**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА АБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ КАРБОН-КАРБОНОВЫХ КОМПОЗИТОВ
ЗА СЧЕТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТА****А. Н. Кириченко, Метак Аль Ибрахим**Центральноукраинский государственный технический университет
просп. Университетский, 8, г. Кропивницкий, Украина, 25006.**В. Т. Щетинин, О. А. Ченчевая**Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: salenko2006@ukr.net

Рассматриваются вопросы повышения качества резки абразивным инструментом заготовок из карбон-карбонových материалов. Данный класс материалов характеризуется высокой анизотропией свойств, повышенной абразивной способностью, высокой температуростойкостью и низкой теплопроводностью; его обработка связана с активным образованием трудноудаляемых пылевых продуктов разрушения, представляющих собой мелкодисперсную высокоактивную пыль. Показано, что использование абразивного инструмента (например, пильных дисков и полотен, трубчатых сверл) как правило, безальтернативно для некоторых операций с карбонowymi материалами. В то же время процесс резания часто сопровождается дефектами и повреждением поверхностных слоев, возникающих вследствие изменения формы и размеров пятна динамического контакта. Приведены результаты теоретико-экспериментальных исследований явлений в зоне резания. Показано, что основным фактором, влияющим на изменение условий контакта, и, как следствие, на тепловыделение, является загрязнение пильного диска продуктами износа. Таким образом, для поддержания заданной продуктивности процесса и обеспечения требуемых показателей качества необходимо применение специальных механических систем манипулирования рабочим инструментом.

Ключевые слова: карбон-карбонowe материалы, механическая обработка, абразивный инструмент.**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ АБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ КАРБОН-КАРБОНОВИХ КОМПОЗИТИВ
ЗА РАХУНОК ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ УМОВ ДИНАМІЧНОГО КОНТАКТУ****А. М. Кириченко, Метак Аль Ибрахим**Центральноукраїнський державний технічний університет
просп. Університетський, 8, м. Кропивницький, Україна, 25006.**В. Т. Щетинін, О. О. Ченчева**Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: salenko2006@ukr.net

Розглянуто питання підвищення якості різання абразивним інструментом заготовок з карбон-карбонových матеріалів. Незважаючи на те, що окремі компоненти в цілому нормально піддаються різанню, технологічні процеси лезвийної обробки полімеризованого матеріалу досить складні. Даний клас матеріалів характеризується високою анизотропією властивостей, підвищеною абразивною здатністю, високою температуростійкістю і низькою теплопровідністю; його обробка пов'язана з активним утворенням продуктів руйнування, що представляють собою дрібнодисперсний високоактивний пил. Неоднорідність матеріалу вимагає уточнення підходу до визначення умов контактної взаємодії, оскільки останнім впливає на кількість теплоти, що виділяється в зоні різання. Показано, що використання абразивного інструменту (наприклад, пилкових дисків і полотен, трубчастих свердел) як правило, безальтернативне для деяких операцій з карбонowymi матеріалами. У той же час процес різання часто супроводжується дефектами і пошкодженням поверхневих шарів, які виникають внаслідок зміни форми і розмірів площини динамічного контакту. Показано, що при обробці у міру зносу кола і формування щільної поверхневої карбонowej плівки починає різко зростати як вертикальна складова сили різання, так і температура в зоні різання. Приведено результати теоретико-експериментальних досліджень явищ у зоні різання. Показано, що основним чинником, що впливає на зміну умов контакту, і, як наслідок, на тепловиділення, є забруднення пилкового диска продуктами зносу. З ростом забруднення і збільшенням контактних деформацій на майданчику контакту різко зростають температури, що може привести не тільки до викришування робочих зерен інструменту, але і до утворення мікротріщин в при поверхневому шарі. Це особливо небезпечно для заготовок з карбон-карбонových матеріалів, піддається механічним впливам. Таким чином, для підтримки заданої продуктивності процесу і забезпечення необхідних показників якості необхідне застосування спеціальних механічних систем маніпулювання робочим інструментом.

