216–221.
29. Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P. Machining studies of uni-directional glass fiber enforced plastic (UD-GFRP) composites part 1: Effect of geometrical and process parameters / D. Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // Machining Science and Technology, 2005. – 9. – P. 481–501.
30. Takeyama H., Iijima N. Machinability of glass-fiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining / H. Takeyama, N. Iijima // Annals of CIRP, 1988. – 37. – P. 93–96.
31. Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P. Machining studies of UD-FRP composites part 2: finite element analysis / D. Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // Machining Science and Technology, 2005.– 9(4). – P. 503–528.
32. Tsukizoe T., Ohmae N. Friction and Wear Performance of Uni-Directionally Oriented Glass, Carbon, Aramid and Stainless Steel Fiber Reinforced Plastics, Friction and Wear of Polymer Composites /T. Tsukizoe, N. Ohmae // Friction and Wear of Polymer Composites, 1986. – P. 205–231.

References (transliterated)

1. Sheikh-Ahmad J.Y. Machining of polymer composites / J.Y. Sheikh-Ahmad. – Springer, 2009.– 315 p. <https://citations.springernature.com/book?doi=10.1007/978-0-387-68619-6>
2. Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces / M. Henerichs, R. Voss, F. Kuster, K. Wegener // CIRP J Manuf. Sci. Technol., 2015.– 9. – P. 136–145.
3. The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates / D. Nguyen, M.S.B. Abdullah, R. Khawarizmi etc. // Wear, 2020. – 450. – P. 203–213.
4. Fiber orientation angle effects in machining of unidirectional CFRP laminated composites / V. Madhavan, G. Lipczynski, B. Lane, E. Whitenon // Manufactory Process, 2015. – 20. – P.431–442.
5. Davim J.P. Machining composite materials / J.P. Davim.– John Wiley & Sons, Hoboken, 2009. <https://www.wiley.com/en-us/Machining+Composites+Materials-p-9781848211704>.
6. Analyticalforce model for orthogonal machining of unidirectional carbon fibre re- enforced polymers (CFRP) as a function of the fibre orientation / R. Voss, I. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // J Material Process Technology, 2018.– 263.– P.440–469.
7. Sharma M., Rao I.M., Bijwe J. Influence of fiber orientation on abrasive wear of unidirectionally reinforced carbon fiber– polyetherimide composites / M. Sharma, I.M. Rao, J. Bijwe // Tribology Int., 2010.– 43(5).– P.959–964.
8. Wang D.H., Ramulu M., Arola D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate / D.H. Wang, M. Ramulu, D.Arola // International J. of Machine Tools and Manufacture, 1995. – 35.– P.1623–38. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00014-O](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00014-O).
9. Pwu HY, Hocheng H. Chip Formation Model of Cutting Fiber-Reinforced Plastics Perpendicular to Fiber Axis. Journal of Manufacturing Science and Engineering 1998;120:192. <https://doi.org/10.1115/1.2830100>.
10. Zhang L.C., Zhang H.J., Wang X.M. A force prediction model for cutting unidirectional fibre- reinforced plastics / L.C. Zhang, H.J. Zhang, X.M. Wang // Machining Science and Technology, 2001.– 5.– P. 293–305. <https://doi.org/10.1081/MST-100108616>.
11. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009. – 49.– P.1185–1196. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2009.08.002>.
12. Effects of fiber orientation direction on tool-wear processes in down-milling of carbon fiber-reinforced plastic laminates / S. Maegawa, Y. Morikawa, S. Hayakawa etc. // International Journal of Automation Technology, 2015.– 9. – P.356–364. <https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0356>
13. Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic / M.K. Nor Khairussima, C.H. Che Hassan, A.G. Jaharah etc. // Wear 2013, – 302. – P.1113–1123. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.043>.
14. Muhamad Khairussaleh N.K., Che Haron C.H., A. Ghani J. Study on wear mechanism of solid carbide cutting tool in milling CFRP / N.K. Muhamad Khairussaleh., C.H. Che Haron, A. Ghani J. // Journal of Materials Research, 2016. –31. – P.1893–1899. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.21>.
15. Inoue T., Hagino M. Cutting Characteristics of CFRP Materials with Carbon Fiber Distribution / T. Inoue, M. Hagino // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P. 285–291. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0285>.
16. Inoue T., Hagino M. Cutting Characteristics of CFRP Materials with Carbon Fiber Distribution / T. Inoue, M. Hagino // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P. 285–291. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0285>.
17. Hagino M., Inoue T. Effect of Carbon Fiber Orientation and Helix Angle on CFRP Cutting Characteristics by End Milling / M. Hagino, T. Inoue // International Journal of Automation Technology, 2013. –7. – P.292–299. <https://doi.org/10.20965/ijat.2013.p0292>.
18. High-quality machining of CFRP with high helix end mill / A. Hosokawa, N. Hirose, T. Ueda, T. Furumoto // CIRP Annals, 2014. – 63. – P.89–92. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.084>.
19. Analytical force model for orthogonal machining of unidirectional carbon fibre reinforced polymers (CFRP) as a function of the fibre orientation / R. Voss, L. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // Journal of Materials Processing Technology, 2019. –263. – P.440–469. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.001>.
20. Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP / R. Voss, L. Seeholzer, F. Kuster, K. Wegener // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2017. –18. – P.75–91. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.10.002>.
21. Tool wear and spring back analysis in orthogonal machining unidirectional CFRP with respect to tool geometry and fibreorientation / L. Seeholzer, F. Kneubühler, F. Grossenbacher, K. Wegener // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021. – 115. – P. 2905–2928. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07222-z>
22. Fiber orientation angle effects in machining of unidirectional cfrp laminated composites / V. Madhavan, G. Lipczynski, B. Lane, E. Whitenon // Proceedings of NAMRI/SME, 2014. – 42. – P.1–13.

