

DOI 10.32820/2079-1747-2019-23-31-40

УДК 621.914

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І УМОВ ФОРМОУТВОРЕННЯ
РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ
ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ КОМПОЗИЦІЙНИХ НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ**

©Скоркін А.О.¹, Кондратюк О.Л.¹, Старченко О.П.², Камчатна-Степанова К. В.³

Українська інженерно-педагогічна академія¹

Харківський радіотехнічний технікум²

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"³

Інформація про авторів:

Скоркін Антон Олегович: ORCID: 0000-0003-3032-83414; Andromeda862@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри машинобудування та транспорту; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Кондратюк Олег Леонідович: ORCID:0000-0002-3263-0483; kondr20071@i.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри машинобудування та транспорту; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Старченко Олена Павлівна: ORCID:0000-0002-7444-6668; Estarchenko79@gmail.com; заступник директора з навчальної роботи, Харківський радіотехнічний технікум, вул. Сумська 18/20, м. Харків, 61057, Україна

Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна: ORCID: 0000-0001-7825-1238; katerina.ks@i.ua; інженер I категорії Науково-дослідної частини, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

Серед вимог, пропорованих до сучасних конструкційних матеріалів можна назвати зниження маси, збільшення твердості й міцності, максимальний ресурс виробів, що виготовляються, у різних умовах експлуатації, висока надійність створюваних з таких матеріалів конструкцій. Перераховані вимоги, як правило, забезпечуються на стадіях вибору матеріалу й удосконалювання технології виготовлення виробів. Тенденції розвитку промисловості спрямовані на перехід до застосування в якості конструкційних матеріалів, що відповідають комплексу перерахованих вимог, композиційних матеріалів.

Останнім часом значно збільшилася частка використання композитів у машинобудуванні, автомобілебудуванні, енергетику, суднобудуванні, деревообробці, верстатобудуванні, будівництві, ракетної, аерокосмічної, хімічної й нафтової промисловості. Досягнення в області застосування виробів з композиційних матеріалів багато в чому залежать від удосконалювання технологій виробництва елементів різних конструкцій з композиційних матеріалів. Композиційні матеріали являють собою металеві й неметалічні матриці (основи) із заданим розподілом у них ущільнень (волокон, дисперсних часток); при цьому ефективно використовуються індивідуальні властивості складових композиції.

Найважливішими технологічними методами виготовлення композиційних матеріалів є: просочення армуючих волокон матричним матеріалом; формування в прес-формі стрічок ущільнень й матриці, одержуваних намотуванням; холодне пресування обох компонентів з наступним спіканням; електро-хімічне нанесення покриттів на волокна з наступним пресуванням.

У зв'язку із цим, одним з перспективних напрямків розвитку науково-технічного комплексу країни є підвищення ефективності обробки сучасних композиційних матеріалів лезвийним інструментом з метою розширення області їх використання. З'являється необ-

хідність у дослідженні методів і способів підвищення працездатності інструмента, створення нових конструктивних рішень, що володіють високими експлуатаційними характеристиками, відшукування раціональних умов його експлуатації із забезпеченням необхідного якості продукції, що виготовляється. Актуальною стає проблема ефективної і якісної технологічної підготовки різального інструменту для обробки композиційних матеріалів.

Ключові слова: інструмент, фрезерування, лезвийний інструмент, полімер, композиційний матеріал

Скоркин А.О., Кондратюк О.Л., Старченко Е.П., Камчатная-Степанова Е. В.
«Исследование методов и условий формообразования режущих элементов твердосплавного инструмента для фрезерной обработки композиционных неметаллических материалов»

Среди требований, предъявляемых к современным конструкционным материалам можно назвать снижение массы, увеличение жесткости и прочности, максимальный ресурс изготавливаемых изделий в различных условиях эксплуатации, высокая надежность создаваемых из таких материалов конструкций. Перечисленные требования, как правило, обеспечиваются на стадиях выбора материала и совершенствования технологии изготовления изделий. Тенденции развития промышленности направлены на переход к применению в качестве конструкционных материалов, отвечающих комплексу перечисленных требований, композиционных материалов.

