

Использование цифровых двойников для математического моделирования ультразвукового сверления титановых заготовок

© 2021

Илюшкин Максим Валерьевич^{1,3}, кандидат технических наук, заместитель директора
Савельев Кирилл Сергеевич^{2,4}, аспирант кафедры «Инновационные технологии в машиностроении»
Киселев Евгений Степанович^{*2,5}, доктор технических наук, профессор,
директор Регионального технологического центра промышленного центра в машиностроении

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

²Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

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

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

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0473-4699>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

Аннотация: В статье рассматривается создание и исследование компьютерных моделей сверления заготовок из титанового сплава методом Лагранжа и Галеркина. Разработанные конечно-элементные модели предназначены для проведения исследований процесса механической обработки и оптимизации технологических параметров резания. Представлены результаты численных исследований сверления титановых заготовок с использованием программ математического моделирования, позволяющие полностью имитировать технологические процессы в компьютере (цифровой двойник). В качестве программы для моделирования процесса съема припуска с титановой заготовки применяли программный многоцелевой продукт конечно-элементного моделирования и анализа высоко-линейных динамических процессов с использованием различных схем интегрирования по времени Ls-DYNA. Применение метода Галеркина позволяет адекватно описать процесс сверления с введением в зону обработки энергии ультразвукового (УЗ) поля, существенно сокращает длительность проведения экспериментальных исследований и дает возможность оценить влияние элементов режима резания и конструктивных параметров инструмента на силовые и энергетические аспекты формообразования новых поверхностей деталей машин. Оба метода пригодны для создания различных процессов механообработки, однако метод Лагранжа менее чувствителен к энергии ультразвукового поля. Введение в зону сверления заготовок из труднообрабатываемых титановых сплавов энергии ультразвукового поля позволяет существенно снизить энергетические затраты. В результате моделирования был получен расчетный файл, содержащий процесс симуляции, решение которого визуально отражает процесс сверления титановой заготовки, максимально приближенный к реальной ситуации, со снятием стружки. Однако для полной верификации результатов численных исследований необходимо осуществить экспериментальную проверку и внести полученные коррективы в расчетные данные.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 18-47-730005.

Ключевые слова: цифровой двойник; моделирование; резание; ультразвук; титан; сверление; энергия деформирования.

Для цитирования: Илюшкин М.В., Савельев К.С., Киселев Е.С. Использование цифровых двойников для математического моделирования ультразвукового сверления титановых заготовок // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 00–00. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-00-00.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка отверстий лезвийными инструментами относится к числу наиболее сложно реализуемых в практике процессов механической обработки заготовок. Высокие требования к точности, шероховатости и качеству поверхности приводят к необходимости совершенствования технологии обработки и подготовки производства. При этом особенно сложным является формообразование отверстий в заготовках из труднообрабатываемых материалов [1], среди которых наиболее распространены титановые сплавы [2]. При проектировании новых технологических процессов оптимизация элементов режима обработки проводится чаще всего эмпирическим путем. Такой подход приводит к увеличению времени и затрат на проектирование. В связи

с этим изучение формообразования новых поверхностей при обработке отверстий сверлением является актуальным [3]. Детальное исследование напряженного состояния при сверлении позволяет лучше изучить и процесс резания в целом. Однако экспериментальные исследования данного вида формообразования отличаются большой трудоемкостью, высокими экономическими и временными затратами.

Эффективность проектирования технологического процесса производства можно повысить, используя Computer-aided engineering (CAE) системы. Большое количество таких систем являются универсальными и не имеют специальных шаблонов для моделирования механической обработки. Создание модели в CAE-системах представляет собой очень трудоемкий процесс, 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 и рассматриваемый сегодня как основной способ решения задач, описываемых уравнениями математической физики в частных производных. Метод включается в системы автоматизированного проектирования (САПР) и служит для моделирования механических, тепловых и других задач [4; 5].

Сегодня МКЭ является мощным инструментом инженерного анализа и физических исследований благодаря созданию пакетов компьютерных программ, таких как ANSYS, LS-DYNA, MSC.NASTRAN, MSC.MARC, COSMOS, ABAQUS, DEFORM, которые не только реализуют вычислительный процесс МКЭ, но и имеют удобный интерфейс для ввода исходных данных, контроля процесса вычисления и обработки результатов расчета. Однако количество научных трудов по использованию конечно-элементных методов при обработке отверстий со снятием стружки, в частности при сверлении заготовок из труднообрабатываемых титановых сплавов, явно ограничено, а вопросы, связанные с моделированием процесса сверления с наложением ультразвуковых колебаний в зону формообразования, недостаточно полно изучены [6–7].

