

Г.Л. ХАВИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

The model of tool corner abrasion for turning of reinforced composite materials is considered. The dependence magnitude of wear has congenital character is supposed. The power law dependence between wear velocity and specific pressure and velocity of contact interaction is take place. Use power law dependence for the components of cutting force and expression for cutting edge width as function of the process parameters the relation for the specific pressure is obtained. Using experimental data the empirical relationship between of tools wear and cutting velocity and contact pressure is obtained. The analysis of this relations are provided.

Рассмотрена модель абразивного изнашивания вершины инструмента при точении армированных композиционных материалов. Предполагается, что величина износа носит наследственный характер и имеет место степенная зависимость скорости изнашивания от удельного давления и скорости контактного взаимодействия. На основе степенной зависимости составляющих силы резания и выражения для ширины режущей кромки, как функции параметров резания, получено соотношение для величины удельного давления. Используя экспериментальные данные, получена эмпирическая зависимость износа вершины инструмента от скорости резания и контактного давления. Проведен сравнительный анализ полученных результатов.

Розглянуто модель абразивного зносу вершини інструменту при точінні армованих композиційних матеріалів. Припускається, що величина зносу носить спадковий характер і має місце степенна залежність швидкості зносу від удільного тиску і швидкості контактної взаємодії. На базі степенної залежності складових сили різання і виразу для ширини ріжучої крайки, як функції параметрів різання, одержано співвідношення для величини удільного тиску. Використовуючи експериментальні дані, одержана емпірична залежність зношування вершини інструменту від швидкості різання і контактного тиску. Проведено аналіз одержаних результатів.

Точение армированных композиционных материалов сопровождается интенсивным износом инструмента, вызванным присутствием в зоне резания твердых составляющих наполнителя. Явление изнашивания сопровождается изменением следующих факторов процесса обработки: геометрических параметров режущего инструмента; ростом силы резания и перераспределением абсолютных значений составляющих силы резания; повышением температуры в очаге деформации.

Существует экспериментально подтвержденный факт [1], что при резании армированных композиционных материалов, например, стеклопластиков, имеет место износ за счет округления режущей кромки инструмента. Это, в свою очередь, вызывает образование отрицательного переднего угла и площадки износа по задней поверхности, которые определяют качественные показатели обработки.

Износ по задней поверхности, во-первых, по всей видимости, является косвенной характеристикой затупления инструмента, т.е. изменения его

геометрических параметров в процессе резания, во вторых, это величина, которую наиболее легко и точно можно измерить при проведении экспериментов. Фактически это принятый исследователями параметр, отражающий состояние инструмента, но не отражающий физическую сущность ухудшения процесса резания с точки зрения качества обработки и энергетических затрат.

Многочисленными исследованиями было установлено, что при обработке резанием армированных композиционных материалов имеет место абразивный износ вершины инструмента. Теория абразивного изнашивания контактирующих тел достаточно хорошо разработана на основе многочисленных экспериментальных данных [2]. Главной целью настоящей работы является попытка применить достижения теории абразивного изнашивания к описанию процесса износа вершины резца при резании армированных композиционных материалов. Далее предполагается использование найденных закономерностей в математическом обеспечении по расчету оптимальных режимов резания композиционных материалов и прогнозирование качества обработанной поверхности с учетом изменения геометрии режущего инструмента во времени.

По своему физическому содержанию абразивное изнашивание – это накопленные за время τ^* перемещения, обусловленные потоком разрушений, происходящих на малых отрезках времени $\Delta\tau$. Основными факторами, обуславливающими процесс изнашивания, являются, как известно, контактное давление и скорость взаимодействия. Поэтому зависимость величины износа носит наследственный характер и в большинстве случаев имеет место степенная связь интенсивности (скорости) изнашивания от давления и скорости контактного взаимодействия [2]

$$\frac{\partial w(Q, \tau)}{\partial \tau} = K_w p^n(Q, \tau) V^m(Q, \tau) \tau^q, \quad (1)$$

где w - величина износа в точке Q контактирующих поверхностей; p - контактное давление; V - скорость контактного взаимодействия; τ - время взаимодействия; K_w - коэффициент изнашивания, не зависящий от времени; n, m, q - постоянные.