В последнее время значительно увеличилась доля использования композитов в машиностроении, автомобилестроении, энергетике, судостроении, деревообработке, станкостроении, строительстве, ракетной, аэрокосмической, химической и нефтяной промышленности. Достижения в области применения изделий из композиционных материалов во многом зависят от совершенствования технологий производства элементов различных конструкций из композиционных материалов. Композиционные материалы представляют собой металлические и неметаллические матрицы (основы) с заданным распределением в них упрочнителей (волокон, дисперсных частиц); при этом эффективно используются индивидуальные свойства составляющих композиции.

Важнейшими технологическими методами изготовления композиционных материалов являются: пропитка армирующих волокон матричным материалом; формирование в пресс-форме лент уплотнений и матрицы, получаемых намоткой; холодное прессование обоих компонентов с последующим спеканием; электро-химическое нанесение покрытий на волокна с последующим прессованием.

В связи с этим, одним из перспективных направлений развития научно-технического комплекса страны является повышение эффективности обработки современных композиционных материалов лезвийным инструментом с целью расширения области их использования. Появляется необходимость в исследовании методов и способов повышения работоспособности инструмента, создания новых конструктивных решений, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, отыскания рациональных условий его эксплуатации с обеспечением требуемого качества изготавливаемой продукции. Актуальной становится проблема эффективной и качественной технологической подготовки режущего инструмента для обработки композиционных материалов.

Ключевые слова: инструмент, фрезерование, лезвийный инструмент, полимер, композиционный материал.

Skorkin A., Kondratyuk O., Starchenko O., Kamchatna-Stepanova K. «Study of the methods and conditions of forming cutting elements of carbide tools for milling processing of composite non-metal materials»

Among the requirements for modern structural materials include weight reduction, increase in stiffness and strength, the maximum life of manufactured products in various operating conditions, high reliability created from such materials. The listed requirements, as a rule, are provided at the stages of material selection and improvement of the technology for manufacturing products. Trends in the development of industry are aimed at the transition to the use of composite materials as a construction material that meets the complex of the listed requirements.

Recently, the proportion of use of composites in engineering, automotive, power engineering, shipbuilding, woodworking, machine-tool construction, construction, rocket, aerospace, chemical and petroleum industries has significantly increased. Achievements in the field of application of products made of composite materials largely depend on the improvement of production technologies for elements of various structures made of composite materials. Composite materials are metallic and non-metallic matrices (bases) with a specified distribution of reinforcers (fibers, dispersed particles); this effectively uses the individual properties of the components of the composition.

The most important technological methods for manufacturing composite materials are: impregnation of reinforcing fibers with a matrix material; forming in the mold tapes of seals and the matrix obtained by winding; cold pressing of both components, followed by sintering; electrochemical coating of the fibers followed by pressing.

In this regard, one of the promising areas of development of the scientific and technical complex of the country is to increase the efficiency of processing modern composite materials with a blade tool in order to expand their field of use. There is a need to study methods and ways to improve the performance of the tool, to create new design solutions with high performance characteristics, to find rational conditions for its operation, ensuring the required quality of manufactured products. The problem of effective and high-quality technological preparation of cutting tools for processing composite materials is becoming urgent.

Keywords: tool, milling, blade tool, polymer, composite material.

Вступ

Створення композиційних матеріалів переслідує наступні цілі: здешевлення матеріалів, одержуваних на основі комбінації тих або інших речовин з меншою вартістю, у порівнянні з використовуваними матеріалами; додання цим матеріалам бажаного комплексу властивостей; зниження питомої маси; збільшення строків старіння. Слід звернути увагу на те, що ніколи не вдасться досягти всіх зазначених позитивних властивостей в одній композиції. Більше того, досягнення тих або інших бажаних властивостей систем часто супроводжується й появою негативних явищ, наприклад, ускладненням в переробці композицій, що різко ускладнює одержання з них виробів, небажане змінює деякі фізико-механічні показники системи. У цілому композиційний матеріал – гетерогенна система, що полягає із двох або більш компонентів, взаємодія яких на границі роздязгнула фаз приводить до утвору міжфазного ша-

ру, що надає матеріалу нові властивості при збереженні індивідуальності кожного компонента [1].

