

## Моделирование процессов сверления заготовок из полимерных композиционных материалов путем использования цифровых двойников

© 2023

*Илюшкин Максим Валерьевич*<sup>1,3</sup>, кандидат технических наук, заместитель директора  
*Киселев Евгений Степанович*<sup>\*2,4</sup>, доктор технических наук, профессор

<sup>1</sup>Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства, Ульяновск (Россия)

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

\*E-mail: kec.ulstu@mail.ru

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3335-728X>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

Поступила в редакцию 08.02.2023

Принята к публикации 28.04.2023

**Аннотация:** Поликристаллические композитные материалы из углепластиков находят все более широкое распространение в машиностроении и становятся основным материалом при производстве современных видов скоростного транспорта. Так, в конструкции пассажирских летательных аппаратов их доля уже достигла 35–45 %. Однако технология механической обработки поверхностей деталей из этих материалов, в частности отверстий, отличается недостаточной изученностью, отсутствием нормативов режимов резания и основывается чаще всего на производственном опыте предприятий. При изменении условий обработки и материала длительность технологической подготовки производства становится причиной существенного увеличения себестоимости изготовления деталей вследствие необходимости опытного подбора рациональных элементов режима резания. Для исключения эмпирического подбора рациональных элементов режима резания на станочном оборудовании была рассмотрена возможность использования цифровых двойников для исследования процессов сверления отверстий в заготовках из композиционных материалов, в том числе (для повышения качества и производительности обработки) с введением в зону формообразования новых поверхностей энергии ультразвукового поля. При моделировании использовалась программа LS-DYNA. Подготовка моделей и обработка результатов выполнялась в программе LS-PrePost 4.8. В процессе исследований применялся явный метод моделирования с предварительной валидацией и калибровкой результатов тестовых испытаний композитов. Калибровка осуществлялась на тестовых операциях растяжения, трехточечного изгиба и межслойного сдвига широко используемого в отечественном машиностроении полимерного композиционного материала на основе углеродных волокон (углепластика) ВКУ-39. Разработанные конечно-элементные компьютерные модели позволяют имитировать технологические процессы сверления без проведения достаточно сложных и затратных натуральных испытаний. В результате моделирования был получен файл симуляции, который отражает процесс сверления отверстий в заготовке из полимерного композиционного материала, максимально приближенный к реальной ситуации со снятием стружки.

**Ключевые слова:** сверление композиционных материалов; композиционный материал; ВКУ-39; энергия ультразвукового поля; ультразвук; моделирование процессов сверления; цифровой двойник.

**Для цитирования:** Илюшкин М.В., Киселев Е.С. Моделирование процессов сверления заготовок из полимерных композиционных материалов путем использования цифровых двойников // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 2. С. 47–57. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-2-64-1.

### ВВЕДЕНИЕ

Многочисленными исследованиями, выполненными рядом авторов, установлено существенное различие в процессах лезвийной обработки заготовок из полимерных композиционных материалов и металлических заготовок [1–3]. Особой сложностью отличается сверление отверстий в заготовках из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных волокон [4–6], что объясняется, с одной стороны, хрупкостью и неоднородностью системы «волокна – матрица», с другой – разными условиями работы различных участков режущих кромок сверла из-за непостоянства скорости резания при съеме припусков (от нуля до максимальных значений на наружной поверхности сверла).

При сверлении отверстий в ПКМ удаление материала, в отличие от резания металлов, происходит через

серию последовательных разрывов, чему способствует разный характер и неравномерное распределение нагрузки между матрицей и волокнами [7; 8]. Такое образование стружки вызвано хрупким разрушением композиционного материала из-за зарождения и распространения трещины в зоне первичного сдвига после частичного формирования скола и вынуждает вносить соответствующие коррективы в программное обеспечение. Поскольку хрупкое разрушение является доминирующим процессом, который возникает при механической обработке композиционного материала, сегментная стружка образуется в виде «порошкообразной пыли». Однако данный тип стружки, образующийся при сверлении отверстий в ПКМ, в значительной степени зависит от свойств волокон и матрицы. В некоторых случаях может образовываться «непрерывная/сливная» стружка, как при обработке металла [9; 10]. Кроме того,

при увеличении объемной доли волокна большая часть композиционных материалов может удаляться путем последовательного разрушения из-за неравномерной пластической деформации, способствующей формированию сегментной стружки. Стоит отметить, что на тип стружки влияют входные параметры режима резания, такие как скорость резания и подача. Основным фактором, снижающим эффективность лезвийной обработки ПКМ, является абразивная природа наполнителя [11]. Обилие углеродных или других типов волокон в структуре ПКМ обеспечивает быстрый износ инструмента (преимущественно по задней поверхности). Перечисленные отличия в процессах съема припусков одновременно сопровождаются практически полным отсутствием режимов резания при обработке композиционных материалов.

Как известно, введение в зону механической обработки энергии ультразвукового (УЗ) поля способствует существенному снижению силы трения между режущим инструментом и заготовкой [12; 13]. Это не только способствует повышению производительности формообразования, но и существенно улучшает качество новых поверхностей, прежде всего за счет снижения вероятности возникновения дефектов в виде расслоения, сколов, растрескивания, термических повреждений и оплавления полимерной матрицы, микротрещин между волокном и связующим и др. [14; 15].

При проектировании новых технологических процессов, в том числе с введением в зону обработки УЗ колебаний, выбор элементов режима сверления отверстий осуществляется, как правило, эмпирическим путем. Экспериментальный подбор элементов режима сверления отличается большой трудоемкостью, высокими стоимостными и временными затратами.

Сокращения временных затрат на проектирование технологического процесса изготовления любых изделий из области машиностроения, особенно изделий из композиционных материалов, можно достигнуть, используя Computer-aided engineering (CAE) системы [16; 17]. Создание модели в CAE-системах позволяет получать информацию о напряжениях, температуре, распределении сил в зоне обработки и деформациях [18; 19].

Цель исследования – создание компьютерных моделей процессов сверления заготовок из полимерных композиционных материалов, в том числе с введением в зону формообразования новых поверхностей энергии ультразвукового поля.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Тестовые испытания

На первом этапе осуществляли тестовые испытания механических характеристик композитов. Результаты этих испытаний требовались для расчетов по математическим моделям.

В ходе исследований применялся явный метод моделирования с предварительной валидацией и калибровкой результатов тестовых испытаний композитов. Калибровка осуществлялась на тестовых операциях растяжения, трехточечного изгиба и межслойного сдвига. Для моделирования использовалась программа LS-DYNA. Подготовка моделей и обработка результатов выполнялись в программе LS-PrePost 4.8.

