

Технологія машинобудування

УДК 621.95.01:678

Хавин Г.Л., канд. техн. наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МЕЖСЛОЙНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Введение. Наиболее опасным дефектом при сверлении полимерных композитов считается расслаивание между соседними слоями армирования вдоль его направления. Основной причиной появления расслаивания является высокое значение действующей осевой силы, величина которой в основном определяется подачей. Кроме того существенную роль играет также неправильный выбор режущего инструмента и степень его изношенности. Для уменьшения расслаивания известно несколько приемов, например, снижение подачи и сверление в подкладную плиту. Межслойное расслаивание, возникающее при сверлении композитов, является главным дефектом уменьшающим целостность композита, его изгибную прочность и усталостную прочность под действием циклической нагрузки. Поэтому задача создания математических моделей, позволяющих на стадии проектирования технологической операции сверления прогнозировать появление и рост величины межслойного разрушения, является актуальной и имеет практическую ценность.

Анализ литературных источников, состояние проблемы и моделирование механизма появления трещины расслаивания. Многочисленные экспериментальные наблюдения показали, что расслаивание появляется вокруг отверстия на входе и выходе инструмента из заготовки. Механизм этого явления подробно рассмотрен в литературе [1-3]. Расслаивание возникает при контактном нагружении материала заготовки осевой силой.

Появление межслойных трещин на входе обусловлено контактным взаимодействием поперечной режущей кромки с поверхностью заготовки, вследствие чего тонкий слой начинает шелушиться, в результате отделяется от соседнего и образуется зона расслаивания вокруг входного отверстия. В момент, когда сверло находится возле выхода из отверстия, число слоев композита, находящихся перед сверлом, уменьшается, снижается их общая жесткость в структуре композита. В результате происходит расслаивание (отслаивание) последних слоев и разрушение последних волокон (жгутов) в материале.

Изучению качественных и количественных характеристик этого процесса посвящено достаточно много исследований [3-5]. Размер зоны растрескивания и ее амплитуда определяется условиями сверления и состоянием инструмента. При сверлении традиционным спиральным сверлом, величина зоны растрескивания растет с увеличением подачи, но уменьшается с ростом частоты вращения шпинделя. Однако влияние подачи часто намного сильнее, чем частоты вращения шпинделя.

При обработке отверстий в работе [6] расслаивание предложено характеризовать одномерным критерием F_{dam} (фактор расслаивания), который определяется отношением максимального диаметра зоны разрушения – D_{dam} к номинальному диаметру отверстия – D_{hole} (рис.1),

$$F_{dam} = D_{dam} / D_{hole}.$$

© Г.Л. Хавин, 2013

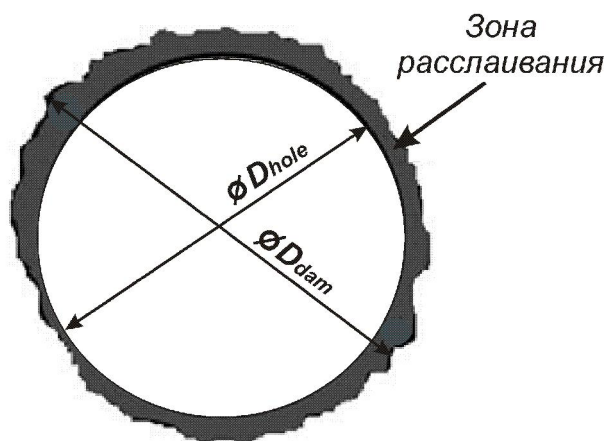


Рис.1. Расслаивание при сверлении слоистого композита.

Этот критерий получил наибольшее распространение, как наиболее простой для измерения и практического использования. В настоящее время имеется достаточно большое количество экспериментальных исследований по сверлению угле- и стеклопластиков различными типами инструментов, для которых получены эмпирические зависимости расчета фактора расслаивания [7-11].

Постановка задачи и цель работы. Целью настоящей работы является построение математической модели, позволяющей для заготовки из многослойного композита данной марки, выбранного типа инструмента и технологических параметров сверления спрогнозировать характер предполагаемой зоны разрушения и рассчитать ее величину.