Властивості композиційних матеріалів залежать головним чином: від розміру й площі поверхні часток наповнювача, їх об'ємної частки й характеру розподілу в матриці; фізико-хімічних властивостей, як матриці, так і наповнювача; міцності зв'язку на границі роздязнула фаз. По своїй будові композиційні матеріали діляться на анізотропні, властивості яких значно різняться між собою уздовж і поперек матеріалу, і ізотропні, властивості яких незмінні.

У композиційних матеріалах армуючі елементи з'єднані ізотропною полімерною, металевою або іншими видами матриці, яка забезпечує монолітність матеріалу, фіксує форму виробу, сприяє спільній роботі волокон і перерозподіляє навантаження при руйнуванні частини волокон.

У машинобудівному виробництві широке поширення одержали волокнисті композитні матеріали, армовані високоміцними й високомодульними безперервними волокнами, у яких армуючі елементи несуть основне навантаження, тоді як матриця передає напругу волокнам. Волокнисті композитні матеріали, як правило, анізотропні. Механічні властивості їх визначаються не тільки властивостями самих волокон, але і їх орієнтацією, об'ємним змістом, здатністю матриці передавати волокнам прикладене навантаження й ін. Діаметр безперервних волокон вуглецю, бору, а також тугоплавких з'єднань (B4C, SiC і ін.) звичайно становить 100...150 мкм.

Волокнисті композитні матеріали, на відміну від монолітних сплавів, мають високу сталостну міцність. Так, наприклад, в алюмінієвих сплавах вона становить 130...150 МН/м², у той час як в армованого борним волокном алюмінієвого композитного матеріалу – близько 500 МН/м². Межа міцності й модуль пружності композитного матеріалу на основі алюмінію, армованого борним волокном, приблизно у два рази більше, чим в алюмінієвих сплавах В-95 і АК4-1 [2-3].



Рис. 1. – Приклади виробів, отриманих механічною обробкою заготовок з композиційних неметалічних матеріалів

Найбільше поширення на сьогоднішній день одержали композиційні матеріали на деревній основі й полімерні композити в силу економічності й доступності вихідної сировини й високих фізичних властивостей виробів, виготовлених із цих матеріалів при значному зниженні питомої маси. Прикладом можуть бути деталі для різних конструкцій машин, приладів, апаратів використовуваних у різних галузях промисловості (рис. 1).

Прикладом можуть бути деталі для різних конструкцій машин, приладів, апаратів використовуваних у різних галузях промисловості (рис. 1).

1. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Полімерні композиційні матеріали (склопластики, органопластики, боропластики, вуглепластики) знаходять широке застосування в таких областях промисловості, як космічна техніка, авіа-, судо-, автомобілебудування і т.д. Застосування композиційних матеріалів у сучасних конструкціях дає істотний вигравш у масі, міцності, довговічності, стійкості до корозії й агресивним хімічним середовищам.

Так конструкційні вуглепластики на основі вуглецевих наповнювачів різних текстурних форм (джгути, стрічки, тканина) призначені для використання в силових конструкціях планера літака.

Високоміцні (міцність 1200...1500 Мпа) склопластики на основі кордних склотканин і полімерних сполучних для використовуються для виготовлення багатошарових високонавантажених малошумних гвинтів гвинтовентиляторних двигунів широкофюзеляжних літаків короткого зльоту й посадки.

Високоміцні, негорючі поліімідні склопластики конструкційного й радіотехнічного призначення з робочою температурою до 350°C застосовуються в мотогондолах двигунів, для виготовлення панелей капотів різних кожухів і захисних екранів літаків.

Серед найпоширеніших можна виділити композиційні матеріали на полімерній основі, армовані скляними, вуглецевими, борними й органічними волокнами [4]. У якості матриць у металевих композиційних матеріалів в основному застосовується алюміній, титан і магній, зміцнені борними й вуглецевими волокнами, дисперсними частками оксидів і карбідів тугоплавких металів.

Для обробки композиційних матеріалів застосовуються цільні й складені фрези із затилованими й гострозаточеними зубами, а також збірні конструкції фрез.

