

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №8 (146). С.3-11.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №8 (146). P. 3-11.

Научная статья
УДК 536:621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-11

Компьютерное моделирование процесса сверления сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала с использованием цифровых двойников

Евгений Степанович Киселев¹, д.т.н.
Максим Валерьевич Илюшкин², к.т.н.

¹ Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия;

² Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства, Ульяновск, Россия

¹ kec.ulstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

² fzbm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3335-728X>

Аннотация. Сложные пакеты из поликристаллических композитных материалов на основе углепластиков и титановых сплавов находят все более широкое распространение в конструкциях изделий машиностроения и становятся основным материалом при производстве современных видов скоростного транспорта. 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 материалов сложных пакетов длительность технологической подготовки производства становится причиной существенного увеличения себестоимости изготовления узлов и 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 процессов сверления отверстий в заготовках из данных материалов, в том числе, с введением в зону формообразования новых поверхностей энергии ультразвукового поля с целью повышения качества обработанных поверхностей, производительности обработки и сокращения технологической подготовки производства на этапе подбора элементов режима резания взамен апробации выбранных условий обработки на действующем технологическом оборудовании. При моделировании использовалась программа LS-DYNA. Подготовка моделей и обработка результатов выполнялась в программе LS-Prepost 4.8. В процессе исследований применяли явный метод моделирования с предварительной валидацией. Исследованиями установлено, что разработанные конечно-элементные модели позволяют имитировать технологические процессы одновременного сверления пакетов титанового сплава и композиционного материала в компьютере (цифровой двойник) без проведения достаточно сложных и затратных натурных испытаний. В результате моделирования был получен расчетный файл, содержащий процесс симуляции, решение которого визуально отражает процесс сверления отверстий в заготовках из сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала, максимально приближенный к реальной ситуации со снятием стружки. Так как использование цифровых двойников для выполнения данного этапа технологической подготовки производства в условиях действующих предприятий не связано с длительной и 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.

Ключевые слова: сложный пакет, титановый сплав, композиционный материал, сверление, ультразвук, моделирование, цифровой двойник, качество поверхности

Для цитирования: Киселев Е.С., Илюшкин М.В. Компьютерное моделирование процесса сверления сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала с использованием цифровых двойников// Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-11

Computer simulation technique for drilling process of titanium alloy and composite material complex packages using digital twins

Evgeniy S. Kiselev¹, D. Eng.
Maxim V. Ilyushkin², PhD. Eng.

¹ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia;

² Ulyanovsk Research Institute of Aviation Technology and Production Organization, Ulyanovsk, Russia

¹ kec.ulstu@mail.ru,

² fzbm@mail.ru

Abstract. Complex packages of polycrystalline composite materials based on carbon fiber plastics and titanium alloys find wide application in the designs of machine-building products and become the main material in the production of high-speed modern transport modes. However, the technology of machining parts surfaces made of these materials, namely holes, is characterized by insufficient knowledge, lack of standards for cutting modes and is based more often on the production experience of enterprises. When machining conditions and materials of complex packages change, the duration of technological preparation of production causes a significant increase in the cost of manufacturing components and parts due to the need for competent selection of rational elements of the cutting mode. To exclude the empirical fit of rational elements of the cutting mode on machining facility, the possibility of using digital twins of drilling processes in workpieces made of these materials is studied. It also implies the introduction of ultrasonic field energy into new surfaces generation of geometry in order to improve the quality of the machining area production efficiency and reduction of technological preparation of production based on the selection of elements of the cutting mode instead of testing the selected machining conditions using the existing technological equipment. The LS-DYNA program was used in the simulation process. Preparation of models and data process was carried out in the LS-Prepost 4.8 program. In the course of research, an explicit simulation technique with preliminary validation was used. Studies proved that the developed finite element models allow simulating the technological processes of simultaneous drilling of packages of titanium alloy and composite material in a computer (digital twin) without conducting sufficiently complex and costly field tests. Generated by simulation, a calculation sheet was obtained containing the simulation process, the solution of which visually reflects the process of drilling holes in workpieces made of complex packages of titanium alloy and composite material, as close as possible to the real situation with chip removal. Since the use of digital twins for performing this stage of technological preparation of production in the conditions of existing enterprises is not associated with a long and expensive operation of machine-tool fleet, we should expect a significant reduction in the cost of manufacturing components and parts from similar materials in industry, primarily in small-scale or single-part production.

