

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 22, № 2, 2020**

**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.2.08  
УДК 621.95.01

**А.С. Дударев<sup>1</sup>, М.В. Илюшкин<sup>2</sup>, И.Ф. Николаев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия  
<sup>2</sup>АО «Ульяновский НИАТ», Ульяновск, Россия

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА В LS-DYNA**

Рассматривается моделирование и исследование процесса сверления слоистого материала с использованием многоцелевого инженерного пакета LS-DYNA совместно с использованием препостпроцессора LS-PrePost. Программа LS-DYNA предназначена для решения трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, а также связанных задач. Исследование процесса осуществлялось на базе метода конечных элементов. Целями исследования являлись разработка методики симуляции процесса механической обработки слоистых материалов в микроне и получение в результате расчетов информационных выходных характеристик процесса сверления. Построены 3D-модели режущего инструмента и заготовки с заданными геометрическими параметрами. Заготовка слоистого материала структурно представлена набором множества слоев, каждый со своими свойствами. В результате моделирования получен расчетный файл с симуляцией, в результате решения которого визуально показан процесс сверления слоистого материала, максимально приближенного к реальной ситуации, со снятием стружки. Также получены такие выходные показатели, как напряжения, возникающие в зоне резания по различным осям в зависимости от времени работы внедрения сверла в обрабатываемый материал. Задача динамическая, очень трудоемкая. Решена в России впервые. Для ее решения требуются значительные вычислительные мощности. Количество ячеек составляло 75 348 для заготовки и 35 048 ячеек для сверла. Причем сложность вычислений микроне резания методом МКЭ заключалась не только в количестве расчетных ячеек, но и в сложности постановки и решения связанной динамической задачи в данном пакете (задание условий, задание свойств, заполнение взаимоисключающих параметров во вкладках и картах). С некоторыми допущениями задача была решена.

**Ключевые слова:** моделирование, сверление, процесс, технология, стружка, метод конечных элементов, симуляция, модель, ячейка, композиты, слоистый материал, напряжение.

**A.S. Dudarev<sup>1</sup>, M.V. Ilyushkin<sup>2</sup>, I.F. Nikolaev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation  
<sup>2</sup>PC “Ulyanovsk NIAT”, Ulyanovsk, Russian Federation

**MODELING THE DRILLING PROCESS OF LAYERED MATERIAL IN PROGRAM LS-DYNA**

The article discusses the modeling and study of the process of drilling layered material using the LS-DYNA multi-purpose engineering package in conjunction with the LS-PrePost prepost processor. The LS-DYNA program is designed to solve three-dimensional dynamic nonlinear problems in the mechanics of a deformable solid, as well as related problems. The study of the process was carried out on the basis of the finite element method. The aim of the study is to develop a methodology for simulating the process of mechanical processing of layered materials in the microzone and obtain, as a result of calculations, information output characteristics of the drilling process. 3D models of cutting tools and workpieces with specified geometric parameters are built. The procurement of layered material is structurally represented by a set of many layers, each with its own properties. As a result of the simulation, a calculation file with a simulation was obtained, as a result of which a process of drilling layered material, as close as possible to the real situation, with chip removal, is visually shown. Also obtained are output indicators such as stresses arising in the cutting zone along various axes depending on the operating time of the introduction of the drill into the material being processed. The task is dynamic, very laborious. Solved in Russia for the first time. To solve it, significant computing power is required. The number of cells was 75,348 for the workpiece, and 35,048 cells for the drill. Moreover, the complexity of calculating the cutting microzone by the FEM method was not only in the number of calculation cells, but in the complexity of setting and solving the related dynamic problem in this package (setting conditions, setting properties, filling in mutually exclusive parameters in tabs and maps). With some assumptions, the problem was solved.

**Keywords:** modeling, drilling, process, technology, chips, finite element method, simulation, model, cell, composites, layered material, stress.

Механическая обработка остается основным видом формообразования деталей. Высокие требования к точности, шероховатости и качеству поверхности приводят к необходимости совершенствования технологии обработки и подготовки производства, особенно при обработке деталей из труднообрабатываемых слоистых или новых композиционных материалов.

При проектировании новых технологических процессов оптимизация параметров обработки производится чаще всего эмпирическим путем. Это приводит к увеличению времени и затрат на проектирование технологических процессов. При механической обработке композиционных материалов задача дополнительно усложняется – свойства таких материалов зависят от геометрии конструкции деталей и параметры режимов обработки различаются в зависимости от структуры композиционного материала [1, 2].

Эффективность проектирования технологического процесса производства можно повысить, используя CAE-системы. Большое количество CAE-систем являются универсальными и не имеют специальных шаблонов для моделирования механообработки [3, 4]. Создание моделей резания в CAE-системах очень трудоемко, но позволяет получать информацию о напряжениях, температуре, распределении сил в зоне обработки и деформациях.

В основу инженерного анализа технологических процессов может быть положен метод конечных элементов (МКЭ), разработанный на основе матричных методов расчета механических конструкций, рассматривается сегодня как способ решения задач, описываемых уравнениями математической физики в частных производных [4–9]. Метод включается в системы автоматизированного проектирования (САПР) и служит для моделирования механических, тепловых и других задач.

Широкое применение композитных материалов еще больше увеличило фокус производственных исследований обрабатываемости этих гетерогенных материалов. Сверление является неизбежной, наиболее часто используемой операцией обработки в ходе производственных процессов во многих отраслях промышленности. Процесс сверления композитных материалов во многом определяет качество их отверстий. Недавний прогресс в области технологии производства композитов обусловил необходимость применения метода конечных элементов (FEA) [10, 11]. FEA хорошо используется в различных областях машиностроения для анализа свойств при сверлении материалов, как правило, в условиях возникновения напряжений,

сил, тепла и вибрации [12, 13]. Использование анализа методом конечных элементов сделало возможным проектировать технологии, основанные на учете влияния структуры слоистых и композиционных материалов на выходные характеристики процесса обработки, в том числе на такой важный показатель, как качество обработки [14, 15]. Таким образом, применение FEA для сверления композитов из натуральных волокон, армированных волокном (FRP), очень актуально, особенно в механообрабатывающей промышленности [16].

