

Г. Хавин, Х. Чживень, Харьков, Україна

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ИЗНАШИВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. *Самой сложной проблемой при механической обработке полимерных композиционных материалов является интенсивное изнашивание инструмента, которое приводит не только к снижению его работоспособности, но и резко ухудшает качество произведенных операций. В настоящей работе рассматривается процесс изнашивания режущей кромки инструмента как изменение его микрогеометрии по отношению к первоначальному состоянию. Рассмотрена физическая природа абразивного износа как процесса контактного взаимодействия задней поверхности инструмента с разрушенным наполнителем и интенсивным тепловыделением за счет трения. Представлены различные модели описания изменения микрогеометрии режущей кромки в виде геометрических моделей с их преимуществами и недостатками. Подробно рассмотрены современные экспериментальные достижения в исследовании характера изменения микрогеометрии в процессе изнашивания. На этом основании сделано предположение об однопараметрическом характере изменения геометрии режущей кромки в процессе взаимодействия с композитом. Предполагается дальнейшее развитие исследования и создание математической модели, связывающей изменение микрогеометрии инструмента во времени как функции одного параметра, зависящего от первоначальной геометрии инструмента.*

Ключевые слова: *изнашивание инструмента; абразивный износ; резание композитов; микрогеометрия режущей кромки.*

Введение. Постановка задачи.

Одной из наиболее характерных особенностей механической обработки полимерных композиционных материалов (ПКМ) типа стеклопластиков, углепластиков является интенсивный износ режущей части инструмента. При этом характер изнашивания полностью отличается от изнашивания при обработке металлов. Это является следствием высоких абразивных свойств и неоднородностью структуры ПКМ.

Многочисленные экспериментальные исследования и практические приложения позволили сформулировать несколько основополагающих положений изнашивания инструмента при обработке полимерных композитов. К ним относят:

– в подавляючому більшості випадків спостерігається абразивний знос, який інтенсифікується появою в зоні різання поверхностно-активних речовин, виникаючих при деструкції полімерного зв'язуючого;

– загальний вигляд кривої залежності параметра изнашивания від часу характеризується двома етапами – інтенсивний знос в початковий момент роботи (прироботка) і період стаціонарного изнашивания (нормальний знос), період катастрофічного износа відсутній;

– изнашивание режущої кромки інструмента характеризується незначительним износом по передній поверхності інструмента і основним износом по задній поверхності, який є наслідком контактної взаємодії оброблюваного матеріала і задньої поверхності інструмента;

– фізичний знос режущої кромки (удалення матеріала інструмента) виникає як за рахунок округлення режущої кромки, так і за фактичної площини контактної взаємодії по задній поверхності.

Опираючись на перераховані закономірності можна зробити висновок про те, що первинна геометрія режущої кромки інструмента вже в період прироботки різко змінюється і до початку стаціонарного изнашивания набуває певної форми, яка в подальшому змінюється тільки кількісно без спотворення стійкої прироботаної форми. Фактично можна говорити про те, що первинна геометрія режущої кромки, вибрана за певними раціональними міркуваннями або в результаті рішення задачі оптимізації, служить тільки для ефективного різання в період прироботки, після чого її вплив на подальшу роботу інструмента в умовах стаціонарного изнашивания, несуттєво.

Аналіз досягнень і публікацій по проблемі.

Аналіз різних досліджень изнашивания режущої кромки інструмента при обробці ПКМ показав, що існує жорстка кореляція між появою износа, зростанням силового навантаження, температурної напруженості і появою різних дефектів обробленої поверхності [1].

Моніторинг процесу різання, власне як процесу руйнування матеріала, величини сили різання, температури інструмента і заготовки, дає можливість проаналізувати знос і прогнозувати термін служби інструмента [2]. Однак прослідкувати це взаємодіяння інструмента з заготовкою в зоні контакту дуже складно. Тому були

предложені різні прогностичні теорії, підтвержені або опровергнуті численними експериментами. Для опису точних моделей необхідні дорогі і трудомісткі експериментальні дослідження. Тому важливою частиною досліджень є численне моделювання, в першу чергу методом кінцевих елементів (МКЕ) [3]. Відповідна модель може точно передбачити процес різання, а саме силову взаємодію інструмента з заготовкою, знос інструмента і руйнування матеріалу. Для різання армованого волокнами композиту було створено кілька моделей, які в порівнянні з різанням однофазного матеріалу, не дали задовільних результатів. Ці моделі не описують поведінку багатофазного матеріалу. Для точного моделювання процесу різання слід враховувати не тільки властивості з'єднання волокна, матриці і волокна-матриці, а також взаємодію інструмент-волокно, інструмент-матриця і волокно-матриця відповідно [4,5].

Базуючись на експериментальних дослідженнях, в основному по ортогональному різанню углепластика, було зроблено ряд якісних висновків і тверджень по фізичному характеру изнашивания режущої кромки інструмента. Так в [1] було підтверджено, що изнашивание режущої кромки (закруглення) носить асиметричний характер, величина і інтенсивність якого є, в першу чергу, функцією вихідної геометрії інструмента (початкової заточки) і орієнтації армування.

