

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ВИХІДНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ
ПРИ ОБРОБЦІ НЕЩІЛЬНИХ КАРБОНОВІСНИХ МАТЕРІАЛІВ АБРАЗИВНИМ ІНСТРУМЕНТОМ****А. М. Кириченко, Метак Аль Ібрахім**Центральноукраїнський державний технічний університет
просп. Університетський, 8, м. Кропивницький, 25006, Україна.**О. О. Ченчева, В. Т. Щетинін**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: salenko2006@ukr.net

Приведено результати досліджень абразивного оброблення нещільних карбон-вмісних матеріалів. Показано, що абразивна обробка алмазним інструментом є достатньо ефективною, однак для забезпечення стабільності процесу різання (як відрізними кругами, так і трубчастими свердлами) слід враховувати зміну умов взаємодії внаслідок залипання продуктів руйнування на поверхні інструменту. Із використанням сучасної вимірювальної техніки та спеціального верстатного устаткування (у вигляді маніпулятора із надлишковими кінематичними ланцюгами з додатковими приводами) виконано дослідження зміни температури у зоні контакту, встановлено обумовленість даного явища забрудненням різальної крайки. На основі багатофакторного експерименту встановлено функціональну обумовленість параметрів якості обробки (зокрема, шорсткості та деструкції поверхневого шару) режимами процесу; показано, що головним чинником забезпечення вихідних показників якості є робоча подача інструменту, для якої запропоноване відповідне регресійне рівняння.

Ключові слова: абразивна обробка, алмазовмісний інструмент, композити карбонівної групи.

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ПРИ ОБРАБОТКЕ НЕПЛОТНЫХ КАРБОНСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ
АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ****А. Н. Кириченко, Метак Аль Ибрахим**Центральноукраинский государственный технический университет
просп. Университетский, 8, г. Кропивницкий, 25006, Украина.**О. А. Ченчевая, В. Т. Щетинин**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского,
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: salenko2006@ukr.net

Приведены результаты исследований абразивной обработки неплотных карбонсодержащих материалов. Показано, что абразивная обработка алмазосодержащих инструментом является достаточно эффективной, однако для обеспечения стабильности процесса резания (как отрезными кругами, так и трубчатыми сверлами) следует учитывать изменение условий взаимодействия вследствие залипания продуктов разрушения на поверхности инструмента. С использованием современной измерительной техники и специального станочного оборудования (в виде манипулятора с избыточными кинематическими цепями с дополнительными приводами) выполнено исследование изменения температуры в зоне контакта, установлено обусловленность данного явления загрязнением режущей кромки. На основе многофакторного эксперимента установлено функциональную обусловленность параметров качества обработки (в частности, шероховатости и деструкции поверхностного слоя) режимами процесса; показано, что главным фактором обеспечения выходных показателей качества является рабочая подача инструмента, для которой предложено соответствующее регрессионное уравнение.

Ключевые слова: абразивная обработка, алмазосодержащих инструмента, композиты карбонной группы

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Вуглець-вмісні матеріали, зокрема, карбон-карбонів, знаходять застосування в машинах, що працюють в екстремальних умовах: при високих температурах, в агресивних хімічних середовищах, в умовах високих навантажень. Як правило, карбон-карбонів матеріали створюють у вигляді плетеного 2-D або 3-D каркасу із суцільного вуглецевого волокна, сполученого чистим вуглецем (переважно піровуглецем). На відміну від карбон-полімерних заготовок і препрегів, що можуть бути викладені на основу перед полімеризацією, початкові заготовки із карбон-карбону отримують у вигляді плит, кругів, або брусків, які потребують подальшого оброблення. Абразивне різання таких матеріалів на пластини або проміжні заготовки за допомогою кругів є одним із найбільш доцільних способів обробки, оскільки пошкодження матеріалу може бути зведено до мінімуму.

Обробка композиційних матеріалів абразивним інструментом є досить складною, вимагає створення певних умов для раціональної взаємодії сполучених

абразивних зерен із матеріалом неоднорідної структури.

Особливості структури і властивостей, а також специфіка композиційних матеріалів, як об'єкта обробки різанням виділяє їх у групу важкооброблюваних матеріалів, яка характеризується своїми закономірностями протікання процесу [1, 2]. Так, дослідниками, задіяними у царині вивчення особливостей процесів різання та мікрорізання встановлено, що явища, які супроводжують процес відокремлення стружки від неоднорідного армованого матеріалу, принципово відрізняються від різання сталей та сплавів. Отже, використовувати відомі підходи при призначенні режимів різання практично неможливо. Не стають у пригоді і результати, отримані при обробці різанням важкооброблюваних сталей і сплавів [3]. При механічній обробці (свердлінні, обрізці, точінні і фрезеруванні) деталей з композиційних матеріалів, у тому числі, з вуглепластику, склопластику, виникають дефекти, пов'язані із пошкодженням поверхневого шару. Через це різко спадають

сили, які протидіють втомним напруженням, що в цілому знижує ресурс конструкції і збільшує ймовірність появи відмови виробу. Дефекти обробки виявляються також у вигляді розшарувань, сколювань, виривів волокон. Серед дефектів, отриманих в результаті свердління, основним пошкодженням є відшарування. Wong T.L. і ін., Stone R. та ін. [4, 5], аналізуючи вплив дефектів на надійність елементів авіаційної промисловості, зазначають, що відмова вуглепластикових деталей через розшарування, обумовлених процесами свердління і фрезерування, сягають 60%. Це обумовлює необхідність забезпечення якості обробленої поверхні, точності виконуваних розмірів. Вирішення даної задачі вбачається у встановленні функціональної обумовленості процесів формування поверхневого шару режимами різання на основі експериментального вивчення закономірностей протікання процесів різання.