Общей особенностью при создании конечно-элементных моделей процесса сверления вне зависимости от САЕ-системы, в которой проводится симуляция процесса, является сложность построения модели заготовки. Построение является важным этапом, так как в дальнейшем оно может существенно влиять на точность расчетов.

Основное количество трудов по тематике МКЭ процесса сверления в САЕ-системах посвящены вопросам пластической деформации, полученных методом Лагранжа, однако данный метод не чувствителен к энергии ультразвукового поля [8]. Относительно новый подход к решению подобных задач методом Галеркина,

рассмотренный в данной работе, позволяет достаточно полно оценить влияние частоты ультразвуковых колебаний на результирующую силу резания и другие энергетические показатели процесса съема стружки.

В последнее время все более широкое распространение для уменьшения подобных затрат получили программы математического моделирования, дающие возможность полностью имитировать технологические процессы в компьютере (цифровой двойник). LS-DYNA является одной из таких программ, позволяющих разрабатывать моделирование процессов сверления [9].

Цель исследования – осуществление конечно-элементного моделирования процессов сверления титанового сплава и на его основе оценка влияния элементов режима резания и ультразвуковых колебаний на силы резания.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе рассматривали два варианта имитации обработки отверстий.

Первый вариант заключался в сверлении заготовки, элементы которой задавались методом Лагранжа (рис.1 а), второй вариант – в сверлении заготовки, элементы которой задавались методом Галеркина (рис. 1 б). Последний вариант позволяет существенно проще и за более короткий временной промежуток оценить влияние ультразвуковых колебаний на энергосиловые параметры процесса обработки.

По первому варианту модель состояла из двух частей: сверла 1 и заготовки 2 (рис. 1). Фиксация заготовки осуществлялась по боковой поверхности. Угол сверла при вершине составлял 130° . Угловая скорость вращения сверла – 160 об/с; подача – 0,2 мм/об.

Заготовка задавалась в виде цилиндра с отверстием, при этом верхняя плоскость представляла собой конус, вытянутый в направлении подачи сверла. Величина конуса соответствовала углу при вершине сверла (130°). Размеры заготовки составляли $\varnothing 12 \times 0,8$ мм, сверла – $\varnothing 10 \times 25$ мм, элементов заготовки – $0,05 \times 0,05 \times 0,025$ мм. Размеры элементов у сверла в зоне контакта режущего

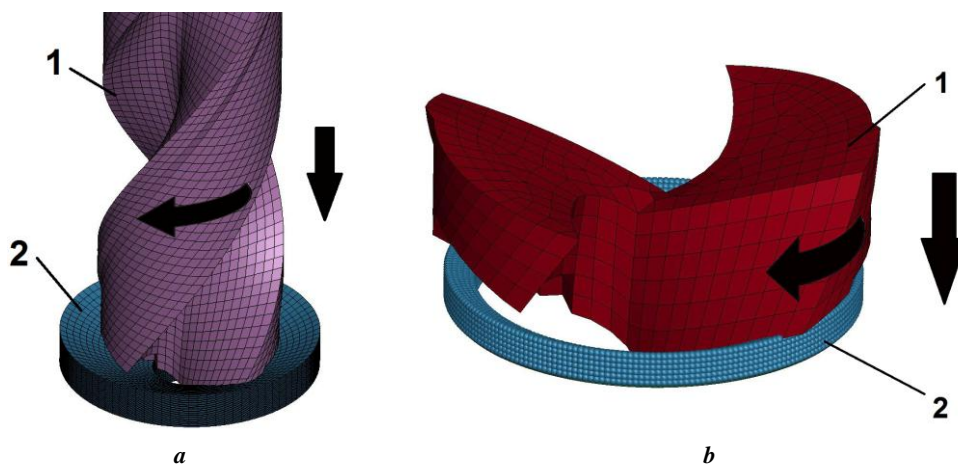


Рис. 1. Схема процесса сверления цилиндрической заготовки методом Лагранжа (а) и трубной заготовки методом Галеркина (б): 1 – сверло, 2 – заготовка

Рис.1. Схема процесса сверления цилиндрической заготовки методом Лагранжа (а) и трубной заготовки методом Галеркина (б): 1 – сверло, 2 – заготовка

клина также составляли 0,05 мм. Сама модель заготовки содержала 2 млн элементов и 15 тыс. элементов сверла (сверло перед расчетом было обрезано по длине для ускорения времени расчета).