Механізм крихкого руйнування при різанні ПКМ передбачає відсутність зони застою перед режущою кромкою, характерною при різанні металів, яке представляє собою скапливание матеріалу заготовки і фактично захищає режущу кромку. Відсутність такої зони призводить до домінуючому абразивному изнашиванню [6]. Відповідно до [7] знос інструмента в першу чергу інтенсифікується в невеличкій області поруч з режущою кромкою, де має місце перехід між передньою і задньою режущими кромками.

Для кількісного опису процесу изнашивания, як явища відповідного округленню режущої кромки, було запропоновано кілька моделей області контакту режущої частини інструмента і оброблюваного матеріалу. Так в [7] розглянута модель з п'ятьма параметрами, де робоча частина режущої кромки геометрично описана простими геометричними об'єктами типу «пряма лінія - еліпс - пряма лінія». В такому представленні режуща кромка представляється трьома окремими частинами за аналогією з моделлю в [8].

Геометрія різних типів інструментів достатньо добре визначена через задній і передній кути, а власне режуща кромка

как переход между передней и задней гранями. Как отмечено в [9], быстрый начальный износ определяет дальнейшее состояние инструмента и его пригодность для обработки ПКМ. Поэтому детальное определение микрогеометрии инструментов имеет важное практическое значение, а решение этой проблемы является актуальной задачей технологии механической обработки ПКМ.

Цель работы. Изучение современного состояния проблемы интенсивного изнашивания инструмента при резании ПКМ, определения существующих подходов к описанию микрогеометрии изношенного инструмента, формулировка новой математической модели прогнозирования работоспособности инструмента.

Основная часть.

В отечественной литературе в качестве технологического критерия изнашивания была принята условная величина изменения линейного размера по задней поверхности h_z [10]. Была предложена схема симметричного изнашивания, из которой было получено соотношение (1), связывающее износ по задней поверхности h_z с текущим ρ и начальным радиусом округления ρ_0 режущей кромки [11,12] или соотношение (2), связывающее текущий радиус округления ρ с износом по задней поверхности h_z

$$h_z = (\rho - \rho_0) \cdot \frac{\cos[(\alpha - \beta)/2]}{\sin[(\alpha + \beta)/2]}, \quad (1)$$

$$\rho = \rho_0 + h_z \cdot \frac{\sin[(\alpha + \beta)/2]}{\cos[(\alpha - \beta)/2]}. \quad (2)$$

На практике для рациональных значений переднего угла $\gamma = 5 - 20^\circ$ и заднего угла $\alpha = 10 - 25^\circ$ [10], используют формулы $h_z = (1,45 - 1,60) \cdot (\rho - \rho_0)$ и $\rho = \rho_0 + (0,6 - 0,7) \cdot h_z$.

Однако, экспериментальные исследования [13], показали, что изнашивание режущей кромки имеет ярко выраженную несимметричную форму. Интенсивный износ инструмента при обработке полимерных композиционных материалов резко меняет начальную геометрию заточенного инструмента, что оказывает значительное влияние на обрабатываемость и интенсифицирует появление различных дефектов в

обработанном материале. Анализ многочисленных экспериментальных данных показал, что наиболее сильно подвержена износу задняя поверхность инструмента и ее интенсивность в основном определяется углом ориентации армирования θ . Например, как показано в [1], максимальный износ при обработке однонаправленного углепластика имеет место для $30^\circ < \theta < 60^\circ$.

Далее под износом по задней поверхности будет пониматься величина «flank wear V_b » согласно нормативному определению в норме ISO 8688:1 следующим образом: «Износ по задней поверхности измеряется в параллельном направлении к грани износа и в перпендикулярном направлении к начальной режущей кромке, например, от начальной режущей кромки до предельной грани износа, который обрезает начальную заднюю поверхность». Эта величина может быть измерена с помощью электронного или оптического микроскопа как длина между текущей режущей кромкой и последней точкой, принадлежащей задней поверхности [14].

Несмотря на попытки оптимизации геометрии инструмента, использования различного вида покрытий (в том числе и алмазных), защищающих режущую кромку, изнашивание неизбежно, как неизбежно появление дефектов типа расслаивания, выдернутых и не срезанных волокон, растрескивания. По мере изнашивания, например при сверлении, растет осевая сила [15, 16], что, в свою очередь, интенсифицирует износ.

Собственно в процессе изготовления инструмента между передней и задней гранью имеет место переходная область, которая характеризуется закругленным краем. Даже если избежать этого округления, то острый край не будет работоспособным, из-за малой прочности, что показано, например, в [17,18]. Использование алмазных покрытий толщиной от 6 до 12 мкм приводит к увеличению радиуса округления. К модификации режущей части инструмента имеется достаточно устойчивый интерес и в наши дни, что нашло отражение во множестве работ, посвященных подтачиванию, снятию фасок и т.д.

