

Р. Ю. Мелентьев

Одесский национальный
политехнический университет,
Одесса,
e-mail: 15KGrant@mail.ru

УДК 53.053:004.383.4

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ В ЭЛЕМЕНТАРНОМ ОБЪЕМЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ключові слова: полімерні композиційні матеріали, теплове поле, теплопровідність, волокно, елементарна комірка.

Створена і досліджена комп'ютерна модель теплового поля структурних фаз полімерних композиційних матеріалів в елементарному об'ємі. Визначено відмінність процесу розподілу теплоти на поверхні і по осі окремого волокна і елементарної комірки. Встановлено тепловий вплив полімерної матриці на волокно.

Введение

Обработка резанием полимерных композиционных материалов (ПКМ) обладает рядом специфических особенностей, определяемых главным образом особенностью их структуры, механическими и теплофизическими свойствами. В то же время процессу резания ПКМ сопутствуют те же явления, что и при резании металлов, т. е. наблюдаются стружкообразование, силовые и тепловые явления, интенсивное изнашивание режущего инструмента. Каждое из перечисленных явлений в той или иной мере отличается от аналогичных явлений при резании металлов, поэтому для оптимизации процессов обработки ПКМ необходимо вскрыть физическую сущность процесса их резания.

Специфика свойств обрабатываемых материалов определяет и особенность тепловых явлений при их резании. Низкая теплопроводность ПКМ существенно влияет на соотношение составляющих общего теплового баланса. Так, теплопроводность ПКМ составляет 0,14–0,50 Вт/(м·К), что в несколько сот раз меньше у металлов. Это обуславливает слабый отвод теплоты со стружкой и в обрабатываемое изделие, поэтому при обработке ПКМ основная доля теплоты отводится через режущий инструмент. Так, по данным [1] расход теплоты при обработке полимерных композиционных материалов распределяется следующим образом: в инструмент – 90, в стружку – 5, в обрабатываемую деталь – 5%. В то же время при обработке металлов порой до 90% теплоты уносится стружкой и только 10% поглощается деталью и инструментом. Такое перераспределение расходной части теплового баланса накладывает определенные условия на применяемый режущий инструмент, который должен интенсивно отводить выделяющуюся в зоне резания теплоту.

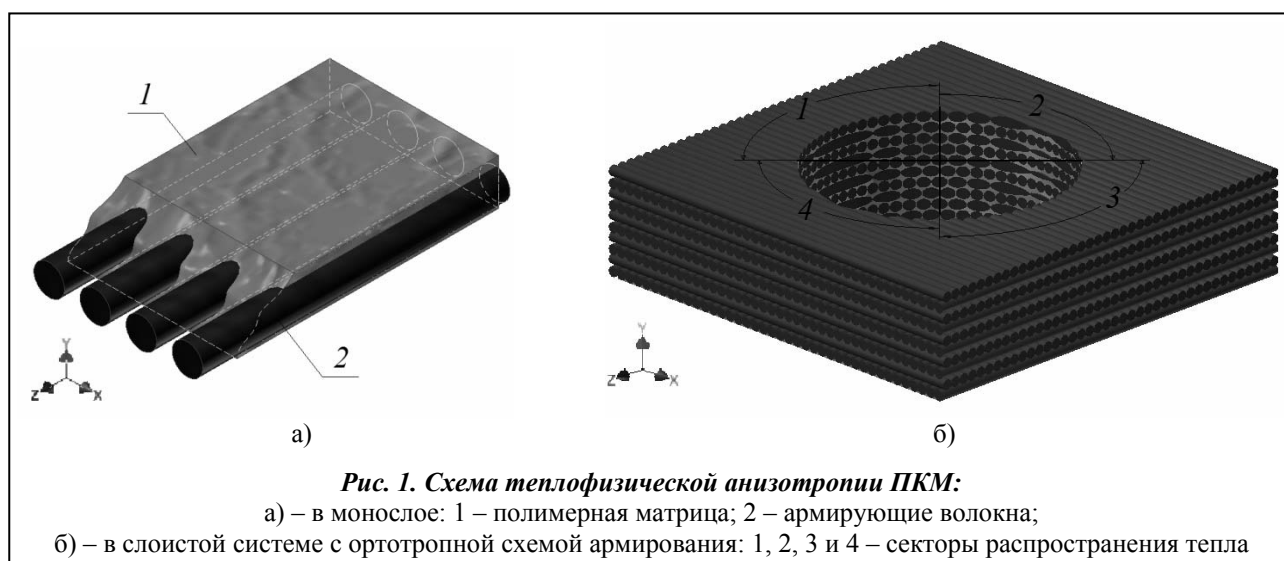
В отличие от металлов ПКМ обладают низкой теплостойкостью. Так, при температурах выше 570–620 К начинается интенсивная термодеструкция и разложение полимерного связующего, а при обработке таких материалов как органопластики – и полимерного наполнителя. В результате этих процессов образуется деструктивно-диспергированный слой, который ухудшает эксплуатационные характеристики деталей из ПКМ.