Відмінна риса фрез із гострозаточеними зубами полягає в тому, що задні поверхні зубів прямолінійні. Це дозволяє змінювати в широких межах число зубів, кутові параметри фрез і обробляти деталі із глибоким профілем. Такі фрези застосовуються для обробки площин, пазів і фасонних поверхонь. В останньому випадку при переточуваннях відбувається істотне викривлення профілю оброблюваної деталі. Тому фрези з гострими зубами для обробки фасонних поверхонь звичайно оснащуються напаяними пластинами. Для фрез цього типу можливо обмежене число переточувань, обумовлене розмірами пластин по товщині [4-5].

2. Постановка проблеми

Існує кілька способів формування затилованої поверхні: по логарифмічній спіралі, по спіралі Архімеда, по дузі окружності й по прямій лінії [6].

При виготовленні зубів фрези на спеціалізованих інструментальних підприємствах конструювання задньої поверхні зручніше за все робити по архімедовій спіралі, що задовольняє з достатнього для практики ступенем точності.

Під цільними розуміють інструменти з ріжучими елементами (зубами), нероз'єднаними з корпусом інструмента. Цільні конструкції фрез виготовляють цілком з інструментальних сталей. Фрези із цільного матеріалу при втраті ріжучої здатності – переточуються; при повному зношуванні – більш не використовуються [6].

Основний недолік цільних фрез, виготовлених цілком з інструментальних сталей, полягає в тому, що у випадку поломки або аварійного зношування одного із зубів уся фреза

стає непридатною до експлуатації. Крім того, для обробки складнопрофільних поверхонь таким інструментом необхідні кілька різних фрез, або їх комплекти.

При виробництві складнопрофільних виробів з композиційних матеріалів широке застосування знайшли складені фрези. Більшість їх залежно від оброблюваних профілів складається із двох або трьох одинарних фрез, які звичайно використовують для обробки складних профілів, що мають ділянки, що лежать у площині обертання фрези. Як правило, при конструюванні складених фрез складний оброблюваний профіль розбивають на більш прості із прямолінійними або похилими ділянками. Від кількості ділянок залежить і кількість одинарних фрез, що збираються на одному оправленні в один блок. У складені фрези можуть входити інструменти з однаковими або різними параметрами. Технологія виготовлення окремих фрез, що входять у складові, не відрізняється суттєво від технології виготовлення цільного або збірного інструмента.

Одним з перспективних напрямків підвищення стійкості й працездатності інструмента є перехід на виготовлення збірних конструкцій, що відзначається багатьма авторами в роботах [6-8].

Збірні фрези призначені для фрезерування плоских і профільних поверхонь виробів з композиційних матеріалів. Вони складаються з корпусу, змінних ріжучих елементів, деталей кріплення й регулювання. Усі ці елементи виготовляються окремо, потім збираються в єдину фрезу; ріжучі елементи регулюються на діаметр різання. Виготовлена й зібрана фреза проходить контроль і випробування (статичні й динамічні).

Основна перевага збірних фрез – економія дорогих інструментальних матеріалів. Крім того, у порівнянні із цільними, вони мають і інші переваги: більш раціональне використання інструментальних матеріалів, підвищений термін служби корпусу. У той же час даний тип фрез має й недоліки: відносно більш високу трудомісткість виготовлення й експлуатації й меншу твердість [9].

У цей час розроблені нові конструкції збірних фрез, але вони також мають ряд недоліків: малий ресурс і твердість ріжучих елементів; складність кріплення різців і відсутність єдиної схеми базування; складність установки й регулювання на розмір різання при складанні інструмента; зменшення точності й твердості всього інструмента в цілому [10].

4. Метою роботи є дослідження процесу обробки композиційних неметалічних матеріалів фрезеруванням, та подальша розробка технологічних методів створення, виготовлення й вибору різального інструменту.