В настоящее время не существует стандартов по подготовке режущей кромки для обработки ПКМ, но было предложено несколько математических моделей, описывающих геометрию режущей части и округление, в том числе в процессе изнашивания. Так в [19] было предложено для описания закругления режущей кромки использовать четыре параметра Δr , ϕ , S_γ , S_α , рис.1. Метод сводится к определению К-фактора, как отношения $K = S_\gamma/S_\alpha$. Профиль инструмента определяется при помощи двух параметров Δr , как минимальное расстояние от пересечения двух наиболее подходящих линий к профилю инструмента и

угла ϕ , который описывает смещение точки среза либо на переднюю, либо на заднюю поверхность относительно биссектрисы. Два параметра S_γ и S_α измеряют длину от пересечения с точкой разделения закругления режущей кромки на передней и задней поверхности, соответственно. Асимметрия геометрии и определяется К-фактором и средним округлением режущей кромки $S_{av} = (S_\gamma / S_\alpha) / 2$.

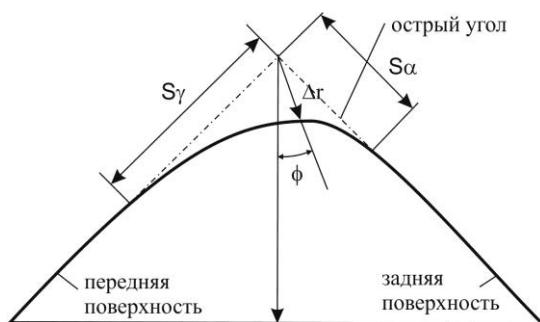


Рисунок 1 – Общее представление геометрических характеристик режущей кромки для описания К- фактора согласно [20]

Из предложенной геометрической модели следует, что в основу положена идеализированная абсолютно острая модель, образуемая прямыми, проведенными к профилям переднего и заднего углов. После определения условных точек перехода профилей в прямые измеряют величины S_γ и S_α (рис.1) и оценивают значение Δr как минимальное расстояние от точки пересечения прямых абсолютно острого профиля режущей кромки и действительного. После этого рассчитывают К-фактор.

Согласно [21] метод расчета К-фактора хорошо зарекомендовал себя для описания асимметричности формы режущей кромки и ее затупления (за счет округления). Однако метод не применим для режущих кромок с изогнутыми передними или боковыми гранями. Метод получил большую популярность из-за своей простоты и ясности понимания. Однако, как отмечено в [22], имеет место субъективизм и неопределенность в определении точки разделения, потому что профиль режущей кромки приближается к идеальной геометрии плавно. Также было установлено, что измерение радиуса режущей кромки оптическими и контактными способами дает средний разброс этой величины до 48%. Основным

источником выявленной ошибки является алгоритм, используемый для расчета параметров геометрии режущей части. Для преодоления такой высокой погрешности в [22,23] был разработан итерационный алгоритм уточнения параметров микрогеометрии. В основе этого подхода лежит описание вида «прямая–окружность–прямая», рис.2. Авторы использовали две интерполяции к передней и задней поверхности и приняли биссектрису линии угла клина. Биссектриса была дополнена линией l_n на ее пересечении с профилем инструмента (горизонтальная линия на рис.2). Авторы определили идеальный круг с радиусом r_{ideal} , который определяется через 3 точки: касательно к передней, задней поверхностям и линии l_n .

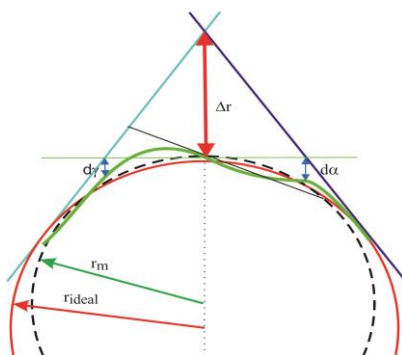


Рисунок 2 – Геометрии закругления режущей кромки [23]

Начиная r_{ideal} , круг радиуса r_m (профиль) с минимальной ошибкой согласуется с профилем инструмента. Этот радиусный выступ представляет профиль идеально закругленной симметричной режущей кромки (пунктирная линия на рис.2). Также в [22,23] предложен метод наименьших квадратов для подгонки круга к профилю инструмента.

Недостатком такого подхода считается чрезмерное упрощение микрогеометрии через описание одной дугой окружности. Однако в [22,23] дополнительно была описана асимметрия микрогеометрии двумя длинами $d\gamma$ и $d\alpha$. Эти значения определялись как расстояние между пересечением l_n и линейной интерполяцией на передней и задней поверхности. В отличие от определения К-фактора, значение Δr в этом подходе описывается как расстояние от пересечения передней и задней

поверхностей до профиля инструмента в направлении биссектрисы. Характерные параметры были выбраны таким образом, чтобы обеспечить настройку во время оценки. Параметры Δr , $d\gamma$ и da опорных точек на профиле режущей кромки, можно измерить с хорошим качеством и повторяемостью, и без аппроксимации, в отличие от определения в [24].

Для инструментов со скошенной геометрией режущей кромки были предложены оптимизированные подходы [18,25], в которых использовался не только один круг, но и круг при каждом переходе от передней и задней поверхности соответственно к фаске, представленной на рис.3.