В качестве материала исходной заготовки использовали титановый сплав BT6, задаваемый моделью *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY с определением критерия разрушения Gissmo в карте MAT_ADD_EROSION [10; 11]. Данные модели материала позволили получить кривые упрочения в зависимости от скорости деформации, используя табличные данные в карте DEFINE_TABLE, а критерий разрушения от напряженного состояния – с помощью параметров триаксилиты и Lode. Теплофизические характеристики материала задавали в карте MAT_THERMAL_ISOTROPIC (теплопроводность и теплоемкость).

Для заготовки определялся тип элемента *SECTION_SOLID с полноинтегрированной элементной формулировкой (-2), применяемой при плохом соотношении сторон.

Сверло рассматривалось как недеформируемое тело с помощью модели материала *MAT_RIGID с параметрами стали. Для инструмента определялся тип элемента *SECTION_SOLID с пониженным интегрированием.

Контакт между сверлом и заготовкой задавался картой *ERODING_NODES_TO_SURFACE. Этот контакт позволял учесть разрушения элементов в процессе резания и обеспечивал контакт с последующими внутренними элементами заготовки. Величина коэффициента трения составляла 0,05 [12]. Для отсутствия проникновения отхода в заготовку определялся самоконтакт с помощью карты CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE.

Для обеспечения продольной подачи и вращения сверла использовали карту BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID, определение графиков движения осуществлялось с помощью карты DEFINE_CURVE.

Для проведения прочностного расчета совместно с тепловым определялась карта *CONTROL_SOLUTION, а также использовали тепловые карты CONTROL_THERMAL_, позволяющие определять настроечные параметры теплового расчета. На все элементы модели устанавливалась начальная температура 200° с помощью карты INITIAL_TEMPERATURE_SET.

Для вывода параметров тензора деформации на заготовке определялась карта DATABASE_EXTENT_BINARY с заданием параметра STRFLG=1.

Для ускорения времени расчета корректировали временной шаг с помощью параметра DT2MS в карте CONTROL_TIMESTEP. Значение этого параметра подбирали опытным путем так, чтобы вносимые воздействия незначительно влияли на весь процесс сверления.

С целью устранения вышеупомянутых недостатков во второй части данной работы в качестве метода, описывающего математическую модель заготовки, использовали бессеточный метод Галеркина (SPG). В этом методе отсутствуют в явном виде отдельные элементы, а разрушение задается потерей связей между узлами. Кроме того, как было ранее установлено, данный метод чувствителен и к ультразвуковым колебаниям [13].

Для оценки влияния ультразвуковых колебаний на эффективность процесса сверления в направлении про-

дольной подачи инструмента вводили синусоидальное смещение, описываемое зависимостью [14]

$$Y = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \eta \cdot t) - s \cdot t,$$

где A – амплитуда воздействия УЗ колебаний;

η – частота воздействия;

t – текущее время;

s – величина подачи в единицу времени.

Для данной модели были заданы следующие параметры: $A=0,013$ мм; $\eta=20$ кГц; $s=4$ мм/сек. Кроме основной частоты в 20 кГц, также были рассмотрены варианты с частотой 10 и 40 кГц.

По данному варианту модель состояла из двух частей: сверла 1 и заготовки 2. Фиксация заготовки осуществлялась по ее нижней части. Угловая скорость вращения сверла составляла 16 об/с, подача – 0,22 мм/об.

Заготовку задавали в виде трубной модели, вытянутой вдоль продольной подачи сверла. Ее верхняя плоскость также представляла собой конус, вытянутый в направлении подачи сверла. Наружный диаметр трубной заготовки составлял $\varnothing 9$ мм, внутренний $\varnothing 8$ мм, толщина заготовки 0,625 мм. Размеры элементов заготовки 0,12×0,12×0,12 мм. Сама модель заготовки содержала 6332 элемента и 860 элементов для сверла.

Как и в первом варианте, в качестве материала исходной заготовки был выбран титановый сплав BT6, задаваемый моделью *MAT_JOHNSON_COOK. В данной карте отсутствовал критерий разрушения материала, поскольку в модели SPG вместо разрушения описывается разделение материала [15].