Keywords: complex package, titanium alloy, composite material, drilling, ultrasound, simulation, digital twin, surface quality

For citation: Kiselev E.S., Ilyushkin M.V. Computer simulation technique for drilling process of titanium alloy and composite material complex packages using digital twins / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-11

Введение

Все возрастающий рост уровня спроса композиционных материалов в машиностроении влечет за собой необходимость разработки эффективных технологий для их обработки. Одним из основных видов применения таких материалов, в частности полимерных композиционных материалов (ПКМ), является их использование при изготовлении конструктивных элементов продукции авиационной промышленности. Это происходит за счёт уникальных свойств таких материалов – малой плотности и высокой прочности.

Расчетные данные, подтвержденные результатами экспериментальных исследований, показывают, что использование композиционных материалов позволяет снизить массу планера летательного аппарата на 30...40 % по сравнению с массой планера из традиционных металлических материалов. Все это обеспечивает получение резерва массы, который может быть использован для увеличения дальности полета или полезной нагрузки.

Использование композиционных материалов в авиационной промышленности существенно снижает материалоемкость конструкций, увеличивает до 90 % коэффициент

использования материала, уменьшает количество оснастки и резко снижает трудоемкость изготовления конструкций за счет уменьшения в несколько раз количества входящих в них деталей. Компоненты, состоящие из композиционных материалов, производятся, практически, в окончательной форме, но в процессе соединения их с титановыми или алюминиевыми кронштейнами механическая обработка неизбежна. Сверление является наиболее частой операцией для получения конструктивных отверстий, используемых для соединения между собой деталей самолёта посредством специального крепежа, применяемого в авиации. Проблемы, возникающие при сверлении, могут привести к отказу компонентов летательного аппарата (ЛА). Расслоение является одним из наиболее негативных повреждений, т. к. оно приводит к резкому снижению механических свойств узла самолёта и, бесспорно, к снижению его надежности в эксплуатации. В большинстве случаев ПКМ, применяемые в авиастроении используются в совокупности с другими материалами, образуя сложный пакет, состоящий из нескольких слоёв. В основном в состав таких соединений, кроме ПКМ, входят титан или алюминий. Как правило, из алюминиевых и титановых сплавов изготавливают детали силового каркаса планера и обводообразующие элементы.

Количество разнородных материалов в пакетах обычно не превышает трех (титановый сплав, алюминиевый сплав, КМ), а суммарное количество слоев ПКМ может достигать пяти и более. Состав сложного пакета и последовательность расположения слоев зависит от конструктивных особенностей и назначения соединяемых деталей. Составляющие элементы таких многослойных пакетов обладают различными физико-механическими свойствами (например, низкой теплопроводностью и склонностью к адгезии титановых сплавов, ярко выраженной анизотропией свойств ПКМ и др.). Поэтому в процессе механической обработки возникают дефекты: расслоение, деструкция, несрезанные волокна, вырывы, оплавление полимерной матрицы, изменение формы отверстий, их разбивка, образование прижогов на обработанных поверхностях и т. п. В свою очередь, снижение качества отверстий может привести к высоким контактным нагрузкам, снижению ресурса и разрушению соединений в сложных пакетах.