Ключові слова: карбон-карбонowe матеріали, механічна обробка, абразивний інструмент.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современное машиностроение характеризуется стабильным увеличением в конструкциях удельного веса изделий, изготавливаемых из композиционных материалов, в первую очередь, на основе стеклянных и углеродных волокон. Владея комплексом уникальных физико-механических свойств, в первую очередь, ортотропией прочности и упругости, малым весом, стой-

костью к действию агрессивных сред, эти материалы все шире проникают в изделия авиационной, автомобильной техники, средств производства, товаров народного потребления.

Широкие технологические возможности формирования изделия из нитей и жгутов, пропитанных двух- и многокомпонентными клеящими составами, возможность относительно простого получения

оболочек, максимальное приближение формы заготовки в процессе выкладки к окончательной форме не только открывают новые перспективы использования таких материалов. При этом требуется и постоянное совершенствование способов и методов обработки отдельных технологических элементов, формообразование которых в процессе выкладки затруднено.

Несмотря на то, что отдельные компоненты в целом нормально поддаются резке, технологические процессы лезвийной обработки полимеризованного материала достаточно сложны. Они определяются следующими особенностями материала:

- 1) высокой вязкостью матрицы, ее низкой стойкостью к температурному воздействию;
- 2) твердостью и жесткостью армирующего наполнителя, высоким абразивным воздействием на поверхность режущего инструмента;
- 3) конечная адгезионная прочность компонентов, образование дефектного слоя при резании;
- 4) явления химического характера, высокие удельные давления в зоне контакта.

Еще большие сложности сопровождают процесс обработки карбон-карбоновых высокотемпературных материалов, которые, в отличие карбон-полимеров, имеют более хрупкую и абразивно-активную матрицу, образованную пироуглеродом. Именно поэтому операции резания, которыми получают различные уступы, пазы, отверстия, как правило, стараются осуществлять с применением алмазосодержащего инструмента.

Вопросам изучения особенностей процесса абразивной обработки композиционных материалов уделяли внимание многие исследователи, в частности В.И. Дрожжин, Л.С. Кравченко, А.А. Степанов, В.М. Ярославцев, Н.В. Вerezуб и др.

Так, авторами [1–4] показано, что, несмотря на более низкие прочностные свойства обрабатываемых материалов по сравнению с металлами, обработка композитов сопряжена с рядом сложностей, обусловленных приведенными выше особенностями.

В работе [5] детально проанализированы также возможности применения физико-технических методов обработки (в частности, гидрорезания), для формирования сквозных гладких отверстий.

Работа [6] показывает, применение функционального подхода дает возможность не только достичь более высокого качества поверхности, но и снизить материальные и временные затраты. Однако авторы считают, что именно абразивная обработка алмазосодержащим инструментом имеет наибольшие перспективы в получении удовлетворительных кромок. Эта же работа приводит данные и о потере алмазных зерен с поверхности инструмента в процессе резания, связывая это явление с контактными давлениями в зоне резания. При этом сделан вывод, что качество обработки будет резко снижаться.

В то же время систематизированной информации по вопросу обеспечения стабильности процесса обработки алмазосодержащим инструментом и высокого уровня качества поверхностного слоя в работах не приводится, что и обуславливает актуальность данных исследований.

Цель работы – установление закономерностей формирования поверхностного слоя при разрезании материала алмазосодержащим инструментом и выявление способов и методов повышения качества реза за счет обеспечения рациональных условий динамического контакта.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для достижения поставленной цели проведен комплекс теоретико-экспериментальных исследований, направленных на выявление особенностей формирования поверхностного слоя при действии инструмента с алмазоносным слоем. Используя основные положения теории тепло- и массообмена, теории упругости композиционных материалов, разработана модель формирования тепловых потоков в зоне резания, исследование математического модели которой с учетом упругих свойств материала позволило получить картины тепловых полей в материале и на поверхности инструмента.

