

УДК 621.91

Г.Л. Хавин, канд. техн. наук, Харьков, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖСЛОЙНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Розглянуто задачу визначення появи та розвитку тріщини розшарування при свердленні шарових композиційних матеріалів, що базується на використанні лінійної механіки руйнування. Модель локального руйнування сумісно з відомими емпіричними залежностями використовується для раціонального вибору режимних параметрів свердлення. Працездатність запропонованого підходу продемонстровано для розрахунку технологічних параметрів свердлення епоксидного вуглепластику.

Рассмотрена задача определения появления и развития трещины расслоения при сверлении слоистых композиционных материалов, базирующегося на использовании линейной механики разрушения. Модель локального разрушения совместно с известными эмпирическими зависимостями применена для рационального выбора режимных параметров сверления. Работоспособность предложенного подхода продемонстрирована для расчета технологических параметров сверления эпоксидного углепластика.

The problem of crack delamination appearance and propagation in the drilling of composite laminates is considered. It's as basic model use linear fracture mechanic. For the rational choice of drilling parameters the local damage model in common empirical dependences are used. Efficiency of proposed method is showed for the calculation of drilling parameters of epoxy carbon plastic.

Вступлення. За последние время технология производства композиционных материалов (КМ) значительно удешевилась, что вызвало значительное расширение их применения в различных отраслях техники. В практике механической обработки КМ отличаются твердостью и имеют высокие абразивные свойства. Эти, и некоторые другие качества [1,2], приводят к наличию серьезных трудностей при обработке, которые в основном сводятся к сильному изнашиванию режущего инструмента и низкой точности обработки. Эти обстоятельства приводят к существенным энергетическим затратам на полную обработку детали и, как следствие, к высокой стоимости обработки. Появились новые процессы обработки КМ, такие как лазерное и водоструйное резание, и другие, однако, несмотря на их достаточно бурное развитие, по-прежнему главными методами обработки КМ остаются традиционные процессы, среди которых самым распространенным является сверление. Поэтому задача обеспечения качества обработанных отверстий при сверлении КМ является актуальной и имеет практическую ценность.

Состояние проблемы и формулировка задачи. В сравнительно недавних исследованиях процессов механической обработки КМ особое внимание уделялось сверлению ламинированных композитов [3–8]. При этом развивалось как фундаментальное изучение процесса сверления, так и проводились многочисленные экспериментальные опыты. Главной проблемой при сверлении многослойных КМ (ламинатов) является обеспечение качества обработки отверстия, и, в первую очередь, отсутствие трещин расслоения на выходе инструмента из заготовки. Наличие таких дефектов является причиной ограничений при использовании КМ в различных приложениях, особенно в случае воздействия на крепление в этом отверстии длительной циклической нагрузки. Основополагающей моделью, устанавливающей связь между величиной расслаивания со свойствами КМ, явилась модель Ho–Cheng и Dhanan [9], которые ввели понятие критической нагрузки, позволяющей избежать расслоения. Далее эта модель была развита в работах [10,11], где основное внимание было уделено установлению связи разрушающей силы с началом расслаивания.

Постановка задачи и цель работы. Главной целью настоящей работы является развитие аналитического метода для предсказания появления и развития трещины расслоения при сверлении слоистых композиционных материалов, базирующегося на использовании линейной механики разрушения. Также сделана попытка увязать применение аналитической модели в совокупности с традиционной методикой выбора подачи и частоты вращения для инструмента с заранее заданными геометрическими параметрами. Кроме того предложена проверка расчетных значений с известными из литературных источников данными, полученными расчетом по эмпирическим зависимостям.

Теоретические положения. Сверление слоистых пластиков – ламинатов заданной толщины заготовки t (рис. 1) обладает рядом особенностей. При приближении сверла к выходу из заготовки, жесткость оставшихся слоев уже не обеспечивает противодействия действующей осевой силе, нижние слои начинают прогибаться вокруг отверстия и при превышении прочности межслойной границы происходит расслаивание, что схематически изображено на рис. 1.