Метою роботи є встановлення закономірності формування вихідних показників якості при обробці нещільних карбоновмісних матеріалів абразивним інструментом на основі експериментальних досліджень.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Раніше (у роботі [6]) нами було показано, що умови формування поверхневого шару безпосередньо визначаються явищами в плямі контакту інструменту з поверхнею і залежать від термосилового навантаження. При цьому було показано, що погіршення якості оброблюваної поверхні пов'язане зі зміною температури у зоні різання, яка визначається забрудненням різального шару.

Поряд із тим, реальна верстатна система має ряд невраховуваних параметрів, які також будуть впливати на показники якості, що вимагає проведення ряду експериментальних досліджень процесу.

Обладнання і методика досліджень. Натурні випробування виконували на відрізнному верстаті FDB Maschinen GYQ400B / 220 та на створеному дослідному маніпуляторі з надлишковими приводами, з регульованими штангами та змінними динамічними параметрами (рис. 1); обробку виконували алмазним кругом марки 400 H15 60 VICTORY ST зернистістю 25/50 мкм з різною кількістю зерен на периферії (для досліджень використовували 6 кругів різної щільності, діаметр кругів 115 x 22,23 мм); дослідження поверхневого шару, а також вивчення одержуваного шламку виконувалося на растровому електронному мікроскопі PEM-106-1; зразки готувалися з карбонокарбонних матеріалів регулярного плетіння; різання здійснювали з режимами, рекомендованими виробником інструменту для обробки каменю. Температуру в зоні різання вимірювали пірометром Maurer DigitalInfrared-Pyrometer Series KTRD 1065, обробку результатів проводили з використанням спеціального програмного забезпечення Maurer Software IR-LOG. Сили різання в зоні контакту визначали за допомогою тензометричного перетворювача ZEMIC VM3-C3-0,2-3В, підключеного до АЦП m-DAQ з роздільною здатністю 2,0 Н і записом в файл EOM.

Визначення впливу ступеня забруднення поверхневого шару інструменту здійснювали шляхом зважування зразків прецизійними вагами типу RADWAG із поділкою 0,01 мг та межею визначення ваги до 150,000 г.

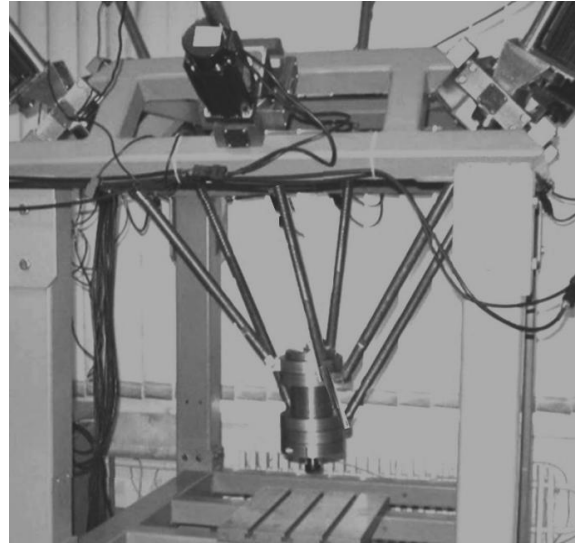


Рисунок 1 – Верстат із надлишковими приводами для дослідження процесу різання заготовок абразивним інструментом

Виходячи із тверджень [7], що якість обробки визначається термосиловим навантаженням зони контакту і залежить від кількох чинників: від профіля поверхні круга, зокрема, від висоти виступу абразивних зерен над периферією δ та кількості зерен n ; від ступеня забруднення поверхні круга ψ (коли пляма контакту різко збільшується і починає активно проявлятися тепловиділення від тертя по торцю і боковим поверхням); від швидкості робочої подачі s , яка безпосередньо визначає умови стійкості інструменту та динамічні явища, що протікають при різанні, тобто від сили різання $P_p = f(b, c_j, \alpha, t)$, розробити методику досліджень.

При абразивному руйнуванні поверхневого шару, яке відбувається за рахунок контакту одиничного зерна із матеріалом, площа безпосереднього контакту визначиться на основі пружної взаємодії елементів технологічної системи, однак в міру зниження продуктивності обробки (визначається обсягом зйому матеріалу за одиницю часу W_r , причому $W_r = t_f b s_r$, s_r – швидкість робочої подачі, b – ширина круга) при попередніх режимах обробки невилучений матеріал збільшить контактний тиск (і площу контакту). Дійсно, нехай зерно, рухаючись в масиві матеріалу, здійснює роботу руйнування на довжині контакту l_p . При цьому вважатимемо, що форма штриха відповідає формі виступаючої частини зерна, яку уявлятимемо у вигляді напівсфери висотою ψ . Тоді об'ємний зйом матеріалу складе

$$W_r' = \frac{\pi \psi^2}{2} l_p n, \quad (1)$$

а різниця в обсязі зменшить t_f в рівнянні

$$t_f = t_z - (x_k + x_d), \quad (2)$$

з одночасним зростанням пружних деформацій (і, відповідно, сили F у місці контакту. Таким чином, $R_x = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} (x_k + x_d) = F$, що дозволяє за величиною фактично знятого шару визначити умови контакту в зоні різання.

Так, зважаючи на рівняння $q = fpv$ температура на поверхні диску за умови нехтування складовими відведення тепла (1) при малому часі спостереження, визначатиметься

$$T_0(t) = \frac{2fpv\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T} \quad (3)$$

або з урахуванням того, що тиск визначатиметься із сили F , віднесеної до площі контакту s , матимемо $T_0(t) = \frac{2fFv\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T s}$, тобто

$$s_i = \frac{2fFv\sqrt{\alpha_T t}}{T_0(t)\lambda_T}, \quad (4)$$

де плинний час t визначається від початку контакту інструменту із заготовкою, F та $T_0(t)$ вимірюються за допомогою відповідних приладів, інші параметри рівняння (4) є відомими константами.