Экспериментальную обработку проводили на отрезном станке FDB Maschinen GYQ400B/220 алмазосодержащим кругом марки 400 H15 60 VICTORY ST зернистостью 25/50 мкм с разным количеством зерен на периферии круга (для исследований использовали 6 кругов разной плотности); пазы выполнялись реноватором с установленным пыльным полотном Bosch Diamant-RIFF ACZ 85 RD, исследование поверхностного слоя, а также изучение получаемого шлама выполнялось на растровом электронном микроскопе РЕМ-106-И; образцы подготавливались из карбон-карбоновых материалов регулярного плетения; резание осуществляли с режимами, рекомендованными производителем инструмента для обработки камня. Температуру в зоне резания измеряли пирометром Maurer DigitalInfrared-Pyrometer Series KTRD 1065, обработку результатов производили с использованием специального программного обеспечения Maurer Software IR-LOG. Силы резания в зоне контакта определяли с помощью тензометрического преобразователя ZEMIC BM3-C3-0,2–3B, подключенного к АЦП m-DAQ с разрешающей способностью 2,0 Н и записью в файл ЭВМ.

Заготовки из карбон-карбоновых материалов характеризуются тем, что в соответствии с технологией их получения материал формируется практически без привязки к форме готового изделия; переплетенных между собой нити на каркасе подвергают химико-термической обработке, в результате которой слой пиролитического углерода прочно сшивает отдельные нити и жгуты между собой.

Как правило, заготовки имеют пористую структуру, а плотность зависит как от режимов обработки, так и от плетения армирующих жгутов [7]. При этом, несмотря на изотропность пироуглерода, анизотропия свойств определяется особенностями плетения.

Неоднородность материала требует уточнения подхода к определению условий контактного взаимодействия, поскольку последнее влияет на количество теплоты, выделяемой в зоне резания.

Пусть модель материала будет соответствовать приведенной на расчетной схеме рис. 1. Материал

имеет регулярное плетение, которое условно можно считать кубическим.

Рисунок 1 – Расчетная схема взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом

Считаем, обработка ведется диском, который контактирует с обрабатываемой поверхностью на длине контакта l . На этой длине с шириной b находятся одновременно N алмазных частиц, которые выступают с поверхности связки на величину h . Взаимодействие происходит так, что срез или разрушение волокна возможно только в случае, когда контакт в направлении действия силы резания происходит на высоте ψ относительно поверхности, в противном случае происходит упругая деформация с последующим восстановлением волокна.

Контакт по поверхности между зернами в момент упругого восстановления волокна приводит к выделению тепла Q , которое распределяется в инструмент, обрабатываемую заготовку, частично рассеивается в окружающую среду.

Поскольку инструмент вращательного типа, такой контакт происходит циклически, с постепенным выносом шлама из зоны резания.

При обработке инструмент контактирует с заготовкой периферией, а также торцами. Тогда тепловой баланс может быть представлен следующим образом

$$Q_p + Q_{tr} + Q_{tl} = Q_k + Q_i + Q_a, \quad (1)$$

где Q_p – тепловыделение на периферии инструмента; Q_{tr} , Q_{tl} – тепловыделение на правом и левом торце соответственно; Q_k – теплопоглощение в материал; Q_i – теплопоглощение в инструмент; Q_a – потеря тепла в окружающую среду и в стружку.

Считаем, что работа внешних сил в зоне резания распределяется на работу разрушения и работу силы трения. Если принять во внимание, что последняя полностью превращается в теплоту, то интенсивность тепловыделения на основании [8] составит

$$q = fpv, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения (для карбона при условии линеаризации на больших скоростях $f=0,18$); p – контактное давление; v – скорость скольжения.

Контактное давление определится соотношением силы нормального нагружения (F) к площади

контакта (s_k). При действии нормальной силы в месте контакта напряжения могут быть определены по соответствующим формулам Герца, которые для случая контакта абразивного зерна (представляемого в виде сферы радиусом r_1) и жгута волокон радиусом r_2 определится так $\sigma = \frac{mF^{1/3}E^{2/3}}{r^{2/3}}$, где

$m = 1 + \frac{r_1}{r_2}$, E – приведенный модуль упругости,

$E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$, r – приведенный радиус контакта,

$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$. Поскольку при обработке композиционного материала пористой структуры контакт зерен непостоянен, время контакта (a , следовательно, и интенсивность тепловыделения) определится плотностью плетения, плотностью алмазоносного слоя и скоростью относительного движения.

