

УДК 621.95:004.94

Р.Ю. Мелентьев, специалист, Одес. нац. поли-
техн. ун-т

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ СРЕЗАЕМЫХ СТРУКТУРНЫХ ФАЗ ПРИ АЛМАЗНОМ СВЕРЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р.Ю. Мелентьев. Визначення площі зрізаних структурних фаз при алмазному свердлінні полімерних композиційних матеріалів. Створено і досліджено параметричну модель алмазного свердління слоїстої системи волокно-матриця-волокно з ортотропною схемою армування в Autodesk inventor, з урахуванням довільної геометрії різальної кромки абразивного зерна. Одержано залежність площі контакту зрізаних структурних фаз від їх об'ємного вмісту.

Ключові слова: алмазне свердління, армовані полімерні композиційні матеріали, слоїста система, визначення площі контакту.

Р.Ю. Мелентьев. Определение площади срезаемых структурных фаз при алмазном сверлении полимерных композиционных материалов. Создана и исследована параметрическая модель алмазного сверления слоистой системы волокно-матрица-волокно с ортотропной схемой армирования в Autodesk inventor с учетом произвольной геометрии режущей кромки абразивного зерна. Получена зависимость площадей контакта срезаемых структурных фаз от их объемного содержания.

Ключевые слова: алмазное сверление, армированные полимерные композиционные материалы, слоистая система, определение площади контакта.

R. Yu. Melentiev. Determining the cut area of structural phases in diamond drilling of polymeric composites. Created and studied is the parametric model of diamond drilling of a layered system fiber-matrix-fiber with the orthotropic reinforcement scheme in Autodesk inventor, taking into account the arbitrary geometry of the abrasive grain's cutting edge. The dependence of the contact areas of the cut structural phases on their volume content is obtained.

Keywords: diamond drilling, reinforced polymer composites, layered system, determining the area.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) имеют ярко выраженные анизотропные свойства. Если металлы, имеющие кристаллическое строение, с определенным допущением можно считать изотропными, то ПКМ, наполнителем в которых являются волокна, обладают анизотропией свойств. Это определяет различие процесса резания, в частности, стружкообразования, при механической обработке вдоль основы или вдоль утка армирующих волокон. Схема армирования существенно влияет на процесс изготовления изделий из ПКМ, поэтому при обработке следует учитывать углы армирования волокон [1].

Угол армирования волокон определяет анизотропию свойств, поскольку, во-первых, волокна обладают гораздо большей прочностью по сравнению с матрицей, в которой они размещены. Во-вторых, сами по себе волокна обладают разной прочностью в зависимости от направления нагрузки.

Каждый слой ПКМ имеет различные прочностные характеристики. В направлении основы (рис. 1, *a*, ось *z*) прочность всегда выше, чем в направлении (рис. 1, *a*, ось *y*), а также иная прочность наблюдается в трансверсальном направлении (рис. 1, *a*, ось *x*). Так, для ПКМ, марки КМУ 11э характерно, что в направлении основы максимальное напряжение разрыву составляет 1030 МПа, а в направлении утка всего 42 МПа. Необходимо так же учитывать разность напряжения сдвига волокон от угла их укладки. Для того же углепластика КМУ-11э напряжение сдвига вдоль основы составляет 185 МПа, а вдоль утка — 120 МПа [2].

Для определения оптимальных режимов резания и стойкости инструмента при сверлении необходимо учитывать влияние перечисленных факторов. Это возможно после оценки площадей контакта абразивного контакта с структурными фазами ПКМ.

Причина переменной площади волокон в срезаемом слое заключается в различном расположении волокон относительно профиля режущей кромки абразивного зерна, вращающегося по винтовой поверхности.

Для определения соотношения объемов волокон и матрицы, попадающих в зону резания в пределах срезаемого слоя ортотропных ПКМ, сначала оценивается площадь контактирующих волокон в плоскости профиля зерна.

Каждая режущая кромка абразивного зерна последовательно проводит срез волокон в различных плоскостях, динамично меняющихся от 0 до 360° , где плоскости под углом 90 и 180° являются плоскостями симметрии.