Наиболее часто в условиях абразивного изнашивания в машиностроении используют линейный закон, полагая в соотношении (1) $n=1, m=1, q=0$. Это справедливо при изнашивании за счет твердых частиц, присутствующих в зоне трения, как правило, продуктов износа. Применение линейной зависимости предопределено простотой и удобством ее использования для расчетов. Теория усталостного изнашивания опирается на степенную зависимость скорости изнашивания от контактного давления, т.е. $n>1, m>1$.

Изнашивание вершины резца происходит за счет микровыкрашиваний

металла, которое будем считать происходящим за счет абразивно-усталостного механизма. Поэтому в соотношении (1) будем полагать значения показателей степеней $n > 0$, $m > 1$, $q > 0$.

Примем следующие допущения в постановке задачи:

- катастрофический износ инструмента (разрушение) отсутствует;
- процесс изнашивания вершины инструмента можно условно разделить на два периода – интенсивного износа (приработки) и стационарного изнашивания, когда скорость износа становится постоянной и достаточно малой по абсолютной величине;
- изнашивание происходит при постоянной скорости контактного взаимодействия (скорость резания не меняется);
- величина контактного давления определяется равнодействующей сил резания P_z и P_y ;
- температурный фактор не рассматривается.

Классические зависимости для величин износа вершины резца представлены на рис.1 [1]. Основным элементом, характеризующим износ резца при точении, например, стеклопластика, является величина износа по задней поверхности. Причем эта величина вместе с изменением радиуса округления претерпевает наиболее сильные изменения с увеличением продолжительности точения.

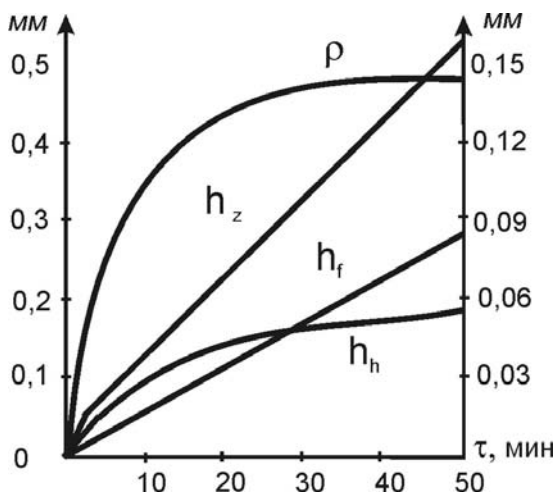


Рисунок 1 – Зависимость износа режущей кромки резца от продолжительности резания при точении стеклопластиков [1]: h_z , h_f , h_h - износ по задней, передней кромке и смещение режущей кромки соответственно; ρ - радиус закругления режущей кромки.

Физические наблюдения показывают [1], что износ инструмента проявляется в виде характерных штрихов по задней поверхности резца. Наиболее интенсивно, особенно в первое время работы, изнашивается место перехода от главной режущей кромки к вспомогательной. При этом в первые минуты работы происходит наиболее интенсивный износ, вплоть до появления небольших выкрашиваний. По мере дальнейшей работы режущая кромка смещается параллельно самой себе, выравнивается, и после этого появляется износ по вспомогательной режущей кромке, который совместно с износом по главной режущей кромке приводит к смещению вершины резца.

Из рис.1 видно, что этап интенсивного изнашивания имеет небольшую продолжительность во времени, в зависимости от режима резания. Основное время работы инструмента сопровождается изнашиванием с постоянной скоростью, что подтверждается экспериментальными данными различных авторов [3-5]. При этом контактное давление практически неизменная величина, а величина износа линейно зависит от времени. Тогда соотношение (1) для этапа приработки останется в прежнем виде ($V = const$), а для второго этапа стационарного изнашивания (1) можно представить в виде

$$\frac{\partial w(Q, \tau)}{\partial \tau} = K_w V^m(Q) p^n(Q, \tau). \quad (2)$$

Как на первом, так и на втором этапе определяющим в соотношениях (1), (2) является распределение контактного давления, которое меняется с течением времени и зависит от истории контактного взаимодействия, т.е. носит наследственный характер.