Проведенный в [9] анализ на основе изотропной и линейной модели круговой зоны расслоения радиусом l , рис.1, позволил определить осевую силу, при которой происходит старт межслойной трещины следующим уравнением

$$F_z = \pi \left[\frac{8 \cdot G_{JC} \cdot E \cdot h^3}{3(1 - \nu^2)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где G_{IC} – критическое значение энергии трещинообразования по I-му типу, Дж/м²; E – модуль упругости, Па; ν – коэффициент Пуассона. Из уравнения (1) можно найти значение h^* соответствующее критическому значению осевой силы

$$h^* = \left(\frac{1 - \nu^2}{4\pi \cdot G_{IC} \cdot E} \right)^{1/2}.$$

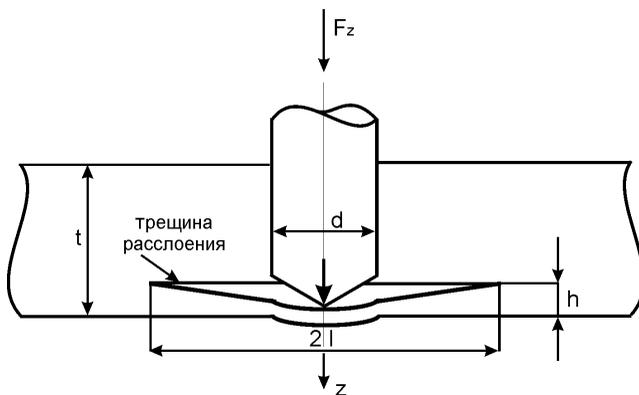


Рисунок 1 – Модель образования межслойной трещины при сверлении ламината

С другой стороны из теории и практики технологии сверления композиционных материалов [1,2] известно, чтобы избежать расслоения армированных КМ необходимо корректно выбирать геометрические параметры инструмента, применять сверла с минимальным износом по задней поверхности (критерий затупления) и использовать различные приспособления на входе инструмента и подкладки на выходе из заготовки.

При сверлении большинства КМ режимы резания назначаются в следующей последовательности [1]:

- выбирается марка инструментального материала сверла;
- выбираются параметры заточки сверла, и назначается критерий затупления по задней поверхности;
- по заданной шероховатости поверхности назначается подача;
- рассчитывается скорость резания в зависимости от подачи и диаметра сверла.

В данном алгоритме определения режимов сверления никоим образом не фигурирует появление эффекта межслойного расслоения, а входит только

предполагаемая шероховатость обработанной поверхности, которая для КМ, в отличие от металлов, представляет собой достаточно специфический параметр.

Для определения осевой силы при сверлении КМ существуют эмпирические соотношения, как общие, так и частные для отдельных типов КМ. В общем случае осевую силу определяют по формуле

$$F_z = C_z \cdot d^m \cdot s^n \cdot K_z, \quad (2)$$

где s – подача, мм/об.; d – диаметр сверла, мм; K_z – совокупность поправочных коэффициентов; C_z , m , n – постоянные. Совокупность поправочных коэффициентов представляется в виде

$$K_z = K_{zh} \cdot K_{z\phi} \cdot K_{z\alpha} \cdot K_{z\gamma}, \quad (3)$$

где K_{zh} , $K_{z\phi}$, $K_{z\alpha}$, $K_{z\gamma}$ – поправочные коэффициенты на износ по задней поверхности, главный угол, задний и передний угол соответственно. Например, для стекло и углепластиков формулы (3) и (4) справедливы в диапазоне изменения параметров $s = 0,08 \dots 0,62$ мм/об; $d = 4 \dots 20$ мм и скорости резания $v = 0,04 \dots 0,58$ м/с. Числовые значения постоянных и поправочных коэффициентов обычно сведены в таблицы, составленные на основе экспериментальных данных.

В качестве основной гипотезы примем, что началу расслоения, проявляющемуся в виде движения межслойной трещины на глубине h , соответствует некоторое значение подачи при известных параметрах инструмента и степени его износа. Тогда при выборе подачи будем руководствоваться предельно заданной глубиной, на которой начинается расслаивание. Примем, что глубина h , может быть трактована как совокупность слоев в виде $h = k \cdot h_{lay}$, где h_{lay} – толщина единичного слоя, мм; k – число слоев, рис. 1. Фактически при таком подходе подача выбирается не по предполагаемому значению шероховатости отверстия, как это приведено в классической методике расчета режимов резания, а по началу образования расслоения на некотором расстоянии от края выхода инструмента из заготовки.

Используя соотношения (1) и (2) для глубины, на которой начинается расслоение, получим соотношение вида

$$h = 3 \sqrt{\frac{3(1-v^2)}{8G_{IC} \cdot E \cdot \pi^2} (C_z \cdot d^m \cdot s^n \cdot K_z)^2}. \quad (4)$$

Уравнение (4) описывает зависимость глубины начала расслоения от подачи и может служить оценкой повреждения материала заготовки на выходе сверла.