В статье рассматривается создание и исследование имитационных моделей сверления полимерного композитного материала методом конечных элементов. Модель FEA была реализована для отражения физики процесса сверления, включая образование геометрии стружки. Фаза предварительной обработки включала рассмотрение различных параметров, включая выбор элементов, свойств материала и граничных условий, а затем выбор подходящего решателя LS-DYNA и инструмента препроцессора Pre-Post. Pre-post был использован для визуализации и отображения окончательных результатов моделирования [17].

Моделирование осуществляется в интерфейсе LS-PrePost для препостпроцессинга задач ANSYS LS-DYNA. LS-DYNA – инженерный пакет разработан корпорацией LSTC (Livermore Software Technology Corporation, США) [18, 19].

LS-DYNA позволяет создавать и импортировать геометрию, строить сетки, определять свойства материалов и взаимодействия, параметры объектов. Главная возможность постпроцессора LS-PrePost – генерация и воспроизведение анимации, создание скриншотов, выгрузка данных и построение эпюр и графиков физических процессов.

В данной работе разработан принцип и последовательность моделирования процесса сверления в слоистом материале. Данная последовательность моделирования позволит проводить исследования механической обработки и технологической оптимизации параметров резания.

Для проведения исследования в системе LS-DYNA по геометрическим данным была построена твердотельная модель режущего инструмента – стандартного сверла диаметром 5 мм по ГОСТ 10902–77 «Сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком. Средняя серия» (в целях упрощения моделирования не строили специальные сверла для слоистых материалов). Учитывались следующие параметры: диаметр и длина сверла, угол при вершине, уклон винтовой канавки и толщина поперечной кромки. Далее 3D-модель инструмента импортировали в пакет [20]. Затем создали

его конечно-элементную модель (рис. 1) [21, 22]. Размер элементарной ячейки 0,27 мм, геометрия произвольная, получилось 35 048 элементов у сверла.

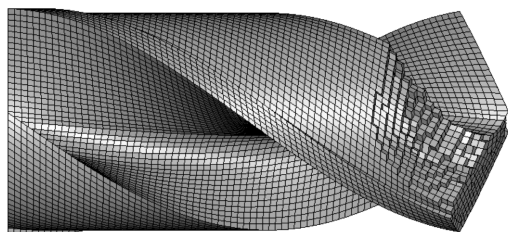


Рис. 1. Конечно-элементная модель сверла 5 мм

После импортирования модели инструмента необходимо создать модель материала, используя стандартные модули программного комплекса LS-Prepost [17]. Используя геометрию в виде цилиндров диаметром 10 мм, строим слоистую заготовку, состоящую из 23 слоев толщиной 0,16 и 0,05 мм, чередующихся между собой, с соответствующими геометрическими параметрами. Каждый слой материала имеет сетку элементов (рис. 2) [23]. На каждом слое получилось 3276 элементов.

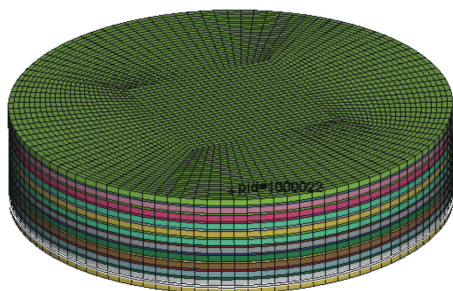


Рис. 2. Модель слоистого материала

После завершения построения основных объектов, необходимых для дальнейшей работы, происходит позиционирование объектов относительно друг друга так, чтобы центр заготовки совпадал с центром сверла (рис. 3).

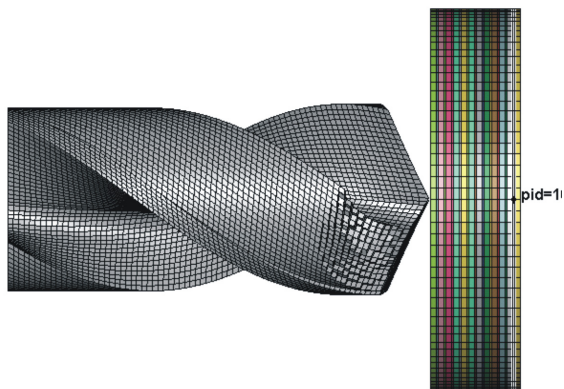


Рис. 3. Позиционирование материала и инструмента

После проведенных действий необходимо задать моделям ограничения, параметры движения, механические и физические свойства материалов инструмента и заготовки [24].

В меню Keyword Manager добавляется BOUNDARY-карта, которая определяет метод нагружения, описание граничных состояний. Создаем схему нагрузки (карту нагрузки) в свойстве BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID, где PID – ID инструмента, DOF – направление движения, VAD – установка скорости/перемещения, LCID – номер кривой нагрузки (табл. 1). Задали скорость подачи 1 мм/об.

Таблица 1

Параметры BOUNDARY соответственно для двух идентификаторов кривой (LCID)

PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
1000000	1	0	1000	0.4	0	1.000e+28	0.0
PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
1000000	5	0	2000	-3.0	0	1.000e+28	0.0

В табл. 1 LCID – график движения, или идентификатор кривой нагрузки, описывающей значение движения в зависимости от времени. Кривая задается в свойстве DEFINE\_CURVE.

DOF определяет степень свободы движения, по которой определяется движение.

SF – коэффициент масштабирования.

DEFINE\_CURVE определяет график изменения нагрузки во времени, где A1 – данные по оси X (время), O1 – данные по оси Y (значение параметра).

Создано три варианта зависимостей в зависимости от времени обработки: описывающая подачу, описывающая поступательное перемещение сверла относительно оси X, вращательное движение сверла относительно оси X (табл. 2–4).

Таблица 2

LCID = 1

№ п/п	A1	O1
1	0.0	0.0
2	0.02	0.72
3	50.0	0.72

Таблица 3

LCID = 1000

№ п/п	A1	O1
1	0.0	0.0
2	0.02	0.72
3	50.0	0.72

Таблица 4

LCID = 2000

№ п/п	A1	O1
1	0.0	0.0
2	0.02	0.72
3	50.0	0.72

Во вкладке BOUNDARY также добавляется свойство движущейся системы координат SPC, которое позволяет задавать одноточечные ограничения для узловых точек.