На величину и интенсивность деструктивных процессов влияет главным образом теплота, выделяемая в зоне резания, и механическое воздействие, приводящее к разрыву молекулярных цепей полимера. Исследования [2] позволили представить условно слоистую структуру поверхностного слоя ПКМ после механической обработки:

- 1 – адсорбированная пленка толщиной менее 1 мкм;
- 2 – модифицированный слой толщиной не более 0,05–10 мкм;
- 3 – уплотненный, собственно деструктивный слой толщиной 5–10 мкм;
- 4 – раздробленный и разрыхленный слой толщиной 10–300 мкм;
- 5 – переходной слой толщиной 20–100 мкм;
- 6 – исходная структура материала.

Таким образом, толщина общего деструктивного слоя может составлять до 420 мкм.

С точки зрения механической обработки такие свойства полимеров в первую очередь сказываются на ограничении интенсивности обработки по температуре в зоне резания. С этой точки зрения наилучшим инструментальным материалом является алмаз. Обладая самой высокой твердостью, ал-



маз имеет коэффициент трения по пластмассе значительно меньший, а коэффициент теплопроводности больший, чем у твердых сплавов.

Формирование проблемы

Аналитический расчет температуры резания, а особенно распределения температур по поверхности и в глубину изделия представляет большие трудности по той причине, что ПКМ имеют ярко выраженную анизотропию не только механических, но и теплофизических свойств, которые зависят от направления теплового потока относительно направления ориентации волокон (рис. 1). Так в монослое ПКМ, армированном непрерывными волокнами, теплопроводность в направлении оси z значительно превышает теплопроводность в направлении x и y (рис. 1, а).

Теплопроводность полимерной матрицы составляет $0,14\text{--}0,50$ Вт/(м·К) и порой в сотню раз ниже теплопроводности наполнителя, например, коэффициент теплопроводности углеволокна может изменяться в пределах $75\text{--}120$ Вт/(м·К) [3]. Из указанных значений становится очевидным, что доминирующим и основным фактором распространения теплоты в ПКМ (особенно в направлении оси z (вдоль волокна)) являются теплофизические характеристики именно волокон, а не матрицы.

При сверлении ПКМ с ортотропной схемой армирования инструмент, двигаясь в осевом направлении (рис. 1, б, ось z), поочередно срезает однонаправленные слои. Как уже было установлено, поскольку распространение теплоты в направлении укладки волокон значительно превосходит распространение теплоты в других направлениях, то волокна первого (верхнего) слоя, попадающие в условные сектора 1 и 3, отведут температуру от поверхности далее волокон, попавших в сектора 2 и 4. Срезав верхний слой, сверло перейдет к обработке следующего. Второй слой уложен под прямым углом по отношению к предыдущему, а значит, отвод теплоты от поверхности будет преобладать в участках, попавших в сектора 2 и 4. Распространение теплоты в слоях 3 и 4 соответствует схеме распределения в 1 и 2 соответственно.