Введем еще два допущения, которые, по всей видимости, не нарушают общности рассуждений. Будем считать, что:

- контактное давление распределено по площадке контакта вершины инструмента с обрабатываемым материалом равномерно;
- геометрические параметры режущего инструмента в процессе резания не меняются по отношению к первоначально заданным.

Последнее допущение, скорее всего, не выполняется, так как имеются данные о существенном изменении переднего угла, вплоть до отрицательных значений, чем собственно и объясняется ухудшение условий резания [1]. Однако учитывать в постановке задачи изменение геометрических параметров резца на данном этапе является невозможным физически и математически.

Первое допущение позволяет достаточно просто рассчитать контактное давление по известным значениям равнодействующей силы резания P_{rez} , которая определяется как

$$P_{rez} = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}, \quad (3)$$

где P_z, P_y - компоненты (составляющие) силы резания, касательная и нормальная соответственно. Составляющей P_x в большинстве случаев пренебрегают в силу малости при точении композиционных материалов.

Величину контактного давления через компоненты силы резания можно представить в виде

$$p = P_{rez} / (b \cdot t) = \sqrt{P_z^2 + P_y^2} / (b \cdot t), \quad (4)$$

где t - глубина резания; b - длина режущей кромки.

Длина режущей кромки b , мм, определяется как функция режимов резания и геометрических параметров резца по формулам [1]:

$$b = \frac{\pi r}{180} \left(\arccos \frac{r-t}{r} + \arcsin \frac{s}{r} \right), \text{ при } t \leq r(1 - \cos \varphi) \quad (5)$$

и

$$b = \frac{\pi r}{180} \left(\varphi + \arcsin \frac{s}{r} \right) + \frac{t - r(1 - \cos \varphi)}{\sin \varphi}, \text{ при } t > r(1 - \cos \varphi), \quad (6)$$

где r - радиус при вершине резца, мм; t - глубина резания, мм; s - подача, мм/об; φ - главный угол в плане.

С другой стороны из работ [1,3] известно, что радиус округления режущей кромки связан с износом по задней поверхности h_z (или с радиальным износом резца), мм, линейным соотношением

$$r = r_0 + \frac{\sin[(\alpha + \beta)/2]}{\cos[(\alpha - \beta)/2]} h_z, \quad (7)$$

де r_0 - начальный радиус округления режущей кромки, мм; γ - передний угол режущей кромки; $\beta = 90^\circ - (\alpha + \gamma)$.

Учитывая (4) для определения контактного давления p необходимо знать выражение для составляющих силы резания P_z, P_y .

Распределение составляющих силы резания при обработке большинства композиционных материалов обладает рядом специфических особенностей по сравнению с обработкой металлов. Возникающая сила резания

значительно меньше, чем при обработке металлов (примерно на порядок), и составляющие ее распределены иначе. Прежде всего, это высокий уровень сил действующих по задней поверхности инструмента. Если при обработке металлов сила резания по задней поверхности резца составляет 2 - 3%, то, например, при обработке стеклопластиков сила на задней поверхности может достигать 30 - 50% от силы резания [5]. Для практических расчетов при обработке металлов силу, возникающую на задней поверхности, в расчетах не учитывают. При обработке композиционных материалов эта сила может превосходить силу на передней поверхности и не учитывать ее в расчетах не корректно.

Описанное перераспределение обычно объясняют наличием упругого отжатия со стороны обрабатываемого материала непосредственно в зоне режущей кромки. После прохождения резца происходит упругое восстановление поверхностного слоя, что вызывает значительное контактное взаимодействие на задней поверхности резца.

