

Численные методы моделирования Numerical simulation methods

Научная статья

УДК 621.91.01

DOI: 10.14529/engin240206

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОМ РЕЗАНИИ ВОЛОКОННО-АРМИРОВАННОЙ КОМПОЗИТНОЙ ЗАГОТОВКИ ОБЪЕМНОГО ПЛЕТЕНИЯ. ЧАСТЬ 1: ОБЗОР И МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ

И.А. Щуров¹, shchurovia@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4254-6354>

Е.И. Щурова¹, shchurovaei@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1709-1861>

Г.В. Вольф¹, wgv333@list.ru

А.В. Морозов², ntk_2005@rambler.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

Аннотация. Для получения точных деталей из волоконно-армированных композитных материалов (ВКМ) объемного плетения ортогональной структуры все чаще применяется лезвийная обработка. Недостатком этого процесса обработки является появление на обработанной поверхности повышенной ворсистости, отрывов волокон от матрицы, отслаиваний и сколов. Для минимизации этого недостатка одним из решений является применение рациональных параметров инструментов и рационального движения лезвия инструмента по отношению к осям волокон. Данное движение может быть выявлено на основе численного компьютерного микромоделирования процесса стружкообразования. Однако для такого моделирования необходимо иметь как геометрическую модель самого композита, так и модели материалов, из которых он составлен, включая модель граничного слоя между волокнами и матрицей. Наиболее перспективным видом микромоделирования резания представляется моделирование на основе метода гидродинамики сглаженных частиц – Smooth Particle Hydrodynamics (SPH). Пока не удалось обнаружить в опубликованной литературе SPH-микромодели композитов объемного плетения с граничными слоями. Не удалось найти и модели материалов для граничных слоев матрица – волокно. С целью решения задачи рационального резания лезвийными инструментами заготовок из ВКМ выполнен анализ опубликованных моделей материалов и параметров таких моделей для последующего их использования в SPH-моделировании процесса резания. Анализ позволил выбрать требуемые модели материалов и их параметры для материалов волокон и матрицы применительно к металлическому композиту. На основе анализа полученных по таким моделям графиков были выбраны параметры для модели граничного слоя волокно – матрица. В основе данного выбора лежит гипотеза, что такой граничный слой должен быть описан той же моделью, что будет применяться для самой матрицы, но с параметрами, определяющими меньшие напряжения разрушения. Полученные решения планируется применить для моделирования лезвийного резания заготовки из ВКМ объемного плетения во второй части статьи.

Ключевые слова: волоконно-армированный композит, обработка резанием, стружкообразование, численное моделирование, метод гидродинамики сглаженных частиц, модель материала Джонсона–Кука, модель материала граничного слоя волокно-матрица

Для цитирования: Численное моделирование стружкообразования при лезвийном резании волоконно-армированной композитной заготовки объемного плетения. Часть 1: Обзор и модели материалов / И.А. Щуров, Е.И. Щурова, Г.В. Вольф, А.В. Морозов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2024. Т. 24, № 2. С. 72–88. DOI: 10.14529/engin240206

NUMERICAL SIMULATION OF CHIP FORMATION DURING EDGE CUTTING MACHINING OF 3D ORTHOGONAL WOVEN FIBER-REINFORCED COMPOSITE WORKPIECE.

PART 1: A REVIEW AND MODELS OF MATERIALS

I.A. Shchurov¹, shchurovia@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4254-6354>

E.I. Shchurova¹, shchurovaei@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1709-1861>

G.V. Volf¹, wgv333@list.ru

A.V. Morozov², ntk_2005@rambler.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russia

Abstract. Edge cutting machining is more commonly used to produce precise parts made of fiber-reinforced composite (FRC) with three-dimensional woven orthogonal structure. The disadvantage of this machining method is increased hairiness of the machined surface, fiber-matrix debonding, peeling and chipping. One possible solution to minimize this disadvantage is to use rational tool parameters and rational tool wedge motion in relation to the axes of the fibers. Such motion can be identified using numerical computer micro modeling of the chip formation process. The difficulty of such modeling is the need to have available both a geometric model of the composite itself and models of composite components, including a model of matrix-fiber boundary layer. Modeling based on the method of smoothed particle hydrodynamics - Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) is the most promising type of machining process micro modeling. Currently, no publications, which present SPH micro models of three-dimensional woven composites with the description of matrix-fiber boundary layers, have been found. It was also not possible to find specific models for the matrix-fiber boundary layers. In order to solve the problem of rational machining of FRC workpieces using edge cutting tools, an analysis of published material models and parameters of such models was carried out. These models should be subsequently used for SPH modeling of the machining process. The analysis made it possible to select the required material models and their parameters for fiber and matrix materials of a metal composite. The analysis of the graphical relationships obtained from the publications, made it possible to select the parameters for the fiber-matrix boundary layer model. This selection is based on the hypothesis that the boundary layer should be described by the same model, that is used for the matrix itself, but with parameters that determine lower failure stresses. The obtained solutions are planned to be used to simulate machining process of a workpiece made of three-dimensional woven FRC in the second part of the presented research.

Keywords: fiber reinforced composite, machining, chip formation, numerical simulation, smooth particle hydrodynamics, Johnson–Cook material model, fiber-matrix boundary layer model

For citation: Shchurov I.A., Shchurova E.I., Volf G.V., Morozov A.V. Numerical simulation of chip formation during edge cutting machining of 3D orthogonal woven fiber-reinforced composite workpiece. Part 1: A review and models of materials. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2024;24(2):72–88. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin240206

Введение

Композитные материалы все чаще применяются в производстве различных изделий. Несмотря на повсеместное использование технологий получения деталей с одновременным получением самого композита, высокая точность их размеров и формы поверхностей, как и в случае с металлами, достигается лишь путем лезвийной и абразивной обработки. Фасонные поверхности деталей, как правило, получают лезвийной обработкой, например, фрезерованием на станках с ЧПУ. Гетерогенная структура волоконно-армированных композитных материалов (ВКМ) в случае их лезвийной обработки обуславливает множество проблем, связанных с обеспечением требуемого высокого качества обработанных поверхностей, включая проблемы с повышенной ворсистостью, отрывом волокон от матрицы и различного рода отслаиваниями и сколами. В связи с этим в последние десятилетия проводится множество исследований, направленных на улучшение условий стружкообразования при лезвийном резании заготовок из композитов. В этих исследованиях оп-

ределяются благоприятные условия обработки, при этом фрезерование фасонных поверхностей, например, концевыми фрезами обуславливает множество вариантов положения инструментов относительно заготовки и вариантов врезания, что требует дополнительного изучения этого вопроса и выявления рациональных решений. Одним из наиболее экономичных способов получения таких решений является компьютерное моделирование. В настоящее время широкое распространение получило численное компьютерное моделирование, в частности такие бессеточные методы расчета, как Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) и Smoothed Particle Galerkin (SPG) методы. Данные методы расчета процесса стружкообразования при резании включают в себя модели материалов, которые представляют собой взаимосвязь между деформацией исследуемого образца и возникающими в нем напряжениями. Поскольку процесс резания – это процесс высокоскоростной деформации с разрушением, обусловленный влиянием изменения свойств материала от скорости этой деформации и температуры, то часто в качестве требуемой модели материала применяются модели, учитывающие эти обстоятельства. К таким моделям относятся, например, Johnson–Cook (JC), Zerilli–Armstrong (ZA), Preston–Tonks–Wallace (PTW), Steinberg–Cochran–Guinan–Lund (SCG), Mechanical Threshold Stress (MTS) и другие более сложные модели [1]. Данные модели включают в себя подобранные в ходе различных экспериментов коэффициенты, которые отличаются на порядки и демонстрируют различные значения напряжений от одних и тех же деформаций. Оценки точности этих моделей для различных условий нагружения являются предметом научных исследований, одно из которых было опубликовано В. Vanerjee [2]. В этой работе показано, что при статическом растяжении алюминиевого сплава 6061-T6 меньшую погрешность дает модель MTS (14 %), при сжатии PTW (10 %). Погрешность на высоких скоростях деформации для MTS составляет (15 %), при высоких температурах для PTW (16 %). Между тем перечисленные модели почти не находят отражение в публикациях, посвященных как прочности различных преград при их пробитии, так и в исследованиях процессов резания. Одной из причин этого, по-видимому, можно считать сложность и, как следствие, высокую стоимость вычислений. Большее распространение получила модель JC, которая в вышеприведенном исследовании дает намного большие погрешности для указанных условий, соответственно, 25; 45; 29 и 43 %. Зачастую разработчики численных моделей процесса стружкообразования приводят в публикациях определенные значения коэффициентов такой модели, не обсуждая при этом ни условия получения коэффициентов моделей, ни состояние поставки материала во взаимосвязи с методом получения заготовки, ни уровень напряжений, которые такие коэффициенты определяют. Таким образом, численное исследование процесса резания заготовки из ВКМ необходимо начинать, прежде всего, с выбора моделей составляющих ее материалов и определения коэффициентов этих моделей. Поскольку любой композит является конструкцией из составных частей, то нельзя не учитывать, как эти части были соединены. В большинстве публикаций, где затрагивался этот вопрос, отмечается влияние граничного слоя между матрицей и наполнителем на характер разрушения всего композита. Следовательно, свойства граничного слоя также являются предметом любого исследования резания композитных заготовок. После решения вопроса со свойствами материалов, составляющих композит, на втором этапе изучения его резания нужно определить модель структуры такого композита. В дальнейшем следует оценить влияние на стружкообразование характера резания лезвийным инструментом.

