

Г.Л. ХАВИН, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
Е.С. КАСЬЯН, студент, НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДЕФЕКТОВ ПРИ СВЕРЛЕНИИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Рассмотрена задача определения длины трещины расслаивания при сверлении слоистых композитов сверлом с центральной и периферийной режущей кромкой. Для фиксированного значения глубины залегания трещины получено соотношение, связывающее отношение диаметра сверла к длине трещины расслаивания и отношения величины силы, действующей на периферии сверла к ее центральной составляющей. Используя эмпирическое представление интегральной осевой силы, получены зависимости длины трещины от глубины ее залегания.

Ключевые слова: трещина расслоения, глубина залегания трещины, полимерные слоистые композиты.

Вступление. Появление новых композиционных материалов (КМ) и удешевление производства уже известных приводит к все более широкому их применению во всех областях промышленности. Сверление КМ является основной вторичной операцией механической обработки. Несмотря на появление новых технологий получения отверстий их высокая стоимость пока не может заменить традиционного сверления отверстий. Главной проблемой при сверлении слоистых композитов является появление дефектов на верхней и нижней поверхности заготовки, т.е. на входе и выходе инструмента. При корректно выбранных технологических режимах сверления и работе острозаточенным инструментом, в первую очередь, это появление продольных трещин, поперечное расслаивание, сколы и разлохмачивание обрабатываемой поверхности. Присутствие таких дефектов существенным образом влияет на прочностные свойства соединений, особенно на усталостную прочность. Для обеспечения качества отверстий при работе используют различного вида кондуктора и приспособления на входе инструмента и сверление в подложку на его выходе.

© Г.Л. Хавин, Е.С. Касьян. 2014

Кроме того, присутствие мелкодисперсной стружки при обработке, требует организации мер по экологической безопасности и утилизации продуктов разрушения. Все это приводит к удорожанию технологических операций и использованию дополнительной энергии на обработку.

Таким образом, присутствие в КМ материалов с резко отличающимися механическими свойствами при обработке сверлением приводит к нарушению фактической целостности обрабатываемой поверхности. Появляется шероховатость, которую трудно контролировать, остаточные напряжения и повреждения материала на некоторой глубине, вызванные ростом трещин различной длины и ориентации. В связи с этим в последнее десятилетие проблемы, связанные с точностью и эффективностью сверления КМ обрели особую актуальность также с точки зрения себестоимости обработки, которая связана с износом инструмента, выбором параметров обработки и осуществлением контроля качества обработанной поверхности. Поэтому задача обеспечения качества обработки отверстий при сверлении КМ является актуальной и имеет практическую ценность.

Анализ последних достижений и литературы. Обсуждению теоретических вопросов и инженерных проблем посвящены работы [1,2], где исследованы процессы обработки резанием КМ армированных длинными волокнами. Главный вывод, который был сделан авторами, состоит в том, что степень разрушения обработанной поверхности и обрабатываемость КМ определяется в основном ориентацией волокон по отношению к направлению резания. Также в работе [3] были рассмотрены вопросы влияния геометрии режущего инструмента и ориентации волокон. Достаточно большие усилия исследователей были уделены прогнозированию величины силы резания [4, 5], где был использован энергетический подход для ортогонального резания. Кроме сугубо аналитических и экспериментальных методов активно применялись численные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ) [6, 7]. Были проведены расчеты по усредненной модели и рассмотрено резание отдельных волокон как разрушение волокна при взаимодействии с инструментом.

Постановка задачи и цель работы. Рассматривается задача об обеспечении качества поверхности при сверлении заготовки из слоистого КМ на выходе инструмента. Для обеспечения качества обработки требуется минимизировать величину длины продольной трещины – l , возникающей на некоторой глубине от нижнего края заготовки, и минимизировать глубину начала отслаивания армирующих слоев – h , рис.1. В большинстве практических приложений задается предельное значение глубины отслаивания h . При этом возникает вопрос о том, как определить значение величины распространения трещины в продольном направлении и как увязать расчет этой величины с режимными параметрами обработки, геометрией сверла и его стойкостью к изнашиванию. Классический алгоритм расчета технологических параметров при сверлении КМ предусматривает после выбора марки и типа сверла определение величины подачи из удовлетворения условий выполнения заданной шероховатости обработанной поверхности [8]. Расчет базируется на эмпирических зависимостях, полученных обработкой экспериментальных данных. При назначении осевой подачи не учитывается появление расслаивания и распространение продольной трещины. В большинстве случаев это связано с тем, что сверление производится в подложку, что, хотя и улучшает качество обработки, но приводит к ее удорожанию и, в значительной степени, препятствует автоматизации процесса сверления.

