

Криворучко Д. В., Залога В. А.

Сумской государственной университет. Украина, г. Сумы

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗАНИЯ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Анотація

Використання композиційних матеріалів в конструкціях сучасних літальних апаратів зростає, що потребує значно ефективніших процесів їх механічної обробки. Тому в статті розглянуті сучасні методи вивчення процесів механічної обробки композиційних матеріалів. Показано переваги і недоліки чисельних методів. Залежно від глибини деталізації опису структури композиційних матеріалів виділені три рівні деталізації чисельних моделей: макромеханічний, мезомеханічний і мікромеханічний. Дана характеристика отриманих за допомогою цих моделей рішень.

Abstract

The utilization of fiber reinforced composite materials in the modern aircraft structures has been increasing. This requires considerably more efficient processes for the composite machining. Therefore, the article deals with the modern methods of studying the composite machining. The advantages and disadvantages of numerical methods are described. Depending on the depth of describing of fiber reinforced composite materials three groups of numerical models are identified. These are macromechanical, mesomechanical and micromechanical. The characteristics present solutions are given.

Введение

Механические и физические свойства современных композиционных материалов (КМ), в первую очередь достаточно высокая прочность при относительно малом удельном весе, делают их привлекательными конструкционными материалами для авиационной промышленности. Использование композиционных материалов в узлах самолета, несмотря на существенное сокращение веса конструкций и другие преимущества, которые могут обеспечить КМ, постоянно растет, хотя и не так стремительно как предсказывалось ранее [1, 2, 3]. В современной конструкции планера самолета масса металлических материалов по-прежнему составляет не менее двух третей от его веса. Хорошим примером эффективного использования КМ может служить компания Boeing, которая за последние годы довела использование

(по массе) композиционных материалов в планере самолетов 787 серии до 50 % [4].

Следует отметить, что в настоящее время активному внедрению армированных композиционных материалов (АКМ) в авиационной промышленности в наибольшей степени мешают проблемы их механической обработки, и, в частности, обработки отверстий осевым инструментом. Одной из проблем является высокая интенсивность изнашивания режущего инструмента, что в первую очередь обусловлено наличием в АКМ армирующих волокон, обладающих высокими абразивными свойствами. Кроме того, при резании АКМ могут формироваться повреждения обработанной поверхности, не свойственные металлическим материалам: расслоения, термические повреждения матрицы, нарушение сцепления волокон с матрицей, вытягивание волокон и другие [5].

В настоящее время основными методами исследования процессов механической обработки АКМ все еще являются экспериментальные методы [5]. Вместе с тем, накопленные за последние годы эмпирические знания практически уже создали основу для разработки моделей процессов механической обработки АКМ, которые позволяют по-новому взглянуть на процесс резания этих материалов.

Целью настоящей работы является обзор современных достижений в моделировании процессов резания АКМ и выявление сложившихся в этой области тенденций и перспектив создания (разработки) прогнозирующих моделей, с помощью которых можно было бы без каких-либо натуральных экспериментов непосредственно по резанию с достаточной точностью предсказывать такие выходные показатели процесса механической обработки как сила резания, температура и мощность резания, износ и стойкость инструмента, показатели качества обработанной поверхности и др.

Краткая характеристика АКМ

В современных конструкциях летательных аппаратов наибольшее распространение получили армированные композиционные материалы (АКМ). Находят применение АКМ на основе арамидных волокон — АКМ кевлар; на основе стекловолокна — стеклопластики; на основе углеволокна — углепластики [1].

Из за своих высоких механических свойств и относительно низкой стоимости в последние годы объем

использования углепластиков (УП) начал увеличиваться. Следует отметить, что УП является хрупким материалом, который не поддается пластической деформации в области концентрации напряжений. Его прочность снижается при ударных нагрузках. Кроме того, матрица (эпоксидная смола) способна впитывать влагу, что может существенно ослаблять матричные связи и сопровождаться снижением прочности при сжатии. С другой стороны, упругие свойства УП менее подвержены влиянию внешних факторов, чем его прочность. Это делает УП более устойчивыми к усталостному разрушению, чем металл. Установлено, что замена 40 % конструкции из алюминиевого

личалось от направлений волокон во всех остальных листах, что и позволяет обеспечить максимально высокую прочность слоистого (композиционного) АКМ.

Удельная прочность (прочность/плотность) и модуль упругости (упругость/плотность) высокопрочных волокон, особенно из углерода, выше, чем прочих аэрокосмических материалов, в том числе и металлов. Но композиционная структура АКМ вызывает значительную анизотропию их свойств. Необходимо учитывать то, что прочность и упругие свойства АКМ зависят от направления приложения силы. При действии силы по нормали к листу прочность АКМ самая низкая [1]. Это обстоятельство в значительной мере ограничивает применение такого материала при трехмерном нагружении.

На механические свойства АКМ оказывает влияние температура. Как правило, с увеличением температуры, снижаются механические свойства матрицы. Низкие температуры, хоть и в меньшей степени, также воздействуют на волокно и матрицу материала. Поглощенная влага приводит к разбуханию матрицы и снижает механические свойства матрицы. Это разбухание «запускает» процесс теплового деформирования при увеличении температуры. Возникающие в результате разбухания деформации, неизбежно влияющие на эксплуатационные характеристики узла, могут вызвать изгибы и кручения в конструкции, в которой применяется АКМ [8].

Существует возможность создавать материалы из разных типов волокон, с различными способами плетения и направлениями укладки (рис. 1). Это усложняет исследования резания композиционных материалов, поскольку их свойства определяются не только химическим составом и условиями производства волокон и матрицы, но и ориентацией волокон в слоях, схемой укладки слоев в конкретном листе слоистого АКМ [1].

Вместе с тем, технология производства деталей из КМ позволяет выполнять заготовку, максимально приближенную по форме и размерам к готовому изделию, что существенно уменьшает необходимый объем механической обработки деталей из КМ при их изготовлении, даже для очень пространственно сложных и крупногабаритных изделий. Наиболее распространенными операциями механической обработки композиционных материалов являются: контурное фрезерование, сверление и другие операции осевой обработки отверстий. Эти операции в большом количестве реализуются при сборке узлов и агрегатов летательных аппаратов. Например, в одном самолете может быть до нескольких миллионов отверстий [9].