В связи с этим **целью данного этапа исследования** является выявление на основе анализа имеющихся публикаций параметров моделей материалов и численное моделирование стружкообразования лезвийным инструментом волокноно-армированных композитных заготовок. **Актуальность** этого исследования обусловлена необходимостью поиска решений для выявления рациональных параметров инструментов и рационального их положения в каждой точке обрабатываемой поверхности композитной заготовки для минимизации ее разломачивания, отрывов волокон от матрицы композита, его расслоения и сколов при выходе инструмента из заготовки. Это позволит еще шире и рациональнее использовать такие процессы, как фрезерование, для получения фасонных композитных деталей высокой точности и с высоким качеством поверхностей.

Для достижения указанной цели прежде всего необходимо произвести **анализ доступной литературы**. Все литературные источники применительно к указанной цели условно можно разделить на две части. К первой следует отнести имеющиеся решения, связанные с рациональным расположением режущего клина инструмента относительно расположения волокон у по-

верхности композитной заготовки. Ко второй части следует отнести имеющиеся решения, направленные на рациональное расположение всего инструмента относительно волокон на поверхности данной заготовки. В настоящее время опубликовано значительное количество работ по теме первой из указанных частей. Предварительный анализ показал, что эту часть, в свою очередь, можно разбить еще на три основные группы: 1) с применением аналитических подходов; 2) с применением численных подходов и 3) экспериментальные исследования.

Публикации первой группы исследований появились в прошлом столетии. Обзор доступной литературы показал, что такие публикации появились как за рубежом, так и в СССР. Объемным отечественным изданием стала книга А.А. Степанова [3]. Автор отмечает, что «...[анизотропия композита] определяет различие процесса резания, в частности стружкообразования, вдоль и поперек армирующих волокон. Существенным образом схема армирования будет влиять и на качество получаемой поверхности, поэтому при разработке технологической операции механической обработки ВКПМ следует учитывать и направление обработки относительно направления армирования». В этой же работе приводятся схемы образования опережающей трещины при точении ВКПМ, названные автором «коаксиальным», «тангенциальным» и «радиальным» видами армирования. Здесь же анализируются условия стружкообразования при радиальном армировании в зависимости от величин переднего угла. Расчеты сил резания производятся по традиционным формулам, аналогичным для резания металлов [3]. Подобная схема раскрытия трещины была представлена и в другой отечественной работе этого же периода, где показаны полученные высокоскоростной видеосъемкой не только процесс разрушения матрицы и разрыва волокон, но и их отрыв от матрицы у обработанной поверхности, что является причиной ее ворсистости [4]. Аналогичные работы публиковались в этот же период и за рубежом. В них было показано влияние на качество получаемой поверхности углов между осями волокон и вектором скорости главного движения резания [5, 6]. Похожие работы были в начале этого столетия в России [7] и за рубежом [8–10]. Своего рода обзорной работой стала публикация объемом в 300 страниц с рассмотрением влияния углов наклона волокон и аналитическими зависимостями для описания этого процесса [11]. Ценностью этих и других работ являются экспериментальные исследования, в которых представлены результаты микрофотосъемки и скоростной видеосъемки. Однако *общей особенностью всех этих работ является изучение резания заготовок только из однонаправленных волоконно-армированных композитов.*

С развитием компьютерных технологий все большие возможности для моделирования стали предоставлять численные методы расчета, отнесенные выше ко второй группе публикаций. В работе А. Pramanik 2006 г. отражены расчеты стружкообразования методом конечных элементов (МКЭ) в процессе резания однонаправленного ВКМ для коаксиального случая ортогонального свободного резания [12]. Подобные работы были опубликованы в 2007 г. [13] и в 2010 г. [14]. В дальнейшем микромоделирование с описанием волокон стало получать все большее распространение. Однако зачастую при этом композит состоял только из волокон и матрицы без граничного (интерфейсного) слоя [15]. Появлялись в этот же период и работы обзорного характера [16]. Публикация подобных работ продолжается и до настоящего времени [17–19]. Как отмечалось выше, исследование свойств ВКМ показало, что между волокнами и матрицей существует слой, отличающийся по свойствам от первых и второй. Это обстоятельство получило отражение в одной из публикаций с приведенными расчетами МКЭ [20], хотя в данном случае моделирование снова оказалось двумерным. В цитируемой работе приводятся числовые данные для моделей волокон и матрицы из материалов естественного происхождения. Что касается граничного слоя, то отмечают его линейная модель с последующим разрушением. В работе приводятся некоторые числовые данные для таких моделей, однако обоснования применения таких моделей и их параметров обнаружить не удалось. Также продолжает развиваться и второй тип моделирования – макро-моделирование процессов резания композитов [21, 22]. Трехмерное микромоделирование МКЭ заготовки с несколькими слоями волокон было выполнено и авторами данной статьи в своей публикации¹ в 19-м выпуске этого же журнала в 2012 г., при этом волокна были окружены треть-

¹ Щуров И.А., Болдырев И.С. Моделирование процесса резания заготовок из композитных материалов с применением метода конечных элементов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2012. № 19. С. 143–147. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-protsessa-rezaniya-zagotovok-iz-kompozitnyh-materialov-s-primeneniem-metoda-konechnyh-elementov>

им материалом – граничным слоем, который по свойствам несколько отличался от свойств матрицы. Обоснования применения именно этих параметров также не было приведено. Обзор других публикаций показал, что если граничный слой и рассматривается в численных моделях, то параметры моделей этого слоя или описываются кратко и упрощенно [18], или считается, что свойства этого слоя практически не отличаются от свойств матрицы [19]. Таким образом, выбор модели и ее параметров для граничных слоев композитов до настоящего времени является открытым вопросом, что и отражено в первой части цели настоящего исследования.

Трехмерное моделирование становится все более актуальным в связи с необходимостью моделирования резания ВКМ, армированных волокнами в двух и трех направлениях. Такое моделирование было выполнено в работе S. Usui и др. [23]. Авторы данной работы предложили использовать слоистую модель ВКМ, при этом каждый слой отражал расположение волокон одного направления, при этом такой слой описывался лишь как гомогенный ортотропный материал. Подобный подход описан и в других обзорных публикациях [24, 25]. В выполненном поиске литературных источников *микромоделирование резания ВКМ с волокнами в трех направлениях обнаружить не удалось*.

Рассматривая вопрос численного моделирования резания композитов, нельзя не отметить расширения научных исследований в применении других методов расчета, в частности, бессеточных методов, которые имеют известные преимущества в задачах больших пластических деформаций и разрушения [26]. Такие публикации имеют, в частности, и авторы публикуемой статьи² в 16-м выпуске данного журнала в 2016 г., а также в публикациях SCOPUS [27, 28]. Но и здесь моделирование резания заготовок из вышеуказанных ВКМ объемного плетения отсутствует.

Как отмечалось ранее, третья группа публикаций посвящена экспериментальным исследованиям резания ВКМ. Обзор работ, посвященных экспериментальным исследованиям при резании композитных заготовок, дан в ранее опубликованных зарубежных [29, 30] и отечественных [31] статьях. Отечественные исследования посвящены как влиянию геометрии инструмента на стружкообразование [32], так и ориентации волокон к вектору скорости главного движения резания [33–36]. Зарубежные экспериментальные исследования отражают как статические [37], так и динамические [38] явления. В последней работе представлены результаты влияния рассматриваемого угла наклона волокон на динамические явления. Таким образом, идея о целесообразном положении волокон относительно вектора скорости главного движения инструмента находит подтверждение и в современных экспериментальных исследованиях.