Зона разрушения служит одной из важнейших характеристик, определяющих прочность и долговечность крепления в отверстии. Поэтому предсказать величину зоны разрушения очень важно. В работах [2,3] для характеристики зоны разрушения используются достижения механики линейного разрушения, где принято, что по достижению упругой энергии высвобождения определенного значения, происходит движение трещины. Проведенные эксперименты показали, что зона разрушения занимает достаточно малую область вокруг отверстия, а не всю заготовку, которая обрабатывается. В [3] были проведены экспериментальные замеры зоны расслоения как функции от различных параметров процесса: подачи, частоты вращения и радиуса сверла. Полученные результаты были обобщены методами регрессионного анализа в виде соотношения

$$F_{dam} = \frac{l_{dam}}{D_{hole}} = k \left(\frac{\pi \cdot f \cdot D_{hole}}{10^3 \cdot s} \right)^n \cdot \left(\frac{F_z}{E \cdot D_{hole}^2} \right)^m, \quad (1)$$

где l_{dam} – размер зоны расслоения, равная $l_{dam} = (l_{dam1} + l_{dam2})/2$, мм; D_{hole} – диаметр отверстия, м; s – величина подачи, мм/мин; f – частота вращения шпинделя, об/мин; F_z – осевая сила, Н; E – модуль упругости армирующих волокон, Па; n, m, k – постоянные.

Развитие расслоения происходит в два этапа, что порождает образование главной и вторичной области трещинообразования (рис.2). Главная область с максимальным повреждением расположена в направлении волокон. Вторичная область

имеет небольшие размеры и образуется в режущей фазе, в которой контакт между направлением армирования и скоростью резания образует острый угол. Кроме того, здесь часто появляются волокна, которые не были срезаны на краю отверстия в главной и вторичной области повреждения. Этот дефект обработки собственно и есть разломачивание или распушивание. Растрескивание (расслоение) и распушивание обычно появляются совместно и их размеры имеют тенденцию к изменению, чем большее появление межслоевых и других трещин, тем больше распушивание и наоборот. Однако, когда расслоение достигает определенной величины, распушивание исчезает.

Теоретические положения. В силу отличия механических свойств материала вдоль и поперек волокон, трещина расслоения имеет форму близкую к эллиптической форме с полуосями – a и b , рис.2. Учитывая это, и основываясь на модели расслоение в два этапа, примем в качестве допущения, что длина большей полуоси эллипса расслоения равна $a = D_{hole} / 2 + l_{dam}$, а длина меньшей полуоси $b = D_{hole} / 2$.

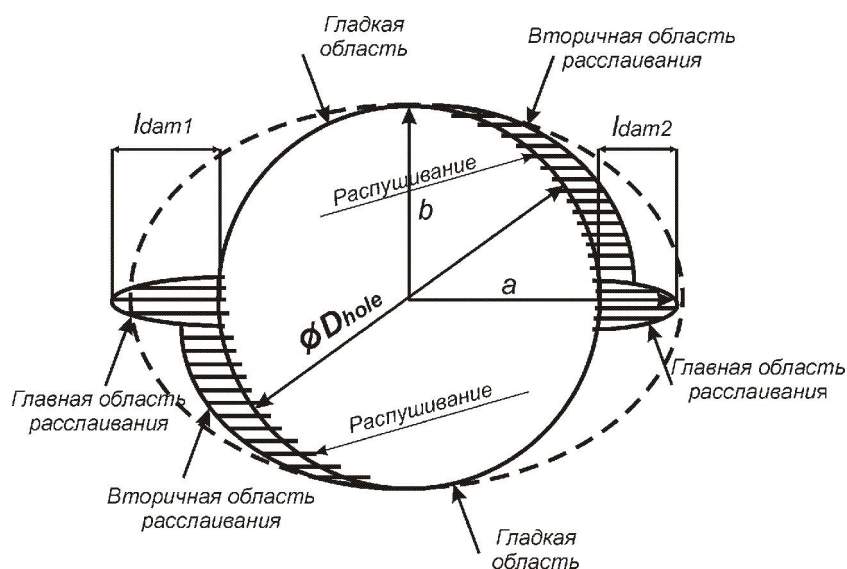


Рис. 2. Модель образования главной и вторичной области разрушения и межслойной эллиптической трещины расслоения.

Проведенный в [12] анализ на основе анизотропной теории упругости и линейной механики разрушения для эллиптической зоны расслоения, позволил определить осевую силу, при которой происходит старт межслойной трещины на расстоянии h_{dam} от нижнего края заготовки, следующим уравнением

$$F_z = \pi \sqrt{\frac{E_{22}}{E_{11}}} \left[\frac{G_{IC} \cdot K_a \cdot h_{dam}^3}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где G_{IC} – критическое значение энергии трещинообразования по I-му типу, Дж/м²; E_{11} , E_{22} – модули упругости в направлении армирования – 11 и ему перпендикулярном (трансверсальном направлении) – 22, Па; ν_{12} , ν_{21} – соответственно коэффициенты Пуассона; значение коэффициента K_a рассчитывается по формуле

$$K_a = 2E_{11} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}} [v_{12} \cdot E_{22} + 2 \cdot G_{12} (1 - v_{12} \cdot v_{21})],$$

где G_{12} – модуль сдвига.