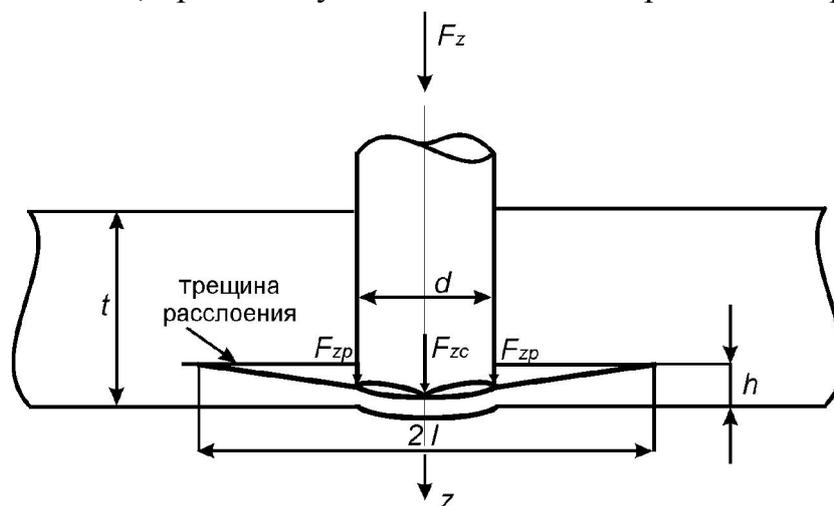


Рис. 1. Модель образования межслойной трещины при сверлении слоистого пластика

Главной целью работы является в рамках математической модели установить зависимость между глубиной отслаивания и величиной продольной трещины, а также между технологическими параметрами обработки и величиной этих дефектов при заданной геометрии сверла.

Теоретические положения. В качестве режущего инструмента рассмотрим сверло из твердого сплава с двумя подрезающими кромками, представленное на рис.2. Особенность такого инструмента заключается в том, что осевая сила в зоне разрушения действует в центральной части – F_{zc} и на периферии – F_{zp} , рис.1. В иностранной литературе сверло такой формы называется «candle stick drill», т.е. подсвечниковое сверло. Для таких сверл действие разрушающей осевой силы представляют в виде суммарного воздействия центральной осевой силы и распределенной нагрузки по периферии сверла.

Согласно теоретическому анализу, приведенному в работе [9], для сверла такой формы режущей части, осевая сила, соответствующая началу старта продольной круговой трещины и появлению отслаивания нижних слоев заготовки, может быть записана в виде

$$F_z = \pi(1+k_f) \sqrt{\frac{8 \cdot G_{IC} \cdot E \cdot h^3}{3(1-\nu^2) [1+k_f^2(1-k_l^2)^2]}} \quad (1)$$

где G_{IC} – критическое значение энергии трещинообразования по I-му типу, Дж/м²; E – модуль упругости, Па; ν – коэффициент Пуассона; $k_f = F_{zp} / F_{zc}$ – отношение силы действующей на периферии к центральной силе; $k_l = d / (2 \cdot l)$ – отношение диаметра сверла к общей длине трещины, рис.1.

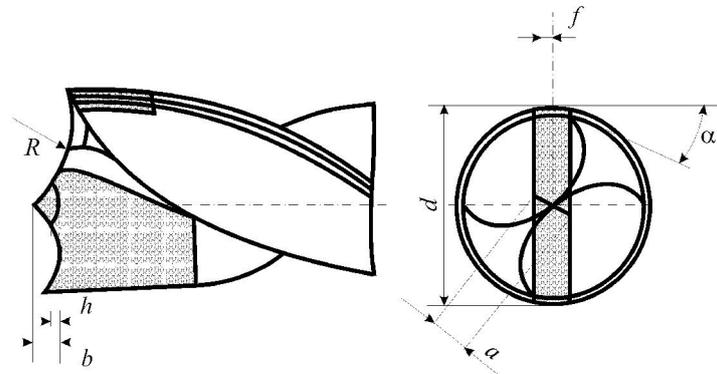


Рис. 2. Спиральное сверло с подрезающими режущими кромками (ПРК [8])

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. Согласно [8] для стекло- и углепластиков формулы (2) и (3) 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.