Результаты и обсуждения. Рассмотрим выбор режимов сверления эпоксидного однонаправленного углепластика марки Т300/5208 с объемным

содержанием волокон 70% и механическими характеристиками, приведенными в табл. 1.

Таблица 1 – Основные механические характеристики однонаправленного эпоксидного углепластика Т300/5208

Механические характеристики					
Плотность, кг/м ³	Продольный модуль упругости, ГПа	Поперечный модуль упругости, ГПа	Поперечный модуль сдвига, ГПа	Коэффициент Пуассона	Критическая энергия трещинообразования, Дж/м ²
1600	181	10,3	7,17	0,28	250

Сверление заготовки толщиной 30 мм осуществляется сверлом из твердого сплава ВК8 диаметром 10 мм на полную глубину. Выбрано спиральное сверло с нормальной заточкой НПЛ [1], форма режущей части которого представлена на рис. 2. Геометрические параметры сверла следующие: угол при вершине сверла – $2\phi = 100^\circ$; передний угол – $\gamma = 10^\circ$; задний угол – $\alpha = 20^\circ$. В качестве технологических ограничений примем износ по задней поверхности не более $h_z \leq 0,2$ мм и стойкость инструмента $T = 60$ мин. Сверление осуществляется без применения смазочно-охлаждающей жидкости.

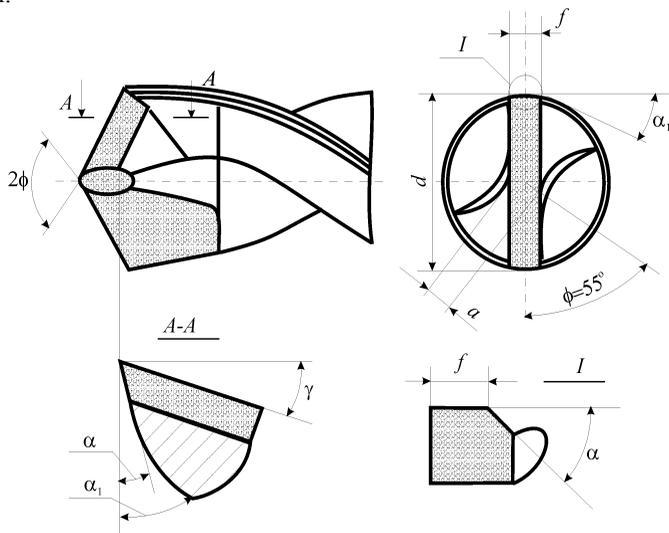


Рисунок 2 – Конструкция сверла из твердого сплава

Значения постоянной и показателей степени в соотношении (2), а также коэффициентов из выражения (3) по данным [1] следующие: $C_z = 79,8$; $m = 1,02$; $n = 0,85$; $K_{zh} = 2,04$; $K_{z\phi} = 1$; $K_{z\alpha} = 1$; $K_{z\gamma} = 1$.

На рис. 3 представлена зависимость глубины начала расслоения от величины подачи, вычисленная с использованием зависимости (4). В выбранном диапазоне изменения подачи 0,01 – 0,6 мм/об глубина появления межслойного разрушения не превышает 1 мм, для рекомендуемых средних значений подачи при сверлении углепластиков 0,2 – 0,3 мм/об не более 0,5 – 0,6 мм, что свидетельствует о достаточно щадящем режиме обработки отверстия. При этом возникающая осевая сила находится в диапазоне 350 – 600 Н (рис. 4), что также свидетельствует о том, что сверление осуществляется с нагрузкой, обеспечивающей минимальную вероятность появления различных локальных повреждений [1,2].

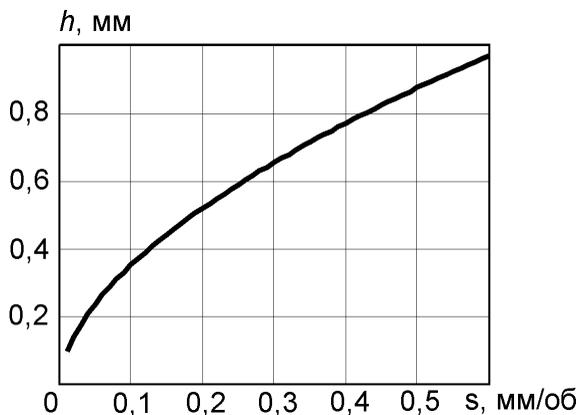


Рисунок 3 – Зависимость глубины начала расслоения от величины подачи

Для определения взаимосвязи шероховатости поверхности, по заданному значению которой назначается подача, и начала межслойного разрушения была использована эмпирическая зависимость для стекло- и углепластиков [1]