В связи с этим в современных публикациях об обработке слоистых АКМ наибольшее внимание уделяется изучению процессов сверления. Особенности процесса сверления (наличие сердцевинки и перемычки у сверл, большая длина вспомога-

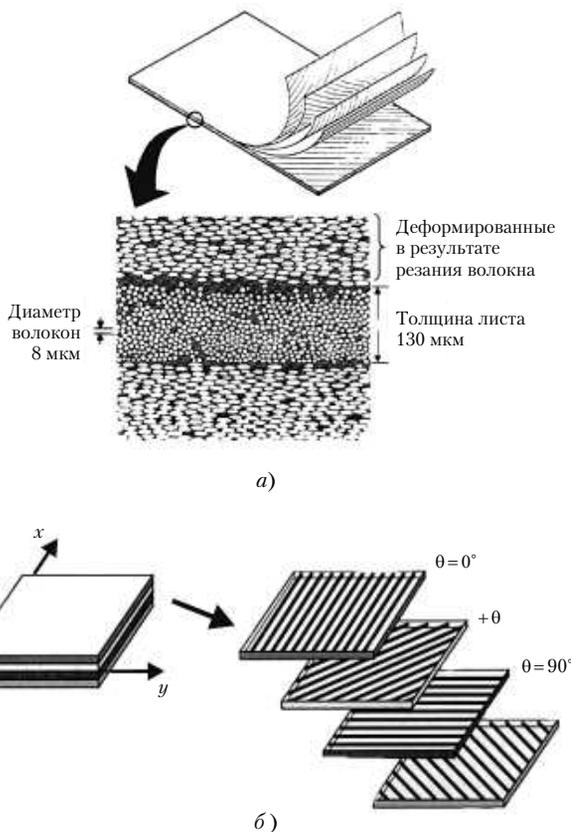


Рис. 1. Микроструктура слоистого АКМ (а) [8] и одна из возможных схем укладки волокон в слоях (б) [7]

сплава на УП позволяет снизить вес всей конструкции не менее, чем на 12 % [6].

Одним из существенных резервов повышения прочности АКМ является его создание в форме слоистых структур. Слоистые АКМ изготавливаются путем соединения двух или более листов АКМ в одно целое. В такой конструкции АКМ параллельные волокна в каждой из пластин «вплетены» в полимерную матрицу. На рис. 1, а изображен слоистый АКМ, состоящий, состоящий из нескольких листов полимерного материала. На рис. 1, б показан пакет, из четырех листов полимерного материала, уложенных так, чтобы направления волокон в каждом листе от-

ных режущих кромок из-за наличия ленточек, различная скорость резания вдоль главных режущих кромок и др.), как правило, сопровождаются большими осевыми силами и интенсифицируют специфические процессы повреждения КМ, например, расслоение, как ни в каких других процессах их механической обработки. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время преобладающее число исследований процессов сверления АКМ посвящено вопросам обеспечения качества обработанных поверхностей деталей из них, а вопросам работоспособности инструмента уделяется мало внимания.

Общая характеристика моделей

Созданию моделей и исследованию на их основе процессов резания АКМ посвящены работы многих исследователей. Усилия ученых разных школ можно условно разделить на ряд направлений, в частности: создание эмпирических моделей и моделей на основе искусственного интеллекта, аналитических и численных моделей.

Экспериментальным исследованиям процессов резания АКМ и построению эмпирических моделей этого процесса к настоящему времени посвящено большинство исследований. Значительный вклад в изучение физики процесса резания КМ внесли работы ученых научной школы М. Ф. Семко: Дрожжина В. И. [10], Верезуба Н. В. [11], Кравченко Л. С. [12]. В 70–80-е годы прошлого столетия работы выполнялись в механическом институте (г. Санкт-Петербург) под руководством Степанова А. А. [13], Омском политехническом институте под руководством Б. П. Штучного [14], в МВТУ им. Баумана (г. Москва) под руководством Подураева В. Н. [15], в институте сверхтвердых материалов НАН Украины (Сороченко В. Г. [16]), в УкрНИИАТе (Б. В. Лупкин [17]), научными школами проф. König W. [18], проф. Davim J. P. [5], проф. Ramulu M. [19], проф. Kim D. [20] и других. Для расчета силы резания при прямоугольном ортогональном точении, сверлении, фрезеровании довольно часто применяются эмпирические модели Tanguy J. C., Schlesinger C., A.S.M.E [21].

Широкое разнообразие структур АКМ делает привлекательным применение моделей на основе *искусственного интеллекта* для описания их поведения, выявление значимости факторов на показатели процесса прерывистого сверления [22], построение модели осевой силы при сверлении [23, 24], моделей свойств материалов [25] и др.

Аналитические модели используются в современных исследованиях резания АКМ как инструмент для прогнозирования сил резания. Эти модели описаны в работах [26–30]. Качество обработанной поверхности, критическая для расслоения осевая сила сверления, коэффициент расслоения рассматривались в ра-

ботах Tsao C. C. [31, 32], Hocheng H. [33], Lachaud F. [34], Jain S. [35] Sadat A. B. [36].

Изучение стружкообразования проводилось в основном на 2D моделях ортогонального резания Zhang L. и соавторов [37], Puw H. Y. и Hocheng H. [38]. Иногда применяется модель с условной плоскостью сдвига [39]. Механизм разрушения КМ включает четыре типа режима разрушения: разрушение волокон, выпучивание и перегиб волокон, трещинообразование в матрице при поперечном растяжении и сдвиге, дробление матрицы при поперечном сжатии и сдвиге [28]. Такое поведение КМ обуславливает значительные сложности построения аналитических моделей, приводящие к введению значительных допущений и упрощений, применения линейных теорий разрушения. Эмпирические модели и модели на основе искусственного интеллекта скрывают физические и механические аспекты происходящих явлений за общей формой уравнений регрессии или алгоритмов, реализующих нейронные сети. В этой связи лишь численные модели, несмотря на их сложность и ресурсоемкость, позволяют выявить особенности физики и механики процессов, происходящих при резании КМ. Поэтому рассмотрим достижения в создании этих моделей более подробно.

Исследований, использующих *численные методы* для моделирования обработки КМ, опубликовано весьма мало по сравнению с количеством таких исследований, выполненных для процессов обработки резанием металлов [40]. Исследователи используют преимущественно метод конечных элементов (МКЭ). Основные принципы построения конечно-элементных моделей процессов резания КМ такие же, как и при создании моделей резания металлических материалов [41]. Основные отличия заключаются в описании поведения обрабатываемого материала и выборе критериев разрушения. В этом направлении следует отметить работы Arola D. и Ramulu M. [42, 28], Mahdi M. I. и Zhang L. [27], Durao L. M. и соавторов [43,44], Budan D. A. и Vijayarangan S. [45], Zitoune R. и Collombet F. [46], Rahme P., Landon Y., Lachaud F., Piquet R. [47], Bhattacharya D. и Horrigan D. P. [48], Singh I. и соавтров [49, 50], Iliescu D. [21], Böhm A. [51], Larsi L. [39], Calzada K. A. [52], Venu Gopala Rao G. [53, 54], Ramesh M. V. и соавторов [55], Nayak D. и соавтров [56], Pramanik и соавт. [57], Dandekar C. и Shin Y. [58] и др. Анализ этих работ свидетельствует о том, что неоднородность состава и свойств АКМ требует применения специальных приемов для описания поведения АКМ при резании. В указанных работах исследователи применяли различные подходы к описанию поведения АКМ при резании. В зависимости от глубины детализации описания структуры АКМ могут быть выделены три уровня [39, 52]:

– *макромеханический*. На этом уровне реальный АКМ рассматривается как некий эквивалентный материал — однородный и анизотропный, — свойства



которого определяются так, чтобы при макромеханическом нагружении они соответствовали бы свойствам реального АКМ. Кроме того, на этом уровне для моделирования процесса стружкообразования, прогнозирования сил резания и возможных повреждений в обработанной поверхности применяют макромеханические критерии отказа. Макромеханическую детализацию свойств обрабатываемого материала использовали в своих работах Arola D. и Ramulu M. [42, 28], Mahdi M. I. и Zhang L. [27], Ramesh M. V. и соавторы [55], Larsi L. [39], Zitoune R. и Collombet F. [59].