Будем считать, что по условиям обработки задана предельная, т.е. максимально возможная глубина расслоения $h = [h]$. 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. Это значение подачи определяет величину общей осевой силы, действие которой при известном значении критической энергии трещинообразования для предельно заданной глубины на которой начинается расслаивание, обеспечивает появление межслойной трещины. Тогда из соотношения (1), для определения возникающей длины трещины $2l$ через $k_l = d / (2 \cdot l)$, учитывая (2), получим

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

Из соотношения (4), зная величину диаметра сверла, можно определить общую длину межслойной трещины $2l$.

Пример и результаты расчетов. В качестве примера использования предложенного подхода рассмотрим сверление отверстия диаметром

10 мм в заготовке из эпоксидного однонаправленного углепластика марки Т300 толщиной 12 мм с объемным содержанием волокон 60% и основными механическими характеристиками: плотность – 1600 кг/м³; продольный модуль упругости $E_{11} = 181$ ГПа; поперечный модуль упругости $E_{22} = 10,3$ ГПа; модуль сдвига $G_{12} = 7,17$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu_{12} = \nu_{21} = 0,28$; критическая энергия трещинообразования $G_{IC} = 250$ Дж/м². Значения постоянных коэффициентов приняты: $C_z = 79,8$; $m = 1,02$; $n = 0,85$; $K_z = 2$. Величина подачи принималась равной $s = 0,2$ мм/об.

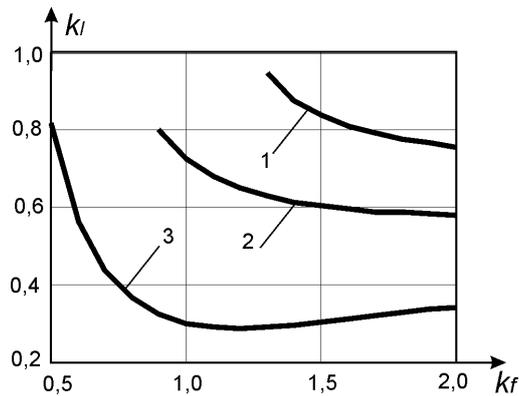


Рис. 3. Зависимость изменения отношения диаметра сверла к длине трещины k_l от величины отношения силы, действующей на периферии отверстия к величине осевой силы k_f , действующей по центру, для различных значений глубины расслаивания: 1 – $[h] = 0,35$ мм; 2 – $[h] = 0,40$ мм; 3 – $[h] = 0,45$ мм

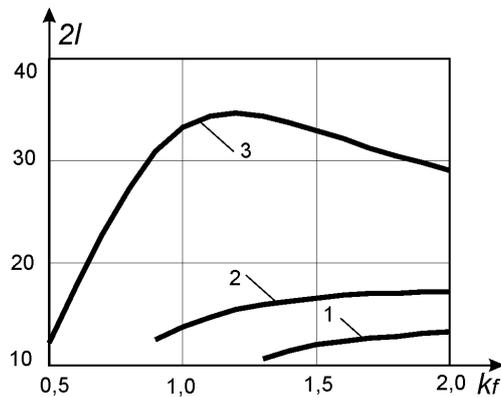


Рис. 4. Зависимость изменения длины $2l$ от величины отношения силы, действующей на периферии отверстия к величине осевой силы k_f , действующей по центру, для различных значений глубины расслаивания: 1 – $[h] = 0,35$ мм; 2 – $[h] = 0,40$ мм; 3 – $[h] = 0,45$ мм

Представленные результаты свидетельствуют о том, что с увеличением силы, действующей на периферии сверла по отношению к центральной осевой силе, величина трещины расслаивания незначительно возрастает в случае, если расслаивание происходит на малой глубине от поверхности выхода сверла.

С увеличением глубины начала расслаивания вначале происходит резкий рост длины трещины вплоть до максимального значения примерно при значении $k_f = 1,2$. При дальнейшем увеличении периферийной силы по отношению к осевой, имеет место снижение абсолютной величины трещины расслаивания.

Выводы.