На сегодняшнее время в авиационной промышленности обозначена конкретная проблема, заключающаяся в необходимости повышения эффективности процессов лезвийной механической обработки как ПКМ, так и сочетания композиционных материалов с титановыми сплавами в различных конструкциях. Объяснением могут являться следующие причины:

– ПКМ и титановые сплавы входят в число труднообрабатываемых материалов, которые требуют использования специальных режимов резания и дорогостоящего режущего инструмента, период стойкости которого значительно ниже, чем при обработке других материалов. С учетом повышенного износа, расход инструмента значительно увеличивается, следовательно, увеличивается и конечная стоимость продукции [1];

– получение отверстий в сложных пакетах в большинстве случаев является окончательным видом обработки, которая необходима для последующих сборочных операций, а именно соединения ПКМ и титанового сплава между собой. Учитывая высокие требования к таким отверстиям и характеру соединения слоев между собой, можно сделать вывод о том, что цена ошибки на заключительной операции крайне высока.

Титановые сплавы и ПКМ существенно отличаются по технологии производства, природе достижения механических свойств и структурному построению, что усложняет выбор способов соединений данных материалов между собой.

Процесс получения отверстий в сложных пакетах, состоящих из титановых сплавов и композиционных материалов, является сложной задачей. Это обусловлено различными требованиями к режиму резания, в том числе, практически, при полном отсутствии нормативной информации по их обработке. Поэтому для решения таких задач необходим поиск нестандартного технологического решения.

Направлениями, способными повысить производительность и уменьшить себестоимость изготовления, могут быть:

– уменьшение машинного времени за счет интенсификации элементов режима резания вследствие рационального выбора материала и геометрии режущего инструмента, снижения затрат на трение в контактных зонах режущего

инструмента и заготовки за счет введения в зону формообразования энергии внешних энергетических полей, например ультразвука;

– сокращение затрат на технологическую подготовку производства (ТПП);

– повышения жесткости технологической системы и др.

Использование цифровых двойников процессов сверления отверстий в заготовках из сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала, том числе – с введением в зону формообразования новых поверхностей энергии ультразвукового (УЗ) поля взамен натурной апробации возможных сочетаний элементов режима резания позволит сократить длительность ТПП и затраты на их проведение на действующем оборудовании. Для моделирования в данной работе использовалась программа LS-DYNA [2, 3], подготовка моделей и обработка результатов выполнялась в программе LS-Prepost 4.8 [3].

Материалы и методы

Для уменьшения времени расчета применяли упрощенную сеточную геометрию сверла. С этой целью от полного сверла оставляли только режущую кромку (рис. 1). Данный подход допустим и не вводит большую

погрешность при наличии сколотой стружки, которая в данном случае характерна для применяемых материалов.

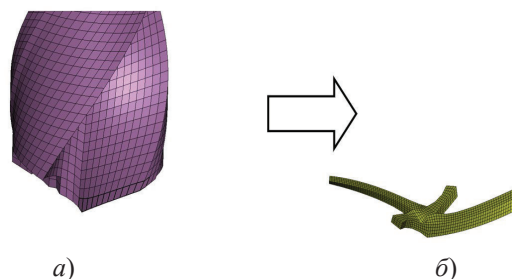


Рис. 1. Упрощение сверла от полной модели (а) до режущей кромки (б)

Fig. 1. Facilitation of the drill from the complete model (a) to the cutting edge (b)

В принятой модели использовались следующие кинематические параметры движения сверла:

– окружная скорость вращения сверла в модели составляла 942 рад/с или 150 об/с;

– осевая подача сверла составила 0,15 мм/об.

Для заготовки использовался пакет «металл – композит – металл».

В качестве металла использовался титановый сплав ВТ6, материала композита – ВКУ-39.

В пакете моделировались 12 слоев (табл. 1).