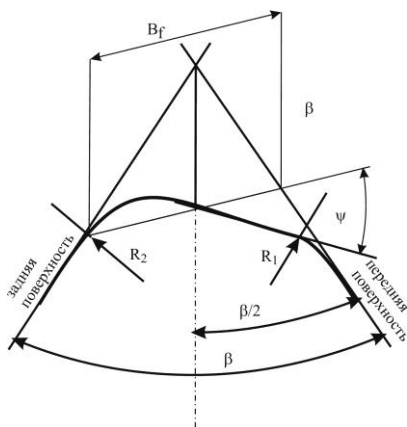


Рисунок 3 – Геометрическая модель закругления режущей кромки согласно [18,25]

В модель были введены дополнительные параметры: ширина гребня – B_f и шаг фаски Ψ , который описывает асимметрию профиля инструмента. Для оценки угла клина (угол заострения) β в [18] был предложен полиномиальный подход шестого порядка. Однако описание микрогеометрии таким полиномом может вызвать значительное отклонение от фактической геометрии режущей кромки и в соответствии с [21] дать низкую точность.

В литературе существуют и другие подходы, которые устанавливают, например, зависимость радиуса округления по отношению к неразрезанной толщине стружки h , вида $\lambda = r_\beta / h$ [18], где r_β – радиус режущей кромки. Однако в [21] было показано, что влияние

вышеупомянутого соотношения на производительность резания ограничено, поскольку оно зависит от определения режущей кромки.

При обработке ПКМ имеет место механизм хрупкого разрушения. Геометрия инструмента при обработке углепластика не защищена от застойной зоны перед режущей кромкой, что приводит к сильному абразивному износу и очень асимметричному округлению режущей кромки, что подробно описано в [26]. В [9] было предложено использовать радиус режущей кромки r_{β} (cutting edge rounding – CER) в качестве критерия износа инструмента при сверлении углепластика. Было статистически доказано, что радиус режущей кромки коррелирует с расслоением заготовки в равной степени с хорошо известным критерием износа по задней поверхности (V_b). Авторы [9] отметили, что измерение износа на основе CER проще и точнее, чем традиционное измерение V_b не только при сложной геометрии инструмента, но и при очень малых значениях износа.

В [27] разработали подход анализа режущей кромки (CEA) для описания геометрии, адаптированный к процессу механической обработки ПКМ, который получил дальнейшее развитие в [28]. В этом подходе рассмотрено резание и изменение в направлении подачи с учетом типичной геометрии износа в ПКМ (углепластике). Было экспериментально показано, что динамика изменения изношенной поверхности образует форму «водопада» с $S_{\gamma} \ll S_{\alpha}$. Был разработан интерфейс, позволяющий находить соотношение между передним углом γ или задним α , в системе отсчета инструмента, как показано на рис.4.

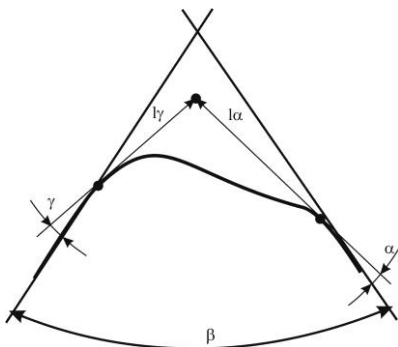


Рисунок 4 – Геометрическая модель контактного взаимодействия режущей кромки и углепластика [27, 28]

Для углепластика рекомендується обробка інструментом с положительными передними и задними углами. Это позволяет достаточно точно определить точки контакта в системе отсчета инструмента с передней и задней гранями инструмента (отмечены точками на рис.4). Расстояние от начала координат системы отсчета инструмента до точки контакта в направлении подачи определяется как длина l_γ , на которую попадает стружка под действием режущей кромки. Согласно [27, 28] эта длина l_γ представляет особый интерес для механической обработки углепластика, поскольку она описывает зону, где материал в основном не перемещается вдоль передней грани, но сжимается под режущей кромкой. Длина, соответствующая наклону l_γ к боковой поверхности, называется l_α .

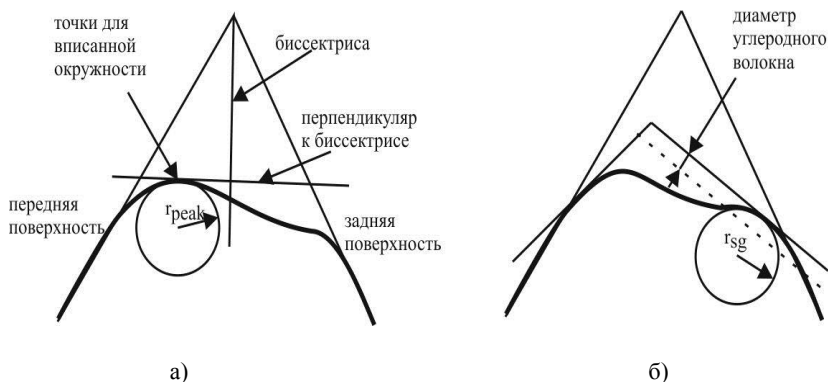


Рисунок 5 – Геометрическая модель контактного взаимодействия режущей кромки и углепластика [27, 28]: а – формирование r_{peak} ; б – формирование r_{sg}

По сравнению с моделью [25] в работах [27, 28] предложена величина максимального радиуса вершины r_{peak} и радиуса генерации поверхности r_{sg} в аппроксимации СЕА. Радиус формирования поверхности r_{sg} показан на рис.5, б. Он описывает профиль инструмента на переходе от отрицательного к положительному заднему углу. В этой зоне инструмент подвергается воздействию нормальных контактных сил высокой интенсивности, что приводит к разрушению материала углепластика. Радиус r_{sg} определяется как радиус вписанной окружности к профилю инструмента между точкой контакта и шириной

равной диаметру одного углеродного волокна (порядка 6 мкм) в направлении подачи с отрицательным задним углом. Согласно [27] для хороших результатов обработки желательнее иметь бесконечно большой радиус r_{sg} .