Ограничения накладываются в параметре DOF, где 1 – ограничение есть, 0 – ограничений нет (табл. 5).

Таблица 5

Параметры модуля движущейся системы координат SPC

DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
1	1	1	1	1	1

Свойства контактного взаимодействия CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE и CONTACT\_ERODING\_NODES\_TO\_SURFACE применяются при контакте с разрушением элементов (например, как в процессах обработки металлов давлением [25]) и имеют дополнительные три опции ISYM, EROSOP, IADJ, настраивающие данный контакт [24, 26]. Основные параметры для карты контакта: SSID, MSID – номера подчиненной и главной частей/набора; SSTYP, MSTYP – тип контактной области (часть, набор части/узлов и др.); FS – статический коэффициент трения; FD – динамический коэффициент трения; VC – коэффициент вязкого трения, является необходимым для ограничения максимума силы трения; VDC – коэффициент демпфирования контакта. Все данные этого свойства представлены в табл. 6.

SSID и MSID – соответствующие порядковые номера взаимодействующих тел, т.е. заготовки из слоев и сверла. Например, слой с порядковым номером (ID) 1000001 был первым слоем, он взаимодействовал со связанным физически телом – сверлом с номером 1000000.

Шаг интегрирования рассчитывается автоматически. Для изменения временного шага используется карта CONTROL\_TIMESTEP и параметр DT2MS (со значением «минус»). Для многих задач можно увеличивать величину временного шага в 5–10 раз. Разница при использовании масштабирования временного шага заключается в появлении осциллирующих воздействий и возможной потере контакта [19, 26].

Таблица 8

Параметры модуля TERMINATION

ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS	NOSOL
7.0	0.0	0.0	0.0	1.000e+08	0.0

Таблица 6

Параметры модуля контактного взаимодействия CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE

SSID	MSID	SSTYP	MSTYP
1000001	1000000	3	3
1000001	1000000	3	3
1000005	1000000	3	3
1000007	1000000	3	3
1000009	1000000	3	3
1000011	1000000	3	3
1000013	1000000	3	3
1000015	1000000	3	3
1000017	1000000	3	3
1000019	1000000	3	3
1000021	1000000	3	3
1000023	1000000	3	3
1000001	1000003	3	3
1000005	1000003	3	3
1000005	1000007	3	3
1000009	1000007	3	3
1000009	1000011	3	3
1000013	1000011	3	3
1000013	1000015	3	3
1000017	1000015	3	3
1000017	1000019	3	3
1000021	1000019	3	3
1000021	1000023	3	3

CONTROL определяется свойствами ACCURACY, BULK\_VISCOSITY, ENERGY, CONTACT, HOURGLASS, TERMINATION, TIMESTEP.

В TIMESTEP определяются следующие параметры: TSSFAC – коэффициент пересчета для исходного шага по времени; DT2MS – величина временного шага (табл. 7).

TERMINATION предназначена для установки времени завершения расчета (табл. 8).

Карта ENERGY предназначена для обеспечения управляющих параметров для учета энергии (табл. 9).

HGEN – опция сохранения энергии искаженных элементов по типу песочных часов, RWEN – опция сохранения диссипации энергии, SLNTEN – опция сохранения энергии по границе скольжения контактов, RYLEN – опция сохранения рассеяния энергии с учетом затухания.

ENDTIM – время завершения расчета.

Свойство контакта CONTACT – в табл. 10.

Таблица 7

Параметры модуля TIMESTEP

DTINIT	TSSFAC	ISDO	TSLIMIT	DT2MS	LCTM	ERODE	MSIST
0.0	0.9	0.0	0.0	-2.770E-05	0.0	0.0	0.0
DT2MSF	DT2MSLC	IMSC	UNUSED	RMSCL			
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			

Таблица 9

Параметры модуля ENERGY

HGEN	RWEN	SLNTEN	RYLEN
2	2	2	2

Таблица 10

Параметры модуля контакта CONTACT

SLSFAC	RWPNAL	ISLCHK	SHLTHK	PENOPT	THKCHG	ORIEN	ENMASS
0.5	0.0	1	0	0	0	1	0
USRSTR	USRFRC	NSBCS	INTERM	XPENE	SSTHK	ECDT	TIEDPRJ
0	0	0	0	4.0	0	0	0
SFRIC	DFRIC	EDC	VFC	TH	TH SF	PEN SF	
0	0	0	0	0	0	0	
IGNORE	FRCENG	SKIPRWG	OUTSEG	SPOTSTP	SPOYDEL	SPOTHIN	
0	1	0	0	0	0	0	
ISYM	NSEROD	RWGAPS	RWGDTH	RWKSF	ICOV	SWRADF	ITHOFF
0	0	2	0	1.0	0	0	0

Свойство HOURGLASS приведено в табл. 11.

Таблица 11

Параметры модуля HOURGLASS

INQ	QH
5.0	0.05

Свойство точности (ACCURACY) – табл. 12.

Таблица 12

Параметры модуля HOURGLASS

OSU	INN	PIDOSU	IACC
1	4	0	0

Одним из методов управления HOURGLASS деформациями является регулирование вязкости материала модели (model's bulk viscosity) с использованием вкладки CONTROL\_BULK\_VISCOSITY. Свойство BULK\_VISCOSITY – табл. 13.

Таблица 13

Параметры модуля BULK\_VISCOSITY

Q1	Q2	TYPE	BTYPE
1.5	0.06	1	0

База данных DATABASE\_ASCII\_OPTION – в табл. 14. Опции этой команды включают следующие файлы в формате ASCII: GLSTAT – глобальные

данные, энергия всей модели; MATSUM – энергия частей модели; RCFORC – данные об усилиях на поверхности раздела; SECFORC – усилия в поперечном сечении; SLEOUT – энергия на поверхности скольжения двух материалов; SPCFORC – усилия реакции для односточечного ограничения (SPC).

Таблица 14

Параметры модуля DATABASE\_OPTION

	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
GLSTAT	0.003	0	0	1
MATSUM	0.003	0	0	1
RCFORCE	0.003	0	0	1

Свойство BINARY\_D3DUMP – в табл. 15.