1. Состав пакета из слоев, марок и моделей материалов

1. Package composition of layers, grades and models of materials

Слой	Материал	Толщина, мм	Марка материала	Модель материала в программе LS-DYNA
1 слой	Металл	1,5	ВТ6	MAT JOHNSON COOK
2...11 слой	Композит	0,15*	ВКУ-39	054/055MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE
12 слой	Металл	1,5	ВТ6	MAT_JOHNSON_COOK

* – толщина слоя препрега

Металл моделировался при помощи восьмиузловых объемных элементов с пониженным интегрированием. Композит моделировался также при помощи восьмиузловых

толстостенных оболочных элементов с пониженным интегрированием. Размеры сеточных ячеек модели представлены в табл. 2, положение зон представлено на рис. 2.

2. Размеры сеточных ячеек модели

2. Model grid cell sizes

Материал	Сетка под сверлом (зона 1*)	Сетка в зоне окружной части сверла (зона 2*)	Сетка вне зоны сверла (зона 3*)
Металл и композит	0,15×0,15×0,15	0,06×0,15×0,15	0,6×0,15×0,15

* – согласно рис. 2

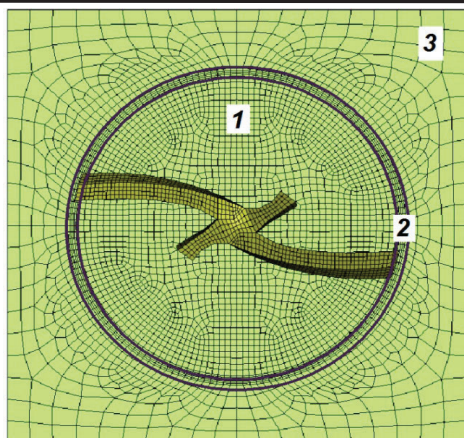


Рис. 2. Сеточная модель сверления пакета с сеткой различной величины:

1 – сетка заготовки, перекрываемая сверлом; 2 – сетка заготовки в зоне окружной части сверла; 3 – сетка вне зоны сверла

Fig. 2. Grid model of drilling a package with a grid of various sizes:

1 – the pattern of the workpiece overlapped by the drill; 2 – the pattern of the workpiece in the zone of the circular part of the drill; 3 – the pattern outside the drill area

Сетка, перекрываемая сверлом (зона 1), будет полностью удаляться в процессе сверления, ее размеры приняты в виде средней величины 0,15 мм по всем сторонам. Данная величина принята после многократных тестовых испытаний на сеточную зависимость. Большая сетка не позволит адекватно отобразить разрушение элементов модели, а использование более мелкой сетки приводит к увеличению времени расчета.

Сетка заготовки в зоне окружной части сверла (зона 2) будет удалена частично, ее величина непосредственно влияет на качество отверстия после сверления и на возникновения дефекта деламинации слоев композита. Предварительно размер сетки уменьшен с 0,15 по 0,06 мм и в зависимости от величины отхода композитных слоев. Размер сетки может быть уменьшен еще больше.

Сетка в зоне 3, находящаяся вне действия сверла (его контактной части), увеличена до 0,6 мм, что сделано для уменьшения времени расчета. С целью обеспечения более точного анализа остаточных напряжений в металле и деламинационных эффектов в композите имеется переходная сеточная зона 2 – в зоне окружной части сверла (см. рис. 2).

В качестве модели материала сверла принимали недеформируемый материал со свойствами быстрорежущей стали и возможностью перемещение и вращения вокруг вертикальной оси Z.

Для удобства расчетов использовалась система единиц несколько отличная от системы СИ (длина в миллиметрах, время в секундах, масса в тоннах).

За модель материала титанового сплава VT6 принимали модель Джонсона Кука с разрушением [4, 5]. Параметры материала приведены в табл. 3.