В качестве моделей образцов использовались вырезанные полоски из материала ВКУ-39 с размером  $240 \times 12 \times 3$  мм.

В композите моделировались 10 слоев при помощи 8-узловых толстостенных оболочных элементов с пониженным интегрированием. Размер одной ячейки композита составлял  $2 \times 2$  мм. Толщина каждого слоя – 0,3 мм.

Начальные параметры композита ВКУ-39 принимались, опираясь на работы [19; 20]. В процессе моделирования и валидации параметры корректировались в целях соответствия используемому композиту.

В качестве модели материала принимали модель композиционного ортотропного материала с разрушением.

Для удобства расчетов использовалась система единиц, отличная от системы СИ (длина в миллиметрах, время в секундах, масса в тоннах). В модели материала задавались следующие параметры [20]:

- плотность –  $1,525 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup>;
- модуль Юнга (EA, EB) –  $6,39 \cdot 10^4$  МПа;
- коэффициент Пуассона PRBA – 0,3;
- модуль сдвига – 4080 МПа.

В модели материала задавалось разрушение от действия растягивающих напряжений, а также значения разрушающих деформаций. Деформации от сжатия и сдвига были завышены, поскольку на процесс разрушения оказывают влияние только деформации растяжения.

Для моделирования клеевого слоя использовался автоматический контакт «поверхность – поверхность» с приставкой tiebreak (связной разрушаемый контакт) с дискретной моделью трещины, степенной зависимостью и моделями повреждения с величиной нормальности и сдвиговых напряжений 80 МПа и энергией разрушения 4 мДж. Данные параметры корректировались при проведении валидации процесса по тестовым испытаниям.

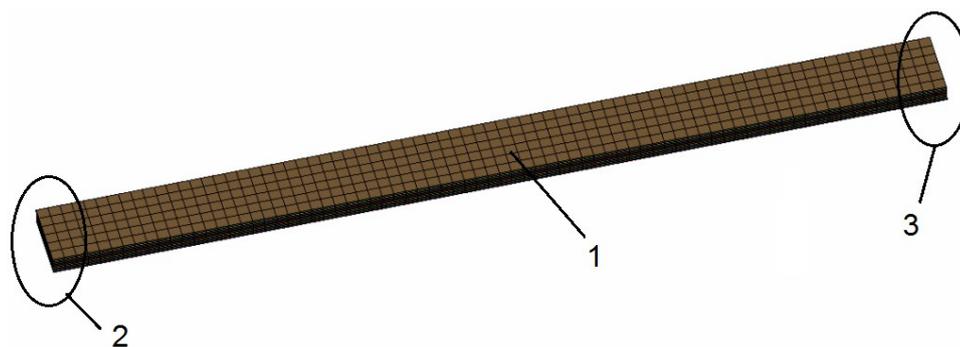
Дополнительно была рассмотрена оценка влияния на результирующий момент коэффициента трения между сверлом и композитом, изменяющегося из-за введения в зону формообразования новой поверхности УЗ поля, при величинах, равных 0, 0,1 и 0,2.

Исходные модели тестовых испытаний представлены на рис. 1, 2. На рис. 3 приведены схемы испытаний образцов из композита ВКУ-39.

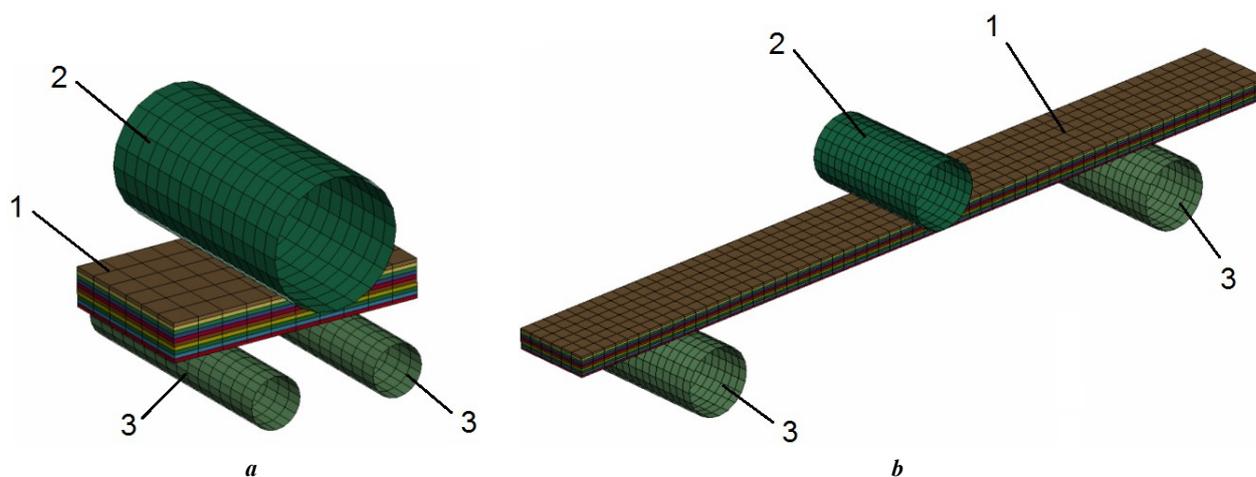
### Математическое моделирование

На втором этапе исследований уточненные параметры модели материала композита и его клеевого слоя были использованы при разработке математических моделей на основе цифровых двойников.

На втором этапе осуществлялось математическое моделирование процессов сверления заготовок из полимерного композиционного материала ВКУ-39 с введением в зону формообразования энергии УЗ поля. Основными задачами являлись отладка цифровой модели и оценка влияния воздействия УЗ колебаний при изменении амплитуды с 6 до 13 мкм, а коэффициента трения в зоне контакта инструмента с заготовкой – с 0,1 до 0,2 (значения принимали по данным многочисленных исследований 50–60-х годов прошлого века). Диапазоны изменений данных параметров представлены в таблице 1. В качестве постоянных параметров при математическом



**Рис. 1.** Модель для математического моделирования на одноосное растяжение композита:  
 1 – композит; 2 – зажимная опора; 3 – подвижная опора  
**Fig. 1.** A model for mathematical simulation of uniaxial tension of a composite:  
 1 – a composite; 2 – a gripping support; 3 – a movable support



**Рис. 2.** Модели для математического моделирования: **a** – на межслойный сдвиг; **b** – на трехточечный изгиб.  
 1 – композит, 2 – нажимной пуансон, 3 – опора  
**Fig. 2.** Models for mathematical simulation: **a** – for interlaminar shear; **b** – for three-point bending.  
 1 – a composite, 2 – a press-on force plunger, 3 – a support

моделировании процесса сверления отверстий диаметром 5 мм с использованием цифровых двойников были выбраны следующие элементы режима резания: окружная скорость резания – 3,14 м/мин, осевая подача – 0,2 мм/об. Модель сверла и композита для моделирования процесса сверления представлена на рис. 4.