Из описанной схемы представляется очевидным, что максимальный отвод температуры от обрабатываемой поверхности сопоставим с отводом теплоты вдоль волокна. Таким образом, задача теплопроводности ПКМ сводится к теплопроводности отдельного волокна.

Необходимо учесть, что в реальных условиях волокно окружено полимерной матрицей, имеющей большие различия физико-механических свойств по сравнению с волокнами. Значит, теплораспределение в полном объеме ПКМ зависит от теплораспределения в одной его элементарной части. Очевидно, что доминирующим фактором распределения теплоты вдоль волокон являются именно волокна, но для полноты модели теплового поля необходимо учесть и влияние матрицы.

Целью статьи является установление различия процесса распределения теплоты на поверхности и по оси отдельного волокна и элементарной ячейки.

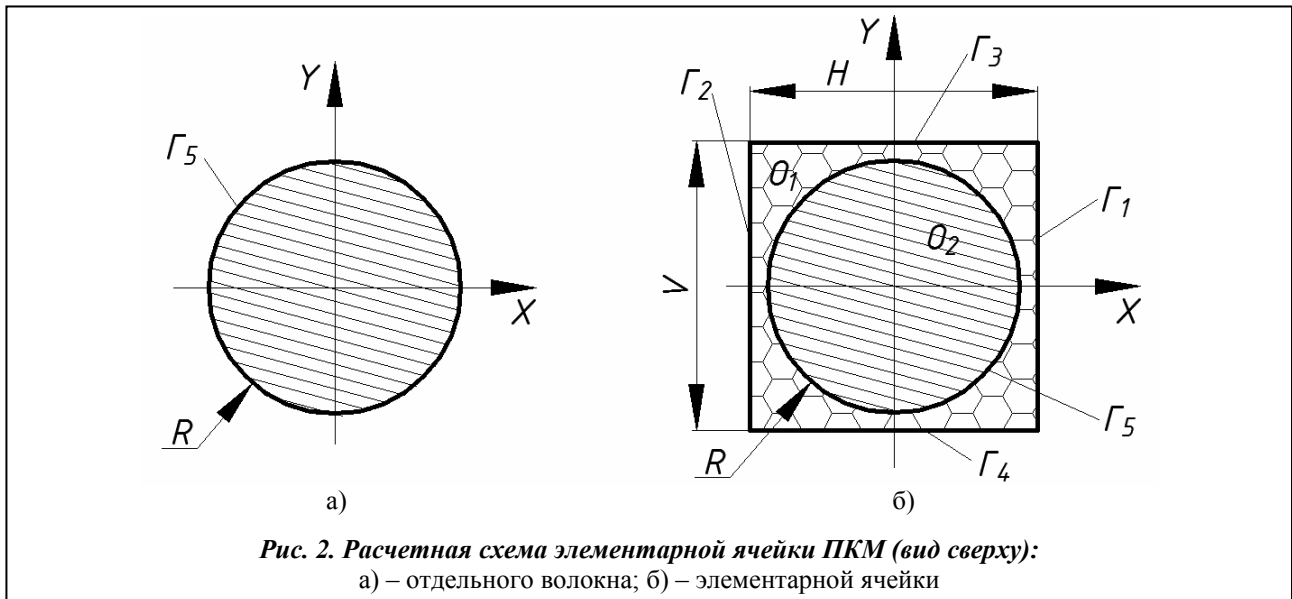


Рис. 2. Расчетная схема элементарной ячейки ПКМ (вид сверху):
 а) – отдельного волокна; б) – элементарной ячейки

Решение задачи

Множество теплофизических задач с конкретной постановкой к настоящему моменту не имеют аналитического решения или имеют аналитические решения, полученные при первичных допущениях, которые снижают их точность. Для использования программы COMSOL (FemLab) нет необходимости получать аналитическое решение (которое, например, необходимо для работы в программе MathCAD). Для моделирования конкретной задачи достаточно иметь исходное дифференциальное уравнение и граничные условия [4].