3. Параметры модели материала 015_MAT_JOHNSON_COOK для VT6

3. Material model parameters 015_MATT_JOHNSON_COOK for VT6

Плотность	$4,443 \times 10^{-6}$ кг/мм ³ ;
Модуль Юнга	$1,138 \times 10^5$ МПа
Коэффициент Пуассона	0,34
Параметры пластичности:	
<i>A</i>	968 МПа
<i>B</i>	380 МПа
<i>N</i>	0,421
<i>C</i>	0,0197
<i>M</i>	0,577
Параметры разрушения:	
<i>D1</i>	0,5

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

В модели материала задавались следующие параметры, представленные в табл. 4 [6, 7].

4. Параметры модели материала 054/055_MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE
для ВКУ-39

4. Material Model parameters 054/055_MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE
for VKU-39

Плотность	$1,525 \times 10^{-6}$ кг/мм ³ ;
Модуль Юнга (<i>E_A</i> , <i>E_B</i>)	$6,39 \times 10^4$ МПа
Коэффициент Пуассона	0,3
Модуль сдвига	4080 МПа

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

Для связи между слоями (моделирование клеевого слоя) использовался автоматический контакт поверхность – поверхность с

приставкой tiebreak (связной разрушаемый контакт) и с дискретной моделью трещины, степенной зависимостью и моделями повреждения, основные параметры также были взяты из работы [7] на основе прочностных данных применяемых клеевых составов после проведения тестовых испытаний и их валидации. Были использованы следующие параметры, представленные в табл. 5.

5. Параметры клеевого слоя

5. Parameters of the adhesive layer

Нормальные напряжения разрушения клеевого слоя	0,15 МПа;
Сдвиговые напряжения разрушения клеевого слоя	1,5 МПа;
Энергия разрушения (нормальное направление)	0,9 мДж;
Энергия разрушения (сдвиговое направление)	0,9 мДж;
Жесткость (нормальное направление)	6,25 МПа.

За модель режущего инструмента была принята режущая кромка спирального двухперого сверла диаметром 10 мм и углом при вершине $2\phi = 140^\circ$. Модель представляли твердотельными элементами со сторонами 0,12...0,14 мм.

Модель пакета представляла собой набор из слоев материала, содержащих металлическую пластину 2 (рис. 3), 10 слоев композита 3 и металлическую пластину 4. Общие размеры модели составляли 15×15×4,5 мм. Все слои модели были связаны между собой, что имитировало клеевое соединение. Модель заготовки представлена в прямоугольной виде для упрощения установки ограничений. На четыре боковых поверхности модели заготовки были введены ограничения по всем шести степеням свободы.

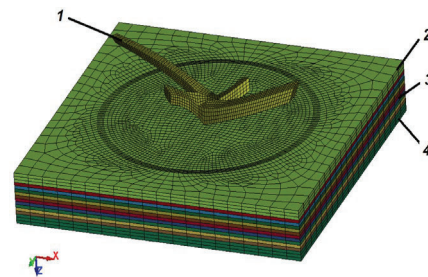


Рис. 3. Модель сверла и пакета для моделирования процесса сверления:

1 – сверло; 2 – слой металла; 3 – слои композита; 4 – слой металла

Fig. 3. Drill and package model for drilling process simulation:

1 – drill bit; 2 – metal layer; 3 – composite layers; 4 – metal layer

С целью оценки условий контакта между сверлом и композитом, а также контактов между самими слоями композита (после разрушения клеевой связи), задавался контакт, учитывающий разрушение материала [8, 9].

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

Результаты и обсуждение

Этапы сверления композита приведены на рис. 4. Для проверки адекватности модели были выведены графики энергетического коэффициента (рис. 5) и графики всех энергий (рис. 6). Значения на графике энергетического коэффициента должны быть близкие к единице [3]. На представленном графике (см. рис. 5) в установившемся режиме значения близки к $1,0 \pm 0,01$, что говорит об полном удовлетворении требования к энергиям. На начальных и конечных этапах значение коэффициента больше единицы на 6...8 %, что допустимо на данных этапах.