5. Виклад основного матеріалу

Технологічна підготовка різального інструменту для обробки композиційних неметалічних матеріалів має немаловажне значення при організації інструментального забезпечення на підприємствах. Крім структурної й параметричної оптимізації при конструюванні нового інструмента, виборі й підготовці до роботи різального інструменту вона містить у собі заходи щодо виготовлення (формування) різального інструменту. Особливо актуальна ця проблема при виготовленні інструмента, оснащеного високоміцними й важкооброблюваними інструментальними матеріалами, що відрізняються підвищеною точністю, надійністю, ресурсом і, як наслідок, високою працездатністю. Обробка таким інструментом повинна вес-

ти до підвищення продуктивності й зменшенню собівартості обробки виробів з композиційних неметалічних матеріалів.

Необхідна якість обробки поверхонь виробів, мінімальні сила й потужність різання досягаються концентрацією напруг у локальній області оброблюваного матеріалу, що прилягає до досить гострого леза. Однак навіть ретельно заточені леза інструмента для обробки композиційних матеріалів не є абсолютно гострими – їхні ріжучі крайки, утворені перетинанням передньої й задньої поверхонь, являють собою не лінію, а перехідну поверхню радіуса ρ_0 (рис. 2). Чим більше наробіток леза, тим більше величини радіуса затуплення й зношування по передній і задній поверхні.

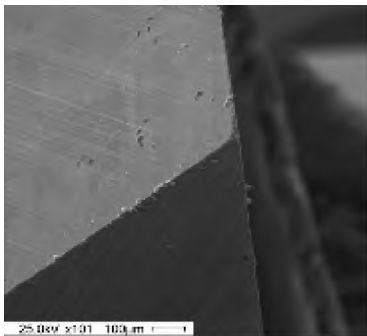


Рис. 2. – Стан ріжучої крайки інструмента після заточування

Традиційне заточування сталевого інструмента здійснюється електрокорундовими колами й колами з кубічного нітриду бору (КНБ). Як правило, при знятті більших припусків застосовують кола з електрокорунду. Для доведення й видалення малих припусків використовують кола із КНБ. Чорнове заточування твердосплавного інструмента призначене для зняття основної частини припуску з максимально припустимою інтенсивністю знімання й підготовки оброблюваних поверхонь до чистового заточення й доведенню.

Процес заточування твердосплавних фрез полягає в шліфуванні ріжучих пластин з обох торців до одержання номінального розміру по висоті фрези із припусками на чистове шліфування. Потім ведеться чорнове шліфування передньої й задньої поверхонь із кутами, збільшеними на 2...40 по порівнянню із заданими.

Для чорнового заточування твердосплавного інструмента, як правило, застосовуються шліфувальні кола з карбиду кремнію зеленого. Тому що чорнова обробка дозволяє вести інтенсивне знімання матеріалу, те можливе використання грубозернистих кіл ($F46...F60$) на керамічному зв'язуванні (V), середньом'якої групи твердості (K, L) і середньоплотної структури (№ 5, 6). Пропонуються наступні режими обробки: швидкість кола 12...15 м/с, поздовжня подача 1,5...2,5 м/хв, глибина шліфування 0,08...0,12 мм. Заточування колами з карбиду кремнію зеленого рекомендується при рясному охолодженні, яке усуває можливість перегріву, місцевих прижогів і утвору мікротріщин і поліпшує якість поверхні, що заточується.

Чистове заточування ріжучих поверхонь інструмента виконується при необхідних кутах зі збереженням мінімальних припусків на доведення інструмента й призначене для підвищення точності розмірів і зменшення шорсткості оброблюваної поверхні.

Кола з карбиду кремнію зеленого, традиційно використовувані у виробничих умовах для чорнового заточування інструмента, оснащеного твердим сплавом, наносять серйозні дефекти інструментальному матеріалу у вигляді відколів, макро- і мікротріщин (рис. 3). Це пояснюється високими силовими й температурними навантаженнями, що виникають у зоні обробки в процесі заточування. Аналіз технологій виготовлення (формування) твердосплавних ріжучих елементів інструмента для обробки композиційних неметалічних матеріалів

лів показав, що при підготовці різального інструменту до роботи важливе значення має якість формування ріжучого леза.