Таблица 15

Параметры модуля BINARY\_D3DUMP

CYCL	LCDT	BEAM	NPLTC	PSETID
3.000e+04	0	0	0	0

Свойство BINARY\_D3PLOT – в табл. 16.

Таблица 16

Параметры модуля BINARY\_D3PLOT

DT	LCDT	BEAM	NPLTC	PSETID	IOOPT
0	0	0	100	0	0

Свойство EXTENT\_BINARY – в табл. 17.

Таблица 17

Параметры модуля EXTENT\_BINARY

NEIPH	NEIPS	MAXINT	STRFLG	SIGFLG	EPSFLG	RLTFLG	ENGFLG
0	0	3	1	1	1	1	1
CMPLG	IEVERP	BEAMIP	DCOMP	SHGE	STSSZ	N3THDT	IALEMAT
0	0	0	1	1	1	2	1
NINTSLD	PKPSEN	SCLP	HYDRO	MSSCL	THERM	INTOUT	NODOUT
0	0	1	0	0	0	stress	stress
DTDT	RESPLT	NEIPB	QUADR	CUBIC			
0	0	0	0	0			

Свойство HOURGLASS – в табл. 18.

Таблица 18

Параметры модуля HOURGLASS

HGID	IHQ	QM	IBQ	Q1	Q2	QB/VDC	QW
1	4	0.05	0	1.5	0.06	0.1	0.1

Примечание: IHQ – тип контроля искажения; QM – параметр контроля искажения.

В карте RIGID определяются следующие параметры: RO – массовая плотность; E – модуль Юнга; PR – коэффициент Пуассона; CMO – опция ограничения на центр масс; CON1 – ограничения на перемещение; CON2 – ограничения на вращение (табл. 19).

Таблица 19

Параметры модуля RIGID

MID	RO	E	PR	N	COUPLE
1000001	7.850e-06	200.0	0.3	0.0	0
M	CMO	CON1	CON2		
0.0	1.0	5	5		

Когезивные свойства слоистых материалов задавали через свойство MAT\_COHESIVE\_MIXED\_MODE (табл. 20).

Таблица 20

Параметры модуля MAT\_COHESIVE\_MIXED\_MODE

MID	RO	ROFLG	INTFAIL	EN	ET	GIC
138	1.000E-07	1.0	1.0	40.0	40.0	4.300E-04
GIC	XMU	T	S	UND	UTD	GAMMA
4.300E-04	1	0.02	0.02	0.0	0.0	1.0

Свойство разрушения слоистых материалов описывается через ортотропное описание разрушения, т.е. с учетом двунаправленных основных свойств, через функцию MAT\_ORTHOTROPIC\_SIMPLIFIED\_DAMAGE (рис. 4).

Карты KEYWORD, PART, SECTION, SET, TITLE создаются автоматически.

В итоге была создана симуляция сверления слоистого материала на основе принятых параметров (рис. 5). Элементы интерфейса режима симуляции – на рис. 6.

Постпроцессорная обработка, которая идет за стадиями препроцессорной проработки и получения решения, дает возможность обратиться к результатам решения и интерпретировать их определенным образом, используя набор команд и возможности интерфейса. Как видно из рис. 7, при сверлении отверстия образуется стружка, кинематику которой программа производит в процессе воспроизведения симуляции.

Результаты решения задач механики в LS-DYNA включают выходные значения информационных характеристик процессов перемещений, напряжений, деформаций, энергии и др. Например, вывели графики максимального напряжения в заготовке в области резания в зависимости от времени (рис. 8), а также растровую диаграмму зависимости деформации от времени (рис. 9). Результатом работы программы может быть как графическое, так и табличное представление результатов расчета. Программа LS-DYNA позволяет создать анимацию процесса, что позволяет более подробно изучить процесс. Во время выполнения решения результаты сохраняются в базе данных. Кроме того, средства графического отображения информации включают векторное представление, эпюры по выбранному сечению и др.

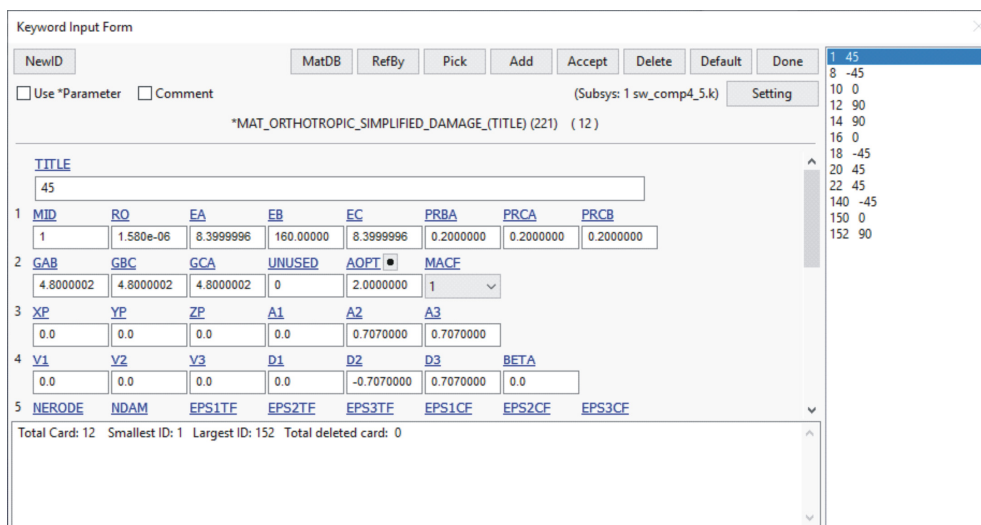


Рис. 4. Математическое описание разрушения (MAT\_ORTHOTROPIC\_SIMPLIFIED\_DAMAGE)