23. Geier N. Influence of fibre orientation on cutting force in up and down milling of UD-CFRP composites / N. Geier // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. – 111. – P.881–893. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06163-3>
24. Effects of Fiber Orientation Direction on Tool-Wear Processes in Down-Milling of Carbon Fiber-Reinforced Plastic Laminates / S. Maegawa, Y. Morikawa, S. Hayakawa etc. // Int. J. of Automation Technology, 2015. –9 (4). – P.356–364. <https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0356>
25. The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates / D. Nguyen, M. S. B. Abdullah, R. Khawarizmi etc. // Journal Pre-proof, Wear, 2020. – P.1–35. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203213>
26. Khavin G.L. Formulirovka zakona iznashivaniya instrumenta pri rezanii polimernyh kompozitov / G. L. Khavin // Integrovani tekhnologii ta energoberezhennya Harkiv: NTU «HPI», 2021. – №.3.– S.36–45.
27. Wang X.M., Zhang L.C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fiber reinforced plastics / X.M. Wang, L.C. Zhang // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003. – 43, – P.1015–1022.
28. Kaneeda T. CFRP cutting mechanism / T. Kaneeda // Tran. of North American Manufacturing Res. Institute of SME, 1991. – 19. – P. 216–221.
29. Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P. Machining studies of uni-directional glass fiber einforced plastic (UD-GFRP) composites part 1: Effect of geometrical and process parameters / D. Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // Machining Science and Technology, 2005. – 9. – P. 481–501.
30. Takeyama H., Iijima N. Machinability of glass-fiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining / H. Takeyama, N. Iijima // Annals of CIRP, 1988. – 37. – P. 93–96.
31. Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P. Machining studies of UD-FRP composites part 2: finite element analysis / D. Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // Machining Science and Technology, 2005.– 9(4). – P. 503-528.
32. Tsukizoe T., Ohmae N. Friction and Wear Performance of Uni-Directionally Oriented Glass, Carbon, Aramid and Stainless Steel Fiber Reinforced Plastics, Friction and Wear of Polymer Composites /T. Tsukizoe, N. Ohmae // Friction and Wear of Polymer Composites, 1986. – P. 205–231.

Поступила (received) 24.04.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Хавін Геннадій Львович (Khavin Gennadii Lvovich) – доктор технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Національного технічного університету «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-050-927-52-79; e-mail: gennadii.khavin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4340-7615

Хоу Чжівень (Hou Zhiwen) – аспірант кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати", Національного технічного університету «ХПІ», м.Харків; тел.: +38-066-195-92-89; e-mail: houbao13488533213@qq.com, ORCID: 0000-0002-1765-6028