Из геометрических соображений и при условии, что срезание части волокна произойдет лишь при выступании волокна на величину ψ , максимальная длина контакта составляет $l_k = 2\sqrt{r_2^2 - (r_2 - \psi)^2}$. Одновременно в зоне обработки будет происходить N контактов, следовательно, приведенная длина контакта составит $l_p = Nl_k$, м. Тогда время контактного взаимодействия, которое определит выделение теплоты, составит

$$\tau = \frac{2N\sqrt{r_2^2 - (r_2 - \psi)^2}}{\pi D_k n}. \quad (3)$$

Частота возникновения зон тепловыделения определится отношением $\varphi = \frac{\pi D_k n}{l_k}$. Для малых зон

тепловыделения, получающих теплоту от контактного взаимодействия задача распределения температурных полей (а также определения температуры на поверхности нагрева) может быть сведена к задаче импульсного нагрева поверхности точечным источником, рассмотренной в [8].

Условия контакта на боковых поверхностях отличаются от условий контакта периферией тем, что нормальная составляющая поверхности инструмента зависит от упругих свойств обрабатываемого материала. В общем случае, считая, что контакт по боковым поверхностям происходит вследствие упругого восстановления материала, а также вследствие незначительной деформации металлического каркаса абразивного инструмента, контактное давление p может быть определено из следующих соображений.

При обработке выделяемое тепло передается не только в обрабатываемый материал, но и распространяется в инструмент. При этом нагрев происходит не всего инструмента, а лишь его части, непосредственно контактирующей с обрабатываемой поверхностью. Влияние неравномерного нагрева периферийной части дискового инструмента радиусом

сом R_1 можна представити, записав відповідуючі рівняння

$$\begin{cases} \sigma_r - \sigma_\tau - r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0; \\ \varepsilon_r = \varepsilon_\tau + r \frac{d\varepsilon_\tau}{dr}. \end{cases} \quad (4)$$

Для нерівномірного нагріву закон Гука може бути представлений наступним образом [9]:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu \sigma_\tau) + \alpha T; \\ \varepsilon_\tau = \frac{1}{E} (\sigma_\tau - \mu \sigma_r) + \alpha T. \end{cases}$$

где α – коэффициент температурного расширения. Для системы уравнений, полученной из (4)

$$\begin{cases} \sigma_r - \sigma_\tau - r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0; \\ \frac{d\sigma_r}{dr} - \mu \frac{d\sigma_\tau}{dr} - \alpha T \frac{dT}{dr} = \frac{1+\mu}{r} (\sigma_r - \sigma_\tau); \\ T = C_T r^2. \end{cases}$$

решение примет вид:

$$\begin{cases} \sigma_r(r) = \frac{1}{4} \alpha E (T_2 - T_1) \left[1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} - \frac{r^2}{R_2^2} - \frac{R_1^2}{r^2} \right]; \\ \sigma_\tau(r) = \frac{1}{4} \alpha E (T_2 - T_1) \left[1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} - 3 \frac{r^2}{R_2^2} + \frac{R_1^2}{r^2} \right]. \end{cases}$$

где R_2 – радиус нагріву інструмента

Возникающие на периферии напряжения приведут к появлению радиальных и тангенциальных деформаций, причем последние определяются как $\varepsilon_\tau = \frac{1}{E} (\sigma_\tau - \mu \sigma_r) + \alpha T$, что при условии недостаточно

прогретого центра диска вызовет его искривление на сторону на величину

$$\delta = \pi r \sqrt{(1 + \varepsilon_t)^2 - 1}.$$

Для прогиба усилие F составит $\delta = \frac{FR_1^2}{16\pi D}$

$$F = \frac{16\pi D}{R_1^2} \delta.$$

Уравнение, описывающее одномерное температурное поле для постановки задачи относительно периферии инструмента может быть получено на основании решения дифференциального уравнения

$$q = q_0 A = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x}(0, t):$$

$$T(x, t) = \frac{2q\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right). \quad (5)$$