$$R_z = C_r + m_r \cdot v + p_r \cdot d + n_r \cdot s, \quad (5)$$

где v – скорость сверления, м/с. Значения постоянных в выражении (5) принимались следующими [1]: $C_r = 11,6$; $m_r = -0,42$; $p_r = 1,78$; $n_r = 49,8$.

Скорость сверления определяется из соотношения

$$v = \frac{C_v \cdot d^{p_v}}{T^{m_v} \cdot s^{n_v}} \cdot K_v, \quad (6)$$

где для данного конкретного случая принимались следующие значения постоянных коэффициентов в уравнении (6): $C_v = 19,6$; $m_v = 1,34$; $p_v = 0,11$; $n_v = 0,96$; $K_v = 1,1$. Тогда, используя зависимость величины подачи от глубины начала межслойного разрушения, полученную из выражения (4) можно рассчитать скорость как функцию заданного начала межслойного разрушения h .

$$s = \left(\frac{\pi}{C_z \cdot d^m \cdot K_z} \sqrt{\frac{8 \cdot G_{IC} \cdot E \cdot h^3}{3(1-\nu^2)}} \right)^{1/n} \quad (7)$$

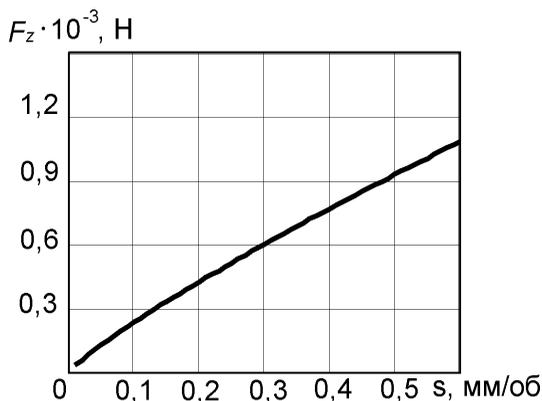


Рисунок 4 – Зависимость осевой силы от величины подачи

На рис. 5 представлено изменение величины подачи в зависимости от предполагаемого значения глубины начала межслойного разрушения.

Используя соотношение (7) в рамках представленной математической модели можно рассчитать необходимое значение подачи, задавшись заранее ограничением по величине глубины начала межслойного расслаивания.

Аналогично, подаче построена зависимость скорости сверления от глубины начала межслойного разрушения, представленная на рис. 6. Наличие этой зависимости позволяет, используя эмпирическое выражение (5), рассчитать значение шероховатости как функцию заданной глубины начала межслойного разрушения, которая приведена на рис. 7.

Полученное соотношение, связывающее величину шероховатости обработанного отверстия и величину глубины расслаивания, позволяет на стадии расчета режимов сверления определить при необходимости величину начала расслаивания или шероховатости проектируемой операции сверления слоистого композита.

Закключение. Таким образом, анализируя полученные расчетные результаты можно сделать вывод о том, что рекомендуемый в отечественной литературе к применению диапазон изменения величины подачи при сверлении композиционных материалов 0,08...0,62 мм/об гарантирует образование межслойных дефектов в виде расслоения на глубине не более чем 1 мм по нижней кромке заготовки. Полученные результаты справедливы при сверлении однонаправленного композита спиральным сверлом из твердого сплава. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с уточнением решения задачи межслойного расслаивания для инструмента отличного от спирального, учет влияния подложки и выбора для новых условий режимных параметров обработки.