Предложенный максимальный радиус r_{peak} , как показано на рис.5, а характеризует переход от отрицательно ориентированной части задней поверхности к передней поверхности, где происходит отделение материала от заготовки и образуется стружка. Чем меньше этот радиус, тем инструмент лучше заострен, что имеет решающее значение собственно для отделения стружки при низких величинах подачи. Асимметрия профиля режущей кромки в подходе СЕА характеризуется отношением замкнутых областей между профилем режущей кромки и вертикалью к биссектрисе на передней поверхности – A_γ , и на задней поверхности A_α , рис.5,а. Согласно [27], этот подход к области для характеристики асимметрии $K_{sym} = A_\alpha / A_\gamma$ более устойчив к ошибками и надежнее, чем фактор $K = S_\gamma / S_\alpha$, предложенный в [19, 20]. Подход СЕА содержит больше параметров микрогеометрии, но l_γ , r_{sg} , r_{peak} и задний угол α оказывают наибольшее влияние на качество обработки.

В соответствии с [7] износ инструмента в первую очередь интенсифицируется в небольшой области рядом с режущей кромкой, где имеет место переход между передней и задней режущими кромками.

Для количественного описания процесса изнашивания, как явления соответствующего округлению режущей кромки, было предложено несколько моделей области контакта режущей части инструмента и обрабатываемого материала. Так в [7] рассмотрена модель с пятью параметрами (рис.6), где рабочая часть режущей кромки описана простыми геометрическими объектами типа «прямая линия - эллипс - прямая линия». В таком представлении режущая кромка представляется тремя отдельными частями по аналогии с [8].

Согласно этому представлению (рис.6, а), контактное взаимодействие вершины инструмента схематически разделено на три области: по передней грани резца (область стружкоотделения) – S_{ch} , область сжатия материала – S_{com} и область упругого взаимодействия по задней грани режущего инструмента – S_{sp} . Область стружкоотделения ограничена номинальным уровнем материала перед режущей кромкой, который определяется, например, глубиной резания (точка 1) и крайней передней точкой в направлении скорости резания – точка 2.

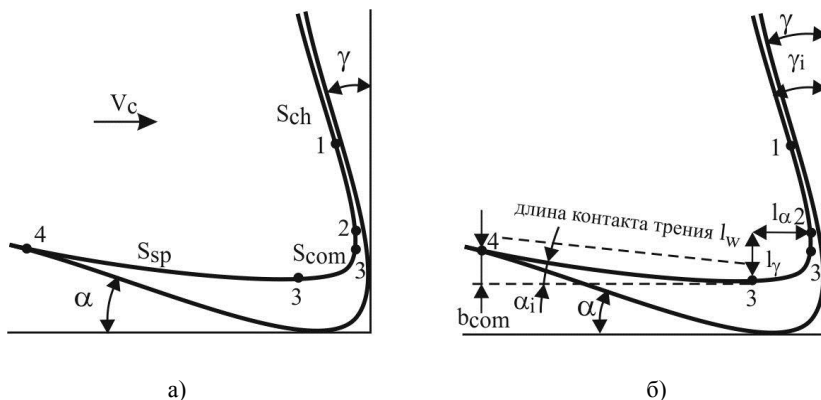


Рисунок 6 – Модель контакту режущої частини інструмента і матеріала [7]:

а – загальний знос інструмента; б – мікрогеометрія вершини інструмента

В моделі передполагается, що ця область в процесі взаємодії (ізнашивання) буде зберігати прямолинійний вид, змінюючи при цьому значення переднього кута γ . Область сжатия матеріала представляє собою контактну площу взаємодії закруглення режущої кромки між крайньої передньої точкою в напрямленні швидкості різання (точка 2) і точкою 3 касання округлення вершини в напрямленні подачі. Форма вершини інструмента здесь может быть описана окружностью некоторого радиуса или эллипсом с полуосями l_α (большая) и l_γ (меньшая) соответственно. Эта область ответственна за контакт по длине задней поверхности между точкой 3 касания округления вершини в напрямленні подачі и точкой отсутствия контакту 4. Эта длина обусловлена упругим последствием (отжатием) обработанного матеріала и определяет переход между первоначальным (или предыдущим) и изношенным (последующим) профилем. В [7] принято, что отжатие b_{com} определяет эту длину и является функцией упругих свойств матеріала. Текущий угол α_i и параметр b_{com} определяют длину контакту трения l_w и прямую, образующую область S_{sp} .

Для оценки изменения формы инструмента в [29] было предложено использовать параметр LWQ – величину локального износа (затемненная площадь, рис.7, б). Это значение находится путем сравнения текущего профиля режущей кромки инструмента с исходным профилем (изношенного инструмента), рис.7, а.