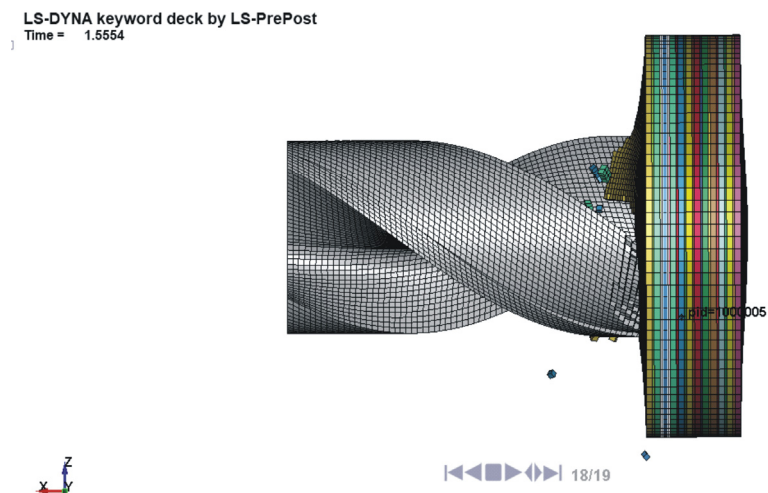


Рис. 5. Результат моделирования процесса сверления слоистого материала

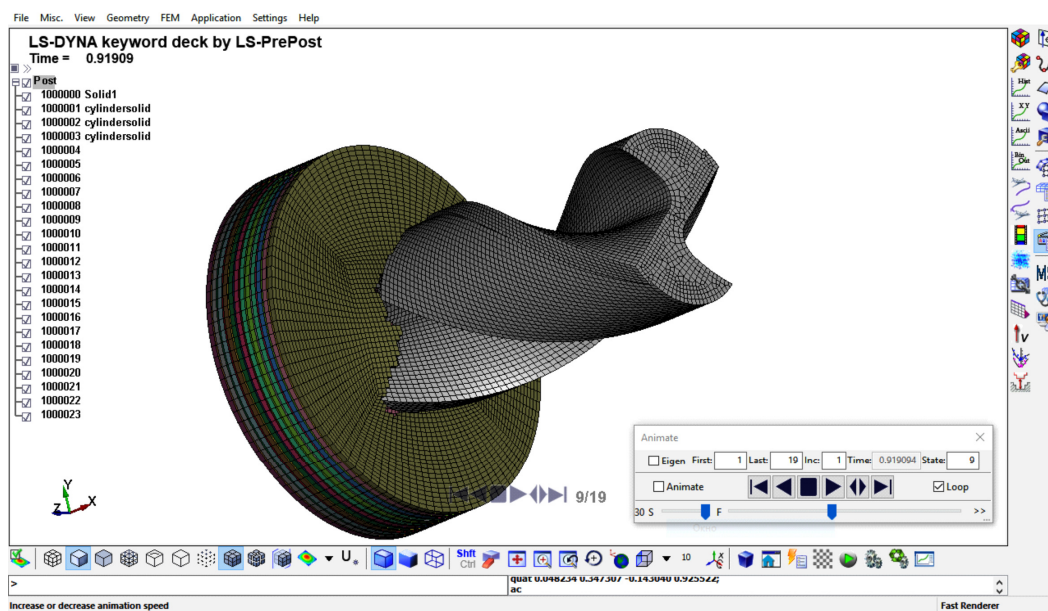


Рис. 6. Режим симуляции процесса сверления

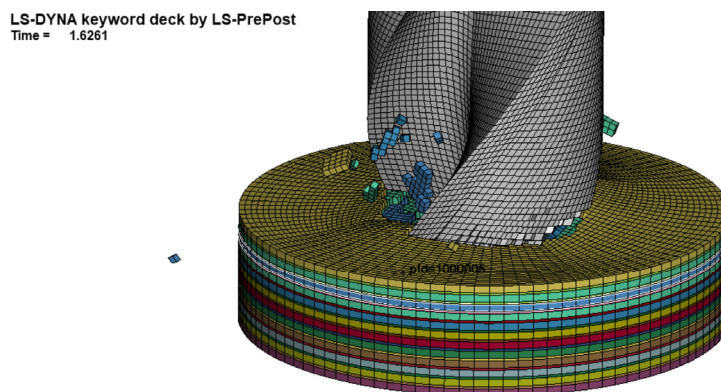


Рис. 7. Образование стружки при сверлении слоистого материала

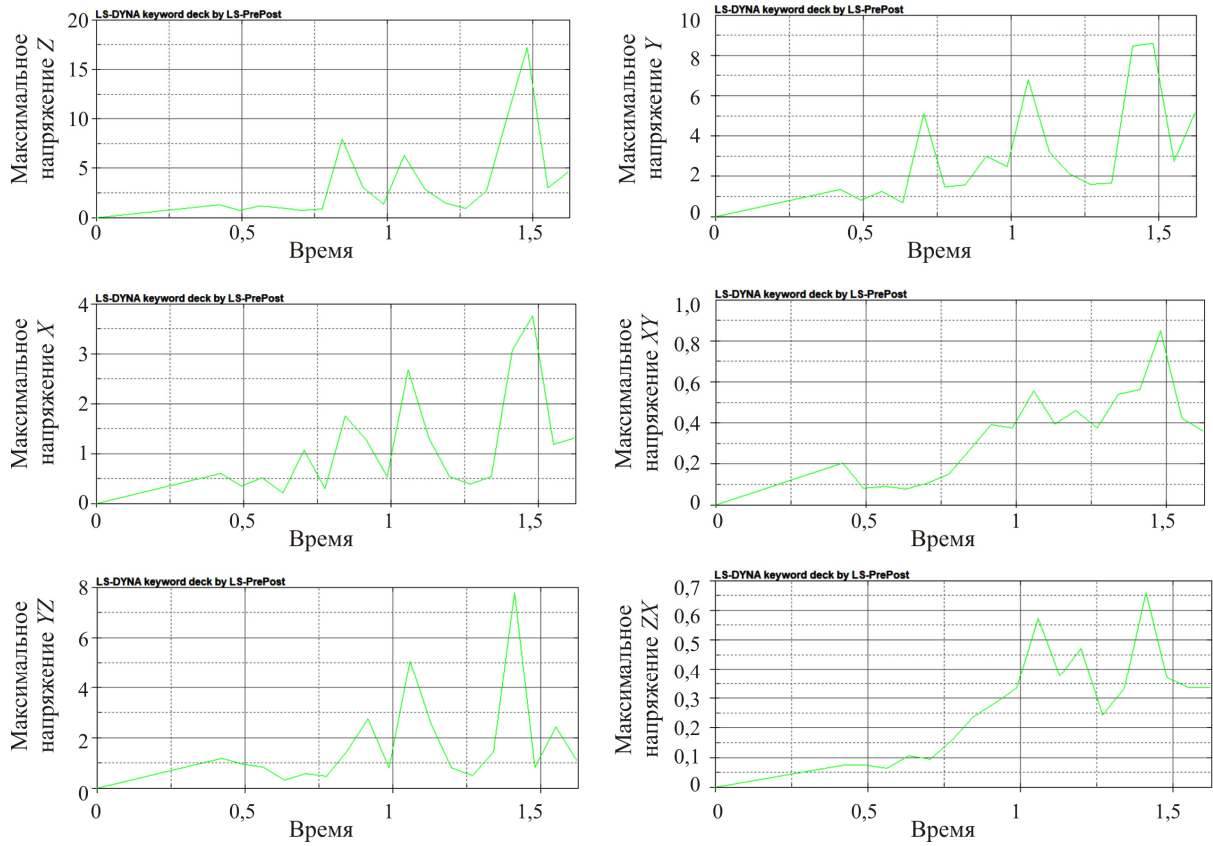


Рис. 8. Графики зависимости максимального напряжения (МПа) от времени (с)

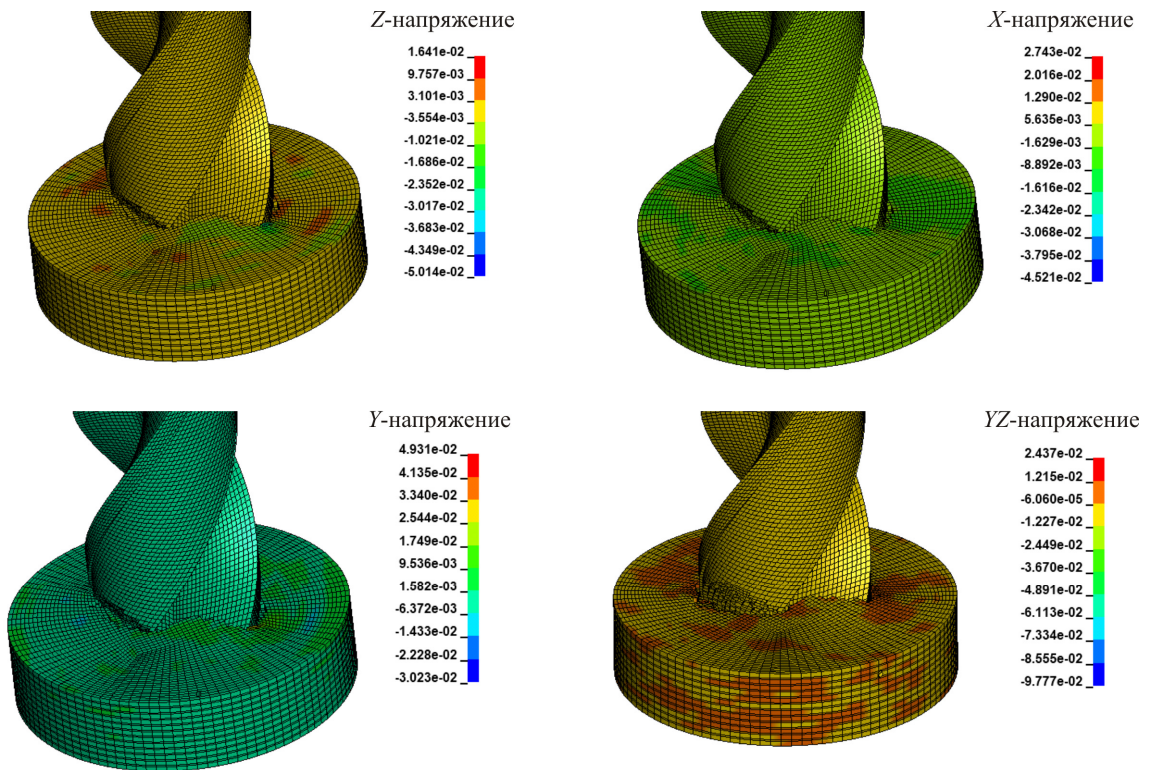


Рис. 9. Диаграммы деформации по различным осям



Необходимо отметить, что на ЭВМ с характеристиками: процессор Intel Core i5 4×2,5 ГГц, Ram 8096 Мб расчет занимал 1,7 сут, поэтому симуляцию необходимо выполнять в специализированном вычислительном центре с более быстродействующими ЭВМ, при этом расчет одного режима займет менее 1 сут.

Таким образом, решена и методически описана сложная связанная задача моделирования динамического процесса сверления слоистых материалов.

### Список литературы

1. Dudarev A., Volegov K., Kurzanov G. Rheonomic phenomenon shrinkage of holes drilled in fibreglass and carbonfibre-reinforced polymer composites // *Mech. of Adv. Materials and Modern Proc.* – 2017. – Vol. 3, iss. 1, art. 17. – 9 p. DOI 10.1186/s40759-017-0033-1

2. Дударев А.С. Повышение эффективности и качества обработки отверстий на основе стабилизации процесса сверления изделий из полимерных композиционных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2009. – 20 с.

3. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ-системах / И.В. Горбунов, И.В. Ефременков, В.Л. Леонтьев, А.Р. Гисметулин // *Известия Самар. науч. центра Российской академии наук.* – 2013. – Т. 15, № 4 (4). – С. 846–853.

4. Грабченко А.И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: дис. ... д-ра техн. наук. – Харьков, 1995. – 125 с.

5. Криворучко Д.В., Залого В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / под общ. ред. В.А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2012. – 496 с.

6. Finite element and experimental studies of the formation mechanism of edge defects during machining of SiCp/Al composites / L. Zhou, Y. Wang, Z.Y. Ma, X.L. Yu // *Int. J. of Machine Tools and Manuf.* – 2014. – Vol. 84. – P. 9–16.

7. Delamination in fibre reinforced plastics: A finite element approach / P.K. Rakesh, V. Sharma, I. Singh, D. Kumar // *Engineering.* – 2011. – Vol. 3. – P. 549–554.