У (4) сила F являтиме собою сумарну силу, що виникає на периферії та на бічних поверхнях, а площа контакту – сумарну площу по усім трьом поверхням.

Теоретична повна площа контакту змінюватиметься з плином часу, оскільки внаслідок робочої подачі круг занурюватиметься у оброблюване тіло. Іншими словами,

$$s_s = s_b + S = \frac{R_1^2(\alpha - \sin(\alpha))}{2} + bl. \quad (5)$$

Якщо б зміни поверхні кругу не відбувалося б, тобто шлам не змінював профілю поверхні, температура кругу відповідала б підведеній потужності, без зростання із зміною площі контакту.

При цьому виникаючій шлам обсягом W_s частково потрапляє у пори матеріалу (W_r), частково – на поверхню інструменту (W_i), частково видаляється потоком повітря (W_p):

$$W_s = W_p + W_r + W_i. \quad (6)$$

Теоретичний обсяг

$$W_s = f(t) = \left[\frac{R_1^2(\alpha - \sin(\alpha))}{4} + vt \right] l\vartheta,$$

де ϑ – щільність матеріалу (оскільки вважаємо, що оброблюване середовище не є щільним), у той час як на поверхню інструменту (при припущенні, що залипання може відбуватися як на торцях, так і на периферії кругу) може потрапити

$$W_i^{max} = 3\pi D_k h \delta - \frac{2}{3} \pi r_a^3 N$$

шламованої речовини, N – кількість зерен абразиву; r_a – радіус абразивного зерна, який умовно вважаємо півсферою. За умови, коли кількість речовини становитиме W_i^{max} , контакт кругу буде відповідати контакту диску із поверхнею при відсутності роботи руйнування, і тепловиділення буде максимальним.

Для встановлення закономірності зміни температури залежно від стану поверхні диску, напрямку укладки армувальних волокон, а також силового навантаження зони різання, тобто визначення $T_i = f(F_p, \tau, A)$ проведено визначення параметрів сили та температури T_i в автоматичному режимі. Використовувалися зразки, орієнтовані у площині X-Y ($A=1$) та Z-X ($A=2$), що дало змогу отримати кілька діаграм нагрівання диску. Обробку виконували так, щоб забезпечити різання як чистими (незабрудненими) дисками, так і дисками із забрудненням.

Перед випробуваннями диски (8 шт.) піддали метрологічному контролю, визначивши їх геометричні параметри шляхом вимірювання плинного радіусу r_j^i та ширини h_j^i при встановленні на оправку шпинделя відрізного верстата мод. FDB Maschinen GYQ400B/220, побудували кругові діаграми та встановили висоту вильоту абразивних зерен відносно поверхні кругу δ_j^i . Також визначено кількість зерен n та встановлено масу дисків m_k^p .

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що розкид параметрів вимірів товщини і діаметру кругів порівняний із похибкою контролю.

Силове навантаження та температуру в зоні різання знімали в автоматичному режимі, отримуючи відповідні осцилограми. Усереднені значення температури наведені на рис. 2.

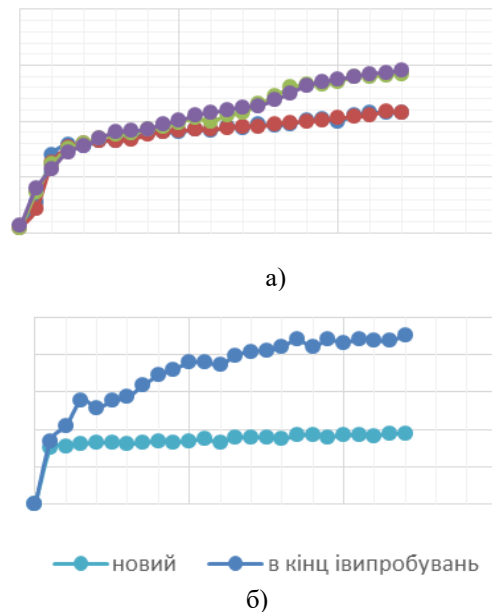


Рисунок 2 – Зміна температури T_i ($^{\circ}\text{C}$) в зоні різання (а) та навантаження F_p (Н) (б) при використанні нового та забрудненого кругів (τ , с)

Обробку виконували з лінійною подачею 20,0 мм/с, частота обертання диску – 5000 хв⁻¹, що відповідає лінійній швидкості різання 30,0 м/с. Глибина різання складала 15,0 мм.

З приведених діаграм стає зрозумілим, що зростання зусилля різання F_p супроводжує зростання температури T_i ; при цьому для нових дисків (без забруднення поверхневого шару) спостерігається певна стабілізація температурного режиму; зі збільшенням бруду на поверхні і з відповідним зниженням різальної здатності при постійній подачі спостерігає поступове зростання температури.

Критичне забруднення веде до стрімкого зростання як сили (практично припиняється процес мікрорізання і спостерігається явище термосилового втиснення диску з його деформуванням практично до повної втрати стійкості (рис. 3)), так і температури в точці контакту, яка може сягати 700-900 $^{\circ}\text{C}$. За рівнянням (4) та на основі отриманих даних визначено площу контакту для диску із нещільним середовищем.