За модель режущего инструмента было принято спиральное двухперое сверло диаметром 5 мм, длиной 14 мм и углом при вершине  $2\phi=140$  град. Модель представляли твердотельными элементами со сторонами 0,25–0,3 мм.

Модель заготовки из композита представляла собой цилиндр диаметром 7 мм и высотой 3 мм. По высоте модель композита включала в себя 10 слоев препрегов, связанных между собой. Каждый слой представлял собой модель, состоящую из толстостенных оболочных элементов с размерами 0,1–0,15 мм.

В качестве основной модели материала (ВКУ-39) использовалась модель композиционного ортотропного материала с разрушением.

После калибровки модели параметры испытаний были скорректированы. Разрушение модели материала задавалось также от действия растягивающих напряже-

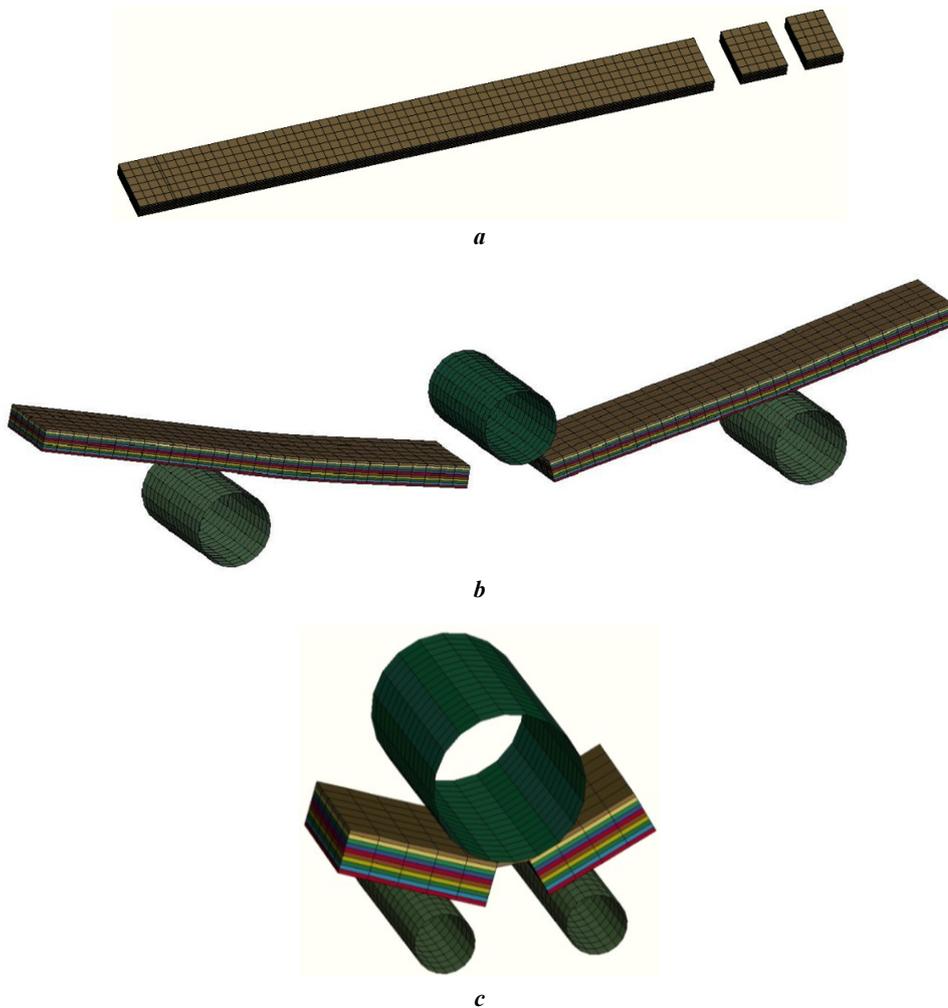
ний и составляло в продольном ( $XZ$ ) и поперечном ( $YZ$ ) направлении композита 1610 МПа. Значения разрушающих максимальных деформаций слоев композита и матрицы были увеличены до 0,032.

Использовались следующие параметры:

- нормальные напряжений разрушения клевого слоя – 0,15 МПа;
- сдвиговые напряжения разрушения клевого слоя – 1,5 МПа;
- энергия разрушения (нормальное направление) – 0,9 мДж;
- энергия разрушения (сдвиговое направление) – 0,9 мДж;
- жесткость (нормальное направление) – 6,25 МПа.

Параметры разрушения клевого слоя для связи слоев композита были определены на основе прочностных данных применяемых клеевых составов после проведения тестовых испытаний и их валидации.

С целью оценки условий контакта между сверлом и композитом, а также контактов между слоями самого композита (после разрушения клеевой связи), задавался одиночный контакт, учитывающий разрушение материала.



**Рис. 3.** Схемы испытаний: **a** – на одноосное растяжение; **b** – на трехточечный изгиб; **c** – на межслойный сдвиг композита  
**Fig. 3.** Test patterns: **a** – for uniaxial tension; **b** – for three-point bending; **c** – for interlaminar shear of a composite

**Таблица 1.** Диапазон изменений условий сверления отверстий в полимерном композиционном материале ВКУ-39 при математическом моделировании с использованием цифровых двойников  
**Table 1.** The range of variations of conditions of drilling holes in the ВКУ-39 polymer composite material during mathematical simulation using digital twins

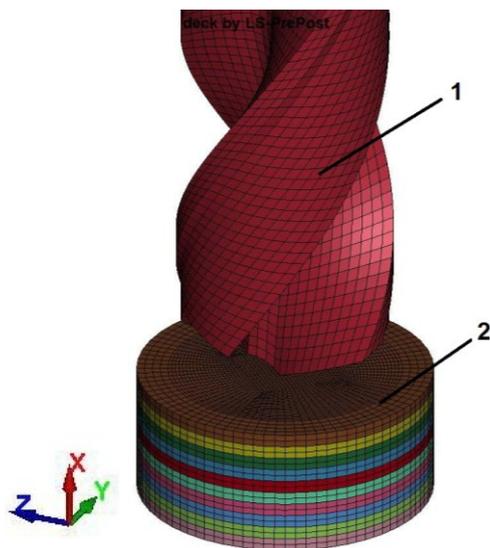
№	Величина амплитуды УЗ колебаний, мкм	Коэффициент трения
1	0	0,0
2	6	0,0
3	13	0,0
4	0	0,1
5	0	0,2

Для сохранения усилия и моментов от воздействия сверла использовалась контактная карта penalty.