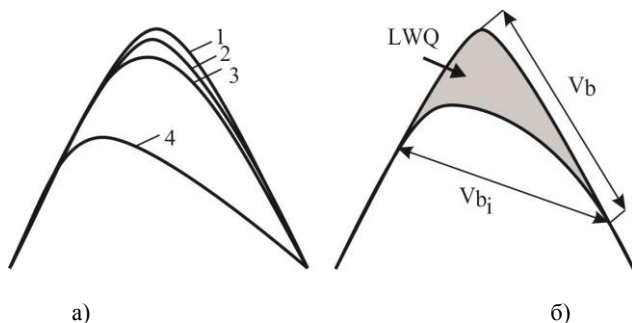


Рисунок 7 – Профиль режущей кромки инструмента без износостойкого покрытия на расстоянии 200 мкм от угла сверления, после сверления: 1 – неизношенный профиль; 2, 3 и 4 – после сверления 5, 50 и 250 отверстий соответственно [29]:
а – текущее изменение профиля; б – износ режущих кромок

Анализ 2D профилей вершины режущей кромки также позволяет оценить боковой износ и радиус режущей кромки. В экспериментальных исследованиях измерения были выполнены в трех местах на режущих кромках инструмента: на расстоянии 200 мкм от угла сверления, в центре и на расстоянии 200 мкм от места соединения первой и второй режущих кромок.

Этот тип измерения, предложенный в [14] показал высокую чувствительность к износу по передней поверхности. Как показано на рис.7, износ по передней поверхности оказывает прямое влияние на значение V_{b_i} . Если износ по передней поверхности растет быстрее, чем износ по задней поверхности, то увеличивается LWQ , но уменьшается значение V_{b_i} . Отсюда следует, что параметр V_{b_i} может иметь существенную ошибку при описании прогрессирующего изнашивания. Из 2D профилей режущей кромки можно получить фактическое значение износа по задней грани (V_{b_i} , рис.7, б) и оценить, исходя из суперпозиции профилей кромок инструмента, количество материала, локально потерянного инструментом. Как и следовало ожидать, измерение LWQ вдоль режущей кромки показало ее непропорциональность с радиальным положением места измерения. Большее значение LWQ находится на периферии в угловой точке сверления и уменьшается к точке в вершине сверления.

В настоящее время, несмотря на многочисленные усилия исследователей в области механической обработки композиционных материалов, описание изнашивания инструмента, изменения его

микрогеометрии в процессе работы и прогнозирования его стойкости, носят эмпирический характер и базируются на проведении конкретных экспериментов для отдельных материалов и инструментов. Теоретические подходы базируются на использовании соотношения Арчарда для абразивного износа, в котором изношенный объем материала (отделенный объем материала) пропорционален приложенному контактному усилию (контактная сила) и длине контакта $w = K / 3 \cdot F \cdot l / H$, где w – объем изношенного (удаленного) материала; F – контактная сила; l – длина контакта; H – твердость более твердого материала, в данном случае инструмента; K – коэффициент Арчарда. Чаще всего это соотношение используют как зависимость скорости изнашивания dw/dt от контактного усилия и скорости взаимодействия dl/dt . Линейный характер соотношения Арчарда корректно выполняется достаточно редко для отдельных видов материала в узком диапазоне изменения параметров взаимодействия.

Изменения действия, например, осевой силы F_s во времени с учетом изнашивания (изменения микрогеометрии вершины инструмента) может быть представлено в виде $F_s = K \cdot F^\alpha \cdot V^\beta \cdot g(w)$, где V – скорость резания, α и β – экспериментальные постоянные. Функцию $g(w)$ чаще всего представляют в виде $g(w) = (w_0 + k_w \cdot w)^\delta$ или $g(w) = w_0 + k_w \cdot w^\delta$, где k_w и δ – экспериментальные постоянные [30].

В конечном итоге для описания закона изнашивания и предсказания стойкости инструмента необходимо определение ряда эмпирических постоянных, значения которых определяются изменением микрогеометрии вершины инструмента в процессе взаимодействия заготовки и материала.

Заключение.

Несмотря на многочисленные научные исследования и усилия, проблема создания научно обоснованной модели изменения микрогеометрии инструмента в процессе изнашивания при механической обработке ПКМ продолжает оставаться открытой. Достигнутые успехи в экспериментальных исследованиях позволили сделать ряд качественных и количественных выводов, которые не обладают обобщающим значением и справедливы только в рамках изменения экспериментальных параметров и материалов.

Существуют значительные сложности в измерении текущего износа и пересчета в математических моделях так, как они включают в себя

большое количество параметров. Последнее обстоятельство снижает практическую ценность моделей потому, что затруднительно производить достаточно простой технический контроль износа режущей кромки и предсказание работоспособности инструмента.

Для преодоления технических трудностей измерения величины износа и усиления практической реализации математических моделей предлагается в качестве главного критерия измерения изнашивания инструмента использовать потерю им веса в процессе резания. Дальнейшая оценка геометрии износа должна описываться простой однопараметрической геометрической моделью, позволяющей оценить изменение формы режущей кромки по задней поверхности инструмента и прогнозировать его стойкость. Создание такой математической модели является перспективным направлением научных исследований обладающих новизной и практической ценностью.