— *мезомеханический*, который, как правило, применяется при построении моделей резания слоистых АКМ. На этом уровне каждый слой такого АКМ рассматривается как отдельная однородная анизотропная пластина, «приклеенная» к соседним слоям, например, с помощью контактных элементов. К этим отдельным слоям слоистого АКМ применяются критерии макромеханического разрушения. Существуют критерии разрушения, которые специально разработаны для элементарных однонаправленных слоев АКМ [60, 61]. Такой подход к детализации эффективно применили для моделирования расслоения при сверлении слоистых АКМ Dugao L. M. и соавторы [43, 44], Singh I. и соавторы [49, 50], Rahme P. и соавторы [47], Bhattacharya D. и соавторы [48], Budan D. A. и Vijayarangan S. [45] и др.

— *микромеханический*. На этом уровне компоненты КМ (волокно, матрица и граница «волокно — матрица») рассматриваются как отдельные, связанные между собой, однородные тела. Как показали решения, полученные для процессов прямоугольного резания исследованиями Nayak D. и соавторов [56], Venu Gopala Rao G. и соавт. [53, 54], Pramanik и соавт. [57], Larsi L. [39], Calzada K. A. [52], Dandekar C. и Shin Y. [58], этот подход позволяет достаточно точно прогнозировать силы резания с учетом разрушения АКМ на границе «волокно — матрица». Вместе с тем, он требует значительных вычислительных ресурсов.

Анализ литературных источников показал, что большинство разработанных моделей являются квазистатическими, которые позволяют прогнозировать место разрушения и формирование стружки только в первом волокне. Эти модели не могут применяться для моделирования собственно процессов разрушения и стружкообразования. Первой моделью, способной моделировать длительное образование стружки при прямоугольном резании, является модель Calzada K. [52]. Интересной также является модель прямоугольного резания Piescu D. [21], реализованная методом дискретных элементов.

Численные модели резания АКМ начали развиваться весьма недавно. Первые исследования, посвященные этому вопросу, опубликованы только в конце 90-х годов прошлого века. Поэтому даже для современных моделей резания АКМ свойственны значительные допущения, иногда не соответствующие фи-

зическим процессам и/или экспериментальным данным [39]. Например, Arola D. и Ramulu M. [42, 28] заранее вводили в свою модель плоскости разрушения не только на границе срезаемого слоя, но и в самой стружке. Модель Venu Gopala Rao G. [53, 54] рассматривает упругопластическое поведение материала матрицы, в то время, как известно, что при резании матрица проявляет себя хрупким материалом [62].

Известные численные модели и основные результаты

Модели, основанные на макромеханической детализации АКМ. Все модели этой группы посвящены прогнозированию силы в процессе прямоугольного резания, а также анализу напряженно-деформированного состояния в области режущей кромки.

В основу модели, полученной Arola D. и Ramulu M. [42, 28], положена гипотеза о двойном разрушении АКМ при внедрении режущего лезвия. В пределах углов ориентации $\theta = 15^\circ - 90^\circ$ первичное разрушение АКМ наступает в результате разрушения волокон, взаимодействующих с режущей кромкой. Оно наблюдается в плоскости резания перед режущей кромкой. Вторичное разрушение связано с разрушением матрицы и имеет место в главной секущей плоскости. Авторами экспериментально установлено, что длина зоны первичного разрушения уменьшается с увеличением угла ориентации, а длина зоны вторичного разрушения равна $a/\sin(\theta)$. При углах ориентации $\theta \rightarrow 0^\circ$ из-за изгиба волокон первичное разрушение происходит в матрице в результате отрыва волокна, в то время как вторичное — поперек волокна. Зоны разрушения предварительно задавались плоскостями (рис. 2), на которых узлы разделяются, если в двух соседних узлах удовлетворяется критерий разрушения

$$f = \sqrt{\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_f}\right)^2 + \left(\frac{\tau_1}{\tau_1}\right)^2 + \left(\frac{\tau_2}{\tau_2}\right)^2} \geq 1; \sigma_n = \max(0, \sigma_n).$$

В процессе двумерного моделирования перемещение инструмента продолжается до тех пор, пока не удовлетворяется критерий разрушения сегмента стружки на ее свободной поверхности.

Двумерная модель прямоугольного резания Arola D. и Ramulu M. разработана в ABAQUS для углов ориентации волокон от 0° до 90° . В этой модели свойства АКМ моделируются свойствами эквивалентного однородного ортотропного упругого материала. Модель хорошо прогнозирует главную проекцию силы резания. В тоже время спрогнозированная по этой модели радиальная проекция силы резания является весьма заниженной. Это связано с тем, что зона первичного разрушения предопределена заранее и модель не учитывает упругого восстановления обработанной поверхности и силового

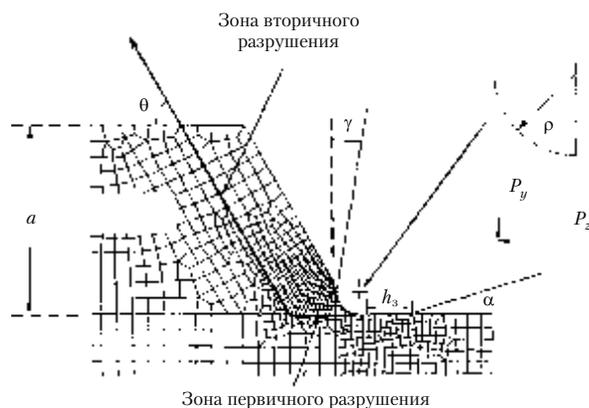


Рис. 2. Схематизация зоны стружкообразования в модели Arola D. и Ramulu M. [42, 28]

взаимодействия в зоне задней поверхности лезвия инструмента.

Mahdi M. I. и Zhang L. [27] в своей квазистатической модели отказались от задания границ разрушения и обеспечили проверку критерия разрушения Tsai-Hill в каждом конечном элементе. Они также описали АКМ моделью эквивалентного однородного анизотропного упругого материала. Несмотря на нулевое контактное трение на передней поверхности, принятый в модели более совершенный критерий разрушения позволил получить адекватный эксперименту прогноз главной проекции силы резания в диапазоне углов ориентации волокон от 0° до 150° .