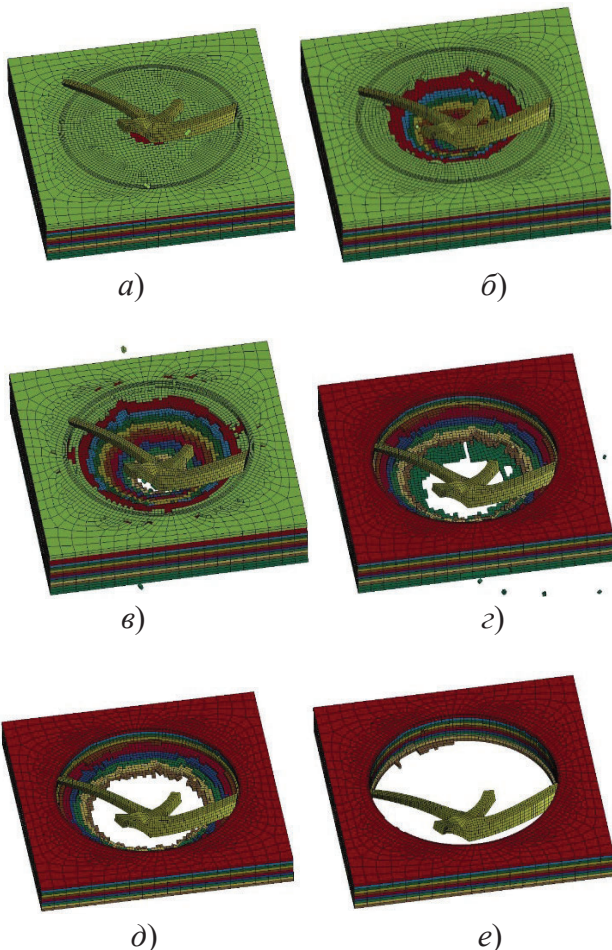


Рис. 4. Этапы сверления пакета по времени: а – 0,02 с; б – 0,06 с; в – 0,08 с; г – 0,1 с; д – 0,12 с; е – 0,15 с

Fig. 4. The stages of drilling the package with respect to time: a – 0,02 s; b – 0,06 s; c – 0,08 s; d – 0,1 s; e – 0,12s; f – 0,15 s

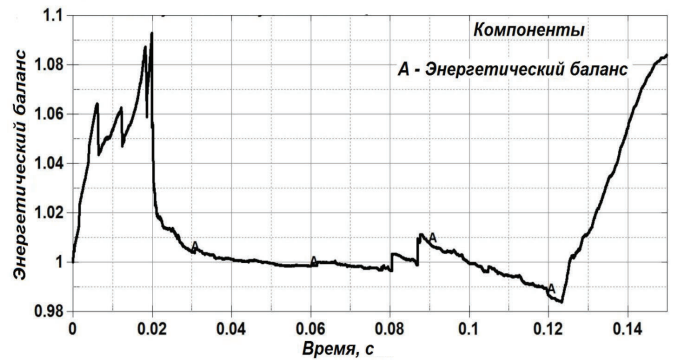


Рис. 5. График вывода энергетического коэффициента для проверки адекватности процесса

Fig. 5. The graph of the output of the energy coefficient to check the process consistency