После прекращения действия импульса длительностью τ на нагреваемую поверхность происходит ее остывание за счет перераспределения подведенного тепла. Одномерное температурное поле при условии, что обрабатываемое тело представляет

собой полубесконечное пространство, может быть определено следующим образом:

$$T(z, t) = \frac{2Aq_0\sqrt{\alpha_T}}{\lambda_T} \left[\sqrt{t} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right) - \sqrt{t-\tau} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T(t-\tau)}}\right) \right] \quad (6)$$

При этом температура поверхности составит $T_0(t) = \frac{2q\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T}$.

Однако такие условия будут сохраняться исключительно до момента засаливания инструмента. В дальнейшем условия контакта изменятся.

Для определения величины контактных давлений по силе резания в зоне обработки рассматриваем упругие свойства технологической системы. Условно ее можно представить в виде упрощенной расчетной схемы рис. 2.

Для такой двухмассовой системы уравнение равновесия сосредоточенных масс, приведенных к заготовке m_k и к рабочему органу инструмента m_d примет вид:

$$m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2} - v_k \frac{dx_k}{dt} - c_1 x_k = m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} - v_k \frac{dx_k}{dt} - c_2 x_k \quad (7)$$

$$m_k \frac{d^2 y_k}{dt^2} - v_k \frac{dy_k}{dt} - c_3 y_k = m_d \frac{d^2 y_d}{dt^2} - v_k \frac{dy_k}{dt} - c_4 y_k.$$

$$\text{При этом} \quad R_x = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} (x_k + x_d) = F,$$

$$R_y = \frac{c_3 c_4}{c_3 + c_4} (y_k + y_d), \text{ а величина фактической глубины резания } t_f \text{ вследствие упругого отжатия в зоне}$$

контакта на величину $(x_k + x_d)$ составит

$$t_f = t_z - (x_k + x_d). \quad (8)$$

Рисунок 2 – Упрощенная расчетная схема технологической системы

Более точно возникающие в зоне резания силы можно определить по результатам, представленным в [10].

Соотношение (8) позволяет экспериментально достаточно легко определить долю работы, приходящейся на резание материала в общей затраченной работе. А также идентифицировать параметры динамической системы.

При засаливании инструмента контакт будет происходить по поверхности охвата инструмента, а усилие прижима определится подачей и упругими свойствами элементов технологической системы. Приведенные уравнения позволяют прогнозировать температуру в точке контакта при различных условиях работы инструмента – как с открытыми зернами, так и в случае, когда поверхность покрывается продуктами разрушения.

По времени контактного взаимодействия рассчитаны температурные поля и оценена температура в зоне контакта, а также установлено изменение условий взаимодействия и его влияние на температуру. Показано, что при обработке по мере износа круга и формирования плотной поверхностной карбоновой пленки начинает резко возрастать как вертикальная составляющая силы резания, так и температура в зоне резания (рис. 3).

Также установлено, что резание новым инструментом формирует начальные очаги тепловыделения, которые в течение небольшого промежутка времени образуют практически однородное температурное поле (рис. 4), величина и градиент которого резко возрастают при ухудшении режущих свойств инструмента.

Рисунок 3 – Ожидаемое повышение температуры T в зоне резания в зависимости от контактных напряжений δ

Рисунок 4 – Изменение температуры на поверхности ($^{\circ}\text{C}$) с течением времени (мин) в зависимости от условий контакта