Как известно, наиболее гибким методом обработки резанием заготовок с фасонными поверхностями является их фрезерование, в том числе на станках с ЧПУ. Исходя из этого, как было оговорено выше, целесообразно рассмотреть вторую часть научных статей, посвященных именно фрезерованию композитных заготовок. Наибольший интерес представляет одна из обзорных публикаций [39]. В работе систематизированы рассматриваемые разными авторами композитные материалы, цели и методы исследований, влияние на повреждение поверхностей и шероховатость деталей режимных и силовых параметров. Для последнего фактора приведены полученные в обзорных публикациях регрессионные зависимости. Влияние кинематики инструментов на характеристики поверхностей деталей не рассматривалось.

В публикации 2011 года приводятся результаты экспериментов по фрезерованию заготовки из ВКМ, которая представляет собой соединенную из отдельных слоев конструкцию [40]. Каждый слой выполнен из однонаправленного волоконного материала, при этом волокна соседних слоев могут располагаться под углами друг к другу с шагом в 45°. Вектор продольной подачи торцевой фрезы направлялся шестью различными способами. В ходе экспериментов было установлено, что два из этих шести вариантов дают наилучшие условия обработки. В другой работе, опубликованной в 2013 г., эксперименты проводились с тремя материалами: двумя однонаправленными ВКМ с углами 0 и 90° к вектору скорости подачи инструмента и третьим двунаправленным под углом $\pm 45^\circ$ ВКМ [41]. Кроме того, применялись три концевые фрезы с разными углами наклона к оси инструмента касательной к режущим кромкам линии: 0; 30 и 45°. Авторы

² Shchurov I.A., Nikonov A.V. Fiber-Reinforced Composite Workpiece Surface Quality Improvement in Machining by Milling-Cutter with Opposite Cutting Edges Using Sph-Method Simulation // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2016. Т. 16, № 1. С. 56–62. DOI: 10.14529/engin16

сделали выводы о целесообразности применения определенных инструментов и о влиянии направления волокон на качество, силу и температуру резания. Аналогичные по цели и выводам исследования приведены в другой работе этого же года [42]. Особенностью этой работы являются микрофотографии волокон композита, которые показывают характер разрушения волокон и поверхность полученной детали. Как и в предыдущем случае, после резания поверхность матрицы композитной заготовки становится рваной, и наблюдаются отрывы волокон у этой поверхности. Исследованию влияния геометрии инструмента и покрытий его режущих лезвий на качество, точность получаемой поверхности и силу резания посвящена более поздняя статья [43]. Доказано, что вышеперечисленные характеристики взаимосвязаны и их следует учитывать при разработке технологической операции. Исследованию взаимосвязи направленности волокон относительно вектора скорости главного движения резания при фрезеровании концевыми фрезами посвящена еще одна работа [44]. Эксперименты проводились с заготовкой, составленной из двух ламинатов с углами однонаправленно расположенных волокон 0 и 90°. Показано, что степень ворсистости получаемой поверхности зависит от угла между направлением волокон и вектором скорости главного движения резания. В более поздней работе наряду с влиянием режимов резания исследуется влияние на качество поверхности композитной детали угла наклона оси фрезы по отношению к нормали на поверхность детали [45]. Авторы отмечают: «This angle has a significant effect on process mechanics and dynamics, which have not been studied in CFRP milling until now». Рассматривая вопросы обеспечения максимально возможного качества поверхности композитной детали, нельзя не отметить еще одну работу, в которой оценивается положительное влияние на качество детали приложенных к системе ультразвуковых колебаний [46].

Таким образом, *вопрос численного моделирования композита объемного плетения с учетом характеристик составляющих его материалов все еще является открытым вопросом*, что и отражено во второй части цели настоящего исследования.

Вышеприведенный обзор литературных источников показал следующее. Во-первых, численные методы расчета являются одним из наиболее экономичных методов оценки качества получаемой поверхности композитной заготовки при ее лезвийной обработке, и поэтому они все шире применяются в научных исследованиях. При этом такие исследования проводятся все еще в основном на примере однонаправленных ВКМ. Во-вторых, численное моделирование процесса стружкообразования, включающее в себя использование различных моделей материалов, обусловлено трудностями с определением коэффициентов таких моделей, в особенности граничных слоев у наполнителей, что представляет собой отдельную научную задачу, связанную с экспериментами, близкими по своему характеру к процессу резания. В-третьих, в экспериментальных исследованиях лезвийной обработки ВКМ показано влияние на качество поверхности детали не только параметров режима резания и геометрии режущего лезвия, но и взаимосвязи направления осей волокон с направлением векторов скоростей подачи и главного движения резания. В-четвертых, экспериментальные исследования, как и численное моделирование, все еще проводятся преимущественно для однонаправленных ВКМ или ВКМ, составленных из отдельных ламинатов с однонаправленным расположением волокон.

Постановка проблемы и формулирование гипотезы

В связи с указанными выше тезисами возникает необходимость численного моделирования стружкообразования при резании лезвийными инструментами заготовок из ВКМ объемного плетения. Для этого необходимо создать численные микромодели таких заготовок, при этом в данных моделях расположенные по трем осям координат волокна должны охватываться граничными слоями с определенными для них параметрами материала. Данное моделирование следует выполнять с использованием моделей материалов волокон, граничных слоев и матрицы, с определением коэффициентов в наиболее полно отвечающих резанию условиях деформирования таких компонентов композитов. С учетом этого будем предполагать, что для решения задач геометрического моделирования композитной структуры достаточно применения воксельного метода моделирования, а для решения задач физического моделирования достаточно применения SPH-метода расчета, исходная модель которого может быть органично получена из его воксельной модели. Для определения коэффициентов моделей материалов следует рассмотреть подобные имеющиеся модели, которые применялись для различных условий напряженно-деформированного состояния, с отбором тех из них, которые наиболее близко отвечают процессу

резания и хорошо согласуются друг с другом. Представляется обоснованным в качестве модели материала граничного слоя матрицы с волокном применить модель, используемую для самой матрицы, а параметры такой модели необходимо изменить. Поскольку, как показывают эксперименты, при резании заготовки из ВКМ первоначально происходит не столько разрушение матрицы или, тем более, волокон, а происходит разрушение граничного слоя, что находит отражение в форме отслаивания волокон от матрицы, то будем предполагать, что граничный слой имеет меньшие прочностные характеристики, чем основной слой матрицы. Исходя из этого, на основе анализа параметров моделей матрицы для различных вариантов одного и того же материала этой матрицы предполагается выбрать случай с наименьшими прочностными характеристиками.

Методология исследования

Для решения поставленной задачи численного моделирования стружкообразования при резании лезвийным инструментом заготовок из ВКМ объемного плетения на первом этапе воспользуемся результатами исследований различных процессов упруго-пластического деформирования с разрушением материалов, применяемых в производстве композитов. Представленные в этих исследованиях модели материалов и их коэффициенты и будут предметом сравнения и выбора параметров моделей для исследования процесса резания композитной заготовки.

Структура работы

Поскольку на разных относительно независимых стадиях публикуемой работы данные исследования выполнялись различными ее участниками, то и результаты всей этой работы будут опубликованы в двух статьях. В первой статье, отражающей первую часть исследований, дан вышеприведенный общий обзор литературы, из которого выявлена общая задача, ее актуальность и методы исследований. В этой же статье решена задача отбора математической модели материалов ВКМ, граничного слоя и параметров этой модели для таких составных частей композита. Во второй статье приведены результаты численного геометрического моделирования заготовки из ВКМ объемного плетения ортогональной структуры, которые базируются на воксельном подходе. Здесь же приведены результаты физического моделирования стружкообразования при лезвийном резании рассматриваемой композитной заготовки на основе метода SPH, даны общие результаты и выводы по поставленной выше задаче.