Ramesh M. V. и соавторы [55] разработали модели прямоугольного резания для четырех композитных материалов (боропластик, два стеклопластика и углепластик). В этих моделях материал описывался законом анизотропной пластической деформации с линейным упрочнением и критерием разрушения, предложенным Vaziri R. [63]. Проверка результатов этого анализа была сделана путем сравнения с экспериментальными результатами, приведенными в [26]. Анализ напряженно-деформированного состояния вблизи режущей кромки для случая резания четырех типов материалов позволил установить: силы, необходимые для зарождения трещины минимальны для угла ориентации волокон 135° ; максимальные напряжения вблизи режущей кромки лезвия при ориентации волокон 0° наблюдаются перед режущей кромкой и перемещаются под нее при других углах ориентации волокон; до разрушения в КМ накапливается очень малая величина пластических деформаций. Результаты расчета главной проекции силы резания по рассмотренной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными [26]. Однако авторы не изучали режимы зарождения и развития трещин во время образования стружки, ограничившись лишь началом процесса взаимодействия лезвия с заготовкой.

Трехмерная квазистатическая модель прямоугольного резания Zitoune R. и Collombet F. [59] основана на механике разрушения и модели трещинообразо-

вания, реализованной методом виртуального распространения трещины (Virtual Crack Extension) с учетом скорости высвобождения энергии. Такой подход дал авторам возможность оценить степень влияния на силу резания геометрии инструмента и глубины резания. Однако силы резания оказались весьма зависимыми от длины начальной трещины, которую приходилось авторам определять экспериментально методом мгновенной остановки процесса резания. Таким образом, при использовании этой модели требуются дополнительные экспериментальные исследования непосредственно по резанию.

Модели, основанные на мезомеханической деградации АКМ. Budan D. A. и Vijayarangan S. [45] применили МКЭ в программном продукте ANSYS 5.4 при исследовании процесса сверления, используя элементарную теорию изгиба пластин и линейную теорию разрушения в квазистатической осесимметричной постановке. С помощью своей модели они показали, что с увеличением объемной доли волокон в КМ величина критической осевой силы, вызывающей расслоение, уменьшается.

Durao L. M. и соавторы [43, 44] разработали квазистатическую трехмерную КЭ модель сверления пластин из АКМ с целью изучения процесса расслоения. Эта модель предполагает использование специальных контактных элементов между слоями в АКМ, реализующих возможность смешенного режима разрушения, что позволило моделировать начало расслоения и распространения трещин между слоями. Каждый слой описывался моделью однородного абсолютно упругого анизотропного тела. Модель разработана с помощью программного продукта ABAQUS путем перемещения абсолютно жесткого идеализированного сверла в слоистом АКМ, реализованном как совокупность склеенных слоев с анизотропными свойствами (рис. 3). Моделирование резания выполнялось путем периодического удаления элементов заготовки. Такой подход позволил оценить влияние геометрических параметров двух различных сверл (спирального сверла с нормальной заточкой и спирального сверла с острием) на зарождение расслоения и его развитие. Рассчитанная с помощью этой модели осевая сила хорошо совпадает с экспериментальными данным как по величине, так и по характеру ее изменения. Спрогнозированное направление начала расслоения составило $22,5^\circ$. Оно соответствует направлению, не совпадающему с укладкой волокон в квазизотропной пластине и близко к тому, которое было измерено на пластинах методом радиографии.

Более того описанная конечно-элементная модель, в отличие от аналитических моделей, позволила спрогнозировать не только критическую силу начала расслоения и осевую силу, но и остаточную толщину пластины a в момент начала расслоения (рис. 4). Применение критерия смешанного режима разрушения позволило получить более точную величину крити-

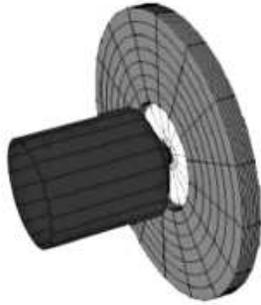


Рис. 3. КЭ сетка модели сверления Dugao L. M. [43]

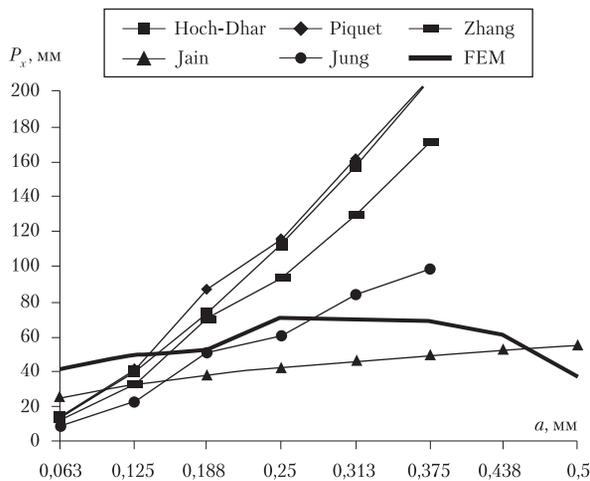


Рис. 4. Сравнение величины критической силы резания, рассчитанной по аналитическим моделям и КЭ модели различными исследователями [44]

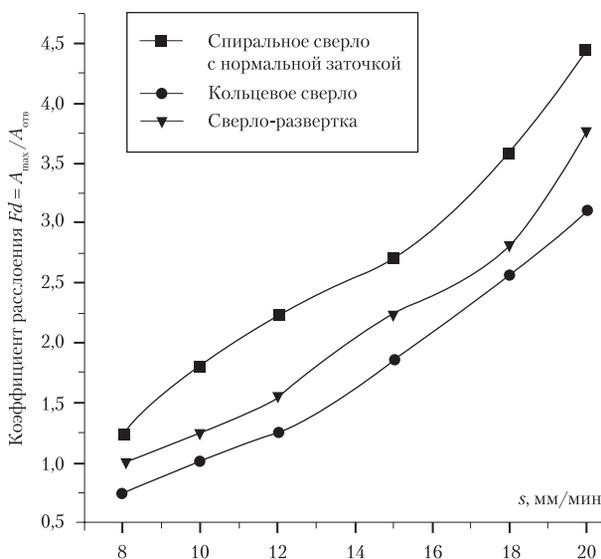


Рис. 5. Коэффициент расслоения при сверлении различными сверлами [50]

ческой осевой силы, особенно при больших толщинах пластины, по сравнению с аналитическими решениями, в которых учтено лишь формирование трещины нормального отрыва (I мода деформации).

Несмотря на все преимущества данной модели, с ее помощью невозможно исследовать влияние режима резания (подачи и скорости резания) на показатели процесса сверления, поскольку она не реализует процесса стружкообразования.