Для вычисления результатов и создания наглядного отражения процесса распределения температуры на поверхности и по глубине отдельного волокна и элементарной ячейки задача решалась в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Расчетная схема моделирования представлена на рис. 2.

Геометрия первой модели состоит из цилиндра с радиусом R и теплоизолированной гранью Γ_5 (рис. 2, а).

Для второй модели в качестве элементарной ячейки ПКМ рассматривается единичное волокно, окруженное полимерной матрицей (рис. 2, а). Волокно рассматривается как идеально цилиндрическое однородное тело, а матрица – окружающий волокно правильный четырехугольник (рис. 2, б). Такое допущение использовано в [5] при определении коэффициента теплопроводности ПКМ и в [6] при исследованиях прочности ПКМ. В элементарной ячейке полимерной матрицы (термореактивная смола или другая связка) O_1 с размерами $H \times V$ размещается углеродное волокно (область O_2) радиусом R . Соотношение размеров R, H, V выбирают на основе данных об объемной доле волокна и матрицы в ПКМ. Считается, что на границе раздела волокна и матрицы Γ_5 имеет место идеальный тепловой контакт. Поверхности $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ и Γ_4 полагаются теплоизолированными. Теплофизические свойства (ТФС) не зависят от температуры.

Были приняты значения: радиус $R = 50$ мкм, соотношение $O_2 / (O_1 + O_2) = 6/10$ (объемное содержание волокна в ПКМ 60%), ширина и высота $H = V = 114$ мкм. Длина тела первой и второй модели, во избежание крупной погрешности из-за прогрева всего тела, выбиралась значительно больше габаритов ячейки H, V и составила 2 мм.

Встроенный в программный комплекс математический аппарат для решения тепловых задач представлен как

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \tag{1}$$

где ρ – плотность; C_p – удельная теплоемкость; T – начальная температура; t – время нагрева; k – коэффициент теплопроводности (далее КТ); Q – плотность теплового источника.

В более известном виде уравнение теплопроводности имеет вид [7]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + V \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2)$$

где T – температура; τ – время действия теплового источника; a – температуропроводность материала; x, z – координаты; V – скорость перемещения теплового источника.

В работе [8] приводится доказательство того, что формулы (1) и (2) равносильны.

Начальная температура принималась комнатной, $T = 293,15$ К. Время нагрева $t = 0,01$ с и плотность теплового источника $Q = 40 \cdot 10^6$ Вт/м² приняты приблизительно.

Свойства углеродных волокон и матрицы (термореактивной смолы) были присвоены усредненные значения (таблица):

Свойства материалов

Материал	Плотность, ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость, C_p , Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности, k , Вт/(м·К);
углеродное волокно	1800	1100	100
термореактивная смола	1400	900	0,5

Описание результатов

Зависимость температурного распределения по глубине на оси волокон 1 и 2 изображена на рис. 3.

Волокно, окруженное связкой (кривая 2), имея максимальную температуру выше, снижается круче и пересекает температуру отдельного волокна (кривая 1) на глубине 0,9 мм, затем с малым расхождением (10–15 К) следует к начальной температуре (293,17 К). Из графика видно, что наличие матрицы на теплопроводность волокон вдоль оси влияет незначительно.

Максимальная температура на поверхности отдельно взятого волокна составила 613,76 К, для волокна, окруженного полимерной матрицей, температура на поверхности достигла 740 К (рис. 4). Увеличение максимальной температуры волокна в ячейке вызвано влиянием более горячей матрицы. Из-за разницы теплофизических констант, при прочих равных условиях, температура на поверхности