Для определения соотношения между объемами армирующих волокон и объемом срезаемого слоя оценивается площадь срезаемых волокон в различных сечениях. Для этого на монослое ПКМ системы волокно-матрица производится 7 сечений с одинаковой длиной, первая секущая плоскость устанавливается параллельно к основе волокон, последующие 6 секущих плоскостей располагаются под углами α , равными $15, 30, 45, 60, 75$ и 90° от первой плоскости (рис. 1, а).

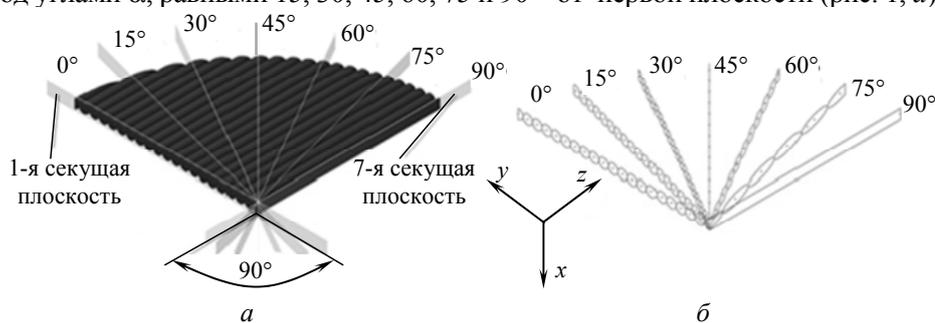


Рис. 1. Сечения в монослое ПКМ: размещение секущих плоскостей (а) и проекция срезаемых волокон в секущих плоскостях (б)

Оценка заключается в сравнении площадей срезаемых волокон в сечениях под разными углами (рис. 3, б). Первая секущая плоскость проходит через поперечное сечение волокна, а так как за него принят цилиндр, то поперечное сечение, как и основа, будет в форме окружности. В сечениях 2, 3, 4, 5 и 6 получатся эллипсы, в которых фокусы удаляются с увеличением угла α . При $\alpha = 90^\circ$ в сечении 7 проецируется прямоугольник.

Суммарные площади срезаемых волокон, попадающих в каждое сечение, сравниваются с площадью проекций волокон в поперечном сечении монослоя (секущая плоскость 1). Такую оценку удобно производить графически, используя программу Autodesk Inventor. Результаты сводятся в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные параметры срезаемых волокон

№ сечения	Длина сечения, мм	Фигура в сечении	Количество фигур	Площадь фигуры, мм ²	Суммарная площадь, мм ²	Расхождение, %
1	2,5	окружность	20	0,01227	0,2454	0
2	2,5	эллипс	19,3764	0,0127	0,2461	0,29
3	2,5	эллипс	17,378	0,01417	0,2462	0,33
4	2,5	эллипс	14,1786	0,01736	0,2461	0,29
5	2,5	эллипс	10	0,02454	0,2454	0
6	2,5	эллипс	5,22	0,04741	0,2474	0,81
7	2,5	прямоугольник	1	0,3125	0,3125	27,34

Как показывает проделанная оценка в монослое ПКМ, разница между суммарными площадями волокон, попавших в 1, 2, 3, 4, 5 и 6 сечения, изменяется незначительно. Заметное увеличение площади наблюдается в сечении 7. Следует заметить, что полученное значение является мгновенным (пиковым) и с малейшим отклонением угла приравняется к среднему значению площади срезанных волокон ($0,2461 \text{ мм}^2$). Это обусловлено превращением прямоугольника (рис. 2, а) в трапецию с эвольвентными бедрами (рис. 2, б), которые, смыкаясь, образуют эвольвентный равнобедренный треугольник (рис. 2, в). Дальнейшее изменение угла приводит к образованию эллипсов.