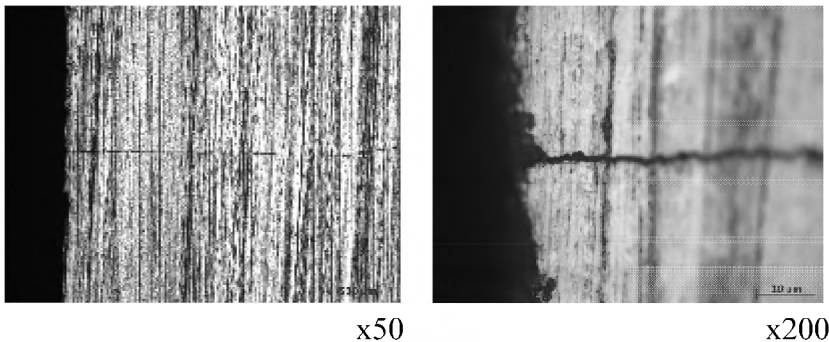


Рис. 3. – Загальний вид передніх поверхонь твердого сплаву марки ВК8 після заточування колами з карбиду кремнію

Крім того, істотним фактором, що впливає на зносостійкість інструмента, є рівень залишкових напруг на поверхні й у приповерхніх шарах на ріжучому лезі, після операції заточування. Для моделювання процесу заточування твердосплавного ріжучого елемента розглянемо схему обробки й діючі при цьому динамічні складові процесу (рис.4).

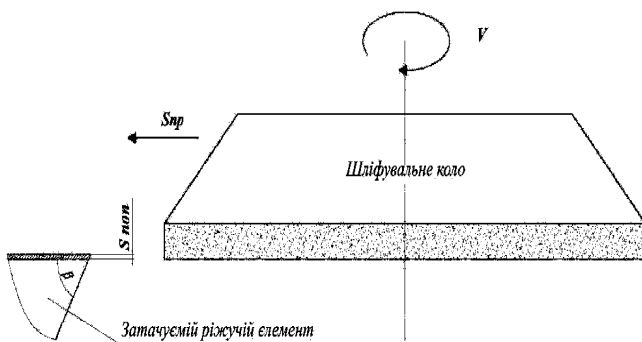


Рис. 4.– Схема заточування ріжучого елемента

Ріжучий елемент, що заточується, має форму клина з кутом загострення β закріпленій нерухомо в спеціальному кріпильному пристосуванні. Шліфувальне коло (у цьому випадку чашковий конічний) обертається навколо своєї осі з постійною швидкістю V (м/с). Крім того, шліфувальне коло поступально рухається, що убік заточується ріжучого елемента з постійною швидкістю, рівній величині поздовжньої подачі $S_{пр}$ (м/хв).

У процесі заточування з поверхні ріжучого елемента знімається шар матеріалу, що дорівнює величині поперечної подачі $S_{поп}$ (мм/дв.хід).

Прийmemo деякі допущення для оцінки напружено-деформованого стану ріжучої крайки й поверхонь при заточуванні. Матеріал ріжучого елемента вважається однорідним, суцільним і анізотропним. У процесі обробки він випробовує незначні деформації. Передбачається, що ріжуча крайка є абсолютно гострою (радіус округлення дорівнює нулю) і зовнішні сили розподілені рівномірно по ширині різця, а задня поверхня не навантажена.

Виберемо в якості об'єкта дослідження клин певної ширини й довжини з кутом при вершині, що варіюється в межах $\beta = 50^\circ \dots 60^\circ$ залежно від умов обробки й комбінації інструментального й оброблюваного матеріалу. Довжина пластини b залежить від призначення ріжучого елемента й може варіюватися в межах від 3 до 21 мм (рис.5).

Фізико-математична модель включає рівняння збереження маси, імпульсу й енергії, записані в рамках Лагранжевого підходу континуальної механіки. Визначальне рівняння середовища, що ушкоджується, сформульоване з використанням моделі Джонсона-Холквіста. Визначальне рівняння в середовищі, що ушкоджується, ухвалює вид:

$$\sigma_{ij} = (1 - D) [-P\delta_{ij} + S_{ij}], \quad (1)$$

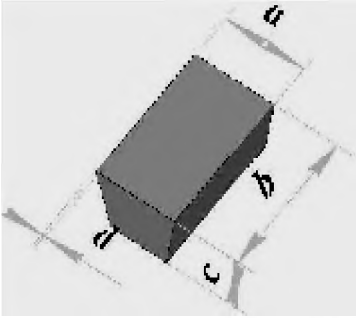


Рис. 5 – Умовні розміри оброблюваної пластини

де σ_{ij} – компоненти тензора ефективного (усередненого в представницькому обсязі ушкодженого середовища) напруги; D – параметр пошкодження середовища; δ_{ij} – символ Кронекера; P, S_{ij} – тиск і девіатор тензора напруги в конденсованій фазі ушкодженого середовища.