Контакт между сверлом и заготовкой задавали картой *AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE так как разрушение элементов заготовки отсутствовало. Величина коэффициента трения составляла 0,05.

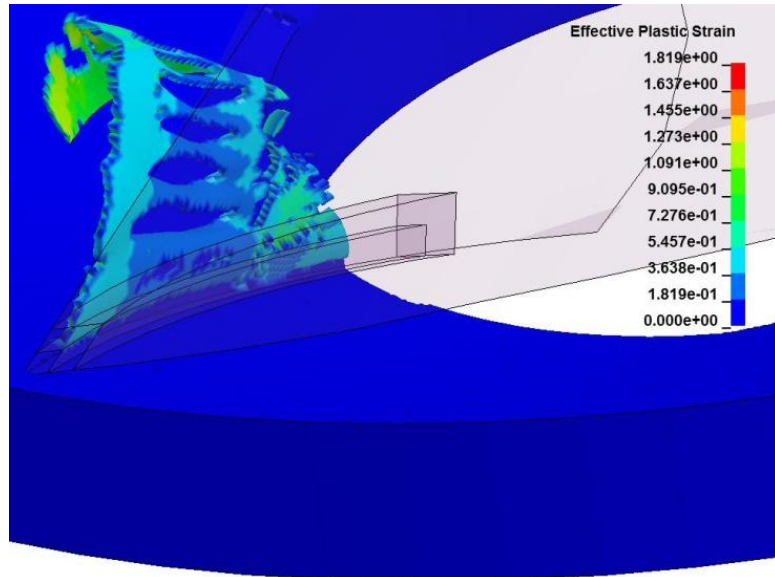
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) на начальных этапах сверления приведены на рис. 2–4. Можно отметить, что наиболее эффективное напряжение находилось в зоне образования стружки от режущего клина сверла (рис. 2 а).

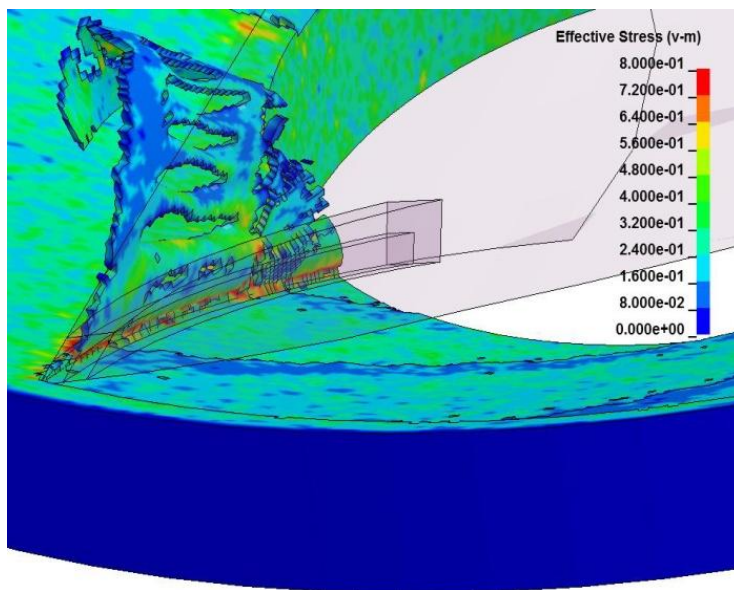
Как видно из рис. 2, стружка представляет собой «рваные участки металла» с последующим их отрывом от заготовки. Сливная стружка не образуется (рис. 3, 4), что характерно для обработки титановых сплавов.

Усилие сверления (рис. 5) соответствует значению 0,12 кН. Энергия деформирования на этапе времени 16 мсек (4 оборота сверла) равна 18 Дж.