Для определения компонентов силы резания проводятся эксперименты, которые направлены на исследование частных зависимостей составляющих сил резания от геометрических параметров инструмента, режимов резания, износа инструмента и т.д. Для получения расчетных зависимостей проводится многофакторный планируемый эксперимент, после обработки которого, составляются нормативные таблицы и расчетные формулы. На практике для получения достоверных результатов такие эксперименты необходимо проводить для каждого материала в отдельности при обработке инструментом заданной марки с заданными геометрическими параметрами и в определенном диапазоне изменения технологических параметров [1,3-7].

Зависимость составляющих силы резания обычно представляется в виде степенной функции

$$P_i = C_i V^{n_v} s^{n_s} t^{n_t} K_{p_i}, \quad (8)$$

где P_i - компонента силы резания ($i=x, y, z$); C_i - постоянная; n_v, n_s, n_t - показатели степени; $K_{p_i} = K_{p_i\alpha} K_{p_i\gamma} K_{p_i\varphi} K_{p_ih}$, $K_{p_i\alpha}, K_{p_i\gamma}, K_{p_i\varphi}$ - поправочные коэффициенты для i -ой составляющей силы резания на значение заднего угла - α , переднего угла - γ ; главного угла в плане - φ , соответственно; K_{p_ih} - поправочный коэффициент на величину износа по задней поверхности инструмента.

Для стеклопластиков и углепластиков числовые значения C_i , показателей степеней и поправочных коэффициентов при точении твердосплавными резцами приведены, к примеру, в [5]. С другой стороны использование обобщенных зависимостей для конкретного композиционного материала может иметь существенные отклонения от зависимостей,

полученных в результате обработки экспериментов проведенных для этого материала.

В работе [1] представлены экспериментальные данные по влиянию режимов резания на составляющую силы резания P_z при точении твердосплавным резцом ВКЗМ стеклопластиков марок ЭФБ-П. Начальные геометрические параметры инструмента принимались: $\alpha=12^\circ$ - задний угол; $\gamma=0^\circ$ - передний угол; $\varphi=45^\circ$ - главный угол в плане; $r_0=1$, мм. Для этих данных была построена статистическая модель с использованием регрессионного анализа для приближения квадратичной и степенной зависимостями [8].

Кроме того, в монографии [1] приведены экспериментальные данные по влиянию продолжительности резания на износ резца при точении стеклопластика ЭФБ-П на различных скоростях резания, рис.2.

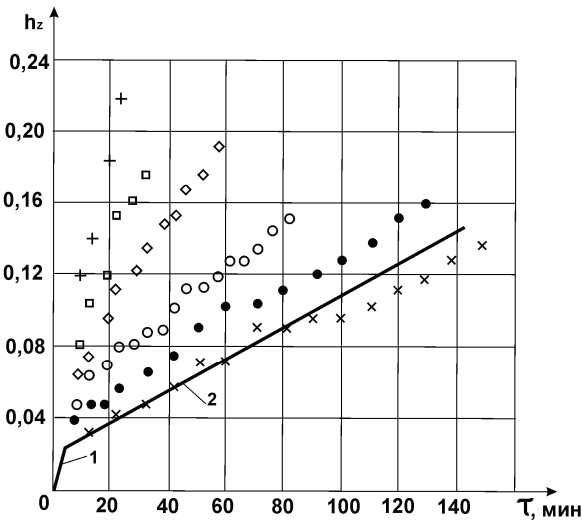


Рисунок 2 - Влияние продолжительности резания τ , мин на износ резца h_z , мм при точении стеклопластика ЭФБ-П при значении подачи $s=0,21$ мм/об, глубине резания $t=1,5$ мм на различных скоростях резания: + - $V=125$ м/мин; \square - $V=115$ м/мин; \diamond - $V=100$ м/мин; $^\circ$ - $V=90$ м/мин; \bullet - $V=80$ м/мин; \times - $V=60$ м/мин.