Определение модели материалов компонентов волоконно-армированного композита объемного плетения

Для выполнения рассматриваемого исследования необходимо, прежде всего, определиться с самими материалами. Как известно, все ВКМ условно можно разделить на три основные группы: полимерные ВКМ, металлические и керамические ВКМ. Поскольку целью работы является разработка модели процесса стружкообразования, которая включает в себя множество относительно независимых вопросов (модели материалов, условия контакта инструмента с заготовкой, параметры собственно численного расчета и т. д.), то на данном этапе для получения наиболее адекватного результата целесообразно воспользоваться и наиболее адекватными и многократно проверенными моделями материалов. Очевидно, что в современных условиях наиболее изученными материалами являются металлы. Исходя из этого, в качестве примера воспользуемся резанием композитной заготовки, составленной из металлических компонентов: волокна будут выполнены из стали, а матрица – из алюминиевого сплава. Как отмечалось выше, одной из наиболее популярных и проработанных моделей материалов, учитывающей зависимость напряжений в теле объекта не только от собственно его деформаций, но и от скорости таких деформаций и температуры нагрева данного объекта, является модель Джонсона–Кука (Johnson–Cook) [50]:

$$\sigma_y = \left(A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n \right) \left(1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*) \right) \left(1 - (T^*)^m \right), \quad (1)$$

где A , B , n , C и m – эмпирические константы для заданного материала в данных условиях нагружения; $\bar{\varepsilon}^p$ – эффективная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}^*$ – скорость эффективной пластической деформации; T^* – гомологическая температура.

Первые шесть параметров и представляют собой интерес в поиске нужных параметров моделирования. Помимо модели деформаций – напряжений для описания стружкообразования необходимо использовать еще и модель разрушения. Такая модель представляет собой уравнение [50]:

$$\bar{\epsilon}_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3(\sigma_m / \bar{\sigma})))(1 + D_4 \ln(\dot{\epsilon}^*))(1 - D_5 T^*), \quad (2)$$

где $D_1 \dots D_5$ – эмпирические константы, зависящие от выбранного материала; σ_m и $\bar{\sigma}$ – среднее от трех нормальных напряжений и напряжение для материала по Мизесу.

С учетом этого первоначально был выполнен поиск литературных источников, в которых рассматривается данная модель и ее параметры для исследования разрушения стальных заготовок. Для примера произведена выборка наиболее популярных американских марок сталей: 1006, 1045, 4340. Результаты такого поиска с отражением значений параметров этой модели в системе «СИ» сведены в табл. 1. Данные сведения приведены для следующих материалов и условий испытаний:

- 1) руководство пользователя ANSYS для стали 1006, сведения о методе получения и состоянии заготовки или образца и его испытаниях не приведены [47];
- 2) пластина из стали А36, аналогично поставка и условия испытаний не приведены [48]⁽¹⁾;
- 3) литая заготовка из стали 4043 [48]⁽²⁾;
- 4) прокат из стали 4043, растяжение цилиндрического образца [49];
- 5) сталь 1045, растяжение испытываемого образца из проката [50];
- 6) стальной сердечник заданного индентора (57-Н-231) для пробития преграды, предположительно сталь 1045 [51];
- 7) сталь 1045, растяжение цилиндрического образца [52];
- 8) стальной сердечник (аналог п. 6) [53];
- 9) отожженная сталь 1045, растяжение цилиндрического образца [54];
- 10) сталь 1045, процесс резания [55].

Таблица 1
 Параметры модели Джонсона–Кука для стальных заготовок (дано до трех значащих цифр)

Table 1
 Johnson–Cook model parameters for steel workpieces (three significant digits are given)

Параметр	Номера наборов параметров модели и ссылки на источники									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	[47]	[48] ⁽¹⁾	[48] ⁽²⁾	[49]	[50]	[51]	[52]	[53]	[54]	[55]
A	3,50E8	2,86E8	7,92E8	11,9E8	3,75E8	2,34E8	5,01E8	2,34E8	6,16E8	5,53E8
B	275E6	5,00E8	5,10E8	5,00E8	5,52E8	4,14E8	1,76E8	4,14E8	6,68E8	6,01E8
n	0,360	0,228	0,260	0,677	0,457	0,250	0,518	0,250	0,255	0,234
C	2,2E–2	2,2E–2	1,4E–3	4,3E–3	2,0E–2	3,3E–3	1,1E–2	3,0E–3	1,1E–2	1,3E–2
m	1,00	0,92	1,03	1,17	1,40	1,03	0,66	1,03	1,08	1,00
D_1	–0,80	0,403	0,05	0,00	0,25	5,63	0,025	5,63	0,04	1,20
D_2	2,10	1,107	3,44	0,00	4,38	0,30	16,93	0,30	1,03	0,00
D_3	–0,50	–1,90	–2,12	0,00	–2,68	–7,20	–14,8	–7,20	–1,39	0,00
D_4	0,0002	0,0096	0,002	0,00	0,002	–0,012	0,021	–0,012	0,002	0,00
D_5	0,610	0,300	0,610	0,000	0,610	0,000	0,000	0,000	0,460	0,000

Расчеты по формуле (1) для постоянной величины удлинения $\bar{\epsilon}^p = 0,87$ позволили построить следующие графики напряжений от скорости деформаций $\bar{\epsilon}^*$ с сохранением вышеприведенной нумерации (рис. 1а). Как видно из графиков, величины напряжений отличаются более чем в два раза. Аналогично для постоянной скорости деформации $\bar{\epsilon}^* = 0,1$ были получены графики напряжений в зависимости от относительных деформаций $\bar{\epsilon}^p$ (рис. 1б). Используя эти графики, для определенности в наших дальнейших расчетах были выбраны последние параметры таблицы ($\sigma_{10,i}$), которые были получены другими исследователями именно для моделирования процесса резания [55]. Их график расположен примерно посередине всех приведенных на рисунке графиков.

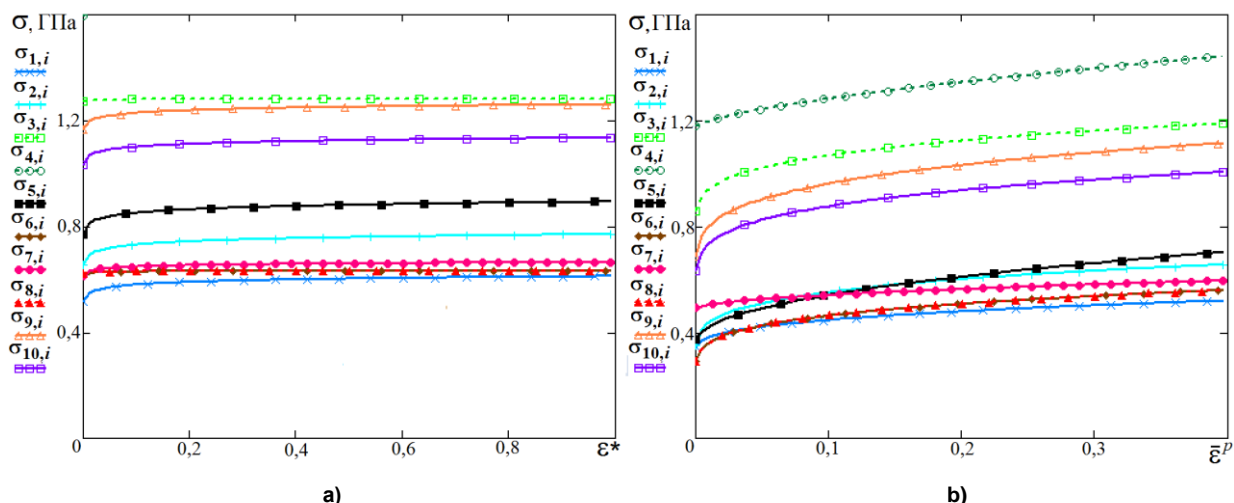


Рис. 1. Зависимости напряжений для стали: а) от скорости деформаций ($\epsilon^P = 0,87$); б) от деформаций ($\epsilon^* = 0,1$)
Fig. 1. Dependence of stress for steel: a) on strain rates ($\epsilon^P = 0,87$); b) true strain ($\epsilon^* = 0,1$)

Аналогично процедуре выбора стального волокна был выполнен поиск литературных источников, в которых рассматривается данная модель JC и ее параметры для исследования заготовок из алюминиевых сплавов, которые будут применяться в качестве матрицы. Для примера произведена выборка наиболее популярных марок американских сплавов: 5083, 6061, 7075. Результаты такого поиска с параметрами модели в системе СИ сведены в табл. 2. Данные сведения приведены для следующих материалов и условий испытаний:

- 1) низкоскоростное пробитие преграды из прокатанного листа, сплав AA5083-H116 [55]⁽¹⁾;
- 2) то же – сплав Al 2024-T3 [55]⁽²⁾;
- 3) растяжение образца в форме пластины из сплава 7075 [56];
- 4) то же – сплав Al 7075-T6 [55]⁽³⁾;
- 5) то же – сплав Al 6061-T6 [55]⁽⁴⁾;
- 6) растяжение на испытательной машине цилиндрического образца из сплава 6061-T651 [57];
- 7) сплав 6061-T6, пробитие преграды из прокатанной плиты [58];
- 8) сжатие цилиндрического образца при низкой скорости деформации, сплав AA 6082-T6 [59].