8. Bagci E. 3-D numerical analysis of orthogonal cutting process via mesh-free method // *Int. J. of the Physical Sci.* – 2011. – Vol. 6, no. 6. – P. 1267–1282.

9. Ding H., Shin Y.C. Multi-physics modeling and simulations of surface microstructure alteration in hard turning // *J. of Materials Proc. Techn.* – 2013. – Vol. 213, no. 6. – P. 877–886.

10. Горбунов И.В., Ефременков И.В., Леонтьев В.Л. Моделирование процесса сверления с помощью SPH и конечно-элементного методов // *Известия Самар. науч. центра Российской академии наук.* – 2014. – Т. 16, № 1 (5). – С. 1346–1351.

11. Isbilir O., Ghassemieh E. Finite element analysis of drilling of titanium alloy // *Procedia Eng.* – 2011. – Vol. 10. – P. 1877–1882.

12. Effects of drilling parameters and aspect ratios on delamination and surface roughness of lignocellulosic HFRP

composite laminates / S.O. Ismail, H.N. Dhakal, E. Dimla, J. Beaugrand, I. Popov // *J. of Appl. Polymer Sci.* – 2016. – Vol. 133. – P. 1–8.

13. Prediction and control of drilling-induced damage in fibre-reinforced polymers using a new hybrid force and temperature modelling approach / A. Sadek, B. Shi, M. Meshreki, J. Duquesne, M.H. Attia // *CIRP Annals – Manuf. Techn.* – 2015. – Vol. 64. – P. 89–92.

14. Recent advances in twist drill design for composites machining: A critical review / S.O. Ismail, H.N. Dhakal, E. Dimla, I. Popov // *Proc. of Institution of Mech. Eng., Part B: J. of Eng. Manuf.* – 2016. – P. 1–16.

15. Doomra V.K., Debnath K., Singh I. Drilling of metal matrix composites: Experimental and finite element analysis // *Proc. of the Institution of Mech. Eng., Part B: J. of Eng. Manuf., Short Communication.* – 2014. – P. 1–5.

16. Sikiru Oluwarotimi Ismail, Hom Nath Dhakal, Yousef Awwadh Alzaidi. Finite element analysis on conventional drilling of natural fibre-reinforced polymer bio-composites / University of Portsmouth, Anglesea Building, Anglesea Road, PO1 3DJ. – United Kingdom, 2017.

17. Morten Villumsen F., Torben Fauerholdt G. Simulation of metal cutting using Smooth Particle Hydrodynamics // *LS-DYNA Anwenderforum.* – Bamberg, 2008. – P. 1–20.

18. Hallquist J.O. LS-DYNA theory manual / Livermore software Technology Corporation. – Livermore, 2006.

19. Shah Q., Hasan A. LS-DYNA for Beginners. An insight into Ls-Prepost and Ls-Dyna. – LAP LAMBERT Academic Publish., 2012. – 144 p.

20. Singh N. Bhatnagar, Viswanath P. Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study // *Materials and Design.* – 2008. – Vol. 29. – P. 546–553.

21. Virginija Gyliene, Vytautas Ostasevicius, Martynas Ubartas. Drilling process modelling using SPH / Kaunas University of Technology. – Lithuania, 2013.

22. SPH method applied to high speed cutting modeling / J. Limido, C Espinosa., n M. Salaü, J.L. Lacomme // *Int. J. Mech. Sci.* – 2007. – Vol. 49 (7). – P. 898–908.

23. Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation / V.A. Phadnis, F. Makhadmeh, A. Roy, V.V. Silberschmidt // *Composites. Part A: Appl. Sci. and Manuf.* – 2013. – Vol. 47. – P. 41–51.

24. Илюшкин М.В., Марковцев В.А., Баранов А.С. Опыт применения инженерного анализа при разработке технологий обработки давлением и механообработки на АО «Ульяновский НИИТ» // *Известия Самар. науч. центра Российской академии наук.* – 2016. – Т. 18, № 4 (3). – С. 557–563.

25. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе LS-DYNA. Теория и семинары: материалы для подготовки курса лекций по моделированию процессов ОМД / под ред. М.В. Илюшкина; АО «Ульяновский НИИТ». – Ульяновск, 2017. – 125 с.

26. Илюшкин М.В. Идентификация упруго-пластических моделей материала для задач явной динамики // *Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России: материалы IV Междунар.*

науч.-производств. конф., приуроченной ко Дню российской науки и 35-летию АО «Ульяновский НИАТ», г. Ульяновск, 7–8 февраля 2019 г. / УлГТУ. – Ульяновск, 2018. – С. 26–40.