Одним из недостатков лагранжевого метода является потеря энергии при удалении элемента стружки. Например, в данном случае потеря энергии составила 55 %, что фактически в 2 раза уменьшает точность расчета. Уменьшить энергию удаления элементов позволяет увеличение их количества или использование других подходов к решению подобных задач. Вторым недостатком данного метода – сложность в оценке влияния на процесс сверления энергии ультразвуковых колебаний, позволяющих существенно уменьшить энергетические затраты на формообразование отверстий [17–19].



a



b

*Рис. 2. Отделение стружки на начальной стадии сверления:
a – вывод по пластической деформации; b – по напряжению von mises*

*Рис. 2. Отделение стружки на начальной стадии сверления:
a – вывод по пластической деформации; b – по напряжению von mises*

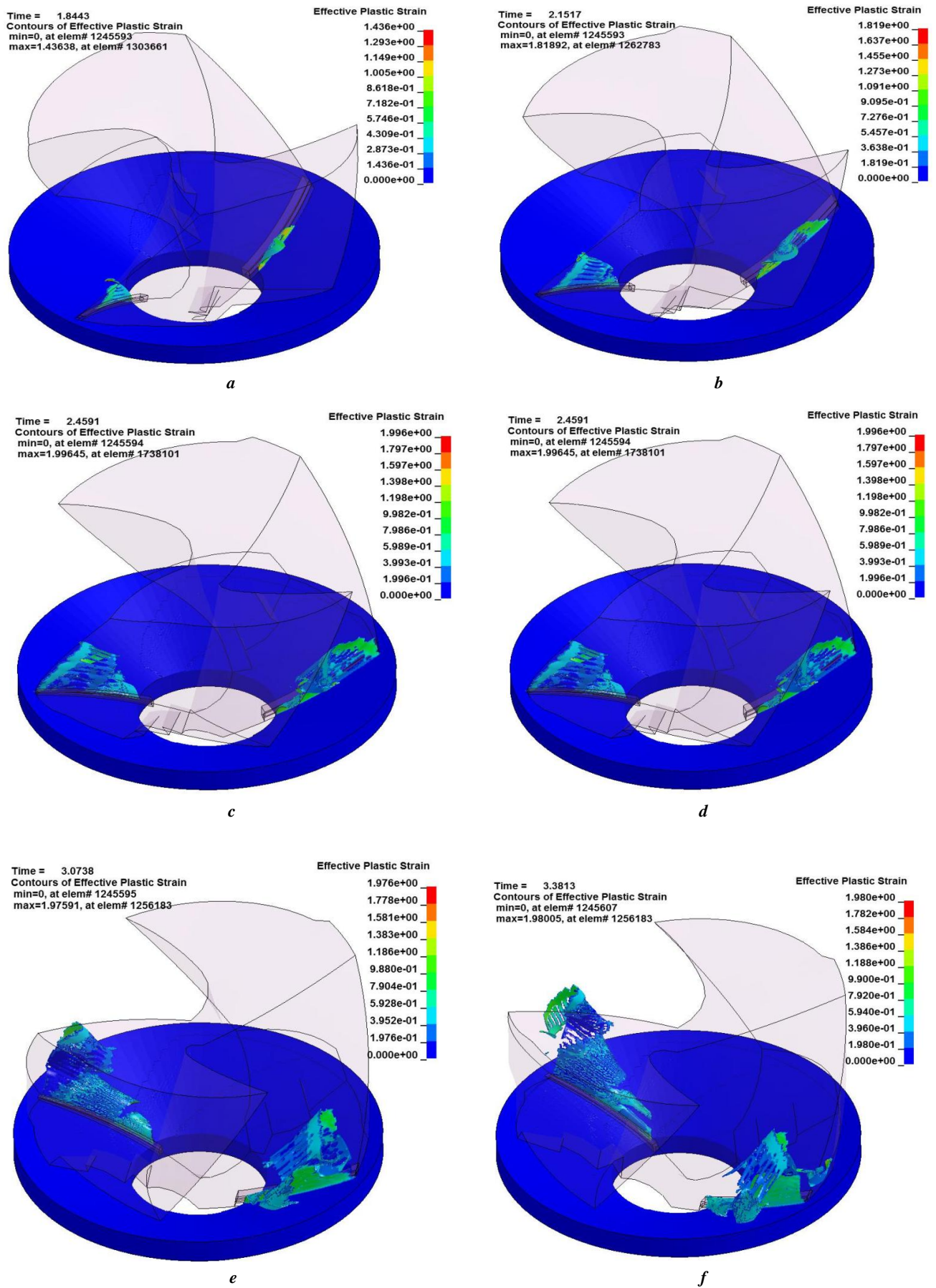


Рис. 3. Пластическая деформация на начальных этапах процесса сверления. Показаны последовательные во времени результаты моделирования (а, в, с, d, e, f)
Рис. 3. Пластическая деформация на начальных этапах процесса сверления. Показаны последовательные во времени результаты моделирования (а, в, с, d, e, f)