Singh I. и соавторы [49, 50] развили предыдущую модель. Сначала авторы использовали коммерческое программное обеспечение NISA, а в дальнейшем ABAQUS. Используя критерий зарождения трещины Hashin Z. J. [60] и управляя жесткостью разрушающихся слоев через величину накопленных повреждений, пропорциональных высвобождающейся энергии, им удалось спрогнозировать влияние подачи на коэффициент расслоения для трех конструкций сверл (рис. 5) с весьма малым отклонением от экспериментальных данных. Они установили, что осевая сила зависит от геометрии вершины сверла и подачи, возрастающей с увеличением угла при вершине и подачи.

Rahme P. и соавторы [47] разработали подобную модель и показали влияние перемычки сверла на расслаивание во время сверления слоистых АКМ. Böhm A. [51] реализовал подобную модель в программном продукте LS-DYNA и исследовал влияние геометрии вершины сверла на расслоение на выходе при сверлении слоистых АКМ. В результате исследований было показано явное преимущество сверла с углом при вершине 192° . Уменьшение угла при вершине от 155° до 118° увеличивает осевую силу и вероятность расслоения. Bhattacharya D. и соавторы [48], разработав аналогичную модель сверления в программном продукте LUSAS и учтя сопротивление межслоевому сдвигу, исследовали влияние опорной пластины на величину критической осевой силы, вызывающей расслоение.

Модели, основанные на микромеханической детализации АКМ. Nayak D. и соавторы [56] разработали в ABAQUS двумерную квазистатическую конечно-элементную модель процесса прямоугольного резания стеклопластика, которая рассматривает волокно и матрицу АКМ в виде отдельных изотропных абсолютно упругих тел (рис. 6). В модели учитывается прочность волокна и матрицы, а также прочность связи на границе «волокно — матрица». Трение между инструментом и АКМ не учитывалось.

Сравнивая рассчитанные с помощью этой модели силы резания с силами, рассчитанными по модели, основанной на макромеханической детализации АКМ, авторы показали, что моделирование АКМ как двухфазного материала позволяет получить значительно более точный прогноз радиальной проекции силы резания. Направление максимального главного напряжения всегда совпадает с ориентацией волокна и приводит к разрушению волокна всегда в поперечной



Рис. 6. Схематизация АКМ по Nayak D. и соавторов [64]

плоскости. Длина разрушенной части волокна увеличивается с возрастанием переднего угла лезвия.

Для всех углов ориентации волокна разрушение в обработанной поверхности возникает в результате отслоения волокна от матрицы. Разработанная модель хорошо прогнозирует разрушение в обработанной поверхности для случаев ориентации волокна до 60° и лишь качественно — при больших углах (рис. 7). Авторами было показано, что передний угол лезвия со значениями до 45° мало влияет на поверхностные повреждения. Минимальные повреждения, соответствующие минимуму силы резания, наблюдались при переднем угле 30° .

Venu Gopala Rao G. и соавторы [53, 54] усовершенствовали двумерную квазистатическую конечно-элементную модель процесса прямоугольного резания Nayak D., включив в нее не одно, а несколько волокон, как отдельные тела, когезионно связанные с матрицей. Они разработали модель в ABAQUS для однонаправленных углепластиков и стеклопластиков. Авторы приняли волокна абсолютно упругими телами, разрушающимися при достижении максимальными главными напряжениями предела прочности, а матрицу — упругопластическим телом, теряющим упругие свойства при накоплении повреждений (рис. 8). С целью обеспечения возможности учета эффекта связи волокна с матрицей авторы разработали модель когезионного разрушения, допускающую нормальное и касательное разрушение, реализовав ее в конечных элементах нулевой толщины на границах волокон. Свойства когезионных связей авторы характеризовали двумя потенциальными функциями: $\phi(\Delta)$ и пределами прочности связи на отрыв σ_{max} и сдвиг τ_{max} (рис. 8).

Авторы показали, что образование стружки происходит в условиях доминирования механизмов дробления и растяжения волокон. Матрица деформируется под воздействием сил со стороны когезионных связей на границе волокна и разрушатся до разрушения волокна. Контактное давление изменяется с изменением ориентации волокон и менее чувствительно к толщине среза и переднему углу для обоих

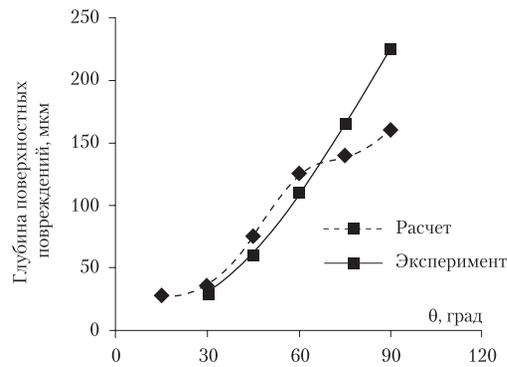


Рис. 7. Сравнение глубины поверхностных повреждений, предсказанных моделью Nayak D. с экспериментальными данными [65]

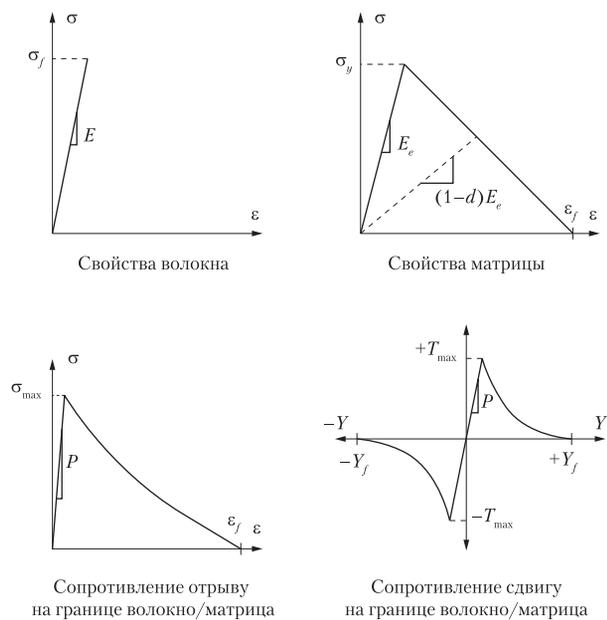


Рис. 8. Механические свойства компонентов однонаправленного КМ в модели Venu Gopala Rao G. и соавторы [53, 54]

исследованных материалов. При $\theta \rightarrow 90^\circ$ разрушение углепластиков происходит в результате изгиба волокон и матрицы и дробления волокон в месте контакта с режущей кромкой. В то же время разрушение стеклопластиков происходит в результате изгиба волокон. При меньших углах θ изгиб становится преобладающей причиной разрушения обоих материалов.

На характер разрушения обработанной поверхности в обоих материалах угол ориентации волокон также оказывает наибольшее влияние. Максимальные разрушения выявлены при $\theta = 90^\circ$. Разрушения в стеклопластике больше, чем в углепластике.