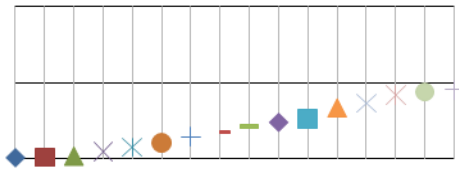


Рисунок 3 – Стрімке зростання температури T_i , °С, в зоні різання при утворенні на поверхні круга забруднення (час τ у хв)

При цьому значення температури і сили фіксували, з чеканням 2,0 с після початку процесу різання.

Результати зведені до табл. 1. Порівнюючи встановлену експериментально площу контакту із розрахованою теоретично s_i для випадку різання із поступальною подачею за (5), отримали щільність забруднення поверхні круга ψ_k , $\psi_k = s_i / \bar{s}$.

Таблиця 1 – Розрахунок площі контакту s_i за встановленими параметрами F_p та T_i

| № | Параметри процесу | | $s_i = \frac{2fFv\sqrt{6_Tt}}{T_0(t)\lambda_T}$ | \bar{s} | $s_s = \frac{R_1^2(\alpha - \sin(\alpha))}{2} + bl$ | ψ_k |
|---------------------------------|-------------------|-----------|---|-----------|---|----------|
| | F_p , Н | T_i , К | | | | |
| Новий круг - $\tau=5$ хв роботи | | | | | | |
| 1 | 82 | 610 | 96,2 | 92,23 | 186,0 | 0,495 |
| 2 | 84 | 599 | 89,3 | | | |
| 3 | 75 | 570 | 92,6 | | | |
| 4 | 79 | 575 | 90,8 | | | |
| Круг після $\tau=15$ хв роботи | | | | | | |
| 1 | 101 | 670 | 104,2 | 103,87 | 186,0 | 0,558 |
| 2 | 98 | 660 | 102,8 | | | |
| 3 | 95 | 675 | 105,3 | | | |
| 4 | 97 | 665 | 103,2 | | | |
| Круг після $\tau=30$ хв роботи | | | | | | |
| 1 | 110 | 702 | 110,4 | 110,42 | 186,0 | 0,593 |
| 2 | 108 | 690 | 108,1 | | | |
| 3 | 118 | 700 | 112,3 | | | |
| 4 | 121 | 685 | 110,9 | | | |
| Круг після $\tau=45$ хв роботи | | | | | | |
| 1 | 149 | 750 | 116,7 | 118,8 | 186,0 | 0,643 |
| 2 | 146 | 730 | 118,5 | | | |
| 3 | 153 | 745 | 119,2 | | | |
| 4 | 164 | 732 | 120,8 | | | |

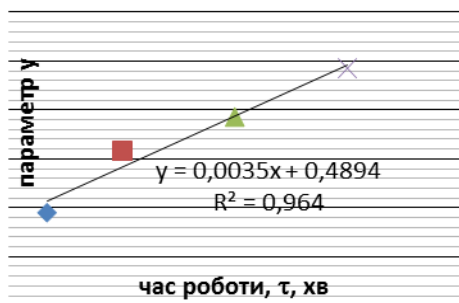


Рисунок 4 – Зміна ступеня забруднення поверхневого шару продуктами руйнування при обробці матеріалу КІМФ (параметра ψ) з плином часу (хв.)

Виміри контрольованих величин і розрахунок параметру ψ_k дозволили побудувати залежність останнього у функції часу (рис. 4). Видно, що дана залежність задовільно описується лінійною регресійною моделлю виду $y=b_0+b_1x$:

$$\psi = 0,4894 + 0,0035\tau \quad (7)$$

Таким чином, вперше встановлено закономірність зміни щільності поверхневого забруднення і показано, що параметр відносного забруднення ψ_k (що дорівнює відношенню площі контакту нового інструменту до площі контакту інструменту, який відпрацював певний час) практично лінійно зростає у функції часу. Як зазначалося раніше, ріст забруднення веде до підвищення температури ти силового навантаження плями контакту, що за певних умов може викликати пошкодження як інструменту, так і оброблюваної деталі.

Таким чином, для якісного оброблення нещільних матеріалів (карбонів типу КІМФ) інструмент має постійно очищуватися.

Оскільки при випробуваннях інструменту забезпечували також і ресурсні умови (тобто до повного пошкодження), проаналізовані виникаючі дефекти інструменту.

Для аналізу пошкодження кругів застосовано растрову електронну мікроскопію, оптичну мікроскопію, мірильні інструменти за ДСТУ 3215-95 (штатгенциркуль цифровий тип Digital Caliper 0-150 mm, мікрометрична головка тип Micrometer Caliper 0-25 mm). При проведенні контролю перевіряли:

- наявність пошкодження алмазовмісного шару та відносну площу ділянок викришування зерен

$$k_{oa} = \frac{N_a}{N_{cep}}$$

- наявність ділянок пошкодження підложки;
- засалювання;
- наявність порушення адгезійного зчеплення підложки із основою;
- відхилення геометричних розмірів корпусу інструменту відповідно до;
- деформація та псування корпусів інструменту.