Таблица 2
Table 2

Параметры модели Джонсона–Кука для алюминиевых заготовок (дано до трех значащих цифр)
Johnson–Cook model parameters for aluminium workpieces (three significant digits are given)

Параметр	Номера наборов параметров модели и ссылки на источники							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	[55] ⁽¹⁾	[55] ⁽²⁾	[56]	[55] ⁽³⁾	[55] ⁽⁴⁾	[57]	[58]	[59]
A	2,15E8	3,69E8	2,70E8	4,73E8	2,70E8	2,70E8	3,24E8	4,29E8
B	2,80E8	6,84E8	1,65E8	2,10E8	1,54E8	1,90E8	1,14E8	3,28E8
n	0,404	0,730	0,222	0,381	0,222	0,300	0,420	1,008
C	0,009	0,008	0,011	0,033	0,130	0,002	0,002	0,007
m	1,010	1,700	0,000	1,000	1,000	1,340	1,000	1,310
D ₁	0,178	0,000	-0,770	0,000	0,000	-0,770	-0,770	0,000
D ₂	0,389	0,000	1,450	0,000	0,000	1,450	1,450	0,000
D ₃	-2,250	0,000	-0,470	0,000	0,000	-0,470	-0,470	0,000
D ₄	0,147	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D ₅	16,800	0,000	1,600	0,000	0,000	1,600	1,600	0,000

Расчеты по формуле (1) для $\bar{\epsilon}^p = 0,87$ позволили построить следующие графики напряжений с сохранением вышеприведенной нумерации (рис. 2а). Как видно из графиков, величины напряжений отличаются более чем в три раза. Расчеты по формуле (1) позволили построить графики напряжений в зависимости от относительной деформации (рис. 2б). Как видно из графиков, величины напряжений отличаются также более, чем в три раза. Для данной модели и последующих расчетов процесса резания выбраны параметры из седьмой колонки табл. 2 [58], дающие кривую, которая находится примерно посередине остальных кривых.

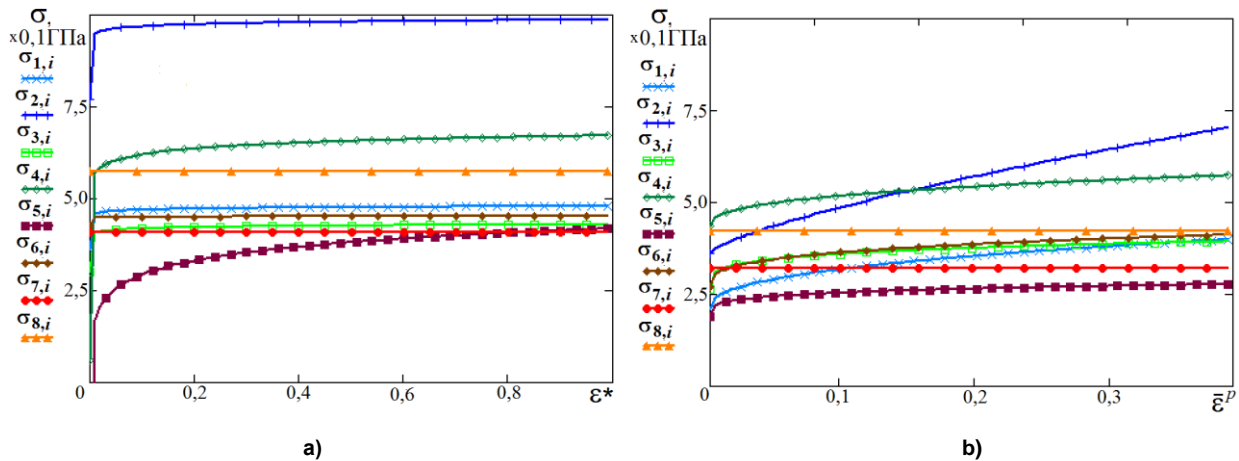


Рис. 2. Зависимости напряжений алюминиевых сплавов:
 а) от скорости деформаций ($\epsilon^p = 0,87$); б) от деформаций ($\epsilon^* = 0,1$)
 Fig. 2. Dependence of stress for aluminum alloys: a) on strain rates ($\epsilon^p = 0,87$); b) true strain ($\epsilon^* = 0,1$)

Как отмечалось выше, в настоящее время наибольший интерес представляет собой определение параметров модели для материала граничного слоя. По-видимому, более достоверным могло бы быть решение на основе создания образцов из материалов, эквивалентных таким граничным слоям, однако сейчас такой информации в литературе обнаружить не удалось. В связи с этим в качестве гипотезы было принято, что граничным слоем матрицы с волокном может быть слой из материала матрицы, но с меньшей прочностью. В таком случае в качестве параметров выбранной модели JC целесообразно принять параметры для наименее прочного материала из тех моделей, что были выбраны для заданной марки материала матрицы, а именно для алюминиевого сплава 6061-Т6. Как видно из графиков (см. рис. 2), наиболее низко расположенной кривой для сплава 6061-Т6 является кривая, соответствующая пятому столбцу табл. 2 [55]. Параметры этой модели и будут далее нами использоваться при расчете напряженно-деформированного состояния композитной заготовки объемного плетения при ее резании лезвийным инструментом. Последующее моделирование этого стружкообразования позволит сравнить модели с выбранными несколько отличающимися параметрами материала для граничного слоя и получить вывод, насколько форма рассматриваемой кривой при практически равных прочих условиях дает отличия в картине напряженно-деформированного состояния в таком композите.

Результаты и обсуждения

Выполненный анализ литературных источников, связанных с лезвийной обработкой заготовок из волоконно-армированных композитных материалов, показал, что опубликованные результаты исследований связаны в основном с резанием однонаправленных ВКМ. Примеров численного моделирования резания ВКМ объемного плетения найти не удалось. Такое моделирование включает в себя различные модели материалов, составляющих композит, из которых наиболее часто используется относительно простая и экономная в вычислительном плане, вместе с тем учитывающая скорость деформаций и температурные поля, модель Джонсона–Кука (Johnson–Cook). Для одних и тех же марок материалов приводятся различные параметры данной модели, которые дают различный уровень напряжений при одинаковых относительных деформациях и их скоростях. Отличия по уровню напряжений могут отличаться в два-три раза для одних и тех же материалов. Соответственно, представляется целесообразным не просто сравнить характеризующие их кривые, а сравнить картины напряженно-деформированного состояния зоны ре-

зания с учетом стружкообразования, полученные по численным моделям, и сравнить такие картины с экспериментальными данными, что является предметом дальнейших исследований.

На следующем этапе данной начальной стадии этих исследований целесообразно получить численную модель ВКМ объемного плетения и для выбранных моделей материалов и их параметров произвести моделирование процесса резания заготовок из этого ВКМ.