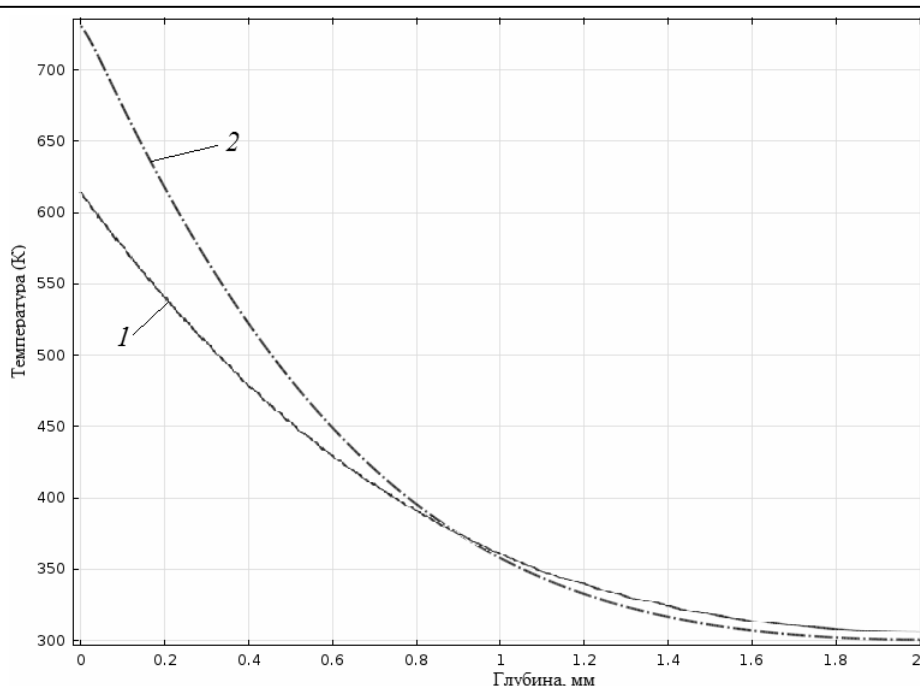
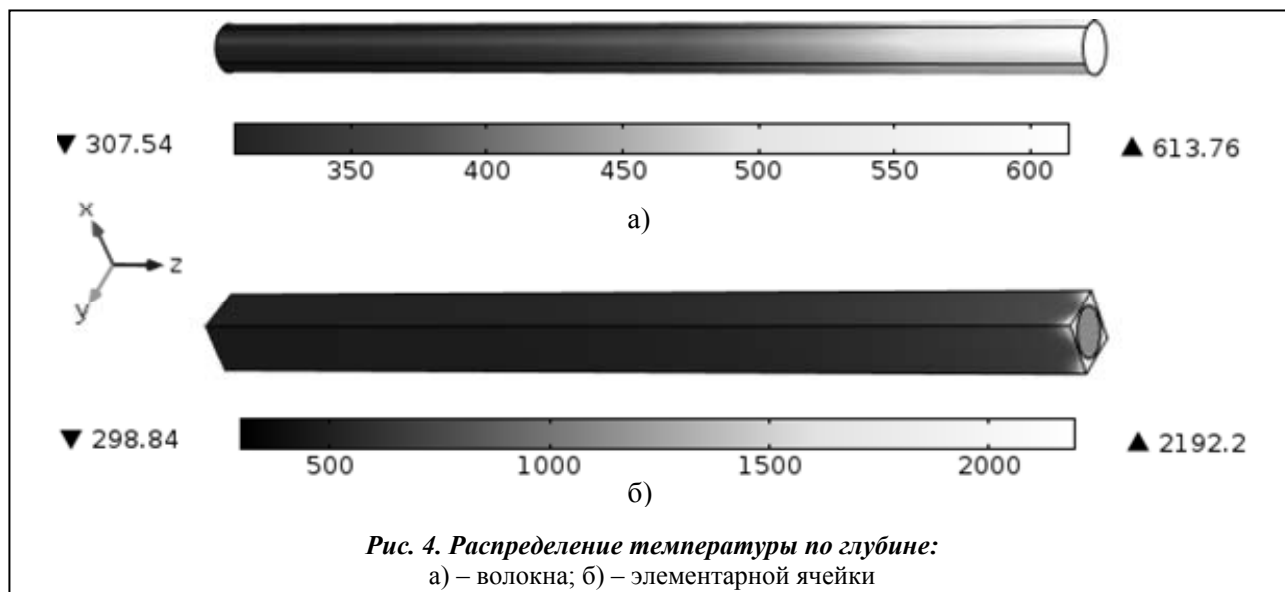