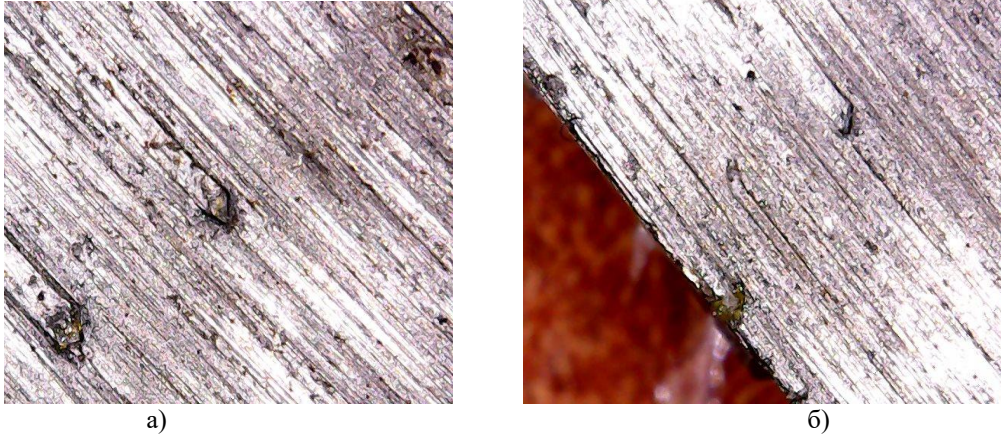
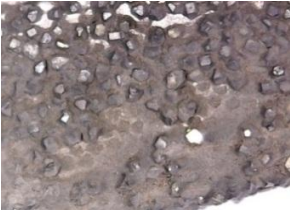




Рисунок 5 – Мікрофотографії очищеного гідроабразивним методом інструменту з малим вмістом алмазних частинок звичайної конструкції після однократного чищення (а), $\tau=80$ хв.; після трикратного очищення підвищеним вмістом алмазних частинок звичайної конструкції (б) $\tau=160$ хв.

Таблиця 2 – Типові дефекти кругів

| № п/п | Тип дефекту | Приклад | Контрольований параметр | Примітка |
|-------|--|---|---|----------|
| 1 | Наявність пошкодження алмазовмісного шару та відносна площа ділянок викрошування зерен |  Для кругів з підвищеним вмістом зерен | $N_{сер} = 7$ шт. При $N_a = 21$ шт., $k_{oa} = \frac{N_a}{N_{сер}} =$ $\frac{7}{21} = 0,33$ | |
| | |  Для кругів звичайної конструкції | $N_{сер} = 4$ шт. При $N_a = 21$ шт., $k_{oa} = \frac{N_a}{N_{сер}} =$ $\frac{4}{21} = 0,19$ | |
| 2 | Засалювання |  | $k_{sb} = \frac{S_b}{S_o} =$ $\frac{161}{227} = 0,71$ | |
| 3 | Наявність порушення адгезійного зчеплення підложки із основою | Не виявлено | | |
| 4 | Відхилення геометричних розмірів корпусу інструменту | Не виявлено | | |
| 5 | Деформація та псування корпусів | | | |

Побудовано залежність величини об'ємного зйому матеріалу та температури в зоні різання у функції глибини занурення круга. З діаграми рис. 6. стає очевидним, що залежно від кількості одночасно працюючих у зоні контакту зерен температура змінюється нерівномірно.

Порівняння результатів, отриманих для кругів різної щільності (із різною кількістю абразивних зерен на поверхні круга показує, що існує певне значення N , для якого максимальна температура внаслідок засалювання поверхні буде найбільшою.

Це явище можна пояснити тим, що засалювання міжзеренного простору вуглецевим пилом відбувається нерівномірно: в одному випадку утворюються сталі конгломерати, які практично не видаляються дією на них волокон матеріалу; в іншому випадку відбувається більш інтенсивне очищення поверхні за рахунок пружного відновлення вугільних волокон, які ще певний час знаходяться в контакті з поверхнею круга.

Оскільки явища у зоні контакту інструменту з оброблюваним матеріалом обумовлюються умовами термосилового навантаження, можна припустити, що зміна плями контакту впливатиме також і на показники якості обробки.

З цієї метою після закінчення обробки перевіряли:

- якість поверхневого шару на предмет відсутності розшарувань та спучень, що характеризуються відношенням товщини утворених дефектів до товщини оброблюваного матеріалу

$$R = \frac{\delta_n}{h}; \quad (8)$$

- шорсткість поверхні, оцінену за параметром Ra .

Додатково визначали зусилля різання P , H при $S=const$, які відбивали умови роботи інструменту; порівнювали також і об'єм знятого матеріалу w_m , отриманому при стабільному зусиллі різання $P=const$. Виміри здійснювали на основі профілограм поверхні, отриманих електронними засобами на РЕМ-106-И. Випробуванням піддавали нові круги та очищені гідроструменем, з відновленим профілем поверхні [9].

Результати досліджень представлені на рис. 6, 7. Оскільки нами було показано, що істотну роль у термосиловому навантаженні поверхні відіграє глибина різання h_p , на приведених діаграмах по осі абсцис зазначено саме цей параметр.

Встановлено, що параметр R незначно нелінійно зростає зі зростанням h , з уповільненням зростання при перевищенні товщини понад 10-12 мм. Залежність може бути визначена поліномом виду $y=b_0+b_1x+b_2x^2$. При цьому розбіжність між результатами обробки матеріалу новим кругом та очищеним неістотна; інша картина спостерігається при аналізі шорсткості поверхні.

Так, встановлено, що застосування кругів із малою кількістю алмазних зерен дозволяє отримати шорсткість поверхні на рівні 6,3 ...3,2 мкм за параметром Ra ; більший рівень шорсткості відповідає новим кругам. Дану особливість можна пояснити

тим, що круги, бувши у вжитку, мають профіль із меншим вильотом частинок абразиву; більша пляма контакту забезпечуватиме меншу шорсткість за рахунок ефекту вигладжування.

При цьому параметр Ra практично не залежить від глибини різання.