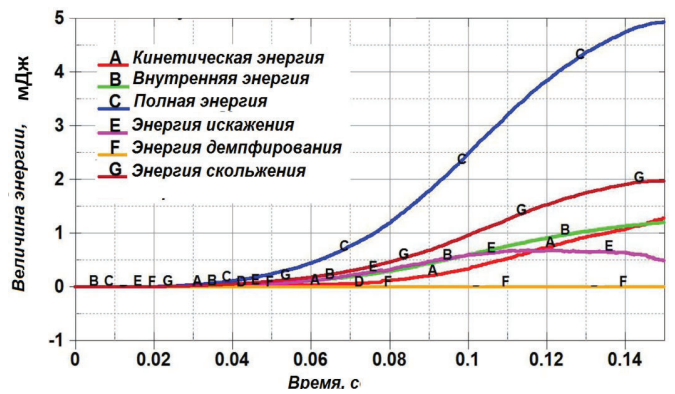


Рис. 6. Графики энергий (МДж) в процессе сверления пакета

Fig. 6. Graphs of energy (MJ) in the process of drilling the package

Оценка величин энергий на конечном этапе показало следующие значения: кинетическая энергия – 1280 МДж; внутренняя энергия – 1190 МДж; полная энергия – 4920 МДж; энергия искажения Hourglass – 480 МДж; энергия скольжения – 1970 МДж.

Полная энергия состоит из суммы всех других энергий и по процентному содержанию составляет: кинетическая энергия – 26 %; внутренняя энергия – 24 %; энергия искажения Hourglass – 10 %; энергия скольжения – 40 %.

Наибольшая из рассматриваемых энергий является энергия скольжения (SlidingEnergy), что связано со скольжением (трением) сверла по поверхности заготовки, вносящая наибольший вклад в общую энергию [7, 10]. Подбирая соответствующие режимы обработки и внося, в качестве примера, в зону формообразования новых поверхностей энергию ультразвукового поля, можно уменьшить

энергию скольжения и, соответственно, общую энергию, что положительно скажется на всей модели и на процессе сверления в целом. Последнее сопровождается существенным уменьшением теплосилового напряженности процесса резания, снижением вероятности возникновения дефектов на обработанных поверхностях, уменьшением износа режущих кромок инструмента [7, 8].

Данные расчетов, представленные в виде графиков на рис. 5 и рис. 6, подтверждают адекватность выполненного моделирования.

На рис. 7 представлены графики усилия сцепления слоев композита. Оценка величин усилия на конечных этапах показала, что верхние слои композита имеют более низкие значения сцепления. Например, сцепление между препрегами один и два составляет 9,5 Н, но по следующим слоям препрега это значение увеличивается и для слоя между препрегами девять и десять составляет 25,5 Н. Это увеличение может быть связано с воздействием нижних зажатых слоев на рассматриваемые слои при освобождении (удалении) при сверлении верхних слоев.

Если оценивать усилие сцепления не по всей поверхности препрегов, а только по зонам края отверстия, это позволит по результатам подобных расчетов предсказать возникновение деламинации слоев композита.

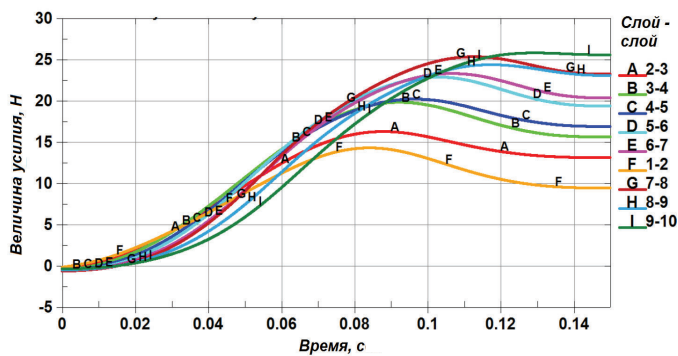


Рис. 7. Усилие сцепления (Н) между слоями композита

Fig. 7. Coupling force (N) between composite layers

Выводы

Выполненные исследования подтверждают возможность замены натуральных испытаний использованием цифровых двойников процессов сверления отверстий в заготовках из сложных пакетов титанового сплава и