Обобщенная формула для вычисления износа по задней площадке h_z , мм при точении стеклопластика ЭФБ-П при различных значениях

технологических параметров, полученная на основе экспериментальных данных имеет вид:

для значений $V > 80$ м/мин, $s \leq 0,21$ мм/об, $t = 1,0 - 5,0$ мм

$$h_z = 0,028 \cdot 10^{-6} \tau^{0,56} V^{2,93} t^{0,59} s^{0,26}, \text{ мм}, \quad (9)$$

для значений $V < 80$ м/мин, $s \geq 0,21$ мм/об, $t = 1,0 - 5,0$ мм

$$h_z = 0,022 \cdot 10^{-2} \tau^{0,56} V^{1,2} t^{0,59} s^{0,95}, \text{ мм}. \quad (10)$$

Если обратиться к экспериментальным данным приведенным на рис.2 ([1], рис.35), то можно заметить, что для каждой скорости резания экспериментальные точки с достаточной степенью точности ложатся на две прямых, рис.2. Первая описывает накопление износа в начальный период, который занимает примерно 2 мин. с момента начала обработки (рис.2, прямая 1). Вторая прямая характеризует дальнейшее накопление износа в процессе обработки (рис.2, прямая 2).

Начальный период работы заточенного инструмента (приработка) характеризуется высокой интенсивностью изнашивания в течение короткого промежутка времени. Будем считать, что скорость изнашивания в этот период зависит только от скорости обработки. После аппроксимации экспериментальных данных на этапе приработки получим формулу для вычисления величины износа h_{z1} на этом участке

$$h_{z1} = \frac{V}{1849 - 3,42 \cdot V}. \quad (11)$$

Для стационарного изнашивания (второй этап) будем полагать линейную зависимость скорости изнашивания от контактного давления, т.е. полагаем $n=1$ в выражении (2). Далее, используя для вычисления контактного давления выражения (3) – (7), по имеющимся экспериментальным данным определим значение скорости изнашивания (величина тангенса угла наклона прямой) как функция скорости резания. В результате получим соотношение

$$\text{для } V \leq 80 \text{ м/мин } h_{z2} = 1,617 \cdot 10^{-8} V^{1,434} p_z \tau, \quad (12)$$

$$\text{для } V \geq 80 \text{ м/мин } h_{z2} = 5,066 \cdot 10^{-15} V^{4,795} p_z \tau. \quad (13)$$

Общий износ за время τ при скорости V будет равен

$$h_z = h_{z1} + h_{z2} \cdot \tau \quad (14)$$

Сравним расчетные данные по формулам (9), (10), (11) – (14) с экспериментальными данными для различных скоростей резания.

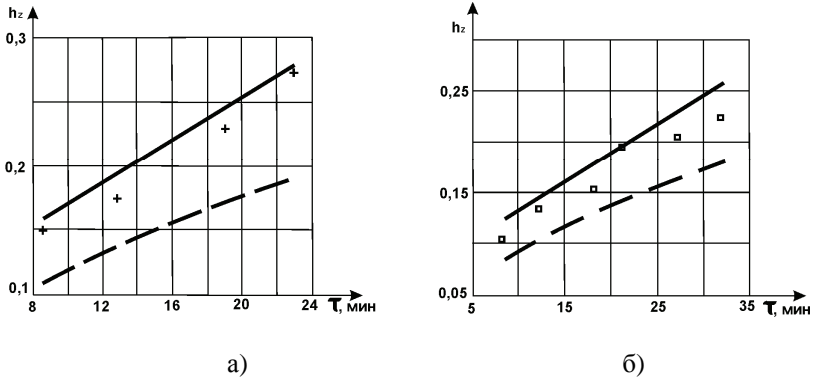


Рисунок 3 – Зависимость величины износа по задней площадке от времени обработки: а) – скорость резания 125 м/мин; б) – скорость резания 115 м/мин.