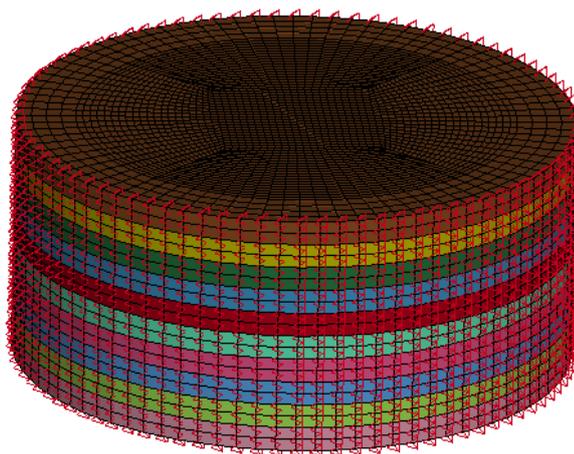
Для уменьшения времени расчета угловая скорость вращения сверла была значительно увеличена и составляла 628 рад/с. Такое увеличение допустимо при расчетах в программах динамического анализа при отсле-

живании общей энергии процесса (динамическая составляющая не должна превышать 10 % от общей энергии процесса). Осевая подача составляла 0,2 мм/об.

Закрепление заготовки композита осуществляли по наружной поверхности (рис. 4, 5) с помощью определения и ограничения узлового набора.



**Рис. 4.** Модель сверла и композита для моделирования процесса сверления: 1 – сверло, 2 – композит  
**Fig. 4.** A model of a drilling tool and a composite for simulating a drilling process: 1 – a drilling tool, 2 – a composite



**Рис. 5.** Ограничение углов по наружной цилиндрической части заготовки композита  
**Fig. 5.** Angle restriction along the external cylindrical section of a composite blank

После подготовки конечно-элементной модели в программе LS-DYNA версии 971 V10.2 выполнялся расчет с двойной точностью.

Этапы сверления композита приведены на рис. 6.

Было исследовано влияние изменений амплитуды УЗ колебаний и коэффициента трения между вращающимся сверлом и заготовкой из композита на эффективность сверления заготовок из композиционных материалов.

Наложение УЗ колебаний на инструмент осуществлялось в направлении подачи сверла (по оси X). Для этого в исходные настройки была задана функция движения. В качестве функции использовалась следующая зависимость от времени *time*:

$$0,006 \cdot \sin(125600 \cdot \text{time}) + 6 \cdot \text{time} ,$$

где параметр 0,006 – амплитуда колебаний, в данном случае равная 0,006 мм (6 мкм); параметр 125600 определялся из зависимости  $2\pi\omega$ , где  $\omega$  – частота колебаний, равная 20 кГц.

Первое слагаемое функции обеспечивало возбуждение УЗ колебаний, второе слагаемое обеспечивало подачу сверла.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты моделирования композита ВКУ-39 на одноосное растяжение, на трехточечный изгиб и на межслойный сдвиг композита представлены на рис. 7.

Начальные отличия по усилию воздействия на образцы в некоторых испытаниях находились в пределах 30–50 %. Дополнительным варьированием параметров моделей материала по максимальной деформации