композиционного материала, в том числе с введением в зону формообразования новых поверхностей энергии ультразвукового поля для сокращения технологической подготовки производства на этапе подбора элементов режима резания взамен апробации изменений условий обработки на действующем технологическом оборудовании. Использование подобных расчетов в действующем производстве позволит существенно уменьшить себестоимость изготовления деталей и узлов из сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала и сократить технологический цикл изготовления изделий в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Киселев Е.С., Илюшкин М.В., Савельев К.С. Исследования процессов резания заготовок из труднообрабатываемых материалов с использованием для математического моделирования цифровых двойников // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 7. С. 29–40.
2. LS-DYNA Theory Manual. Livermore: LSTC, 2019, 689 p.
3. LS-DYNA Keyword User,s Manual. Volume I, II. Livermore: LSTC, 2019, 5289 p.
4. Криворучко Д.В., Залого В.О., Корбач В.Г. Основы 3D-моделирования процессов механической обработки методом конечных элементов. Учебное пособие. Сумы, 2009. 209 с.
5. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: URSS, 2018. 426 с.
6. Кудрявцев О.А., Оливенко Н.А., Жихарев М.В. Разработка и верификация численных моделей для анализа механического поведения композитных элементов при высокоскоростном ударе // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых) тексты докладов участников Международной молодежной научной конференции, в 6 т. 2019. Т. 1. С. 146–152.
7. Савельев К.С., Илюшкин М.В., Киселев Е.С. Использование цифровых двойников для математического моделирования ультразвукового сверления титановых заготовок // Вектор науки ТГУ. 2021. № 1. С. 42–55.
8. Илюшкин М.В., Киселев Е.С. Моделирование процессов сверления заготовок из полимерных композиционных материалов путем использования цифровых двойников // FrontierMaterials&Technologies. 2023. № 2. С. 47–57. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-2-64-1.
9. Муйземник А.Ю., Морозов Е.М. ANSYS в руках инженера: Динамическое нагружение. М.: ЛЕНАНД, 2023. 244 с.
10. Nguyen Thi Anh, Tran Thanh Tung. Drilling Modelling Using Computer Simulation. International Journal Of Scientific & Technology Research Volume 9, Issue 10, October 2020. pp.171–174.

REFERENCES

1. Kiselev E.S., Ilyushkin M.V., Savelyev K.S. Studies of cutting operation of hard-to-machine billets through the use of digital twins applied in mathematical modeling // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no. 7, pp. 29–40.

2. LS-DYNA Theory Manual. Livermore: LSTC, 2019, 689 p.

3. LS-DYNA Keyword User,s Manual. Volume I, II. Livermore: LSTC, 2019, 5289 p.

4. Krivoruchko D.V., Zaloga V.O., Gorbach V.G. Fundamentals of 3D machining modeling through finite element method: manual. Sumy: SumSU, 2009, 209 p.

5. Morozov E.M., Nikishkov G.P. Finite element method in fracture mechanics. Moscow: URSS, 2018. 426 p.

6. Kudryavtsev O.A., Olivenko N.A., Zhiharev M.V. Development and verification of numerical models for analysis of composite elements mechanical behavior during

high-velocity impact. // XXIV Tupolev readings (school of young scientists). Texts of reports of the participants of the International Youth Scientific Conference, in 6 volumes, 2019, vol. 1, pp. 146–152.

7. Savelyev K.S., Ilyushkin M.V., Kiselev E.S. Ultrasonic titanium blanks drilling using digital twins for mathematical modeling // Vector of Science TSU, 2021, no. 1, pp. 42–55.

8. Ilyushkin M.V., Kiselev E.S. Simulation of the processes of drilling polymer composite blanks using digital twins. Frontier Materials & Technologies. 2023;(2):47-57. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-2-64-1>

9. Muizemnek A.Yu., Morozov E.M. ANSYS in the hands of an engineer: Dynamic loading. Moscow: LE-NAND, 2023, 244 p.

10. Nguyen Thi Anh, Tran Thanh Tung. Drilling Modelling Using Computer Simulation. International Journal of Scientific & Technology Research Volume 9, Issue 10, October 2020. pp.171–174.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023; принята к публикации 01.07.2023.

The article was submitted 21.06.2023; approved after reviewing 26.06.2023; assepted for publication 01.07.2023.