Параметр пошкодження середовища D обчислювався шляхом підсумовування прирощень на дискретних інтервалах часу, відповідних до кроку інтегрування:

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{[\Delta \varepsilon_{eq}^P]_i}{\varepsilon_f}$$

Рівняння стану для конденсованої фази сплаву ВК6 (Wc-wt 5.7% Co) у поліноміальній формі Мі – Грюнайзена:

$$P = A_1 + A_2 + A_3 + (B_0 + B_1) \text{при } \xi = [(p / p_0) - 1] > 0 \text{ (стиснення)}$$

$$P = T_1 + T_2 + B_0 \rho_0 E_T, \text{ при } \xi < 0 \text{ (розтягнення)}$$

де P – тиск; $A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, T_1, T_2$ – постійні матеріалу; ρ, ρ_0 – поточна й початкова масова щільність відповідно; E_T – тепла складова питомої внутрішньої енергії.

Як приклад, досліджуємо систему композиційного твердого сплаву марки ВК6, до складу якого входять карбіди вольфраму WC і кобальт Co у якості сполучного.

Для цього була побудована розрахункова область відповідна до оброблюваної пластини зі сплаву (рис. 6). Габаритні розміри пластини в розрахунковій моделі були прийняті рівними: висота $c = 3$ мм, ширина пластини $a = 21$ мм, довжина пластини $b = 12$ мм, кут загострення $\beta = 50^\circ$.

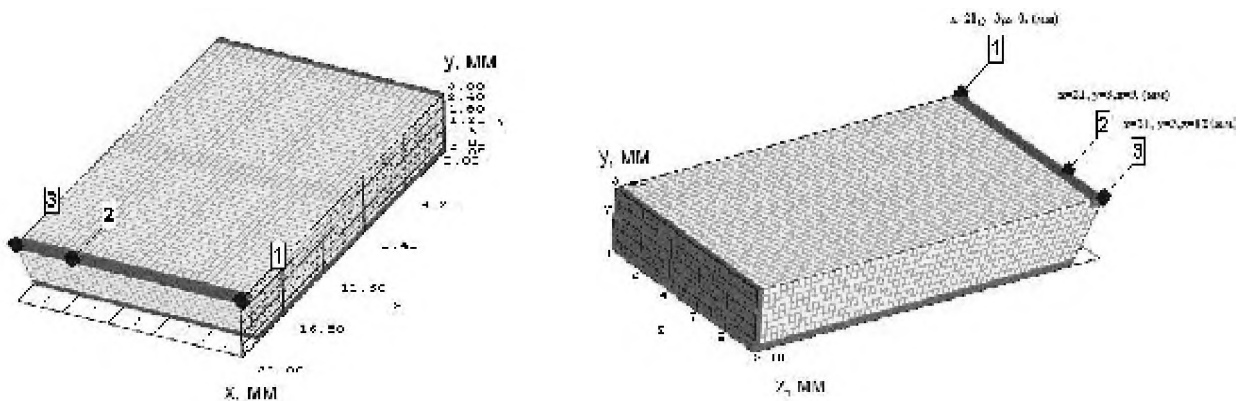


Рис. 6 – Розрахункова модель твердосплавної пластини, що заточується

На рис. 6 показані граничні умови на поверхнях твердого закріплення. На бічних поверхнях були задані граничні умови, що відповідають вільній від навантаження поверхні. На передній поверхні виділена область, відповідна до ділянки d уздовж ріжучої крайки інструмента, шириною l мм, де були задані змішані граничні умови. Кінематичні граничні умови імітували зрушення поверхневого шару в результаті впливу алмазного кола на поверхню пластини, а силові імітували дію розподіленої по поверхні сили, що притискає, виникають в області контакту.