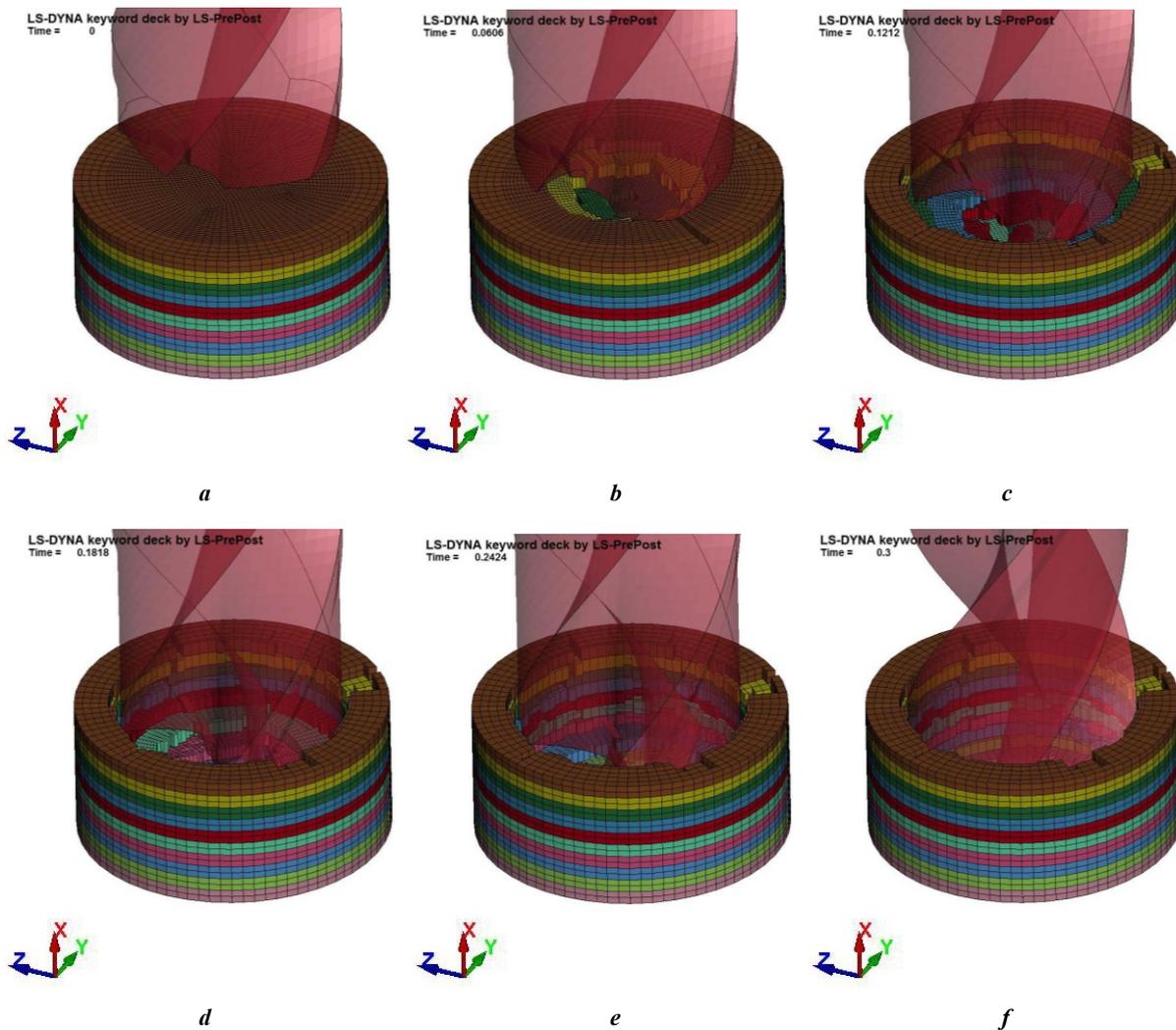


Рис. 6. Этапы сверления композита: *a* – 0 с; *b* – 0,06 с; *c* – 0,12 с; *d* – 0,18 с; *e* – 0,24 с; *f* – 0,3 с  
 Fig. 6. Composite drilling stages: *a* – 0 s; *b* – 0.06 s; *c* – 0.12 s; *d* – 0.18 s; *e* – 0.24 s; *f* – 0.3 s

растяжения и сжатия слоев композита и клеевого слоя (по нормальным и сдвиговым напряжениям и энергии разрушения) удалось добиться различия не более 10–15 %.

На рис. 8 представлен график зависимости результирующего момента от величины амплитуды ультразвука. Как видно из рис. 8, введение в зону обработки энергии ультразвуковых колебаний частотой 20 кГц и амплитудой 6 мкм уменьшает пиковый результирующий момент с 860 до 515 Н·мм. Сверление отверстий с введением ультразвука амплитудой 13 мкм позволяет уменьшить пиковый момент до 430 Н·мм.

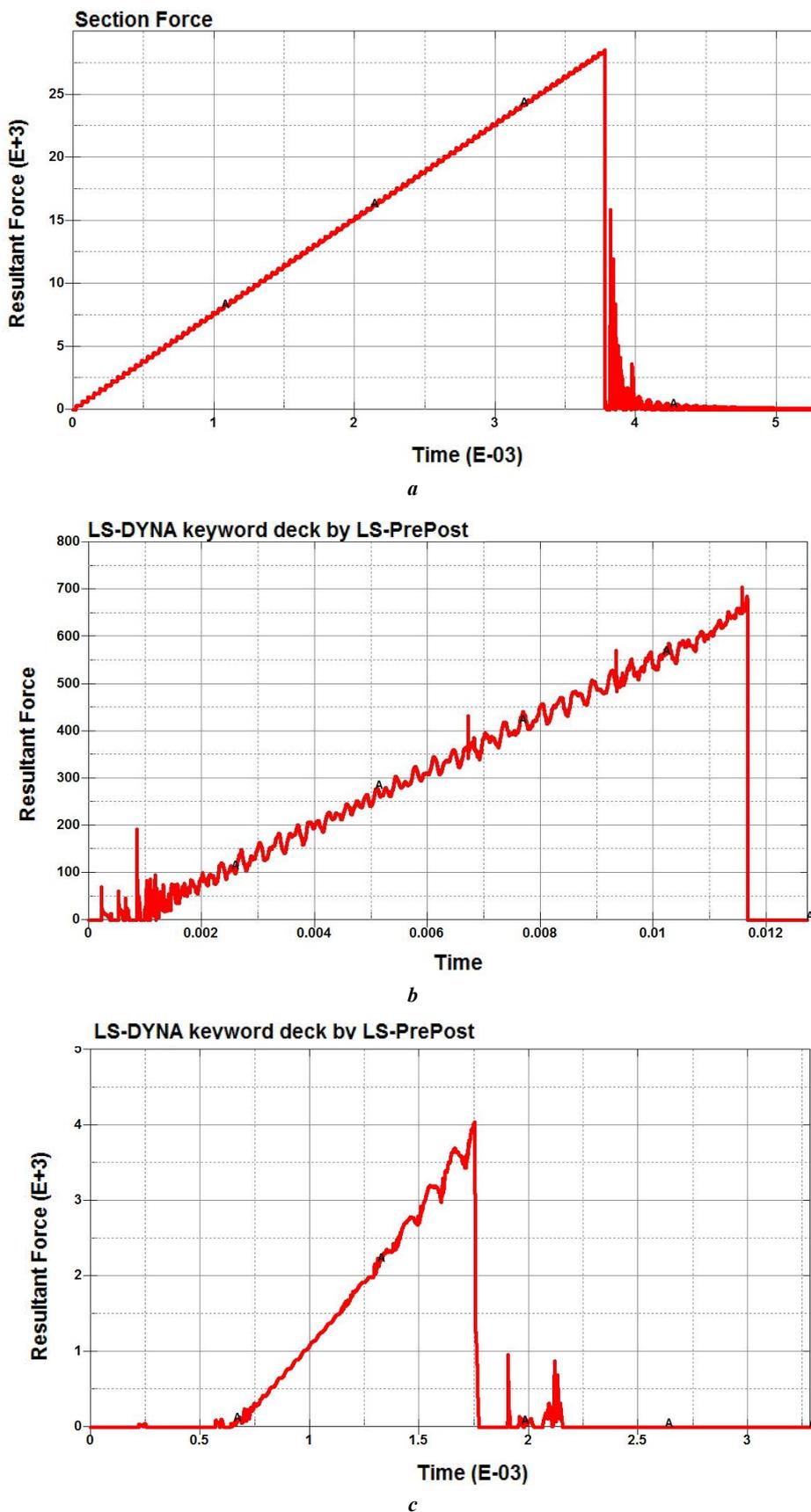
На рис. 9 представлен график зависимости результирующего момента от величины коэффициента трения. Как видно из представленных результатов, при коэффициенте трения, равном 0,2, пиковый результирующий момент составляет 1680 Н·мм. Уменьшение коэффициента трения до 0,1 снижает результирующий момент до 1250 Н·мм. При коэффициенте трения, равном нулю (0), результирующий момент уменьшается до минимального значения в 810 Н·мм.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