Заметим также, что из выражения (2) можно получить известное соотношение Но–Cheng и Dharan [13] для изотропного материала, приняв $E_{11} = E_{22} = E$, $v_{12} = v_{21} = \nu$, $G_{12} = E/2/(1 + \nu)$. Соотношение (1) можно представить в виде

$$F_z = \left[\frac{l_{dam}}{k} \cdot \left(\frac{\pi \cdot f \cdot D_{hole}}{10^3 \cdot s} \right)^{-n} \cdot E_{11}^m \cdot D_{hole}^{2m-1} \right]^{1/m}. \quad (3)$$

Приравняем левую и правую часть (2) и (3) и разрешим относительно l_{dam} :

$$l_{dam} = h_{dam}^{3m/2} \cdot k \cdot \left(\frac{\pi \cdot f \cdot D_{hole}}{10^3 \cdot s} \right)^n \cdot D_{hole}^{1-2m} \cdot E_{11}^{-m} \cdot \left[\frac{G_{IC} \cdot K_a \cdot \pi^2}{1 - v_{12} \cdot v_{21}} \cdot \left(\frac{E_{22}}{E_{11}} \right) \right]^{m/2}. \quad (4)$$

Уравнение (4) при заданном отношении скорости резания к величине подачи связывает усредненное значение максимальной величины расслоения с толщиной материала заготовки от нижнего ее края, на котором это расслоение реализуется. Это соотношение позволяет оценить величину разрушения поверхностных слоев материала при заданных технологических параметрах обработки в зависимости от расстояния до нижней поверхности заготовки.

Результаты и обсуждения. В качестве примера использования предложенного подхода рассмотрим сверление отверстия диаметром 5,5 мм в заготовке из эпоксидного однонаправленного углепластика марки Т300 толщиной 2 мм с объемным содержанием волокон 60%.

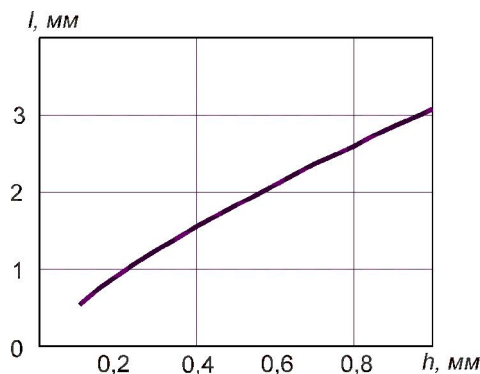


Рис. 3. Изменение длины трещины в зависимости от глубины ее появления.

Основные механическими характеристиками принимались следующими: 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 $v_{12} = v_{21} = 0,28$; критическая энергия трещинообразования $G_{IC} = 250$ Дж/м². Значения постоянных коэффициентов приняты: $k = 1,3 \cdot 10^3$; $n = -0,35$; $m = 0,5$. На

рис.3 приведена зависимость длины трещины l расслоения от глубины ее залегания от нижней поверхности заготовки h , вычисленная из соотношения (4) при значениях частоты вращения шпинделя $f = 3000$ об/мин и подаче $s = 20$ мм/мин.

Приведенный результат подтверждает тот факт, что главным фактором, определяющим качество выходного отверстия, является значение осевой силы. Чем больше осевая сила, тем больше глубина начала появления расслаивания h и тем больше длина трещины l_{\max} (рис.3). Можно видеть, что зависимость длины трещины расслоения от глубины ее образования для рассматриваемого диапазона изменения носит примерно линейный характер.

Выводы. Представлена модель, позволяющая прогнозировать величину трещины расслоения на выходе инструмента. Базируясь на экспериментальных данных, предложенная зависимость связывает физико-механические параметры материала композита с режимными параметрами обработки. В представленном соотношении не учитываются тип и марка инструмента, а также его геометрические параметры. Учет влияния этих факторов в новой модернизированной модели предсказания образования и величины дефектов обработки при сверлении полимерных композитов, является предметом дальнейших исследований.