Подобные исследования выполнил Larsi L. [39], учтя в модели округление режущей кромки ρ . Он показал, что влияние ρ на силу резания настолько же сильное, как и ориентация волокна θ .

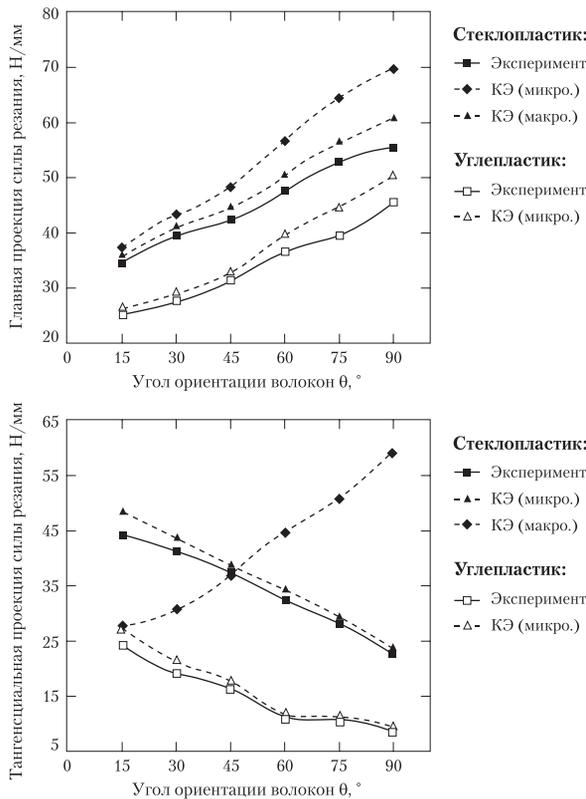


Рис. 9. Сравнение прогноза проекций силы резания АКМ микромеханической моделью Venu Gopala Rao G. [53, 54] с экспериментальными данными и прогнозом с помощью макромеханической модели [56]

В результате таких совершенствований своих моделей Venu Gopala Rao G. [53, 54] и Larsi L. [39] удалось достигнуть хорошей сходимости результатов прогнозирования как главной, так и радиальной проекций силы резания с экспериментальными данными в широком диапазоне углов ориентации волокон θ (рис. 9). Они показали, что главную проекцию силы резания хорошо предсказывают все макромеханические модели при любой ориентации волокна. Вместе с тем, радиальную проекцию силы резания относительно хорошо можно спрогнозировать только с помощью модели, способной корректно моделировать образование стружки.

В работе [21] разработана модель процесса ортогонального резания однонаправленных КМ с использованием метода дискретных элементов. Доказана возможность применения такого подхода для прогнозирования проекций силы резания в широком диапазоне углов ориентации волокон. Однако для выполнения расчетов в этом случае требуется значительное машинное время.

Наиболее совершенной моделью процесса прямоугольного резания однонаправленных КМ является модель Calzada K. [52]. За счет применения явного метода интегрирования уравнений движения и включения в модель разрушения нескольких волокон она способна моделировать длительный процесс

стружкообразования в течение срезания нескольких волокон, а также оценить режим разрушения волокон, характерную длину волокна в стружке и силу резания для ориентаций волокна 0, 45, 90, и 135°.

Для моделирования границы волокно/матрица использовались непрерывные элементы (continuum elements), которые были связаны с двумя независимыми моделями разрушения, что обеспечивало разрушения как при сжатии, так и при растяжении. Связь волокно/матрица играет решающее влияние на процесс стружкообразования. В этой работе структура углепластика характеризовалась тремя параметрами: углом волокон, числом группирования волокон и толщиной матрицы между волокнами. Для каждого параметра определялось статистическое распределение параметров, которое и использовалось для описания поведения материала.

В результате моделирования было установлено, что волокна разрушаются в результате изгиба в направлении плоскости резания при угле ориентации волокон 0°. При угле ориентации 135° волокна разрушаются в результате перемещения (изгиба) под поверхность резания. При углах ориентации 45° и 90° разрушение в месте контакта волокна с инструментом является доминантным. Для углов ориентации 0° и 135°, когда разрушение происходит в результате изгиба, характеристическая длина волокон в стружке значительно больше, чем толщина среза, поскольку разрушение происходит вдали от режущей кромки. При углах ориентации 45° и 90° разрушение волокон в месте контакта со стружкой приводит к тому, что длина волокна в стружке меньше, чем толщина среза.

Хорошо совпадает с экспериментом прогноз главной силы резания при различных углах ориентации волокон с помощью модели Calzada K. Тенденция в изменении радиальной проекции силы резания с изменением угла ориентации волокон также совпадают, однако ее спрогнозированная величина существенно отличается от экспериментальной. В работе [52] продемонстрирована возможность применения модели, разработанной Calzada K. для моделирования резания с большими передними углами лезвия (до 50°) и малыми радиусами округления режущей кромки ρ (до 1 мкм). Показано, что инструмент с большими передними углами способствует при больших углах ориентации (135°) разрушению волокна в зоне его контакта с режущей кромкой вместо изгиба, что способствует уменьшению повреждения обработанной поверхности.

Выводы

Несмотря на то, что аналитические и эмпирические модели способны прогнозировать проекции силы резания с достаточно высокой точностью в широком диапазоне углов ориентации волокон, они все еще слабо объясняют механизм разрушения компо-

зиционного материала. Численные модели позволяют получить более детальную информацию.

Среди численных моделей в наибольшей степени разработаны модели на основе метода конечных элементов. Основные принципы их построения применительно к резанию КМ такие же, как и для процессов резания металлических материалов. Основные отличия заключаются в описании поведения обрабатываемого материала и выборе критериев разрушения. При решении механических задач этим методом температурные эффекты не учитываются. В зависимости от глубины детализации описания структуры АКМ могут быть выделены три уровня детализации: макромеханический, мезомеханический и микромеханический.

Модели, основанные на *макромеханической* детализации АКМ, рассматривают АКМ как однородное анизотропное тело и поэтому они не способны учитывать взаимодействие волокна с матрицей, что приводит к относительно большой ошибке в прогнозах при углах ориентации волокон более 90° . В моделях, основанных на *микромеханической* детализации АКМ, компоненты КМ (волокно, матрица и граница волокно/матрица) рассматриваются как отдельные, связанные между собой, однородные тела. Последние решения Calzada K. позволили: смоделировать непрерывный процесс стружкообразования; объяснить механизмы разрушения волокна и матрицы в диапазоне углов ориентации волокон от 0 до 135° ; достоверно спрогнозировать как главную, так и радиальную проекции силы резания. Модели, основанные на *мезомеханической* детализации АКМ, применяются для моделирования сверления слоистых АКМ, когда необходимо исследовать расслоение между слоями.