Представлена модель, позволяющая прогнозировать величину трещины расслоения на выходе инструмента.

Предложенная зависимость связывает физико-механические параметры материала композита с режимными параметрами обработки.

Использование соотношения из работы [9] Hocheng H. и Tsao C.C. и экспериментального соотношения, полученного регрессионным анализом из работы [8], имеет ряд существенных ограничений:

- использование экспериментального соотношения из работы [8] для сверла типа «candle stick drill» дает значительное отклонение при вычислении значения осевой силы;
- полученное в работе [9] соотношение, связывающее интегральную осевую силу с параметрами трещиностойкости, не описывает диапазон изменения отношения периферийной и осевой силы мене 0,5;
- модель не учитывает влияние полученных повреждений и их накопление на общий характер разрушения на выходе сверла из отверстия.

Улучшение предложенной модели, учет распределения на осевое и периферийное усилие в зависимости от глубины начала расслаивания является целью дальнейших исследований.

Работа выполнена по проекту М2132Ф финансируемого министерством образования и науки Украины.

Список литературы: 1. König W. Machining of fibre reinforced plastics / W. König, Ch. Wulf, P. Gra, H. Willerscheid // *Annals of the CIRP*. 1985. – 34. – P. 537–548. 2. Wang X. M. Machining damage in unidirectional fibre-reinforced plastics. / In: J. Wang, W. Scott, L. C. Zhang. *Abrasive Technology—Current Development and Applications*. World Scientific.– 1999.– P. 429–436. 3. Wang D. H. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite / D. H. Wang, M. Ramulu, D. Arola // Part I: unidirectional laminate. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1995. – 35.– P. 1623–1638. 4. Kishawy H. A. An energy based analytical force model for orthogonal cutting of metal matrix composites / H. A. Kishawy, S. Kannan, M. Balazinski // *Annals of the CIRP*. 2004. – 53. – P. 91–94. 5. A. Pramanik A. Prediction of cutting forces in machining of metal matrix composites / A. Pramanik, L. C. Zhang, J. A. Arsecularatne // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006. – 46. – P. 1795–1803. 6. Arola D. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis / D. Arola, M. Ramulu // *International Journal of Mechanical Science*. 1997. – 39. – P. 597–613. 7. Mahdi M. A finite element model for the orthogonal cutting of fibre-reinforced composite materials / M. Mahdi, L. C. Zhang // *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. – 113. – P. 373–376. 8. Степанов А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние., 1987. – 176 с. 9. Ho-Cheng H. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits / H. Ho-Cheng, C. C. Tsao // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. – No. 140. – P. 335–339.

Bibliography (transliterated): 1. König, W. et al. "Machining of fibre reinforced plastics." *Annals of the CIRP*. No. 34, (1985): 537–548 p. Print. 2. Wang, X. M. and L. C. Zhang. "Machining damage in unidirectional fibre-reinforced plastics." In: J. Wang., W. Scott, L. C. Zhang. *Abrasive Technology—Current Development and Applications*. World Scientific. (1999): 429–436 p. Print. 3. Wang D. H., Ramulu M and D. Arola. "Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite." Part I: unidirectional laminate. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. No.35, (1995): 1623–1638 p. Print. 4. Kishawy H. A., Kannan S. and M. Balazinski "An energy based analytical force model for orthogonal cutting of metal matrix composites." *Annals of the CIRP*. No. 53, (2004): 91–94 p. Print. 5. A. Pramanik A., Zhang L. C. and J. A. Arsecularatne "Prediction of cutting forces in machining of metal matrix composites." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. No.46, (2006): 1795–1803. Print. 6. Arola D. and M. Ramulu "Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis." *International Journal of Mechanical Science*. No.39, (1997): 597–613. Print. 7. Mahdi M. and L. C. Zhang "A finite element model for the orthogonal cutting of fibre-reinforced composite materials." *Journal of Materials Processing Technology*. No. 113, (2001): 373–376 p. Print. 8. Stepanov A. A. "Obrabotka rezaniem vysokoprochnyh kompozitsionnyh polimernyh materialov." Leningrad: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie., 1987.– 176 p. Print. 9. Ho-Cheng H. and C. C. Tsao "Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits." *Journal of Materials Processing Technology*. No. 140, (2003): P. 335–339. Print.

Поступила (received) 28.10.2014