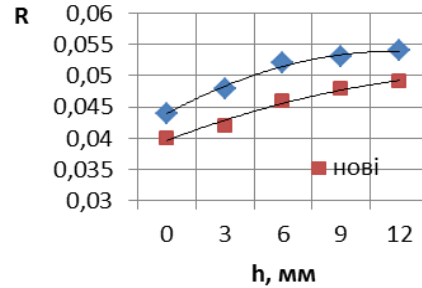


Рисунок 6 – Зміна якості поверхневого шару залежно від глибини різання

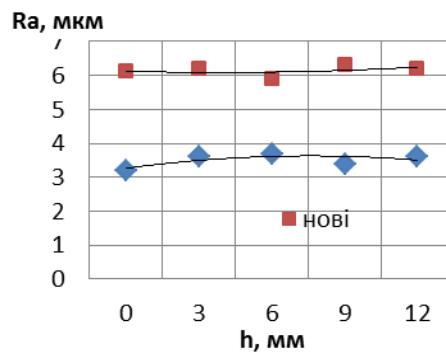


Рисунок 7 – Результати досліджень шорсткості поверхневого шару при зміні глибини різання

Перевірка рівня зусиль при постійній подачі $S=const$ показала (рис. 8), що існує істотна відмінність у силі різання кругів нового та такого, що працював певний час, що вимагає обов'язкового врахування ефекту зростання сили різання який більше проявляється при обробці матеріалів із суттєвими глибинами різання h .

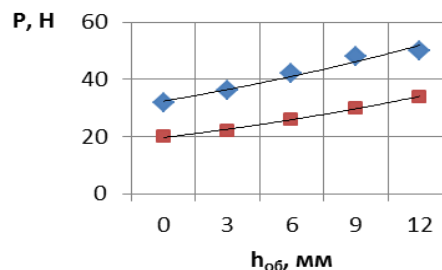


Рисунок 8 – Результати досліджень зусилля різання при постійній подачі для нового круга (а) та круга, що відпрацював 80 хв. (б)

Також визначено і об'єм матеріалу, який видаляється під час обробки. Порівнянню піддавали круги різної конструкції, а сам обсяг визначали за зменшенням ваги частин матеріалу, на які розрізали початкову заготовку. Розрахунок відповідних обсягів приведений в табл. 3.

Таблиця 3 – Обсяги шламу при різанні заготовки та встановлення щільності налипання шламу на поверхні круга

| № | Час роботи τ | Обсяг видаленої речовини $W_s = f(t) = \left[\frac{R_1^2(\alpha - \sin(\alpha))}{4} + vt \right] l\theta$, мм ³ | Зміна маси круга m_i , г | Розрахований обсяг $W_i = \frac{m_i}{\rho}$, мм ³ | Максимальний $W_i^{max} = 3\pi D_k h \delta - \frac{2}{3} \pi r_a^3 N$ мм ³ | Щільність налипання шламу |
|---|-------------------|---|----------------------------|---|--|---------------------------|
| 1 | 10 | 4628,5 | 0,6916 | 411,65 | 1083,3 | 0,38 |
| 2 | 30 | 4345,2 | 0,8188 | 487,4 | | 0,45 |
| 3 | 60 | 4299,8 | 0,9641 | 573,9 | | 0,53 |
| 4 | 120 | 4253,5 | 1,169 | 963,9 | | 0,89 |

З приведених результатів стає очевидним, що із збільшенням часу роботи кругом щільність залипання продуктів різання на поверхні круга зростає, а обсяг видалення речовини при різанні – зменшується. Дане зменшення обумовлене пружними відтисненнями у верстатній системі, які зростають при зростанні сил різання. Отже, зміна профілю різального круга веде до зменшення продуктивності процесу, зростання пружних деформувань, зміни параметрів якості оброблених заготовок.

Для подолання зазначених негативних явищ необхідно підвищувати жорсткість системи, забезпечуючи її раціональне значення при зміні стану робочого інструменту.

Зазвичай при призначенні режимів обробки матеріалу головну увагу зосереджують на встановленні допустимої швидкості об'ємного зняття матеріалу W , яка безпосередньо визначається маркою застосованого абразивного круга, його товщиною b та густиною абразивних частинок на периферії n , висотою виступу частинки над поверхнею δ , потужністю двигуна головного приводу N , глибиною пазу h (або товщиною матеріалу, що обробляється), а також швидкістю робочої подачі s . Як правило, потужність приводу N є лише обмежувачим параметром, у той час як швидкість подачі задається. Отже, можна вважати, що саме s має функціонально визначатися іншими прийнятими до уваги факторами:

- Глибина різання, або товщина оброблюваного матеріалу h ;
- Товщина круга b ;
- Марка круга, яка відображає густину абразивних частинок n ;
- Виступ частинок над поверхнею δ ;
- Жорсткість важільної системи c ;

- Швидкість різання v_p , яка залежить від діаметра круга D_k та частоти обертання шпинделя;
- Параметр матеріалу K .

Узагальнюючим параметром виступатиме швидкість подачі s . Межі зміни зазначених параметрів, одиниці виміру приведені в табл. 4.

Із прийнятих до уваги факторів параметр K визначає напрям різання матеріалу відносно головних осей плетіння, а жорсткість важільної системи c визначатиметься як напрямком дії результуючої сили різання відносно осей жорсткості верстата, так положенням диску (опосередковано жорсткістю самого диску, як зазначалося в роботі [10]).

Виступ частинок δ до уваги прийнятий не випадково, оскільки він обумовлюється не тільки використанням інструментом, а і є змінним із плином часу τ . Так, зміна δ відбуватиметься у міру засалювання диску продуктами руйнування.

Таким чином, нами до уваги прийнято 6 факторів, для яких проведемо випробування за ненасиченими планами багатфакторного аналізу з метою отримання регресійних рівнянь виду

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_1x_2 + \dots \quad (9)$$

Для проведення досліджень було використано програмне середовище Statgraphic Centurion, який дозволяє виконувати усі статистичні процедури із планування дослідження та із обробки результатів натурних експериментів.