Список литературы

1. Jaspers S.P.F.C. Metal Cutting Mechanics and Material Behaviour. Research Report for CIVE 498. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, USA, 1999. 156 p.
2. Banerjee B. Taylor impact tests: detailed report. Report No. C-SAFE-CDIR-05-001, Salt Lake City, USA, 2005. 95 p.
3. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов, Л.: Машиностроение, 1987. 176 с.
4. Ходырев В.И., Филиппов М.Н. О процессе образования ворса при резании волокнистых полимерных композитов // Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск: Высшая школа, 1988, Вып. 13. С. 65–69.
5. Wang D.H., Ramulu M., Arola D.D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: Uni-directional laminate // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1995, vol. 35(12), pp. 1623–1638. DOI: 10.1016/0890-6955(95)00014-0
6. Puw H.Y., Hocheng H. Milling of polymer composites In: Jahanmir S, Ramulu M (ed) Machining of ceramics and composites. Marcel Dekker Book, 1999, p. 267–294.
7. Саленко А.Ф., Ченчевая О.А., Лашко Е.Е., Щетинин В.Т. Формирование дефектного поверхностного слоя при разрезке деталей из карбон-карбонных и карбон-полимерных композитов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2018, № 1 (94), с. 62–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139556
8. Davim J.P. Machining: fundamentals and recent advances. Springer-Verlag London Limited, 2008. 361 p. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5
9. Rao G.V., Mahajan P., Bhatnagar N. Machining of UD-CFRP composites: experiments and finite element modeling // In: Proceedings of the 13th European Conference on Composite Materials (ECCM13), 2008, pp. 1–10.
10. Wang X.M., Zhang L. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, vol. 43, pp. 1015–1022. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00090-7
11. Ahmad J., Ahmad J. Machining of Polymer Composites. Springer, 2008, 315 p. DOI: 10.1007/978-0-387-68619-6
12. Pramanik A., Zhang L., Arsecularatne J.A. An FEM investigation into the behavior of metal matrix composites: tool-particle interaction during orthogonal cutting // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, vol. 47(10), pp. 1497–1506. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.12.004
13. Santiuste C., Soldani X., Miguélez M.H. Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components // Composite Structures, 2010, vol. 92, pp. 691–698. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.09.021
14. Nayak D.K., Bhatnagar N., Mahajan P. Machining studies of UD-FRP composites. Part 2: Finite element analysis // Machining Science and Technology, 2005, vol. 9, pp. 503–528. DOI: 10.1080/10910340500398183
15. Dandekar C.R., Shin Y.C. Multi-Phase Finite Element Modeling of Machining Unidirectional Fiber Reinforced Composites // Proceedings of the 2007 International Manufacturing Science And Engineering Conference, 2007, pp. 1–10. DOI: 10.1115/MSEC2007-31111
16. Dandekar C.R., Shin Y.C. Modeling of machining of composite materials: A review // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, vol. 57, pp. 102–121. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.01.006
17. Umer U., Ashfaq M., Qudeiri J.E., Hussein M., Al-Ahmari A., Arabia S. Finite element modeling of the orthogonal machining of particle reinforced aluminum based metal matrix composites // MM Science Journal, 2014, vol. 12, pp. 511–515. DOI: 10.17973/MMSJ.2014_12_201416

18. Abena A., Essa K. 3D micro-mechanical modelling of orthogonal cutting of UD-CFRP using smoothed particle hydrodynamics and finite element methods // *Composite Structures*. 2019, vol. 218(15), pp. 174–192. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.03.037
19. Ghandehariun A., Nazzal M.A., Kishawy H.A., Umer U. On modeling the deformations and tool-workpiece interactions during machining metal matrix composites // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 91, pp. 1507–1516. DOI: 10.1007/s00170-016-9776-9
20. Chegiani F., Mansori M.E. Numerical Modeling of the Machining Behavior of Natural Fiber Composites. In *Encyclopedia of Materials: Composites*, 3, Elsevier, 2021, pp. 197–208. DOI: 10.1016/b978-0-12-819724-0.00016-1
21. Wang F., Gu T., Wang X., Jin X.Z., Zhang B. Analysis of Burr and Tear in Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Using Finite Element Method // *Applied Composite Materials*, 2021, vol. 28, pp. 991–1018. DOI: 10.1007/s10443-021-09896-w
22. Макаров В.Ф., Койнов И.И., Кумар Д. Особенности деформационных явлений в процессе стружкообразования при ортогональном резании композиционных материалов // *Научные технологии в машиностроении*, 2018, № 6(84), С. 38–43. DOI: 10.30987/article_5b0e4112e75727.70350616
23. Usui S., Wadell J., Marusich T.D. Finite Element Modeling of Carbon Fiber Composite Orthogonal Cutting and Drilling. In *International Conference on High Performance Cutting*, 2014, pp. 211–216. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.081
24. Shetty N., Shahabaz S., Sharma S., Shetty S. A review on finite element method for machining of composite materials // *Composite Structures*, 2017, vol. 176, pp. 790–802. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.06.012
25. Vyavahare S.S., Pathare Y.S., Shelke S.V. Finite element analysis of CFRP composite material machining: A Review // *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2018, vol. 5(01), pp. 854–860.
26. Dehmer A., Prinz S., Breuer P., Barth S., Bergs T. Simulation of machining behaviour of two-phase brittle materials during grinding by modelling single-grain scratching using a combination of FE and SPH methods // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 128, pp. 1709–1723. DOI: 10.1007/s00170-023-12006-8
27. Shchurov, I.A., Nikonov, A.V., Boldyrev, I.S. SPH-Simulation of the Fiber-Reinforced Composite Workpiece Cutting for the Surface Quality Improvement // *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 860–865. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.029
28. Shchurov I.A., Boldyrev I.S., Nikonov A.V., Shchurova, E.I. Chip Formation in the Cutting of Composites // *Russian Engineering Research*, 2020, vol. 40 (4), pp. 336–339. DOI: 10.3103/S1068798X2004019X
29. Diaz O.G., Luna G.G., Liao Z., Axinte D.A. The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface integrity // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019, vol. 139, pp. 24–36. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2019.01.003
30. Liu J., Li J., Xu C. Interaction of the cutting tools and the ceramic-reinforced metal matrix composites during micro-machining: A review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2014, vol. 7, pp. 55–70. DOI: 10.1016/j.cirpj.2014.01.003
31. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш А.В. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // *Труды ВИАМ*, 2016, № 9(45), С. 12. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12
32. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Заостровский А.С. Особенности лезвийной обработки резанием заготовок из полимерных композиционных материалов // *Научные технологии в машиностроении*, 2018, № 2(80), С. 40–48.
33. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Особенности стружкообразования при обработке полимерных композиционных материалов // *Научные технологии в машиностроении*, 2019, № 8(98), С. 36–40. DOI: 10.30987/article_5d2635cb77dfd6.90010587
34. Зубарев Ю. М., Приемышев А.В., Заостровский А.С. Особенности технологии механической обработки углепластиков // *Научные технологии в машиностроении*, 2016, № 5(59), С. 30–33.

35. Криворучко Д.В., Залого В.А., Колесник В.А. Механическая обработка композиционных материалов: монография. Сумы: Университетская книга, 2013. 272 с.
36. Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение, 2015, Т. 17, № 2, С. 30–41.
37. Caprino G., Langella A. Analysing cutting forces in machining processes for polymer-based composites // *Machining Technology for Composite Materials: Principles and Practice*, 2012, pp. 75–115. DOI: 10.1533/9780857095145.1.75
38. Song C., Jin X. Nonlinearity and periodicity in machining carbon fiber reinforced polymer // *Manufacturing Letters*, 2023, vol. 35, pp. 423–429.
39. Patel P., Chaudhary V., Patel K., Gohil P. Milling of Polymer Matrix Composites: A Review // *International Journal of Applied Engineering Research*, 2018, vol. 13(10), pp. 7455–7465.
40. Morandea A.E., Bohlmark J., Leroy R., Bonhoure D., Chibane H., Bouchou A. Carbon fiber reinforced plastics machining: surfacing strategy for reducing cutting forces // *In Comptes Rendus des JNC 17*, 2011, pp. 1–10.
41. Hagino M., Inoue T. Effect of Carbon Fiber Orientation and Helix Angle on CFRP Cutting Characteristics by End-Milling // *Int. J. Autom. Technol.*, 2013, vol. 7, pp. 292–299.
42. Azmi A.I. Chip formation studies in machining fibre reinforced polymer composites // *International Journal of Materials & Product Technology*, 2013, vol. 46(1), pp. 32–46.
43. Bílek O. Cutting-tool performance in the end milling of carbon-fiber-reinforced plastics // *Materials and technology*, 2016, vol. 50(5), pp. 819–822. DOI: 10.17222/mit.2015.153
44. Hintze W., Brüggemann F. Influence of Curved Workpiece Contours on Delamination During end Milling of FRP // *Procedia CIRP*, 2017, vol. 62, pp. 62–67. DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.115
45. Ghafarizadeh S., Chatelain J., Lebrun G. Multi axis machining of high performance CFRP for aerospace industry. In *The 19th international conference on composite materials*, 2013, pp. 4027–4034.
46. Kasim M.S., Mohamad W.N., Izamshah R., Mohamad N., Rosnan H., Sundi S.A., Hassan M.H., Ito T., Kasa Z.C. Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites Delamination during Vibration Assisted Trimming using Historical Data Design // *Malaysian Journal on Composites Science and Manufacturing*, 2021, vol. 6(1), pp. 1–13. DOI: 10.37934/mjcs.6.1.113
47. ANSYS, LS-DYNA. User's Guide. Release 16.1. USA. April, 2015, 202 p.
48. Rasheed M.F., Wu C., Raza A. Effect of Explosive Reactive Armour Cover Plate on Interaction of ERA and Explosively Formed Projectile // *Shock and Vibration*, 2019, Article ID 6093621, 10 p. DOI: 10.1155/2019/6093621
49. Jutras M. Improvement of the characterisation method of the Johnson-Cook model. Quebec, Canada: 2008, 73 p.
50. Zouhar J., Píška M. Modelling the orthogonal machining process using cutting tools with different geometry. In *MM Science Journal*, 2008, vol. 10, pp. 49–52. DOI: 10.17973/MMSJ.2008_10_20081006
51. Carbajal L.A., Jovicic J., Kuhlmann H. Assault Rifle Bullet-Experimental Characterization and Computer (FE) Modeling. In *Experimental and Applied Mechanics*, 2011, vol. 6, pp. 1–18. DOI: 10.1007/978-1-4614-0222-0_77
52. Murugesan M., Jung D.W. Johnson Cook Material and Failure Model Parameters Estimation of AISI-1045 Medium Carbon Steel for Metal Forming Applications // *Materials*, 2019, vol. 12, pp. 1–18. DOI: 10.3390/ma12040609
53. Sedi M., Faderl N., Becker M. Wang, W. Modelling back face deformation of woven layered composite targets under oblique impact. In *12th European LS-DYNA Conference*, Koblenz, DE, 2019, pp. 1–10.
54. Wang K. Calibration of the Johnson-Cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process, Report, Hamilton, Ontario, Canada 2016, 103 p. URL: <http://hdl.handle.net/11375/19091>