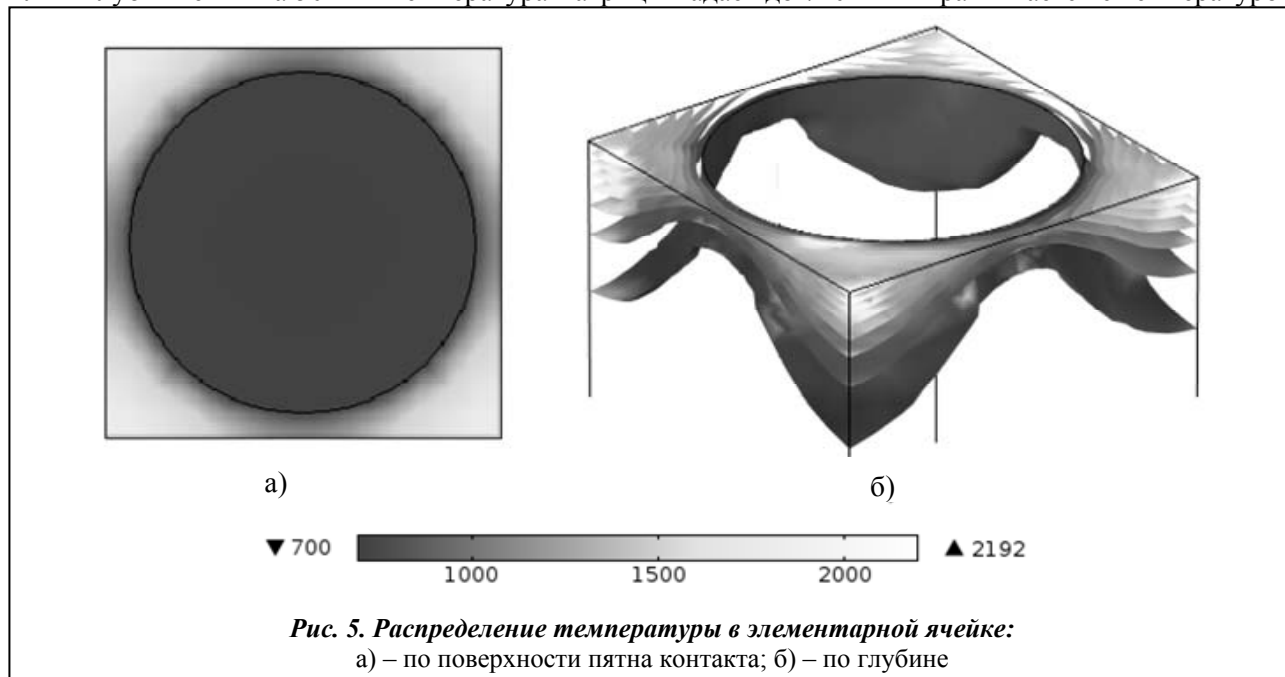
Рис. 3. Распределение температуры по глубине:
1 – изолированного волокна; 2 – волокна в элементарной ячейке



матрицы значительно превышает максимальную температуру волокна. Благодаря высокому значению КТ волокна тепло эффективно распространяется от нагреваемой поверхности (рис. 4, а), чего не происходит с поверхностью связки. На рис. 4, б изображено распределение температуры по глубине и на поверхности контакта ячейки с тепловым источником.

Наивысшая температура наблюдается на поверхности полимерной матрицы (2192 К), рис. 5, причем концентраторами являются участки, наиболее отдаленные от волокна (рис. 5, а). Между элементарными объемами O_1 и O_2 установился очень резкий температурный переход – с 2192 до 740 К длиной в 15 мкм. Для исследования изменений данного теплового поля по глубине ячейки проведен изотермический анализ. Он заключается в нахождении изотермических поверхностей в теплопроводящем теле. Изотермические поверхности отделяют более горячие части тела от более холодных и условно разделяют твердое тело на тонкие слои (рис. 5, б). Тепло течет от одного слоя к другому (от светлого к темному). Тепловой поток имеет направление, нормальное к изотермам, потому что перенос тепла вдоль поверхности одинаковой температуры невозможен [9].