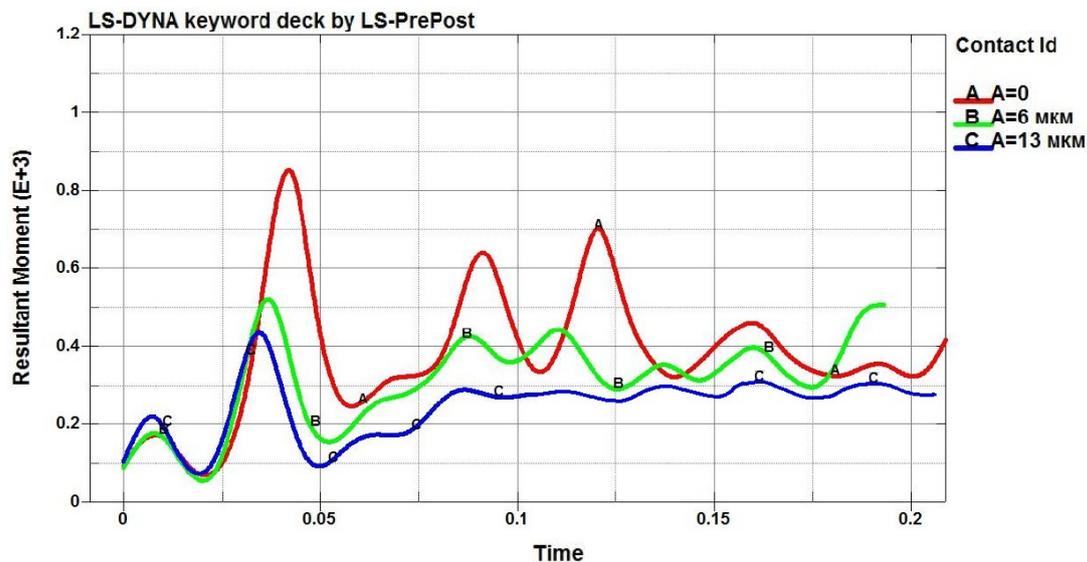
По результатам проведенного исследования можно утверждать, что снижение коэффициента трения при действии ультразвука однозначно приводит к уменьшению результирующего момента.

Выполненные численные исследования доказывают, что использование полученных результатов позволяет существенно сократить длительность или полностью ликвидировать необходимость проведения экспериментальных исследований и натурных испытаний для оценки влияния элементов режима резания и конструктивных параметров режущего инструмента на силовые и энергетические аспекты формообразования обработанных поверхностей деталей из композиционных материалов типа ВКУ-39. В свою очередь, это позволит существенно сократить затраты на технологическую подготовку производства изделий из композиционных материалов, что означает достижение поставленной цели.

Общезвестно, что введение энергии УЗ колебаний в зону обработки приводит к уменьшению коэффициента



**Рис. 7.** Результаты моделирования композита ВКУ-39: *a* – на одноосное растяжение; *b* – на трехточечный изгиб; *c* – на межслойный сдвиг композита ВКУ-39. По ординате усилие в Н, по абсциссе время в с  
**Fig. 7.** The results of simulating the BKV-39 composite: *a* – for uniaxial tension; *b* – for three-point bending; *c* – for interlaminar shear of BKV-39 composite. In y-direction, a force in N is shown, in x-direction – time in s

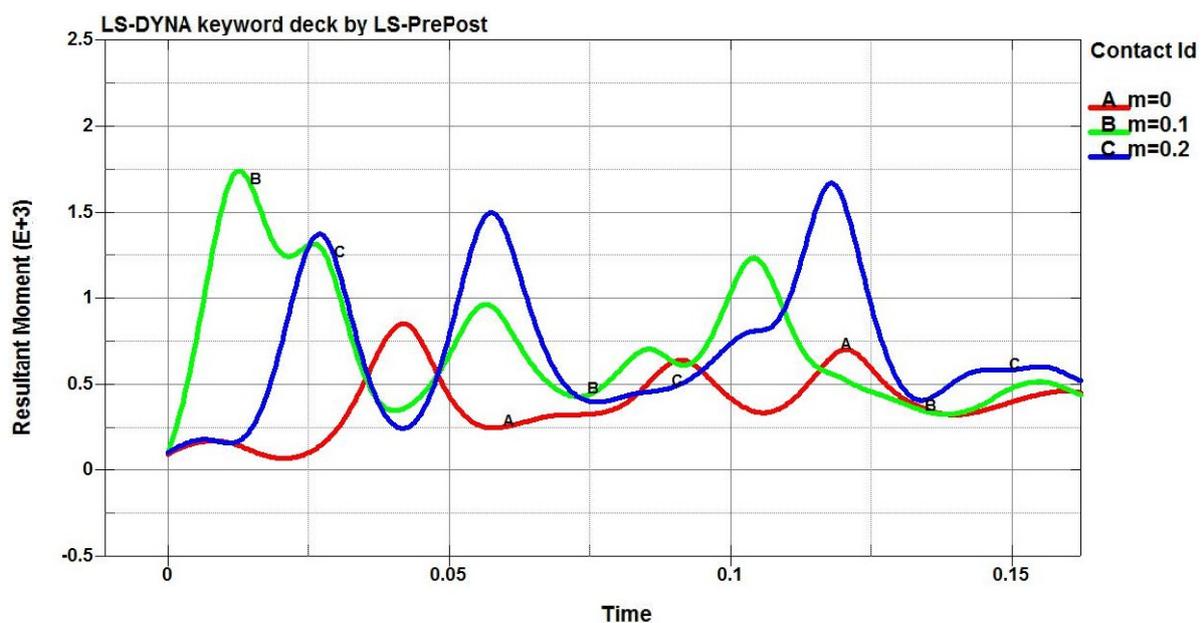


**Рис. 8.** Зависимость результирующего момента от величины амплитуды при подаче ультразвука.

На графике: A – без ультразвука; B – ультразвук с амплитудой 6 мкм; C – ультразвук с амплитудой 13 мкм

**Fig. 8.** The dependence of a resultant moment on the amplitude value when applying ultrasound.

In the graph: A – without ultrasound; B – ultrasound with an amplitude of 6 micron; C – ultrasound with an amplitude of 13 micron



**Рис. 9.** Зависимость результирующего момента от коэффициента трения ( $m$ ) между сверлом и композитом

**Fig. 9.** The dependence of a resultant moment on the ratio of friction ( $m$ ) between a drilling tool and a composite

трения между вращающимся инструментом и обрабатываемой металлической заготовкой [12; 13].

Визуально установлено, что введение в зону формообразования новых поверхностей энергии ультразвукового поля благоприятно сказывается на повышении качества поверхностного слоя деталей из полимерных композиционных материалов, а также способствует уменьшению энергозатрат на процессы резания и износа режущего инструмента. Последнее позволяет существенно повысить производительность обработки заготовок из подобных материалов и снизить себестоимость изготовления деталей из них.