References. 1. *Henerichs M., Voss R., Kuster F., etc.* Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015, no. 9, pp.136–145. doi:10.1016/j.cirpj.2014.11.002. 2. *Siddhpura A, Paurobally R.* A review of flank wears prediction methods for tool condition monitoring in a turning process. *Int. J Adv. Manuf. Technol.*, 2013, no. 65, pp.371–393. doi:10.1007/s.00170-012-4177-1. 3. *Dogra M., Sharma V.S., Sachdeva A., etc.* Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: a review. *Int J Precis Eng Manuf.*, 2010, no. 11, pp.341–358. doi:10.1007/s12541-010-0040-1. 4. *Xu W, Zhang LC.* A new approach to characterizing the surface integrity of fibre reinforced polymer composites during cutting. *Composite. Part A*, 2017, no.103, pp.272–282. doi:10.1016/j.compositesa.2017.10.015. 5. *Xu W., Zhang L.C., Wu Y.* Elliptic vibration-assisted cutting of fibre-reinforced polymer composites: understanding the material removal mechanisms. *Composite Sci. Technology*, 2014, no.92, pp.103–111. doi:10.1016/j.compscitech.2013.12.011. 6. *Wang X., Kwon P. Y., Sturtevant C., etc.* Tools wear of coated drills in drilling CFRP. *Journal of Manufacturing Processes*, 2013, V.15, no.1, pp. 127–135. doi:10.1016/j.jmapro.2012.09.019. 7. *Voss R.* Fundamentals of Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Machining. 2017, Eigenossische Technische Hochschule Zurich (ETH): Zurich. 8. *Zhang L. C., Zhang H. J., Wang X. M.* A force prediction model for cutting unidirectional fibre-reinforced plastics. *Machining Science and Technology*, 2001, V.5, no.3, pp. 293–305. doi:10.1081/MST-100108616. 9. *Faraz A., Biermann D., Weinert K.* Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, V.49, no.15, pp.1185–1196. doi:10.1016/j.ijmactools.2009.08.002. 10. *Stepanov A.A.* Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov, L., Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1987, 176 s. 11. *Rudnev A.V., Korolev A.A.* Obrabotka rezaniem stekloplastikov, M., Mashinostroenie, 1969, 118 s. 12. *Drozhdzin V.I.* O kontakte poverhnosti instrumenta s plastmassoj pri rezanii. *Rezanie i instrument*, 1970, 2, c. 59–66. 13. *Ramireza C., Poulachona G., Rossia F., etc.* Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling. *Procedia CIRP*, 2014, no.13, pp.163–168. doi:10.1016/j.procir.2014.04.028. 14. *Rawat S., Attia H.* Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites. *Wear*, 2009, V. 267, no.5–8, pp. 1022–1030. doi:10.1016/j.wear.2009.01.031. 15. *Hocheng H., Tsao C.* Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits, *Journal of Materials. Processing Technology*, 2003, V.140, no.1-3, pp. 335–339. doi:10.1016/S0924-0136(03)00749-0. 16. *Tsao C., Hocheng H.* Effect of tool wear on

delamination in drilling composite materials, International journal of mechanical sciences, 2007, V.49, no.8, pp. 983–988. doi:10.1016/j.ijmecs.2007.01.001. **17.** Bouzakis K.-D., Michailidis N., Vidakis N., etc. Optimization of the cutting edge radius of PVD coated inserts in milling considering film fatigue failure mechanisms, Surface and Coatings Technology., 2000, no.133, pp. 501–507. doi:10.1016/S0257-8972(00)00971-3. **18.** Cortes-Rodriguez C.J. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing, 2009, Diss., Kassel University, Kassel. **19.** Denkena B., Friemuth T., Fedorenko S., etc. An der Schneide wird das Geld verdient, Werkzeuge-Sonderausgabe der Zeitschrift Fertigung, 2002, no.12, pp. 24–26. **20.** Byrne G., Dornfeld D., Denkena B. Advancing cutting technology, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2003, V.52, no.2, pp. 483–507. doi:10.1016/S0007-8506(07)60200-5. **21.** Denkena B., Biermann D. Cutting edge geometries. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, V.63, no.2, pp. 631–653. doi:10.1016/j.cirp.2014.05.009. **22.** Wyen C.-F., Knapp W., Wegener K. A new method for the characterisation of rounded cutting edges, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, V.59, no. 9-12, pp. 899–914. doi:10.1007/s00170-011-3555-4. **23.** Wyen C.-F., Wegener K. Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2010, V.59, no.1, pp. 93–96. doi:10.1016/j.proeng.2014.03.027. **24.** Denkena B., de Leon L., Basset E., etc. Cutting edge preparation by means of abrasive brushing, Key Engineering Materials, 2010, no.438, pp. 1–7. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.438.1. **25.** Heckmann L. Systematische Analyse der Schneidkantenarchitektur mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode, 2010, Kassel university press GmbH, Diss., 182 s. **26.** Wang X., Kwon P.Y., Sturtevant C., etc. Tool wear of coated drills in drilling CFRP, Journal of Manufacturing Processes, 2013, V.15, no.1, pp. 127–135. doi:10.1016/j.jmapro.2012.09.019. **27.** Henerichs M. Bohrbearbeitung von CFK unter besonderer Berücksichtigung der Schneidkantenmikrogeometrie, (Diss.) Eidgenössische Technische Hochschule Zurich (ETH), 2015, Nr. 22629, Zurich. **28.** Voss R., Henerichs M., Harsch D., etc. Optimised approach for characterisation of cutting edge micro-geometry in drilling carbon fibre reinforced plastics (CFRP). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, V.90, no.1, pp. 457–472. doi:10.1007/s00170-016-9302-0. **29.** Montoya M., Calamaz M., Gehin D., etc. Evaluation of the performance of coated and uncoated carbide tools in drilling thick CFRP/aluminium alloy stacks Int. J Adv. Manuf. Technology, 2013, no.68, pp.2111–2120. doi: 10.1007/s00170-013-4817-0. **30.** Iliescu D., Gehin D., Gutierrez M.E., etc. Modeling and tool wear in drilling of CFRP International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, no.50, pp. 204–213. doi:10.1016/j.ijmachtools.2009.10.004.