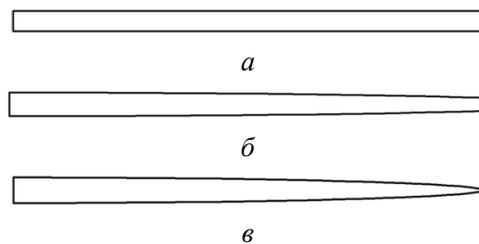


Рис. 2. Проецируемые фигуры в сечении в зависимости от угла секущей плоскости: $\alpha=0^\circ$; $S=0,3125 \text{ мм}^2$ (а); $\alpha=1,27^\circ$; $S=0,2706 \text{ мм}^2$ (б); $\alpha=1,45^\circ$; $S=0,2442 \text{ мм}^2$ (в)

Исследования показывают, что изменение угла на $1,45^\circ$ снижает площадь проецируемой фигуры сечения 7 на 27,96 % и становится в ряд с площадями фигур последующих секущих плоскостей.

Возможна ситуация, когда секущая плоскость 7 создаст сечение не по середине волокна, а между ними. В таком случае в сечении вообще не будет никакой фигуры и соответственно, площади контакта зерна с волокном. При малейшем же изменении угла α в сечении начнет возникать обратный треугольник; при дальнейшем изменении угла треугольник перейдет в эллипс, затем в два эллипса и т.д.

Так как описанное скачкообразное увеличение площади является мгновенным и проявляется лишь в идеально расположенных секущих плоскостях, то исключение его при расчетах не приведет к существенной погрешности.

На данном этапе можно сделать вывод, что при резании абразивным зерном монослоя армированного непрерывными волокнами ПКМ площадь контактирующих волокон от угла поворота режущей кромки изменяется незначительно.

Достоверность измерений, полученных данным методом, доказывается измерением и сравнением параметров виртуальной зоны контакта геометрической модели, созданной в CAD системах конструкторского проектирования (Unigraphics, Solid Works, T-Flex, Pro/Engineer, Autodesk Inventor) с результатами математической модели контакта в зоне резания [3]. Погрешность между результатами вычисления параметров и одноименными результатами их измерения или практически отсутствует или составляют незначительную величину (не более 0,02 %), которая сопоставима с различием между одноименными измерениями в Solid Works и Autodesk Inventor.

В приближенных к реальным условиям срезаемый слой по форме будет копировать профиль абразивного зерна. Для определения срезаемых площадей волокон и матрицы одним зерном были получены две компьютерные модели процесса сверления одним зерном структуры ПКМ с ортотропной схемой армирования (ОСА). На слоистую систему с ОСА накладывалась траектория перемещения режущей кромки абразивного зерна за один оборот сверла (рис. 3, а), а объем ПКМ, попавший в траекторию зерна, вычитался из системы (рис. 4, а). Измерялась площадь среза волокон и сопоставлялась с площадью срезанного (той же траекторией) слоя волокон залитых связующим (рис. 4, б).



Рис. 3. Траектория перемещения кромки абразивного зерна: круглого, за один оборот (а); неправильного многоугольника (фрагмент траектории)(б)

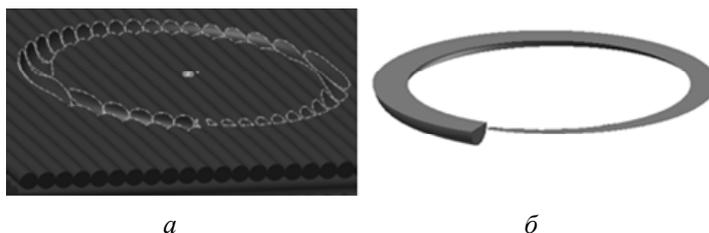


Рис. 4. Срезанный материал круглой кромкой зерна за один оборот:
контактная площадь с волокнами (а); срезанный слой волокон в связке (б)

Исходные условия формирования моделей: размещения волокон в срезаемом сечении при сверлении принято упорядоченным. На границах волокон со связующим предполагается непрерывность условий контакта, а волокна рассматриваются как система идеально цилиндрических, параллельно расположенных однородных тел. Подобное допущение использовалось при исследовании прочности и теплопроводности ПКМ [4]. Объемное содержание волокна в матрице составляет 78,5 % (таково соотношение площади круга к описываемому его квадрату). Моделируемый ПКМ широко применяемый в авиации углепластик КМУ-11э с диаметром волокон 125 мкм; отдаление зерна от оси вращения сверла составляет 1 мм; подача 0,125 мм/об [2].