Если при абразивном разрушении поверхностного слоя, которое происходит за счет контакта единичного зерна с материалом, площадь непосредственного контакта определяется на основе упругого взаимодействия элементов технологической системы, то по мере снижения производительности обработки (определяемой объемом съема материала в единицу времени W_r , причем $W_r = t_f b s_r$, s_r – скорость рабочей подачи, b – ширина круга) при прежних режимах обработки неудаленный материал увеличит контактное давление и площадь контакта. Действительно, пусть зерно, двигаясь в массиве материала, совершает работу разрушения на длине контакта l_p . При этом считаем, что форма штриха соответствует форме выступающей части зерна, которую представим в виде полусферы высотой ψ . Тогда объемный сьем материала составит

$$W'_r = \frac{\pi \psi^2}{2} l_p n,$$

а разница в объеме уменьшит t_f в (7) с одновременным увеличением упругих деформаций (и, следовательно, силы F в месте контакта. Таким образом,

$$R_x = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} (x_k + x_d) = F, \quad \text{что позволит по величине}$$

фактически снятого слоя определить условия контакта в зоне резания.

Следовательно, уменьшение динамических нагрузок пятна контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью возможно, когда режимы абразивной обработки определены так, что механическая работа движения режущего слоя максимально расходуется на работу микрорезания. При этом шламы и микростружка надежно удаляются из зоны резания

и не способствуют уменьшению фактической глубины резания с одновременным резким ростом температуры.

Для подтверждения теоретических положений и идентификации динамических параметров технологической системы выполнен комплекс экспериментальных исследований.

На первом этапе было проведено изучение дисперсности и вида получаемого при абразивной обработке шлама.

После обработки заготовок были подготовлены препараты для микроэлектронного исследования как получаемых поверхностей, так и шлама материала (микростружки) после обработки. Образцы были наклеены на токопроводящую фольгу (рис. 5) и выдержаны при температуре $+85^{\circ}\text{C}$ в течение 12 ч. После этого были получены микрофотографии, которые позволили сделать следующие выводы.

Шлам от абразивной обработки состоит из мелких частиц как армирующих волокон, так и пиролитического углерода (рис. 6); размер частиц шлама сопоставим с размером абразивных зерен (дисперсностью абразивных частиц) и примерно равен величине упругого восстановления материала при воздействии инструмента.

Рисунок 5 – Подготовленные образцы для микроэлектронного исследования:
а) фрагмент материала; б) шлам после обработки

Это позволяет сделать вывод о том, что упругое восстановление поверхностного слоя после снятия нагрузки от действия инструмента приводит не только к увеличению контактных давлений, и, следовательно, к росту температуры T , но и ограничивает производительность процесса. Попытка увеличивать подачу или глубину резания материала без изменения скорости движения алмазоносного слоя не приводит к существенному росту производительности однако существенно увеличивает температуру в зоне резания, что негативно отражается на качестве поверхностного слоя и ведет к появлению микро и макротрещин в материале.

На втором этапе выполнены исследования контактных давлений в зоне резания и измерение возникающих локальных температур. Построенная зависимость величины объемного съема материала и температуры в зоне резания показала, что с ростом глубины резания резко возрастают удельные давления в месте контакта и температура T , что полностью соответствует результатам, представленным на

рис. 7 и позволяет сделать вывод о правильности теоретических допущений.

При этом съем материала практически не растет. Следовательно, можно ожидать более интенсивного выкрашивания зерен, а также более активного засаливания поверхностного слоя инструмента.

а)

б)

Рисунок 6 – Шлам, образующийся при обработке карбон-карбонных заготовок:
а) – частицы пиролитического углерода;
б) – фрагменты карбоновых волокон

Рисунок 7 – Микротрещины, зародившиеся в материале при его силовой обработке

Сравнение результатов, полученных для кругов разной плотности (с разным количеством абразивных зерен на поверхности круга показывает, что существует определенное значение N , для которого максимальная температура вследствие засаливания поверхности будет наибольшей (рис. 8).

Это явление можно объяснить тем, что засаливание межзеренного пространства угольной пылью происходит неравномерно: в одном случае, образуются устойчивые конгломераты, которые практически не удаляются действием на них волокон материала; в другом случае происходит более интенсивная очистка поверхности за счет упругого восстановления угольных волокон, которые еще некоторое время находятся в контакте с поверхностью круга.

Таким образом, ухудшение качества поверхностного слоя при обработке карбон-карбонových мате-

риалов связано прежде всего с ростом температуры в зоне резания.