Висновки

З метою підвищення ефективності механічної обробки композиційних неметалевих матеріалів необхідно оснащувати ріжучий інструмент прогресивними інструментальними матеріалами. Зокрема, за результатами досліджень ефективності застосування різних марок інструментальних матеріалів в конструкціях інструменту для обробки композиційних матеріалів, найбільший економічний ефект досягається при застосуванні твердого сплаву.

Список використаних джерел

1. Абрамов Ю.А. Применение информационно-поисковой системы САПР для изготовления специального режущего инструмента / Ю.А. Абрамов, Ю.Б. Сажин // Известия вузов. – М.: Машиностроение. – 1985. – № 8. – С. 111–114.
2. Ящерицын, П.И. Основы резания материалов: учебное пособие / П.И. Ящерицын, В.Д. Ефремов. — Минск : БГАТУ, 2008. — 644 с.
3. Баранчиков, В.И. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технолога / В.И. Баранчиков, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
4. Башков, В.М. Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1985. – 136 с.
5. Бердник, В.В. Электроабразивное шлифование / В.В. Бердник, А.В. Мамай.– Киев: Техника, 1981. – 64 с.
6. Васильев, В.В. Композиционные материалы: справочник / под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Гарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
7. Артамонов, Е.В. Расчет и проектирование сменных режущих пластин и сборных инструментов / Е.В. Артамонов, Т.Е. Помигалова, М.Х. Утешев; под общей ред. М.Х. Утешева. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 152 с.
8. Andre L., Klaus S. Investigation of tool path interpolation on the manufacturing of die and molds with HSC technology” *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 179, 2006, 178–184.
9. Skorkin, A., Kondratyuk, O., Starchenko, O. (2018). Theoretical bases of optimizing a tool idle motion while milling complex surfaces. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4 (6), 62–70. doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.062>
10. Helleno, A. L., Schtzer, K. (2006). Investigation of tool path interpolation on the manufacturing of die and molds with HSC technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 179 (1-3), 178–184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.092>

References

- 1 Abramov, JuA & Sazhin, JuB 1985, ‘Primenenie informacionno-poiskovoj sistemy SAPR dlja izgotovlenija specialnogo rezhushhego instrumenta’, *Izvestija vuzov*, no. 8, pp. 111-114.
2. Jashhericyн, PI & Efremov, VD 2008, *Osnovy rezanija materialov*, Belorusskij gosudarstvennyj agrarnyj tehnikeskij universitet, Minsk.
3. Baranchikov, VI, Tarapanov, AS & Harlamov, GA 2002, *Obrabotka specialnyh materialov v mashinostroenii: Spravochnik. Biblioteka tehnologa*, Mashinostroenie, Moskva.
4. Bashkov, VM & Kacev, PG 1985, *Ispytanija rezhushhego instrumenta na stojkost*, Mashinostroenie, Moskva.
5. Berdник, VV & Mamaj, AV 1981, *Jelektroabrazivnoe shlifovanie*, Tehnika, Kiev.
6. Vasilev, VV, Protasov, VD, Bolotin, VV et al. 1990, *Kompozicionnye materialy*, Mashinostroenie, Moskva.
7. Artamonov, EV, Pomigalova, TE & Uteshev, MH 2011, *Raschet i proektirovanie smennyh rezhushhih plastin i sbornyh instrumentov*, Tjumenskij gosudarstvennyj neftegazovyj universitet, Tjumen.
8. Andre, L & Klaus, S 2006, ‘Investigation of tool path interpolation on the manufacturing of die and molds with HSC technology’, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 179, pp. 17-184.
9. Skorkin, A, Kondratyuk, O & Starchenko, O 2018, ‘Theoretical bases of optimizing a tool idle motion while milling complex surfaces’, *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, no. 4 (6), pp. 62-70.
10. Helleno, AL & Schtzer, K 2006, ‘Investigation of tool path interpolation on the manufacturing of die and molds with HSC technology’, *Journal of Materials Processing Technology*, no. 179 (1-3), pp. 178-184.

Стаття надійшла до редакції 12 квітня 2019 р.