55. Jamal-Omidi M., Suki M. R. M. A Numerical Study on Aluminum Plate Response under Low Velocity Impact // *International Journal of Engineering – Transactions C: Aspects*, 2017, vol. 30, pp. 439–447. DOI: 10.5829/idosi.ije.2017.30.03c.14
56. Leclerc P. Constitutive models investigation to simulate damage-failure of Aluminium (Al) 6061-T6. Scientific Report DRDC-RDDC-R198, Canada, 2018, 58 p.
57. Borja E.E. Flow and Fracture Behavior of High Performance Alloys. Report. Madrid, 2012, 216 p. URL: [https://www.semanticscholar.org/paper/Flow-and-fracture-behaviour-of-high-performance-Ech %C3 %A1varri/1e947e19f615b2946a5e1671d318345c574c6f89](https://www.semanticscholar.org/paper/Flow-and-fracture-behaviour-of-high-performance-Ech%20C3%A1varri/1e947e19f615b2946a5e1671d318345c574c6f89)
58. Corbett B.M. Numerical simulations of target hole diameters for hypervelocity impacts into elevated and room temperature bumpers // *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 431–440. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.086
59. Jaspers S.P.F.C., Dautzenberg J.H. Material behavior in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone // *J Mat Proc Technol*, 2002, vol. 122 (2-3), pp. 322–330. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)01228-6

References

1. Jaspers S.P.F.C. Metal Cutting Mechanics and Material Behaviour. Research Report for CIVE 498. Eindhoven: *Technische Universiteit Eindhoven*, USA, 1999; 156 p.
2. Banerjee B. Taylor impact tests: detailed report. *Report No. C-SAFE-CDIR-05-001*, Salt Lake City, USA, 2005; 95.
3. Stepanov A.A. Cutting technology of high-strength composite polymer materials. L.: *Mashinostroenie = Machine building*, 1987; 176.
4. Hodyrev V.I., Filippov M.N. Process of fluff formation when cutting fibrous polymer composites. *Mashinostroenie: respublikanskij mezhdzvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Machine building: republican interdepartmental collection of scientific papers*. Minsk, 1988; 13: 65–69.
5. Wang D.H., Ramulu M., Arola D.D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: Uni-directional laminate. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1995; 35(12): 1623–1638. DOI: 10.1016/0890-6955(95)00014-0
6. Puw H.Y., Hocheng H. Milling of polymer composites In: Jahanmir S, Ramulu M. *Machining of ceramics and composites*. Marcel Dekker Book, 1999; 267–294.
7. Salenko A.F., Chenchevaya O.A., Lashko E.E., Shchetinin V.T. Formation of a defective surface layer when cutting parts made of carbon-carbon and carbon-polymer composites. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij = East European journal of advanced technologies*, 2018; 1 (94): 62–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139556
8. Davim J.P. Machining: fundamentals and recent advances. *Springer-Verlag London Limited*. 2008; 361. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5
9. Rao G.V., Mahajan P., Bhatnagar N. Machining of UD-CFRP composites: experiments and finite element modeling. In: *Proceedings of the 13th European Conference on Composite Materials (ECCM13)*, 2008; 1–10.
10. Wang X.M., Zhang L. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003; 43: 1015–1022. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00090-7
11. Ahmad J., Ahmad J. Machining of Polymer Composites. *Springer*, 2008; 315. DOI: 10.1007/978-0-387-68619-6
12. Pramanik A., Zhang L., Arsecularatne J.A. An FEM investigation into the behavior of metal matrix composites: tool-particle interaction during orthogonal cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007; 47(10): 1497–1506. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2006.12.004
13. Santiuste C., Soldani X., Miguélez M.H. Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components. *Composite Structures*, 2010; 92: 691–698. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.09.021
14. Nayak D.K., Bhatnagar N., Mahajan P. Machining studies of UD-FRP composites. Part 2: Finite element analysis. *Machining Science and Technology*, 2005; 9: 503–528. DOI: 10.1080/10910340500398183

15. Dandekar C.R., Shin Y.C. Multi-Phase Finite Element Modeling of Machining Unidirectional Fiber Reinforced Composites. *Proceedings of the 2007 International Manufacturing Science And Engineering Conference*, 2007; 1–10. DOI: 10.1115/MSEC2007-31111
16. Dandekar C.R., Shin Y.C. Modeling of machining of composite materials: A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012; 57: 102–121. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2012.01.006
17. Umer U., Ashfaq M., Qudeiri J.E., Hussein M., Al-Ahmari A., Arabia S. Finite element modeling of the orthogonal machining of particle reinforced aluminum based metal matrix composites. *MM Science Journal*, 2014; 12: 511–515. DOI: 10.17973/MMSJ.2014_12_201416
18. Abena A., Essa K. 3D micro-mechanical modelling of orthogonal cutting of UD-CFRP using smoothed particle hydrodynamics and finite element methods. *Composite Structures*. 2019; 218(15): 174–192. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.03.037
19. Ghandehariun A., Nazzal M.A., Kishawy H.A., Umer U. On modeling the deformations and tool-workpiece interactions during machining metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017; 91: 1507–1516. DOI: 10.1007/s00170-016-9776-9
20. Chegdani F., Mansori M.E. Numerical Modeling of the Machining Behavior of Natural Fiber Composites. In *Encyclopedia of Materials: Composites*, 3, Elsevier, 2021; 197–208. DOI: 10.1016/b978-0-12-819724-0.00016-1
21. Wang F., Gu T., Wang X., Jin X.Z., Zhang B. Analysis of Burr and Tear in Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Using Finite Element Method. *Applied Composite Materials*, 2021; 28: 991–1018. DOI: 10.1007/s10443-021-09896-w
22. Makarov V.F., Kojnov I.I., Kumar D. Features of deformation phenomena in the process of chip formation during orthogonal cutting of composite materials. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyeni = Science-intensive technologies in mechanical engineering*, 2018; 6(84): 38–43. DOI: 10.30987/article_5b0e4112e75727.70350616
23. Usui S., Wadell J., Marusich T.D. Finite Element Modeling of Carbon Fiber Composite Orthogonal Cutting and Drilling. In *International Conference on High Performance Cutting*, 2014; 211–216. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.081
24. Shetty N., Shahabaz S., Sharma S., Shetty S. A review on finite element method for machining of composite materials. *Composite Structures*, 2017; 176: 790–802. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.06.012
25. Vyavahare S.S., Pathare Y.S., Shelke S.V. Finite element analysis of CFRP composite material machining: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2018; 5(01): 854–860.
26. Dehmer A., Prinz S., Breuer P., Barth S., Bergs T. Simulation of machining behaviour of two-phase brittle materials during grinding by modelling single-grain scratching using a combination of FE and SPH methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023; 128: 1709–1723. DOI: 10.1007/s00170-023-12006-8
27. Shchurov, I.A., Nikonov, A.V., Boldyrev, I.S. SPH-Simulation of the Fiber-Reinforced Composite Workpiece Cutting for the Surface Quality Improvement. *Procedia Engineering*, 2016; 150: 860–865. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.029
28. Shchurov I.A., Boldyrev I.S., Nikonov A.V., Shchurova, E.I. Chip Formation in the Cutting of Composites. *Russian Engineering Research*, 2020; 40 (4): 336–339. DOI: 10.3103/S1068798X2004019X
29. Diaz O.G., Luna G.G., Liao Z., Axinte D.A. The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019; 139: 24–36. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2019.01.003
30. Liu J., Li J., Xu C. Interaction of the cutting tools and the ceramic-reinforced metal matrix composites during micro-machining: A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2014; 7: 55–70. DOI: 10.1016/j.cirpj.2014.01.003
31. Raskutin A.E., Hrul'kov A.V., Girsh A.V. Technological features of composite materials machining in the structural parts manufacture (review). *Trudy VIAM = VIAM transactions*, 2016; 9(45): 12. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12

32. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V., Zaostrovskij A.S. Features of edge cutting machining of polymer composite workpieces. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyeni = Science-intensive technologies in mechanical engineering*, 2018; 2(80): 40–48.
33. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V. Features of chip formation when processing polymer composite materials. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyeni = Science-intensive technologies in mechanical engineering*, 2019; 8(98): 36–40. DOI: 10.30987/article_5d2635cb77dfd6.90010587
34. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V., Zaostrovskij A.S. Features of mechanical processing technology of carbon fiber reinforced plastics. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyeni = Science-intensive technologies in mechanical engineering*, 2016; (59): 30–33.
35. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A., Kolesnik F.A. Mechanical processing of composite materials. Monograph. Sumy: *Universitetskaya kniga = University book*, 2013; 272 с.
36. Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. Study of mechanical processing problems of modern high-strength composite materials used for the parts production for aviation and rocket technics. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2015; 17(2): 30–41.
37. Caprino G., Langella A. Analyzing cutting forces in machining processes for polymer-based composites/ *Machining Technology for Composite Materials: Principles and Practice*, 2012; 75–115. DOI: 10.1533/9780857095145.1.75
38. Song C., Jin X. Nonlinearity and periodicity in machining carbon fiber reinforced polymer. *Manufacturing Letters*, 2023; 35: 423–429.
39. Patel P., Chaudhary V., Patel K., Gohil P. Milling of Polymer Matrix Composites: A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2018; 13(10): 7455–7465.
40. Morandea A.E., Bohlmark J., Leroy R., Bonhoure D., Chibane H., Bouchou A. Carbon fiber reinforced plastics machining: surfacing strategy for reducing cutting forces. *In Comptes Rendus des JNC 17*, 2011; 1–10.
41. Hagino M., Inoue T. Effect of Carbon Fiber Orientation and Helix Angle on CFRP Cutting Characteristics by End-Milling. *Int. J. Autom. Technol.*, 2013; 7: 292–299.
42. Azmi A.I. Chip formation studies in machining fibre reinforced polymer composites. *International Journal of Materials & Product Technology*, 2013; 46(1): 32–46.
43. Bilek O. Cutting-tool performance in the end milling of carbon-fiber-reinforced plastics. *Materials and technology*, 2016; 50(5): 819–822. DOI: 10.17222/mit.2015.153
44. Hintze W., Brüggemann F. Influence of Curved Workpiece Contours on Delamination During end Milling of FRP. *Procedia CIRP*, 2017; 62: 62–67. DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.115
45. Ghafarizadeh S., Chatelain J., Lebrun G. Multi axis machining of high performance CFRP for aerospace industry. *In The 19th international conference on composite materials*, 2013; 4027–4034.
46. Kasim M.S., Mohamad W.N., Izamshah R., Mohamad N., Rosnan H., Sundi S.A., Hassan M.H., Ito T., Kasa Z.C. Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites Delamination during Vibration Assisted Trimming using Historical Data Design. *Malaysian Journal on Composites Science and Manufacturing*, 2021; 6(1): 1–13. DOI: 10.37934/mjcs.6.1.113
47. ANSYS, LS-DYNA. *User's Guide. Release 16.1*. USA. April, 2015; 202.
48. Rasheed M.F., Wu C., Raza A. Effect of Explosive Reactive Armour Cover Plate on Interaction of ERA and Explosively Formed Projectile. *Shock and Vibration*, 2019; Article ID 6093621, 10. DOI: 10.1155/2019/6093621
49. Jutras M. Improvement of the characterisation method of the Johnson-Cook model. Quebec, Canada: 2008; 73.
50. Zouhar J., Piška M. Modelling the orthogonal machining process using cutting tools with different geometry. *In MM Science Journal*, 2008; 10: 49–52. DOI: 10.17973/MMSJ.2008_10_20081006
51. Carbajal L.A., Jovicic J., Kuhlmann H. Assault Rifle Bullet-Experimental Characterization and Computer (FE) Modeling. *In Experimental and Applied Mechanics*, 2011; 6: 1–18. DOI: 10.1007/978-1-4614-0222-0_77
52. Murugesan M., Jung D.W. Johnson Cook Material and Failure Model Parameters Estimation of AISI-1045 Medium Carbon Steel for Metal Forming Applications. *Materials*, 2019; 12: pp. 1–18. DOI: 10.3390/ma12040609

53. Sedi M., Faderl N., Becker M. Wang, W. Modelling back face deformation of woven layered composite targets under oblique impact. *In 12th European LS-DYNA Conference*, Koblenz, DE, 2019; 1–10.

54. Wang K. Calibration of the Johnson-Cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process, *Report*. Hamilton, Ontario, Canada 2016; 103. <http://hdl.handle.net/11375/19091>

55. Jamal-Omidi M., Suki M. R. M. A Numerical Study on Aluminum Plate Response under Low Velocity Impact. *International Journal of Engineering – Transactions C: Aspects*, 2017; 30: 439–447. DOI: 10.5829/idosi.ije.2017.30.03c.14

56. Leclerc P. Constitutive models investigation to simulate damage-failure of Aluminium (Al) 6061-T6. *Scientific Report DRDC-RDDC-R198*, Canada, 2018; 58.

57. Borja E.E. Flow and Fracture Behavior of High Performance Alloys. *Report*. Madrid, 2012; 216. URL: [https://www.semanticscholar.org/paper/Flow-and-fracture-behaviour-of-high-performance-Ech %C3 %A1varri/1e947e19f615b2946a5e1671d318345c574c6f89](https://www.semanticscholar.org/paper/Flow-and-fracture-behaviour-of-high-performance-Ech-%C3%A1-varri/1e947e19f615b2946a5e1671d318345c574c6f89)

58. Corbett B.M. Numerical simulations of target hole diameters for hypervelocity impacts into elevated and room temperature bumpers. *International Journal of Impact Engineering*, 2006; 33: 431–440. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.086

59. Jaspers S.P.F.C, Dautzenberg J.H. Material behavior in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone. *J Mat Proc Technol*, 2002; 122 (2-3): 322–330. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)01228-6

Информация об авторах

Щуров Игорь Алексеевич, д.т.н., первый заместитель директора Политехнического института, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shchurovia@susu.ru.

Щурова Екатерина Игоревна, к.т.н., старший преподаватель кафедры технологии автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shchurovaei@susu.ru.

Вольф Геннадий Владимирович, аспирант кафедры технологии автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; wgv333@list.ru.

Морозов Алексей Валентинович, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия; ntk_2005@rambler.ru.

Information about the authors

Igor A. Shchurov, doctor of science, first deputy director of Engineering and Technology Institute, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shchurovia@susu.ru.

Ekaterina I. Shchurova, PhD, assistant professor of automated machine building technology department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shchurovaei@susu.ru.

Gennadiy V. Volf, postgraduate student of automated machine building technology department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; wgv333@list.ru

Alexey V. Morozov, doctor of science, professor of machine building technology department, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russia; ntk_2005@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 23.04.2024; принята к публикации 03.05.2024.

The article was submitted 23.04.2024; accepted for publication 03.05.2024.