Эта температура обуславливается контактными напряжениями, а также площадью контакта, на которой происходит тепловыделение.

При этом зернистость круга и его плотность однозначно определяет размер частиц шлама, а также формирует структуру поверхности (рис. 9). Следовательно, для обеспечения высокого качества поверхностного слоя обрабатываемых заготовок.

Рисунок 8 – Изменение температуры в зоне контакта в зависимости от количества одновременно работающих зерен, движущихся с одинаковой скоростью для разной глубины резания материала

Рисунок 9 – Структура поверхностного слоя: а) – при обработке инструментом с точечным контактом с поверхностью; б) – при обработке инструментом с повышенной площадью контакта (наблюдаются расслоения и поверхностные дефекты)

Целесообразно применение средств активной очистки поверхности инструмента во время обработки и применение специального инструмента, имеющего определенное количество режущих зерен на поверхности. Кроме того, в связи с изменением схемы силового взаимодействия при загрязнении инструмента необходимо применение специ-

альных средств ужесточения системы манипулирования рабочим органом станка, что особенно важно для машин с параллельными кинематическими цепями.

Очевидно, что такие машины должны содержать не только более мощные рычаги и шарниры, но и дополнительные приводы подачи, обеспечи-

вающие стабильное и равномерное перемещение рабочего органа.

ВЫВОДЫ. В результате теоретико-экспериментального исследования взаимодействия абразивного инструмента вращательного типа с неоднородной средой (карбон-карбоновым композитом) получены закономерности формирования поверхностного слоя и установлены функциональные взаимосвязи между пятном динамического контакта инструмента с поверхностью и термосиловым нагружением. Показано, что ухудшение качества обрабатываемой поверхности связано с изменением температуры в зоне резания, которая непосредственно определяется загрязнением режущего слоя.

С ростом загрязнения и увеличением контактных деформаций на площадке контакта резко возрастают температуры, что может привести не только к выкрашиванию рабочих зерен инструмента, но и к образованию микротрещин в приповерхностном слое.

Это особенно опасно для заготовок из карбон-карбоновых материалов, поддающимся механическим воздействиям.

ЛИТЕРАТУРА

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. Лорд Э. Э., Маккей А. Л., Ранганатан С. Новая геометрия для новых материалов / пер.с англ. Под ред. В. Я. Шевченко, В. Е. Дмитриенко. Москва: Физматлит, 2010. 360 с.
5. Вейко В. П., Либенсон М. Н., Червяков Г. Г., Яковлев Е. Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Москва: Физматлит, 2008. 321 с.
6. Salenko A. F., Shchetinin 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.
7. 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.
8. Кавтарадзе Р. З., Лапушкин Н. А., Лобанов И. Е. Расчетно-экспериментальное исследование нестационарного теплообмена в камере сгорания быстроходного дизеля с учетом теплоизолирующего действия слоя нагара. *Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС: материалы VI международного научно-практического семинара*. Владимир. 1997. С. 111–112.
9. Лобанов И. Е. Аналитическое решение нелинейной обратной задачи теплопроводности для тела с низким коэффициентом теплопроводности одномерной геометрии. *Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: программа XII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева*. Москва: МЭИ, 1999. С. 10.
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)*. Чернівці: ЧНТУ, 2016. С. 126.

IMPROVING THE QUALITY OF ABRASIVE CUTTING CARBON-CARBON COMPOSITES THROUGH RATIONAL CONDITIONS OF DYNAMIC CONTACT

A. Kirichenko, Metaq Al Ibrahim

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

V. Schetinin, O. Chenchewa

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

Purpose. Aspects of the processing of carbon-carbon materials with abrasive-containing rotational tools are considered. It is shown that to ensure the high quality of the surfaces obtained, it is necessary to take into account the processes of contamination of the surface of the abrasive layer with treatment products, as a result of which the conditions of dynamic contact change dramatically and the temperature in the cutting zone increases. It is necessary to constantly improve the ways and methods of processing individual technological elements. **Methodology.** To predict temperature fields use the basic provisions of heat transfer between the contacting bodies, as well as the law of heat release in the zone of mechanical contact; force interaction is analyzed from the point of view of the theory of contact interactions of elastic bodies. Experimental studies were performed on laboratory equipment LSK-400-5. For the analysis of temperature, the method of pyrometry with certified instruments was used. The study of surface layers and sludge after processing was performed using a PEM-106 I. scanning electron microscope. **Results.** A mathematical model is proposed for the interaction of elastic bodies with a spot of dynamic contact, which takes into account heat generation due to friction phenomena; The regularities of the formation of temperature fields at the point of contact are given, the relationship