Большинство существующих моделей процессов резания АКМ разработаны в *квазистатической* постановке и, поэтому, способны прогнозировать место разрушения только в первом волокне. Это накладывает значительные ограничения на прогнозирование разрушения волокон в процессе образования стружки. Более того, зона когезии, используемая в *микромеханических* моделях не достаточно корректна, поскольку элементы в этой зоне могут разрушаться только в результате растяжения, что корректно только под поверхностью резания. Все исследования резания АКМ используют макромеханику разрушения волокон и макромеханику резания. Однако следует учитывать, что механизм разрушения волокна на микроуровне существенно отличается от механизма его разрушения на макроуровне, что может вносить существенную погрешность в прогноз силы резания в том случае, когда радиус округления режущей кромки становится соизмерим с критическим диаметром волокна.

На практике используются не только углепластики и стеклопластики, но и АКМ с другими во-

локнами и различными способами укладки этих волокон. Существует необходимость создания и экспериментальной проверки моделей материалов и процессов резания этих материалов с использованием разработанного механизма разрушения, учитывающего ориентацию волокон. На практике все чаще вместо однонаправленных АКМ используются разнонаправленные, причем часто со случайной ориентацией армирующих волокон. Для моделирования резания этих материалов должны быть разработаны новые схемы описания их структуры на основе статистических методов. К настоящему времени имеют место только отдельных попытки решения указанной проблемы, чего явно не достаточно.

Главной проблемой *микромеханического* подхода является определение индивидуальных механических свойств волокна, матрицы и когезионных связей между ними. Механические свойства волокон и матрицы экспериментально определить очень трудно. Более того, механические свойства матрицы непосредственно в КМ отличаются от свойств матрицы вне его. Также очень трудно предсказать «провал» волокна в матрицу, исходя только из ее свойств. Именно поэтому существующие модели на микромеханическом уровне детализации в настоящее время менее актуальны, чем модели на макромеханическом и мезомеханическом уровнях, для которых механические свойства эквивалентного материала определяются достаточно просто.

В опубликованных работах практически не уделяется внимания исследованию моделей на чувствительность к скорости резания и подаче, толщине среза, отрицательным передним углам и радиусам округления режущей кромки.

Для внедрения полученных в работе знаний о механизме разрушения волокон углепластиков при резании должны быть разработаны новые модели реальных процессов, в том числе и 3D, учитывающие сложную геометрию и кинематику реальных процессов.

Литература

1. Baker A. A. Composite Materials for Aircraft Structures. — Eurospan, 2004. — 400 с.
2. Younossi O., Kennedy M., Graser J. C. Military airframe costs: the effects of advanced materials and manufacturing processes. — Santa Monica: RAND, 2001. — 160 с.
3. Resetar S. A., Rogers J. C., Hess R. W. Advanced Airframe Structural Materials: A Primer and Cost Estimating Methodology. — Santa Monica: RAND, 1991. — 128 с.
4. Boeing Company и др. About the 787 Family: Boeing 787 Product Information // [Http://www.boeing.com/commercial/787family/background.html](http://www.boeing.com/commercial/787family/background.html). — 2010.



5. *Davim J. P.* Machining of composite materials. — London: Wiley, 2010. — 262 с.
6. *Teti R.* Machining of Composite Materials // CIRP Annals — Manufacturing Technology. — 2002. — Вып. 2. — Т. 51. — С. 611–634.
7. *Vijayaraghavan A.* Drilling of Fiber — Reinforced Plastics — Tool Modeling and Defect Prediction. — 2006. — 46 с.
8. *Campbell F. C.* Manufacturing Processes for Advanced Composites. — 1 изд. — Elsevier Science, 2004. — 532 с.
9. *Russel J. D.* Composites Affordability Initiative: Transitioning Advanced Aerospace Technologies through Cost and Risk Reduction // The AMMTIAC Quarterly. — 2007. — Т. 1, № 3. — С. 3–6.
10. *Дрожжин В. И.* Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / ХПИ. — Харків, 1982. — 32 с.
11. *Верезуб Н. В.* Научные основы высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композитов: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / ХНИИТМ. — Х., 1995. — 43 с.
12. *Кравченко Л. С.* Исследование процесса сверления слоистых пластмасс: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / ХПИ. — Харків, 1973. — 19 с.
13. *Степанов А. А.* Обработка резанием высокопрочных композиционных материалов. — Л.: Машиностроение, 1987. — 176 с.
14. *Штучный Б. П.* Обработка резанием пластмасс. — М.: Машиностроение, 1974. — 144 с.
15. *Подураев В. Н.* Резание труднообрабатываемых материалов. — М.: Высшая школа, 1974. — 587 с.
16. *Сороченко В. Г.* Теплообразование и температура резания при алмазно-абразивном шлифовании полимерных композиционных материалов // Прогресивні технології і системи машинобудування. — 2009. — Т. 38. — С. 214–224.
17. *Луткин Б. В., Мамлюк О. В.* Механическая обработка композиционных материалов // Труды Международной ежегодной научно-практической конференции «Композиционные материалы в промышленности» (Славполикком). — Ялта, 2001. — С. 70–79.
18. *Konig W., Wulf C., Graß P., Willercheid H.* Machining of fibre reinforced plastics // Annals of CIRP. — 1985. — Т. 34. — С. 537–548.
19. *Ramulu M., Branson T., Kim D.* A study on the drilling of composite and titanium stacks // Composite Structures. — Washington, 2001. — № 54. — С. 67–77.
20. *Kim D., Ramulu M.* Study on the Drilling of Titanium/Graphite Hybrid Composites // Transactions of the ASME. — ASME, 2007. — № 129. — С. 390–396.
21. *Iliescu D.* Approches experimentale et numerique de l'usinage a sec des composites carbone / époxy: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.01. — Paris, 2008. — 219 с.
22. *Kentli A.* Experimental study on peck drilling of GFRP and prediction of drilling-induced damage using ANN // Scientific Research and Essays. — 2011. — Т. 6. — С. 1546–1554.
23. *Mishra R., Malik J., Singh I.* Prediction of drilling-induced damage in unidirectional glass-fibre-reinforced plastic laminates using an artificial neural network. // Proceedings of the Institut. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Man. — 2010. — Т. 224. — С. 733–738.
24. *Tsao C. C.* Prediction of thrust force of step drill in drilling composite material by Taguchi method and radial basis function network // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2008. — Т. 36. — С. 11–18.
25. *Kadi H.* Modeling the mechanical behavior of fiber reinforced polymeric composite materials using artificial neural networks — a review. // Composite Structures. — 2006. — Т. 73. — С. 1–23.
26. *Bhatnagar N., Ramakrishnan N., Naik N. K., Komanduri R.* On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates // Int. J. of Machine tools & Manufacture. — 1995. — Т. 35. — С. 701–716.
27. *Mahdi M. I., Zhang L.* A finite element model for the orthogonal cutting of fiber — reinforced composite materials // Journal of Materials Processing Technology. — 2001. Т. 113. — С. 373–377.
28. *Arola D., Ramulu M.* Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis // Int. J. of Mechanical Science. — 1997. — Т. 39. — С. 597–613.
29. *Piquet R.* Contribution à l'étude des réparations provisoires structurales aéronautiques. Étude du perçage de plaques minces en carbone/époxy: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.01. — Toulouse, 1999. — 179 с.
30. *Davim J. P.* Drilling of composite materials. — New York: Nova Science Publishers, 2009. — 179 с.
31. *Tsao C. C., Hocheng H.* Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network // Journal of Materials Processing Technology. — 2008. — № 203. — С. 342–348.
32. *Tsao C. C., Hocheng H.* Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material // Int. J. of Machine tools & Manufacture. — 2004. — Т. 44. — С. 1085–1090.
33. *Hocheng H., Tsao C. C.* Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits // Journal of Materials Processing Technology. — 2003. — № 140. — С. 335–339.
34. *Lachaud F., Piquet R., Collombet F., Surcin L.* Drilling of composite structures // Composite Structures. — 2001. — Т. 52. — С. 511–516.
35. *Jain S., Yang D. C.* Effects of feedrate and chisel edge on delamination in composites drilling // Trans. ASME. — 1993. — Т. 115. — С. 398–405.
36. *Sadat A. B.* Prediction of delamination load in drilling of graphite / epoxy composites // Engineering Systems Design and Analysis. — 1996. — Т. 3. — С. 21–26.
37. *Zhang H., Chen W., Chen D., Zhang L.* Assessment of the exit defects in carbon fiber-reinforced plastic