Планування експерименту виконане у двох блоках 2^3 із загальною кількістю дослідів (спостережень) 32 для 5 факторів із дублюванням досліджень для різних значень параметру K .

Таблиця 4 – Фактори та рівні їх варіювання

| Фактор | Позначення | Од.виміру | Тип | Min (-1) | Max (+1) |
|---|------------|-----------|---------|---------------|---------------|
| F_1 | h | мм | Кільк. | 5 | 25 |
| F_2 | b | мм | | 1,5 | 3,0 |
| F_3 | n | шт | | 20 | 50 |
| F_4 | δ | мм | | 0,1 | 0,8 |
| F_5 | c | Н/мкм | | 5 | 25 |
| F_6 | K | - | якісний | 1-площина X-Y | 2-площина X-Z |
| Швидкість різання прийнята відповідно до рекомендацій виробника кругів, $v_p = 50 \dots 60$ м/с | | | | | |

За встановленими рівнями факторів F_1-F_5 проведені дубльовані спостереження для змінної K (рі-

зання здійснювали заготовки як в площині X-Y так і X-Z. При цьому s підбирали так, щоб температура у

зоні різання не перевищувала 220-230 °С. Попереднє статистичне оброблення даних довело, що спостерігається чітка функціональна обумовленість залежної змінної прийнятими до уваги факторами.

$$s = 21,0015 - 1,91667b - 0,00625c + 1,96429\delta - 0,4125h - 0,0208333n \quad (10)$$

Таким чином, отримана нами регресійна залежність дозволяє встановлювати значення контурної лінійної подачі робочого інструменту залежно від схеми технологічного налагодження для певного інструменту, який здійснює обробку зі швидкостями різання 50-60 м/с.

ВИСНОВКИ Проведеними дослідженнями встановлено, що зі збільшенням часу роботи кругом щільність налипання продуктів різання на поверхні круга зростає, а обсяг видалення речовини при різанні – зменшується. Отже, зміна профілю різального круга веде до зменшення продуктивності процесу, зростання пружних деформувань, зміни параметрів якості оброблених заготовок. Таким чином, для подолання зазначених негативних явищ необхідно підвищувати жорсткість системи, забезпечуючи її раціональне значення при зміні стану робочого інструменту.

Отримано регресійні рівняння для визначення раціональної швидкості лінійної подачі круга, встановлено закономірності формування показників якості поверхневого шару при абразивній обробці нещільних карбон-вмісних матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мелентьев Р. Ю., Натальчишин В. В. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов. *Зб. наук. праць НУК*. 2013. № 4. С. 30–34.
2. Ярославцев В. М. Процесс образования стружки при резании полимерных композиционных материалов с волокнистыми наполнителями. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2012. № 2 (87). С. 81–87.
3. Верезуб Н. В., Тарасюк А. П., Хавин Г. Л., Гетманов А. А. Механическая обработка волокнистых полимерных композитов: Монография. Харьков: ХНАДУ, 2001. 180 с.
4. Reza Negarestani, Laser cutting of carbon fibre-reinforced polymer composite materials. *School of mechanical, aerospace and civil engineering*. 2010. 112 p.
5. Верещака А. С., Дачева А. В., Аникеев А. И. Обработка материалов инструментом из твердого сплава с Re-Co-связкой повышенной теплостойкости и нано-структурированным износостойким покрытием *Материалы международной научно-технической конференции АИИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ»*, 2010 С. 39–45.
6. О. О. Ченчева, Є. Є. Лашко, О. А. Самусенко, В. Т. Щетинин, О. Ф. Саленко. Підвищення точності визначення механічних властивостей композитів на основі карбонівих волокон застосуванням раціональних методів обробки. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. Вип. 3(1). С. 62–71.
7. A. Salenko, O. Chenchewa, E. Lashko, V. Shchetynin, S. Klimenko, A. Samusenko, A. Potapov, I. Gussarova. Forming a defective surface layer when cutting parts made from carbon-carbon and carbon-polymeric composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4/1 (94). P. 61–72.
8. Dudarev A. S. To the receiving holes in the elements of sound-absorbing panels of aircraft engines made from composite materials. *In Proceedings of 8th All-Russian Conference on Aerospace Engineering and High Technologies* Perm, Russia: Perm State Technical University. 2008. PP. 45.
9. Salenko A. F., Shchetin V. T., Gabuzyan G. V., Nikitin V. A., Novikov N. V., Klimenko S. A. Cutting of polycrystalline superhard materials by jet methods. *Journal of Superhard Materials*. September 2016. Vol. 38. PP. 351–362.
10. Метак Мохамед Аль Ібрахімі, Кириченко А. М. Вдосконалення багатокординатних верстатів паралельної структури введенням надлишкових приводів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016): матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції (26–29 квітня 2016 р)*. Чернігів: ЧНТУ, 2016. С. 126.

REGULARITIES OF FORMATION OF OUTPUT QUALITY INDICATORS IN PROCESSING OF NON-STRONG CARBON CONTAINING MATERIALS BY ABRASIVE TOOL

A. Kirichenko, Metaq Al Ibrahim

Central Ukrainian State Technical University,
prosp. Universitetsky, 8 Kropivnitsky, 25000, Ukraine.