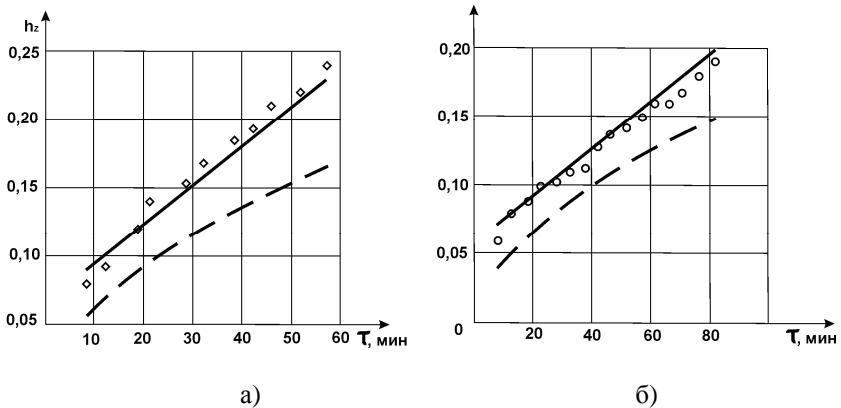


Рисунок 4 – Зависимость величины износа по задней площадке от времени обработки: а) – скорость резания 100 м/мин; б) – скорость резания 90 м/мин.

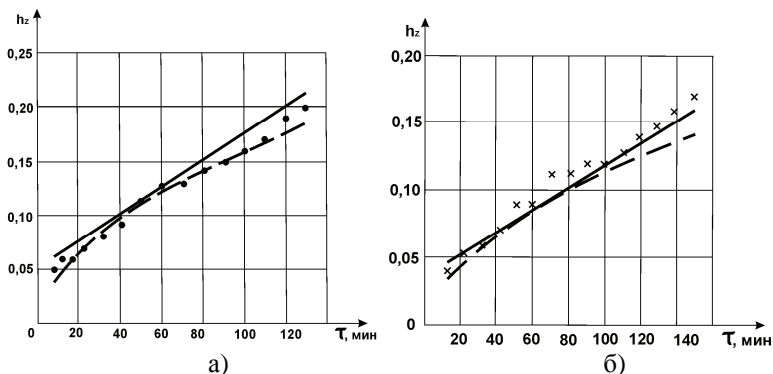


Рисунок 5 – Зависимость величины износа по задней площадке от времени обработки: а) – скорость резания 80 м/мин; б) – скорость резания 60 м/мин.

На рис.3 – 5 представлены значения величины износа инструмента по задней поверхности, рассчитанные по формулам (9), (10) – штриховая линия, формулам (11) – (14) – сплошная линия и экспериментальным данным из рис.2. Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что для сравнительно высоких скоростей резания $V > 80$ м/мин соотношения, полученные в данной работе более точно количественно описывают износ инструмента, чем соотношения из работы [1]. При скоростях $V < 80$ м/мин соотношения (9), (10) и (11) – (14) примерно с одинаковой точностью совпадают с экспериментальными данными.

В обоих случаях полученные в настоящей работе соотношения, связывающие накопленный за время обработки износ вершины инструмента по задней площадке с контактным давлением и скоростью контактного взаимодействия, с высокой степенью точности описывают экспериментальные данные, что и подтверждает принятые в работе допущения и гипотезы.

Работа выполнена в рамках проекта М2306 финансируемого министерством образования и науки Украины.

Список литературы: 1. Руднев А.В., Королев А.А. Обработка резанием стеклопластиков.- М.: Машиностроение, 1969.- 119 с. 2. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии.- М.: Машиностроение, 1988.- 256 с. 3. Семко М.Ф., Сустан Г.К., Дрожжин В.И. Обработка резанием электроизоляционных материалов. – М.: Энергия, 1974.- 176 с. 4. Штучный Б.П. Обработка резанием пластмасс. – М.: Машиностроение, 1974.- 144 с. 5. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987.- 176 с. 6. Буловский П.И., Петрова Н.А. Механическая обработка стеклопластиков. – Л.: Машиностроение, 1969.- 152 с. 7. Тихомиров Р.А., Николаев В.И. Механическая обработка пластмасс. – Л.: Машиностроение, 1975.- 206 с. 8. Антонен В.Ю., Хавин Г.Л. К определению составляющих силы резания при тчении армированных стеклопластиков // Статья в настоящем сборнике.

Поступила в редколлегию 21.04.08