Литература. 1. Vandervelde H. *Drilling processes / Printed circuits handbook*, Ed. C. F. Coombs, Jr., Ed. Mc. Graw Hill Companies, 2008. 2. Jain S. *Delamination free drilling of composite laminates / S. Jain, D.C.H. Yang // Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry.* – 1994. – 116. – P. 475–481. 3. Zhang H. *Assessment of exit defects in carbon fiber–reinforced plastic plates caused by drilling / H. Zhang, W. Chen, D. Chen, L. Zhang // Key Engineering Materials.* – 2001. – 196. – P.43–52. 4. 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. – 140. – P. 335–339. 5. Tsao C. C. *Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) / C. C. Tsao // International Journal Advanced Manufacturing Technology.* – 2008. – 37. – P. 23 – 28. 6. Chen W. C. *Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates / W. C. Chen // Int. J. Machine Tools & Manufacture.* – 1997. – 37. – P. 1097 – 1110. 7. Rubio J. C. *Effect of high speed in the drilling of the glass fibre reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor / J. C. Rubio, A. M. Abrao, P. E. Faria, A. E. Correia, J. P. Davim // International Journal of Machine Tools & Manufacture* – 2008. – 48. – P. 715 – 720. 8. Davim J. P. *Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study / J. P. Davim, P. Reis // Material Design.* – 2003. – 24. – P. 315–324. 9. Tsao C. C. *Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material / C. C. Tsao, H. Hocheng // Int. J. Mach. Tools Manuf.* – 2004. – 44. – P. 1085 – 1090. 10. Gaitonde V.N. *Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites / V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, R.J. Campos, C.A. Esteves, A.M. Abrao, Davim P.J. // J. Mater. Process Technol.* – 2008. – 203. – P. 431 – 438. 11. Khashaba U.A. *Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear / U. A. Khashaba, I. A. El-Sobaty, A. I. Selmy, A. A. Megahed // Composites: Part A*, 2010. – 41. – P.1130 – 1137. 12. Tsao C.C. *Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates / C.C. Tsao, W.C. Chen // Journal of Materials Processing Technology.* – 1997. – 70. – P.185–189. 13. 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. – 112. – P. 236 – 239.

Bibliography (transliterated). 1. Vandervelde H. *Drilling processes / Printed circuits handbook*, Ed. C. F. Coombs, Jr., Ed. Mc. Graw Hill Companies, 2008. 2. Jain S. *Delamination free drilling of composite laminates / S. Jain, D.C.H. Yang // Transactions of the ASME, Journal of*

Engineering for Industry. –1994. – 116. – P. 475–481. 3. Zhang H. Assessment of exit defects in carbon fiber–reinforced plastic plates caused by drilling / H. Zhang, W. Chen, D. Chen, L. Zhang // *Key Engineering Materials*. – 2001. – 196. – P.43–52. 4. 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. – 140. – P. 335–339. 5. Tsao C. C. Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) / C. C. Tsao // *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. – 2008. – 37. – P. 23 – 28. 6. Chen W. C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates / W. C. Chen // *Int. J. Machine Tools & Manufacture*. – 1997. – 37. – P. 1097 – 1110. 7. Rubio J. C. Effect of high speed in the drilling of the glass fibre reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor / J. C. Rubio , A. M Abrao , P. E. Faria , A. E. Correia , J. P. Davim // *International Journal of Machine Tools & Manufacture* – 2008. – 48. – P. 715 – 720. 8. Davim J. P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study / J. P. Davim , P. Reis // *Material Design*. – 2003. – 24. – P. 315–324. 9. Tsao C. C. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material / C. C. Tsao , H. Hocheng // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* – 2004. – 44. – P. 1085 – 1090. 10. Gaitonde V.N. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites / V.N. Gaitonde , S.R. Karnik , R.J. Campos , C.A. Esteves , A.M. Abrao , Davim P.J. // *J. Mater Process Technol* – 2008. – 203. – P. 431 – 438. 11. Khashaba U.A. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear / U.A. Khashaba , I. A. EI-Sobaty , A. I. Selmy , A. A. Megahed // *Composites: Part A*, 2010. – 41. – P.1130 – 1137. 12. Tsao C.C. Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates / C.C. Tsao, W.C. Chen // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1997. – 70. – P.185–189. 13. 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. – 112. – P. 236 – 239.

Хавін Г.Л.

МОДЕЛЮВАННЯ ВЕЛИЧИНИ МІЖШАРОВОЇ ТРІЩИНИ ПРИ СВЕРДЛЕННІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Розглянуто задачу визначення величини і глибини розташування тріщини розшарування при свердленні композитів. Надано модель локального руйнування, що базується на використанні лінійної механіки руйнування. Одержане співвідношення пов'язує глибину появи максимальної тріщини розшарування і значення її довжини.

Хавин Г.Л.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МЕЖСЛОЙНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Рассмотрена задача определения величины и глубины расположения трещины расслоения. Представлена модель локального разрушения, которая базируется на использовании линейной механики разрушения. Получено соотношение, связывающее глубину появления максимальной трещины расслоения и значение ее длины.

Khavin G.L.

SIMULATION OF CRACK DIMENSION OF THE DELAMINATION FOR POLYMERIC COMPOSITS DRILLING

The problem of determining the size and depth of burial delamination crack for drilling of composites is considered. The model of local delamination, which used of linear fracture mechanics, is presented. The correlation of connect maximal crack delamination depth appeared and hers length is obtained.