between heat generation and pollution of the surface layer of an abrasive tool is established. **Originality.** For the first time, the features of processing carbon-carbon materials with an abrasive tool, whose cutting surface properties change with time, are analyzed. **Practice value.** The proposed measures to ensure the rational spot dynamic contact in the cutting zone. Reference 10, figure 9. It is advisable to use means of active cleaning of the tool surface during machining and the use of a special tool having a certain number of cutting grains on the surface.

Key words: carbon-carbon materials, mechanical processing, abrasive tool.

REFERENCES

1. 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*, 4. pp. 30 - 34.
2. Yaroslavtsev, V. M., (2012), *Protsess obrazovaniya struzhky pry rezanykh polymernykh kompozitsionnykh materialov s voloknistymi napolnytelnyami* [The process of the chip formation during cutting of polymer composite materials with fibrous fillers], *Vestnik MGTU im. Bauman. Ser. "Mashinostroeniye"*, No. 287, pp. 81-87.
3. Verezub, N. V., Tarasyuk, A. P., Khavin, G. L., Getmanov, A. A. (2001), *Mekhanicheskaya obrabotka voloknistykh polimernykh kompozitov* [Mechanical processing of fibrous composites].
4. Lord, E. E., Makkey, A. L., Ranganatan, S. (2010), *Novaya geometriya dlya novykh materialov* [New geometry for new materials], Moscow, Fizmatlit.
5. Veyko, V. P., Libenson, M. N., Chervyakov, G. G., Yakovlev, Ye. B. (2008), *Vzaimodeystviye lazernogo izlucheniya s veshchestvom* [Interaction of laser radiation with matter], Moscow, Fizmatlit.
6. 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*, Volume 38, pp. 351–362.
7. 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 Engineer-*
- ing and High Technologies, Perm, Russia: Perm State Technical University, p. 45.
8. Kavtaradze, R. Z., Lapushkin, N. A., Lobanov, I. Ye. (1997), *Raschetno-eksperimental'noye issledovaniye nestatsionarnogo teploobmena v kamere sgoraniya bystrokhodnogo izdeliya s uchetom teploizoliruyushchego deystviya sloya nagar*. [Calculated and experimental study of the nonstationary heat exchange in the combustion chamber of a high-speed diesel engine, taking into account the heat-insulating effect of the carbon layer], Improving the power, economic and environmental performance of internal combustion engines: materials of the VI International Scientific and Practical Workshop, Vladimir. pp. 111-112.
9. Lobanov, I. Ye. (1999), *Analiticheskoye resheniye nelineynoy obratnoy zadachi teploprovodnosti dlya tela s nizkim koeffitsiyentom teploprovodnosti odnomernoy geometrii* [Analytical solution of nonlinear inverse heat conduction problem for a body with low thermal conductivity coefficient of one-dimensional geometry], Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants: the program of the XII school seminar for young scientists and specialists under the guidance of Academician RAS I.I. Leontiev, p. 10.
10. Al' Hbrakhim, Metak Mokhamed, Kirichenko, A. M. (2016), *Vdoskonalennyya bagatokoordinatnykh verstativ paralel'noy strukturiv vedennyam nadlishkovikh privodny* [In addition to the configuration of the external layout of parallel structures and the introduction of the super-flush drive], Comprehensive assurance of the quality of technological processes and systems (KZYATPS - 2016): materials of the VI International Scientific and Practical Conference (April 26-29, 2016), CHNTU, p. 126.

Стаття надійшла 22.10.2018.