plates caused by drilling // Key Engineering Materials. — 2001. — Т. 196. — С. 43–52.

38. *Paw H. Y., Hocheng H.* Anisotropic chip formation models of cutting of FRP // Proceedings of ASME Symposium on Material Removal and Surface Modification Issues in Machining Processes. — New York, 1995.

39. *Larsi L.* Macromechanical and micromechanical modelling of machining long fiber reinforced polymer composites: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.01. — Paris, 2009. — 150 с.

40. *Mackerle J.* Finite element analysis and simulation of machining: an addendum. A bibliography 1996–2002 // Int. J. of Machine tools & Manufacture. — 2003. — Т. 43. — С. 103–114.

41. *Криворучко Д. В.* Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / СумГУ. — Харьков, 2010. — 40 с.

42. *Arola D., Ramulu M., Wang D. H.* Chip formation in orthogonal trimming of graphite / epoxy composite // Composites. — 1996. — Т. 27. — С. 121–133.

43. *Durão L. M., De Moura M. F., Marques A. T.* Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates // Composites. — 2006. — № 37. — С. 1325–1333.

44. *Durão L. M., De Moura M. F., Marques A. T.* Numerical prediction of delamination onset in carbon / epoxy composites drilling // Engineering Fracture Mechanics. — 2008. — Т. 75. — С. 2767–2778.

45. *Budan D. A., Vijayarangan S.* Quality Assessment and Delamination Force Evaluation in Drilling of Glass Fiber Reinforced Plastic Laminates — A Finite Element Analysis and Linear Elastic Fracture Mechanics Approach // Journal of Engineering Manufacture. — 2002. — Т. 216. — С. 173–182.

46. *Zitoun R., Collombet F.* Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long fibre composite structures // Composites. — 2007. — Т. 38. — С. 858–866.

47. *Rahmé P., Landon Y., Lachaud F., Piquet R.* Analytical models of composite material drilling // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2011. — Т. 52, № 5. — С. 609–617.

48. *Bhattacharya D., Horrigan D. P.* A Study of Hole Drilling in Kevlar Composites // Composites Science and Technology. — 1998. — Т. 58, № 2. — С. 267–283.

49. *Singh I., Bhatnagar N., Viswanath P.* Drilling of Uni-Directional Glass Fiber Reinforced Plastics: Experimental and Finite Element Study // Materials & Design. — 2008. — Т. 29, № 2. — С. 546–553.

50. *Rakesh P. K., Sharma V., Singh I., Kumar D.* Delamination in Fiber Reinforced Plastics: A Finite Element Approach // Engineering. — 2011. — № 3. — С. 549–554.

51. *Böhm A.* FEM-Simulation der Bearbeitung von Faserverbundwerkstoffen mit Hilfe von LS-Dyna. — Stuttgart: University of Stuttgart, 2010. — 123 с.

52. *Calzada K.* Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber-reinforced composites: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.01. — Urbana, 2010. — 129 с.

53. *Rao G. V., Mahajan P., Bhatnagar N.* Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites — Cutting force analysis // Composites Science and Technology. — 2007. — Т. 67, № 3. — С. 579–593.

54. *Rao G. V., Mahajan P., Bhatnagar N.* Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism // Composites Science and Technology. — 2007. — Т. 67, № 11. — С. 2271–2281.

55. *Ramesh M. V., Seetharamu K. N., Ganesan N., Sivakumar M. S.* Analysis of Machining of FRPs Using FEM // Int. J. of Machine tools & Manufacture. — 1998. — Т. 38. — С. 1531–1549.

56. *Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P.* Machining studies of UD-FRP composites. Part 2: Finite element analysis // Machining Science and Technology. — 2005. — Т. 9. — С. 503–528.

57. *Pramanik A., Zhang L. C., Arsecularatne J. A.* An FEM investigation into the behavior of metal matrix composites: Tool-particle interaction during orthogonal cutting // Int. J. of Machine tools & Manufacture. — 2007. — Т. 47. — С. 1497–1506.

58. *Dandekar C., Shin Y. C.* Multiphase Finite Element Modeling of Machining Unidirectional Composites: Prediction of Fiber Debonding and Damage // Machining Science and Technology. — 2008. — Вып. 5. — Т. 130. — С. 51–63.

59. *Zitoun R., Collombet F., Lachaud F.* и др. Experimental calculation of the cutting conditions representative of the long fiber composite drilling phase // Composites Science and Technology. — 2005. — Т. 65. — С. 455–466.

60. *Hashin Z. J.* Failure criteria for unidirectional fibre composites // Journal of Applied Mechanics: Trans. ASME. — 1980. — Т. 47. — С. 329–334.

61. *Puck A., Schumann H.* Failure Analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models // Composites Science and Technology. — 1998. — Т. 58. — С. 1045–1067.

62. *Koplev A., Lystrup A., Vrom T.* The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP // Composites. — 1983. — Т. 4. — С. 371–376.

63. *Vaziri M., Olson M. D., Anderson D. L.* Plasticity-based constitutive model for fibre-reinforced composite laminates // Journal of Composite Materials. — 1991. — Т. 25. — С. 512–535.

64. *Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P.* Machining studies of uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composites part 1: Effect of geometrical and process parameters // Machining Science and Technology. — 2005. — Т. 9. — С. 481–501.

65. *Inoue H., Yuge T.* Study on the Surface Finish after Cutting Glass Fiber— Reinforced Plastics // Advances in Fiber Composite Materials. — 1994. — С. 261–274.