Для полной верификации численных исследований процессов резания заготовок из других ПКМ на основе углеродных волокон необходимо продолжить экспериментальную проверку на типовых представителях существующих классов композиционных материалов. Результаты проверки после внесения соответствующих коррективов в расчетные данные, вероятно, позволят расширить области использования цифровых двойников для моделирования процессов сверления заготовок из других классов полимерных композиционных материалов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты исследований доказывают, что разработанные компьютерные модели процессов сверления заготовок из слоистых полимерных композиционных материалов, в том числе с введением в зону формообразования новых поверхностей энергии ультразвукового поля, адекватны натурным испытаниям при апробации выбранных элементов режима резания, режущих инструментов и других условий механической обработки. Учитывая, что использование цифровых двойников для выполнения данного этапа технологической подготовки производства в условиях действующих предприятий не связано с дорогостоящей эксплуатацией станочного парка, следует ожидать существенного снижения себестоимости изготовления узлов и деталей из подобных материалов в промышленности, прежде всего в мелкосерийном и единичном производстве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселев Е.С., Благовский О.Г. Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей. СПб.: ЛАНЬ, 2020. 140 с.
2. Киселев Е.С., Назаров М.В. Особенности технологии изготовления нежестких корпусных деталей. М.: РУСАЙНС, 2022. 218 с.
3. Иванов Ю.Н., Чапышев А.П., Каверзин Е.А. Экспериментальное исследование влияния теплового расширения обрабатываемых материалов при сухом сверлении отверстий в пакетах структуры «полимерный композиционный материал – титановый сплав» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 10. С. 36–42. EDN: [RGSXJV](#).
4. Иванов Ю.Н. Сверление отверстий в смешанных пакетах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1-5. С. 1402–1406. EDN: [TJFAFL](#).
5. Дударьков Ю.И., Левченко Е.А., Лимонов М.В., Шевченко А.В. Расчетные исследования влияния некоторых видов эксплуатационно-технологических повреждений на несущую способность стрингерных панелей из ПКМ // Труды МАИ. 2019. № 106. С. 2–39. EDN: [NLSATO](#).
6. Ефременков И.В., Полянков Ю.В. Математическое моделирование динамического взаимодействия твердого тела с окружающим его пространством в программном комплексе LS-DYNA // Universum: Технические науки. 2019. № 6. С. 6–8. EDN: [JKSOT](#).
7. Дударев А.С., Добринский А.Г. Эффективность вибрационного сверления полимерных композиционных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2019. Т. 21. № 4. С. 42–48. DOI: [10.15593/2224-9877/2019.4.05](#).
8. Колесник В.А., Криворучко Д.В., Мужецкий А.И. О влиянии ориентации волокон на механизм разрушения волокнистых полимерных композиционных материалов // Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. 2012. № 2. С. 55–59.
9. Колесник В.А., Криворучко В.А., Евтухов В.Г. О формировании микрорельефа обработанной резанием поверхности волокнистых полимерных композиционных материалов // Технологические системы. 2013. № 64. С. 60–69.
10. Воробьев Ю.А., Николаенко А.И., Воробьев А.Ю. Анализ исследований по сверлению смешанных пакетов их композиционных материалов и титановых сплавов // Авиационно-космическая техника и технологии. 2008. № 2. С. 32–38.
11. Чашин Н.С., Иванов Ю.Н. Обработка отверстий в смешанных пакетах методом орбитального сверления // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 11. С. 44–49. EDN: [VAUELX](#).
12. Чашин Н.С., Иванов Ю.Н., Сидорова А.В., Семенов Е.Н., Стуров А.А. Исследование технологии обработки отверстий малых диаметров в полимерном композиционном материале на робототехническом комплексе // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 6. С. 39–48. DOI: [10.21285/1814-3520-2017-6-39-48](#).
13. Чигринцев Е.Г., Родригес С.Б., Заборотный Д.И., Чотчаева С.К. Численное моделирование температурных полей в полимерном композите // Труды МАИ. 2021. № 116. С. 17–48. DOI: [10.34759/trd-2021-116-17](#).
14. Чигринцев Е.Г. Оптимизация процесса сверления армированного титаном стеклопластикового лонжерона лопасти несущего винта вертолета // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 177–188. EDN: [VPEKQD](#).
15. Hocheng H., Puw H.Y. On drilling characteristics of fiber-reinforced thermoset and thermoplastics // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1992. Vol. 32. № 4. P. 583–592. DOI: [10.1016/0890-6955\(92\)90047-K](#).
16. Dudarev A.S., Gumarov E.Kh. Study of thermophysics during diamond drilling of fiberglass and carbon fibre-reinforced polymer composites // Proceedings of Irkutsk state technical university. 2021. Vol. 25. № 3. P. 290–299. DOI: [10.21285/1814-3520-2021-3-290-299](#).
17. Савельев К.С., Илюшкин М.В., Киселев Е.С. Использование цифровых двойников для математического моделирования ультразвукового сверления титановых заготовок // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 42–54. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-1-42-54](#).
18. Киселёв Е.С., Илюшкин М.В., Савельев К.С. Компьютерное моделирование процессов резания заготовок из труднообрабатываемых материалов с использованием цифровых двойников // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 7. С. 29–40. DOI: [10.30987/2223-4608-2021-7-29-40](#).
19. Nguyen T.A., Tran T.T. Drilling Modelling Using Computer Simulation // International Journal Of Scientific & Technology Research. 2020. Vol. 9. № 10. P. 171–174.
20. Vajdi M., Moghanlou F.S., Sharifianjazi F., Asl M.S., Shokouhimehr M. A review on the COMSOL Multiphysics studies of heat transfer in advanced ceramics // Journal of Composites and Compounds. 2020. Vol. 2. № 2. P. 35–43. DOI: [10.29252/jcc.2.1.5](#).