### References

- Dudarev A., Volegov K., Kurzanov G. Rheonomic phenomenon shrinkage of holes drilled in fibreglass and carbonfibre-reinforced polymer composites. *Mech. of Adv. Materials and Modern Proc.*, 2017, vol. 3, iss. 1, art. 17, 9 p. DOI 10.1186/s40759-017-0033-1
- Dudarev A.S. Povyshenie effektivnosti i kachestva obrabotki otverstii na osnove stabilizatsii protsessa sverleniia izdelii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Increasing the efficiency and quality of hole processing based on stabilizing the drilling process of polymer composite materials products]. PhD tesises. Perm', 2009, 20 p.
- Gorbunov I.V., Efremkov I.V., Leont'ev V.L., Gismetulin A.R. Osobennosti modelirovaniia protsessov mekhanicheskoi obrabotki v SAE-sistemakh [Features of simulation of machining processes in SAE systems]. *Izvestiia Samar. nauch. tsestra Rossiiskoi akademii nauk*, 2013, vol. 15, no. 4 (4), pp. 846–853.
- Grabchenko A.I. Nauchnye osnovy almaznogo shlifovaniia sverkhtrverdykh polikristallicheskich materialov [Scientific bases of diamond grinding of superhard polycrystalline materials]. PhD thesises. Khar'kov, 1995, 125 p.
- Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. Modelirovanie protsessov rezaniia metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy [Finite Element Process Cutting Modeling: Methodological Basics: Monograph]. Ed. V.A. Zalogi. Sumy: Universitetskaia kniga, 2012, 496 p.
- Zhou L., Wang Y., Ma Z.Y., Yu X.L. Finite element and experimental studies of the formation mechanism of edge defects during machining of SiCp/Al composites. *Int. Joof Machine Tools and Manuf.*, 2014, vol. 84, pp. 9–16.
- Rakesh P.K., Sharma V., Singh I., Kumar D. Delamination in fibre reinforced plastics: A finite element approach. *Engineering*, 2011, vol. 3, pp. 549–554.
- Bagci E. 3-D numerical analysis of orthogonal cutting process via mesh-free method. *Int. Journal of the Physical Sci.*, 2011, vol. 6, no. 6, pp. 1267–1282.
- Ding H., Shin Y.C. Multiphysics modeling and simulations of surface microstructure alteration in hard turning. *Journal of Materials Proc. Techn.*, 2013, vol. 213, no. 6, pp. 877–886.
- Gorbunov I.V., Efremkov I.V., Leont'ev V.L. Modelirovanie protsessa sverleniia s pomoshch'iu SPH i konechno-elementnogo metodov [Simulation of the drilling process using SPH and finite element methods]. *Izvestiia Samar. nauch. tsestra Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 1 (5), pp. 1346–1351.
- Isbilir O., Ghassemieh E. Finite element analysis of drilling of titanium alloy. *Procedia Eng.*, 2011, vol. 10, pp. 1877–1882.
- Ismail S.O., Dhakal H.N., Dimla E., Beaugrand J., Popov I. Effects of drilling parameters and aspect ratios on delamination and surface roughness of lignocellulosic HFRP composite laminates. *Journal of Appl. Polymer Sci.*, 2016, vol. 133, pp. 1–8.
- Sadek A., Shi B., Meshreki, Duquesne J., Attia M.H. Prediction and control of drilling-induced damage in fibre-reinforced polymers using a new hybrid force and temperature modelling approach. *CIRP Annals – Manuf. Techn.*, 2015, vol. 64, pp. 89–92.
- Ismail S.O., Dhakal H.N., Dimla E., Popov I. Recent advances in twist drill design for composites machining: A critical review. *Proc. of Institution of Mech. Eng., Part B: J. of Eng. Manuf.*, 2016, pp. 1–16.
- Doomra V.K., Debnath K., Singh I. Drilling of metal matrix composites: Experimental and finite element analysis. *Proc. of the Institution of Mech. Eng., Part B: J. of Eng. Manuf., Short Communication*, 2014, pp. 1–5.
- Sikuru Oluwarotimi Ismail, Hom Nath Dhakal, Yousef Awwadh Alzaidi. Finite element analysis on conventional drilling of natural fibre-reinforced polymer biocomposites. *University of Portsmouth, Anglesea Building, Anglesea Road, PO1 3DJ. United Kingdom*, 2017.
- Morten Villumsen F., Torben Fauerholdt G. Simulation of metal cutting using Smooth Particle Hydrodynamics. *LS-DYNA Anwenderforum*. Bamberg, 2008, pp. 1–20.
- Hallquist J.O. LS-DYNA theory manual. Livermore software Technology Corporation. Livermore, 2006.
- Shah Q., Hasan A. LS-DYNA for Beginners. An insight into Ls-Prepost and Ls-Dyna. *LAP LAMBERT Academic Publish.*, 2012, 144 p.
- Singh N. Bhatnagar, Viswanath P. Drilling of unidirectional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study. *Materials and Design.*, 2008, vol. 29, pp. 546–553.
- Virginija Gyliene, Vytautas Ostasevicius, Martynas Ubartas. Drilling process modelling using SPH. *Kaunas University of Technology*. Lithuania, 2013.
- Limido J., Espinosa C., Salaün M., Lacomme J.L. SPH method applied to high speed cutting modeling. *Int. Journal Mech. Sci.*, 2007, vol. 49 (7), pp. 898–908.
- Phadnis V.A., Makhadm F., Roy A., Silberschmidt V.V. Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation. *Composites. Part A: Appl. Sci. and Manuf.*, 2013, vol. 47, pp. 41–51.
- Ilyushkin M.V., Markovtsev V.A., Baranov A.S. Opyt primeneniia inzhenernogo analiza pri razrabotke tekhnologii obrabotki davleniem i mekhanoo-brabotki na AO «Ul'ianovskii NIAT» [Experience of engineering analysis application in the development of pressure processing and machining technologies at JSC "Ulyanovsk NIAT"]. *Izvestiia Samar. nauch. tsestra Rossiiskoi akademii nauk*, 2016, vol. 18, no. 4 (3), pp. 557–563.
- Modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem v programme LS-DYNA. Teoriia i seminary: materialy dlia podgotovki kursa lektzii po modelirovaniu protsessov OMD [Modeling of metal working processes by pressure in LS-DYNA program. Theory and Seminars: Materials for Preparation of Lecture Course on WMD Process Modeling]. Ed. M.V. Ilyushkina; AO «Ul'ianovskii NIAT». Ul'ianovsk, 2017, 125 p.
- Ilyushkin M.V. Identifikatsiia uprugo-plasticheskikh modelei materiala dlia zadach iavnoi dinamiki [Identification of elastic-plastic material models for explicit dynamic tasks]. *Nauka, teoriia, praktika aviatsionno-promyshlennogo*

*klastera sovremennoi Rossii: materialy IV Mezhdunar. nauch.-proizvodstv. konf., priurochennoi ko Dniu rossiiskoi nauki i 35-letiiu AO «Ul'ianovskii NIAT»*, UIGTU. Ul'ianovsk, 2018, pp. 26–40.

Получено 24.04.2020

Опубликовано 30.06.2020

#### Сведения об авторах

**Дударев Александр Сергеевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ktn80@mail.ru.

**Илюшкин Максим Валерьевич** (Ульяновск, Россия) – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по науке АО «Ульяновский НИАТ»; e-mail: fzbm@mail.ru.

**Николаев Иван Федорович** (Пермь, Россия) – студент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ivan.Nikolaevich55@gmail.com.

#### About the authors

**Alexander S. Dudarev** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Innovative Engineering Technologies; Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ktn80@mail.ru.

**Maksim V. Ilyushkin** (Ulyanovsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Deputy of General Director in Science, PC "Ulyanovsky NIAT"; e-mail: fzbm@mail.ru.

**Ivan F. Nikolaev** (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ivan.Nikolaevich55@gmail.com.