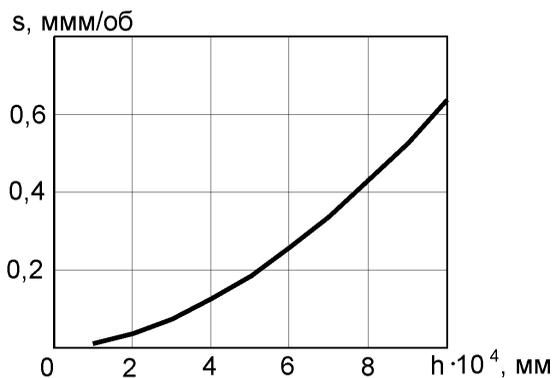


Рисунок 5 – Зависимость величины подачи от предполагаемого значения глубины начала межслойного разрушения

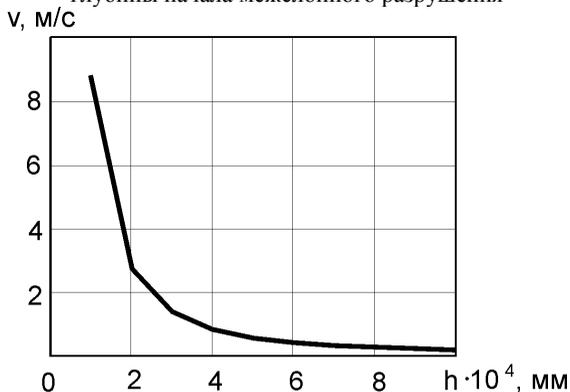


Рисунок 6 – Зависимость скорости от предполагаемого значения глубины начала межслойного разрушения

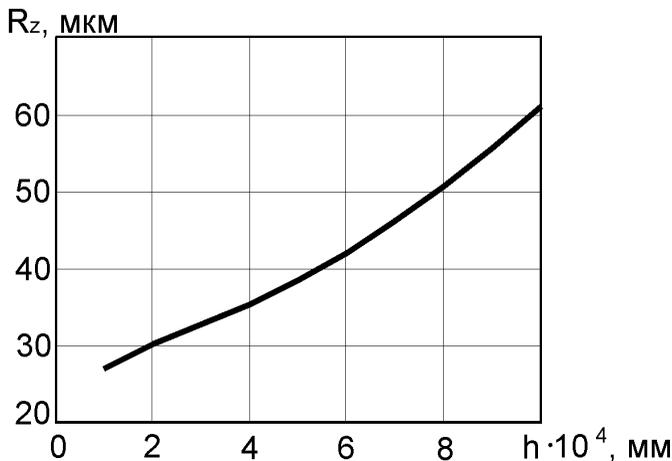


Рисунок 7 – Зависимость величины шероховатости от предполагаемого значения глубины начала межслойного разрушения

Список использованных источников: **1.** Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А.А. Степанов.– Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1987.– 176 с. **2.** Штучный Б.П. Обработка резанием пластмасс / Б.П. Штучный.– М.: Машиностроение, 1974.– 144 с. **3.** Koernig W. Quality definition and assessment in drilling of fiber reinforced thermosets / W. Koernig, P. Grass // Annal CIRP. – 1989. – Vol.38, №1. – P.119–124. **4.** Tagliaferri V. Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GRFP composites/ V. Tagliaferri, G. Gaprino, A. Diterlizzi // Int. J. Mach. Tool Manuf. – 1990. –Vol.30, №1. – P. 77–84. **5.** Sakuma K. Study on drilling of reinforced plastics-relation between tool material and wear behavior / K. Sakuma, Y. Yokoo, M. Seto // Bull. JSME. – 1990. – Vol. 27, №228. – P. 1237–1244. **6.** Tsao C.C. Analysis of delamination in drilling composite materials by core-saw drill /C.C. Tsao, H. Ho-Cheng // Int. J. Materials and Product Technology. –2008. – Vol. 32, № 2/3. – P.188–201. **7.** Gaprino G. Damage development in drilling glass fibre reinforced plastics / G. Gaprino, V. Tagliaferri // Int. J. Mach. Tool Manuf. – 1995.–Vol.35, №6. – P. 817–829. **8.** Chandrasekharan V. A mechanistic approach to predicting the cutting forces in drilling: with application to fiber-reinforced composite materials / V. Chandrasekharan, S.G. Kapoor, R.E. DeVor // Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry. – 1995. – Vol. 117. – P.559–570. **9.** Ho-Cheng H. Delamination during drilling in composites laminates/ H. Ho-Cheng, C.K.H. Drahan // Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry. – 1990. – Vol. 112. – P.236–239. **10.** Jain S. Effects of feedrate and chisel edge on delamination in composite drilling / S. Jain, D.C.H. Yang // Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry. –1993. – Vol. 115. – P.398–405. **11.** Jain S. Delamination free drilling of composite laminates / S. Jain, D.C.H. Yang // Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry. –1994. – Vol. 116. – P.475–481. Роботу виконано за проектом M2132, що фінансується міністерством освіти і науки України.

Поступила в редколлегию 12.03.2013