## REFERENCES

- Kiselev E.S., Blagovskiy O.G. *Upravlenie formirovaniem ostatochnykh napryazheniy pri izgotovlenii otvetstvennykh detaley* [Controlling the formation of residual stresses when producing critical parts]. Sankt Petersburg, LAN Publ., 2020. 140 p.
- Kiselev E.S., Nazarov M.V. *Osobennosti tekhnologii izgotovleniya nezhestkikh korpusnykh detaley* [Special aspects of the technology of manufacturing non-rigid body parts]. Moscow, RUSAYNS Publ., 2022. 218 p.
- Ivanov Yu.N., Chapyshev A.P., Kaverzin E.A. Experimental study of thermal expansion effect of machined materials under dry drilling of holes in packages of “polymeric composite material–titanium alloy” structure. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 10, pp. 36–42. EDN: [RGSXJV](#).
- Ivanov Yu.N. Drilling the holes in the mixed packets. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 1-5, pp. 1402–1406. EDN: [TJFAFL](#).
- Dudarkov Yu.I., Levchenko E.A., Limonov M.V., Shevchenko A.V. Computational studies of some types of operational and technological damages impact on bearing capacity of stringer panels made of composite fiber reinforced plastic. *Trudy MAI*, 2019, no. 106, pp. 2–39. EDN: [NLSATO](#).
- Efremenkov I.V., Polyanskov Yu.V. Mathematical modeling of the dynamic interaction of a solid with its surrounding space in the LS-DYNA software package. *Universum: Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 6, pp. 6–8. EDN: [JKSOT](#).
- Dudarev A.S., Dobrinskiy A.G. Efficiency of vibration drilling polymer composite materials. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 42–48. DOI: [10.15593/2224-9877/2019.4.05](#).
- Kolesnik V.A., Krivoruchko D.V., Muzhetskii A.I. Concerning the influence of fiber orientation on the fracture mechanism of fibrous polymer composites. *Nauchnyy Vestnik Donbasskoy gosudarstvennoy mashinostroitel'noy akademii*, 2012, no. 2, pp. 55–59.
- Kolesnik V.A., Krivoruchko V.A., Evtukhov V.G. The microrelief formation of fibre reinforced plastic machined surface. *Tekhnologicheskie sistemy*, 2013, no. 64, pp. 60–69.
- Vorobev Yu.A., Nikolaenko A.I., Vorobev A.Yu. Analysis of researches on drilling the mixed stacks from composite and titanium alloys. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2008, no. 2, pp. 32–38.
- Chashchin N.S., Ivanov Yu.N. Orbital drilling of holes in mixed packages. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 11, pp. 44–49. EDN: [VAUELX](#).
- Chashchin N.S., Ivanov Yu.N., Sidorova A.V., Semenov E.N., Sturov A.A. Studying the technology of small diameter hole-making in polymer composites by a robotic system. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 39–48. DOI: [10.21285/1814-3520-2017-6-39-48](#).
- Chigrinets E.G., Rodrigues S.B., Zaborotniy D.I., Chotchaeva S.K. Numerical modelling of thermal fields in a polymer composite. *Trudy MAI*, 2021, no. 116, pp. 17–48. DOI: [10.34759/trd-2021-116-17](#).
- Chigrinets E.G. Titanium-reinforced glass fiber plastic main rotor blade beam drilling process optimization. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 177–188. EDN: [VPEKOD](#).
- Hocheng H., Puw H.Y. On drilling characteristics of fiber-reinforced thermoset and thermoplastics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1992, vol. 32, no. 4, pp. 583–592. DOI: [10.1016/0890-6955\(92\)90047-K](#).
- Dudarev A.S., Gumarov E.K. Study of thermophysics during diamond drilling of fiberglass and carbon fibre-reinforced polymer composites. *Proceedings of Irkutsk state technical university*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 290–299. DOI: [10.21285/1814-3520-2021-3-290-299](#).
- Savelev K.S., Ilyushkin M.V., Kiselev E.S. Use of digital twins for mathematical modeling of ultrasonic drilling of titanium blanks. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 42–54. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-1-42-54](#).
- Kiselev E.S., Ilyushkin M.V., Savelev K.S. Computer simulation of hard-to-machine billet cutting using digital twins. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2021, no. 7, pp. 29–40. DOI: [10.30987/2223-4608-2021-7-29-40](#).
- Nguyen T.A., Tran T.T. Drilling Modelling Using Computer Simulation. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 2020, vol. 9, no. 10, pp. 171–174.
- Vajdi M., Moghanlou F.S., Sharifianjazi F., Asl M.S., Shokouhimehr M. A review on the COMSOL Multiphysics studies of heat transfer in advanced ceramics. *Journal of Composites and Compounds*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 35–43. DOI: [10.29252/jcc.2.1.5](#).

## Simulation of the processes of drilling polymer composite blanks using digital twins

© 2023

*Maksim V. Ilyushkin*<sup>1,3</sup>, PhD (Engineering), Deputy Director  
*Evgeny S. Kiselev*<sup>\*2,4</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Professor

<sup>1</sup>*Ulyanovsk Research Institute of Aviation Technology and Production Organization, Ulyanovsk (Russia)*

<sup>2</sup>*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)*

\*E-mail: [kec.ulstu@mail.ru](mailto:kec.ulstu@mail.ru)

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3335-728X>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

Received 08.02.2023

Accepted 28.04.2023

**Abstract:** Polycrystalline composite materials made of carbon fiber reinforced plastics have more and more widespread application in mechanical engineering and become the main material for the production of modern types of high-speed transport. Thus, their share has already reached 35–45 % in the structural design of passenger aircrafts. However, the technology of machining surfaces of parts made of these materials, in particular, holes, is characterized by insufficient knowledge, the absence of regulatory standards for cutting modes and is most often based on the production experience of enterprises. When changing the processing conditions and the material, the pre-production engineering duration causes a significant increase in the cost of manufacturing parts due to the need for experimental selection of the cutting mode rational elements. To exclude the empirical selection of rational elements of the machining equipment cutting mode, the authors considered the possibility of using digital twins for studying the processes of drilling holes in the blanks made of composite materials, including those with the ultrasonic field energy introduction into the new surface shaping zone (to improve the processing quality and productivity). When modeling, the LS-DYNA program was used. The authors prepared the models and processed the results using the LS-PrePost 4.8 program. During the study, an explicit modeling method was used with preliminary validation and calibration of the results of tests of composites. The authors carried out calibration on test operations of tension, three-point bending, and interlaminar shear of the BKY-39 polymer composite material based on carbon fibers (carbon fiber reinforced plastic) widely used in domestic engineering. The developed finite element computer models allow simulating drilling procedures without carrying out rather complicated and expensive field tests. As a result of modeling, a simulation file was obtained, which reflects the process of drilling holes in a polymer composite material blank, as close as possible to the real-life situation with chip removal.

**Keywords:** drilling of composite materials; BKY-39; ultrasonic field energy; ultrasound; drilling process simulation; digital twin.

**For citation:** Ilyushkin M.V., Kiselev E.S. Simulation of the processes of drilling polymer composite blanks using digital twins. *Frontier Materials & Technologies*, 2023, no. 2, pp. 47–57. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-2-64-1.