В приведенной модели кромка абразивного зерна выполнена в виде окружности с диаметром 225 мкм (рис. 3, а). С целью приближения к реальным условиям во второй модели круглая режущая кромка зерна была заменена на неправильный многоугольник с такой же площадью поперечного сечения и периметром. Часть траектории перемещения такой кромки указана на рис. 3, б

Результаты моделирования приведены в табл. 2.

Таблица 2

Площади срезанных волокон и матрицы зернами разной формы (за один оборот)

№ модели	Форма кромки	Площадь срезанного слоя, мм ²	Площадь срезанных волокон, мм ²	Площадь срезанной матрицы, мм ²	Отношение, %	Содержание волокон в матрице, %
1	Окружность	1,525	1,195	0,330	78,3	78,4
2	Многоугольник	1,787	1,379	0,408	77	78,4

Проведенное моделирование позволило сделать вывод:

— Одинаковые по площади поперечного сечения и по периметру зерна, имея разную форму, создают несколько различный по площади след срезанного материала. Однако это не привело к существенному изменению соотношения площади контактирования зерна с волокнами и матрицей.

— Доказана равенность отношения площади контактирования инструмента с волокнами и матрицей к отношению их объемного содержания в ПКМ, с отклонением до 1,4 %.

— При изменении угла между плоскостью режущей кромки и направлением волокон площадь контактирования между последними остается стабильной, из этого следует заключение, что срезаемый слой ввиду малого разброса площади можно считать условно однородным.

Литература

1. Степанов, А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А.А. Степанов. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. — 176 с.
2. Дударев, А.С. Теоретическое определение силовых показателей при сверлении углепластиков / А.С. Дударев, В.И. Свирцев // Физ. и компьют. технологии: Тр. 13-й междунар. науч.-техн. конф. — Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. — С. 97 — 99.

3. Ларшин, В.П. Компьютерное моделирование технологической системы профильного шлифования / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2008. — Вып. 2(30). — С. 76 — 80.
4. Михайловский, К.В. Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций / К.В. Михайловский, П.В. Просунцов, С.В. Резник // Вестн.к МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. — М., 2012. — С. 98 — 105.

References

1. Stepanov, A.A. Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov [Machining of high-strength composite polymer materials]. — St. Petersburg, 1987. — 176 p.
2. Dudarev, A.S. Teoreticheskoe opredelenie silovykh pokazateley pri sverlenii ugleplastikov [Theoretical determination of power performance when drilling carbon plastics] / A.S. Dudarev, V.I. Svirshchev // “Fizicheskie i komp’yuternye tekhnologii”. Trudy 13-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Physical and computer technologies. Proc. of the 13th Intern. Sci.-Tech. Conf.]. — Khar’kov : HNPK “FED”, 2007. — pp. 97 — 99.
3. Larshin, V.P. Komp’yuternoe modelirovanie tekhnologicheskoy sistemy profil’nogo shlifovaniya [Computer design of a technological system for profile grinding] / V.P. Larshin, N.V. Lishchenko // Trudy Odesskogo natsional’nogo politekhnicheskogo universiteta [Proc. of Odessa Polytech. Univ.], 2008, Iss. 2 (30). — pp. 76 — 80.
4. Mikhaylovskiy, K.V. Razrabotka vysokoteploprovodnykh polimernykh kompozitsionnykh materialov dlya kosmicheskikh konstruksiy [The Development of highly heat-conductive polymer composite materials for space structures] / K.V. Mikhaylovskiy, P.V. Prosuntsov, S.V. Reznik // Vesnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroenie [Herald of Bauman MSTU. Ser. “Mechanical Engineering”]. — 2012. pp. — 98 — 105.

Рецензент д-р техн. наук, проф., Одес. нац. политехн. ун-та Деревянченко А.Г.

Поступила в редакцию 12 сентября 2013 г.