O. Chenchewa, V. Schetynin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: salenko2006@ukr.net

Purpose. Carbon materials are used in machines that work in extreme conditions: at high temperatures, in aggressive chemical environments, under high load conditions. Unlike carbon-polymer blanks and prepresses that can be laid on the substrate before polymerization, the initial carbon-carbon billets will be obtained in the form of slabs, circles, or bars that require further treatment. The processing of these materials by the abrasive tool is rather complicated, requiring the creation of certain conditions for the rational interaction of the combined abrasive grains with the material of a non-uniform structure. The solution of this problem is seen in the establishment of the functional conditionality of the

processes of formation of the surface layer by cutting modes on the basis of experimental study of the laws of the course of cutting processes. **Methodology.** To solve the problem, an original method for determining the contact conditions in the cutting zone is used, based on the fundamental provisions of the theory of heat and mass transfer, the theory of elasticity, the theory of plasticity, the basic positions of the mechanics of composite materials as a non-tensile environment. **Results.** The conducted researches have established, that with increasing time of work, the density of sticking of cutting products on the surface of the circle grows in the circle, and the volume of removal of matter during cutting decreases. Thus, the change in the profile of the cutting disc leads to a decrease in the productivity of the process, the growth of elastic deformations, changes in the quality parameters of the finished workpieces. So to overcome these negative phenomena it is necessary to increase the rigidity of the system, ensuring its rational value when changing the state of the working tool. Regression equations were obtained for determining the rational speed of linear feeding of the circle, and the regularities of the formation of the quality indices of the surface layer during abrasive treatment of non-volatile carbon-containing materials were established. **Originality.** The originality of the research is confirmed by the author's method of determining the conditions for the interaction of the instrument with the material, as well as by the application of the well-known theory of statistical processing of an array of experimental data. The resulting equations are also original. **Practical value.** The results of the research are brought to the engineering methodology of calculating the modes of maintenance of the dies, in particular, the determination of the rate of linear feed with known parameters of the cutting zone. **Conclusions.** Using a modern measuring technique and a special machine tool (in the form of a manipulator with surplus cinematic chains additional drives performed a study of temperature changes in the contact area, the condition of this phenomenon was determined by contamination of the cutting edge. On the basis of the multifactorial experiment, the functional condition of the parameters of the quality of processing (in particular, roughness and destruction of the surface layer) process regimes, it is shown that the main factor of supply output their quality indicators are the working flow of the instrument for which the corresponding regression equation is proposed.

Key words. abrasive treatment, diamond-binding tool, carbon-fiber composites.

REFERENCES

- Melentev, R. Y., Natalchishin, V. V. (2013) *Osobennosti mekhanicheskoy obrabotki poimernykh kompozitsionnykh materialov* [Features of machining of polymer composites], Collection of scientific papers of NUSNo, vol. 4. pp. 30–34.
- Yaroslavtsev, V. M. (2012), *Protsess obrazovaniya struzhky pry rezannyi polymernykh kompozitsionnykh materialov s voloknistymi napolnytelnyami* [The process of the chip formation during cutting of polymer composite materials with fibrous fillers], *Bulletin of MGTU after Bauman, Ser. "Machinebuilding"*, Vol. 287, pp. 81–87.
- Verezub, N. V., Tarasyuk, A. P., Khavin, G. L., Getmanov, A. A. (2001), *Mekhanicheskaya obrabotka voloknistykh polimernykh kompozitov* [Mechanical processing of fibrous composites], Monografiya. p. 180.
- Negarestani, R. (2010), Laser cutting of carbon fibre-reinforced polymer composite materials, *School of mechanical, aerospace and civil engineering*, 112 p.
- Vereshchaka, A. S., Dacheva, A. V., Anikeev, A. I. (2010), *Obrabotka materialov instrumentom iz tverdogo splava s Re-Co-svyazkoy povyshennoy teplostoykosti i nano-strukturirovannym iznosostoykim pokrytiem* [Material processing with a hard-alloy tool with a Re-Co-bond of high heat resistance and nano-structured wear-resistant coating], *Materials of the International Scientific and Technical Conference AAI "Automobile and tractor construction in Russia: development priorities and training" dedicated to the 145th anniversary of MSTI*, pp. 39–45.
- Chencheva, O. O., Lashko, E. Ya., Samusenko, O. A., Shchetinin, V. T., Salenko, O. F. (2017), *Pidvyshchennya tochnosti vyznachennya mekhanichnykh vlastyivostey kompozytiv na osnovi karbonovykh volokon zastosuvannyam ratsional'nykh metodiv obrobky*, [Increase of accuracy of determination of mechanical properties of composites based on carbon fiber using rational processing methods], *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Vol. 3 (1), pp. 62–71.
- Salenko, A., Chencheva, O., Lashko, E., Shchetinin, V., Klimenko, S., Samusenko, A., Potapov, A., Gusarova, I. (2018), Forming a defective surface layer when cutting parts made from carbon-carbon and carbon-polymeric composites, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4/1 (94), pp. 61–72.
- Dudarev, A. S. (2008), To the receiving holes in the elements of sound-absorbing panels of aircraft engines made from composite materials, *In Proceedings of 8th All-Russian Conference on Aerospace Engineering and High Technologies. Perm, Russia: Perm State Technical University*, p. 45.
- Salenko, A. F., Shchetinin, V. T., Gabuzyan, G. V., Nikitin, V. A., Novikov, N. V., Klimenko, S. A. (2016), Cutting of polycrystalline superhard materials by jet methods, *Journal of Superhard Materials*, Vol. 38, pp. 351–362.
- Metak, Mokhamed Al' Ibrakhimi, Kirichenko, A. M. (2016), *Vdoskonalennya bagatokoordinatnykh verstativ paralel'noi strukturiv vedennyam nadlishkovikh privodiv* [In addition to the configuration of the external layout of parallel structures and the introduction of the super-flush drive] *Kompleksne zabezpechennya yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZYATPS – 2016): Comprehensive assurance of the quality of technological processes and systems (KJNPSP-2016): materials of the VI International Scientific and Practical Conference (April 26-29, 2016).*

Стаття надійшла 25.02.2019.