Генадій Хавін, Хоу Чживень, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОГЕОМЕТРІЇ ІНСТРУМЕНТУ В ПРОЦЕСІ ЙОГО ЗНОШУВАННЯ ПРИ РІЗАННІ КОМПЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація. Найскладнішою проблемою при механічній обробці полімерних композиційних матеріалів є інтенсивне зношування інструменту, яке призводить не тільки до зниження його працездатності, а й різко погіршує якість вироблених операцій. У даній роботі розглядається процес зношування ріжучої кромки інструменту як зміна його мікрогеометрії по відношенню до первісного стану. Розглянуто фізична природа абразивного зносу як процесу контактної взаємодії задньої поверхні інструмента зі зруйнованим наповнювачем і інтенсивним виділенням тепла за рахунок тертя. Спираючись на закономірності, отримані експериментальним шляхом, можна зробити висновок про те, що первісна геометрія ріжучої кромки інструменту вже в період приробітки різко

змінюється і до початку стаціонарного зношування набуває деяку форму, яка в подальшому змінюється тільки кількісно без спотворення стійкою приробленої форми. Фактично можна говорити про те, що первісна геометрія ріжучої кромки, обрана за деякими раціональним міркуваннями або в результаті рішення задачі оптимізації, служить тільки для ефективного різання в період приробітки, після чого її вплив на подальшу роботу інструменту в умовах стаціонарного зношування, не є суттєвим. Аналіз процесу зносу ріжучої крайки інструменту при обробці полімерних композитів показав, що є жорстка кореляція між зношуванням, зростанням силового навантаження, температурної напруженості і появою різних дефектів обробленої поверхні. Представлені різні моделі опису зміни мікрогеометрії ріжучої крайки у вигляді геометричних моделей з їх перевагами і недоліками. Детально розглянуті сучасні експериментальні досягнення в дослідженні характеру зміни мікрогеометрії в процесі зношування. На цій підставі зроблено припущення про однепараметричний характер зміни геометрії різальної крайки в процесі взаємодії з композитом. Передбачається подальший розвиток дослідження і створенням математичної моделі, що пов'язує зміну мікрогеометрії інструменту в часі, як функцію одного параметра, що залежить від початкової геометрії інструменту.

Ключові слова: зношування інструменту; абразивний знос; різання композитів; мікрогеометрія ріжучої крайки.

Gennadii Khavin, Hou Zhiwen, Kharkiv, Ukraine

MODELING OF THE INSTRUMENTAL MICROGEOMETRY IN THE PROCESS OF ITS WEARING AT CUTTING OF COMPOSITE MATERIALS

Abstract. *The most difficult problem during the machining of polymer composite materials is the intensive wear of the tool, which leads not only to a decrease in its working capacity, but also sharply worsens the quality of the operations performed. In this paper, we consider the process of wear of the cutting edge of a tool as a change in its microgeometry with respect to the initial state. The physical nature of abrasive wear as a process of contact interaction of the flank surface of a tool with a destroyed filler and intense heat due to friction is considered. Based on the laws obtained experimentally, we can conclude that the initial geometry of the cutting edge of the tool already sharply changes during the running-in period and by the beginning of stationary wear takes on some form, which later changes only quantitatively without distortion of the stable worked-in shape. In fact, we can say that the initial geometry of the cutting edge, selected for some rational reasons or as a result of solving the optimization problem, serves only for effective cutting during the running-in period, after which its influence on the further operation of the tool under stationary wear is not significant. An analysis of the wear process of the cutting edge of the tool during the processing of polymer composites showed that there is a strong correlation between the appearance of wear, the growth of power loading, thermal stress and the appearance of various defects of the treated surface. Various models of describing changes in the microgeometry of the cutting edge in the form of geometric models with their advantages and disadvantages are presented. The modern experimental achievements in studying the nature of changes in microgeometry in the process of wear are examined in detail. On this basis, an assumption was made about the one-parameter nature of changes in the geometry of the cutting edge in the process of interaction with the composite. The further development of the study and the creation of a mathematical model are proposed, linking the change in the tool's microgeometry over time as a function of one parameter, depending on the initial geometry of the tool.*

Keywords: tool wear; abrasive wear; composites cutting; cutting edge microgeometry.