С отдалением от концентратора температуры (угол четырехугольника) к центру на 15 мкм или в глубь ячейки на 50 мкм температура матрицы падает до 740 К и выравнивается с температурой



волокна. Дальнейшее снижение (от 740 до 300 К) происходит почти равномерно по всей площади поперечного сечения элементарной ячейки.

Из расположения изотерм заметно, что наличие волокна положительно влияет на теплопроводность в элементарной ячейке. Совершенно очевидно, что с увеличением объемного содержания волокна в матрице увеличится коэффициент теплопроводности монослоя и ПКМ в целом по всем координатам. Таким образом, при моделировании теплового поля в ПКМ необходимо с точностью учитывать геометрические параметры исследуемого объекта, в особенности радиус волокна, ширину и высоту элементарной ячейки.

Выводы

Проведенная работа позволяет заключить следующее:

- задача теплопроводности ПКМ может быть сведена к тепловому распределению в одной его элементарной ячейке;
- максимальная температура возникает на поверхности полимерной матрицы и значительно отличается от температуры на поверхности волокна;
- вследствие разницы температур полимерная матрица повышает максимальную температуру на поверхности волокна.
- наличие полимерной матрицы незначительно влияет на теплопроводность ячейки вдоль оси волокна;
- объемное содержание волокна в матрице влияет на теплопроводность ПКМ.

Следует также отметить, что для решения тепловых задач со сложной геометрией и анизотропией физических свойств с применением программных модулей необходимость получать аналитические решения практически исчезает. Программа COMSOL (FemLab) открывает большие возможности для определения тепловых явлений в зоне резания при механической обработке и ставит в перспективу возможность управления технологическими процессами в режиме реального времени.

Выражение благодарности

Автор приносит глубокую благодарность Н. В. Лищенко и Ю. А. Морозову за помощь в освоении используемого программного комплекса, а также В. П. Ларшину за идею в сведении трудной задачи к более простой.

Литература

1. *Дрожжин, В. И.* Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс : Дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Дрожжин. – Харьков, 1982. – 32 с.
2. *Исследование* теплопроводности углепластиков в широком диапазоне эксплуатационных температур с использованием элементов натуральных конструкций / С. В. Резник, О. В. Денисов, В. А. Нелюб [и др.] // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – № 3. – С. 2–6.
3. Дрожжин, В. И. Измерение температуры при резании неметаллических материалов инструментом из сверхтвердых материалов поликристаллов / В. И. Дрожжин, Н. В. Верезуб // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1976. – Вып. 11. – С. 17–19.
4. *Ларшин, В. П.* Определение температуры при шлифовании резьбы полукруглого профиля / В. П. Ларшин, Н. В. Лищенко // Инж. механика. – 2008. – Вып. 21. – С. 51–55.
5. Михайловский, К. В. Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций / К. В. Михайловский, П. В. Просунцов, С. В. Резник // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – № 3. – С. 98–106.
6. *Ван Фо Фы, Г. А.* Конструкции из армированных пластмасс / Г. А. Ван Фо Фы. – Киев: Техника, 1971. – 172 с.
7. *Сипайлов, В. А.* Тепловые процессы при шлифовании и управлении качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978 – 167 с.
8. *Ларшин, В. П.* Компьютерное моделирование процесса шлифования для определения температуры в зоне резания / В. П. Ларшин, Н. В. Лищенко // Инж. механика. – 2008. – Вып. 21. – С. 130–140.
9. *Carslaw, H. S.* Introduction to the mathematical theory of the conduction of heat in solids / H. S. Carslaw. – N.-Y.: Dover publication, 1945. – 36 p.

Поступила в редакцию 02.03.14