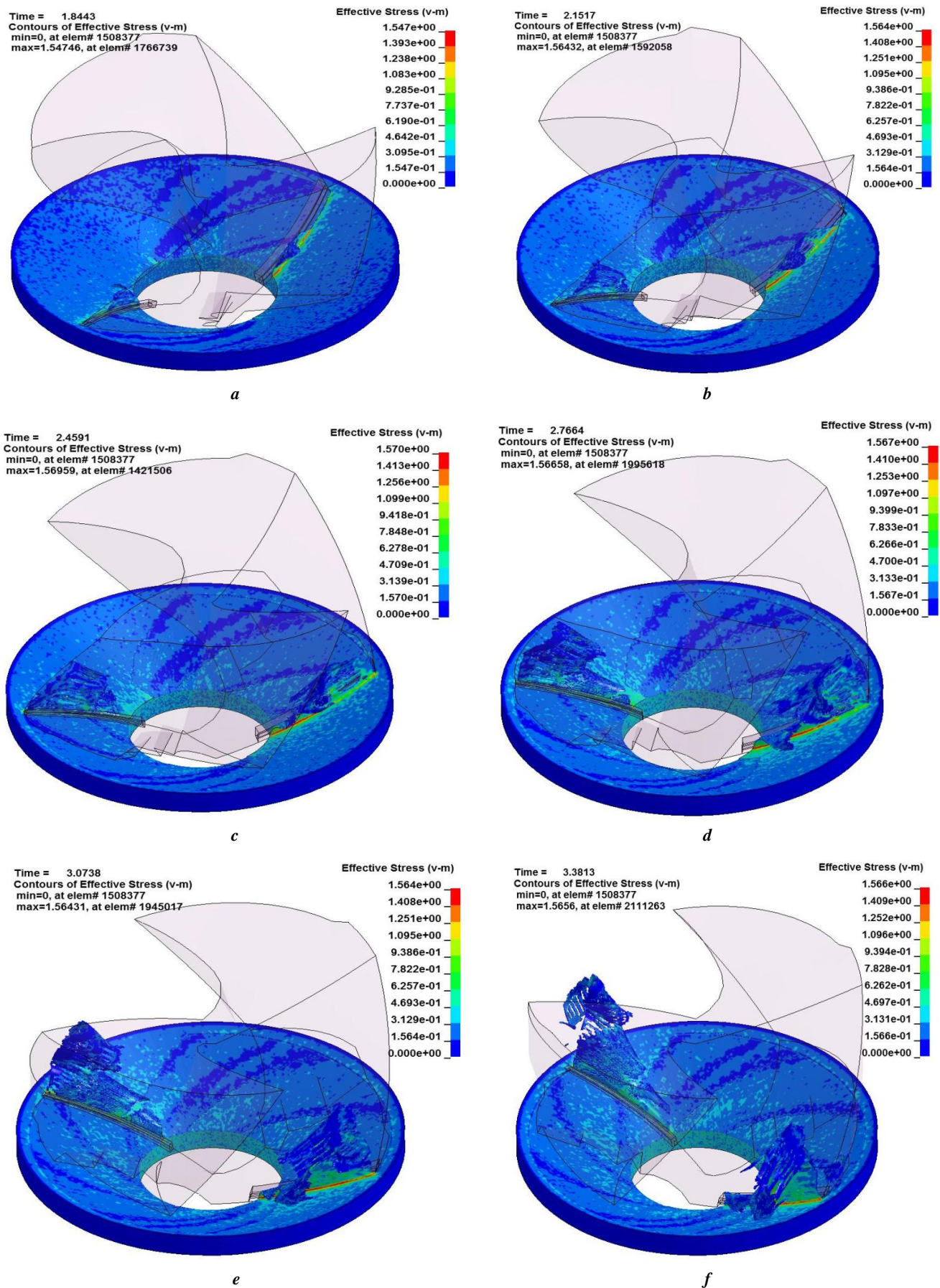


Рис. 4. Напряжения Von mises на начальных этапах процессов сверления. Показаны последовательные во времени результаты моделирования (а, в, с, d, e, f)
Рис. 4. Напряжения Von mises на начальных этапах процессов сверления. Показаны последовательные во времени результаты моделирования (а, в, с, d, e, f)

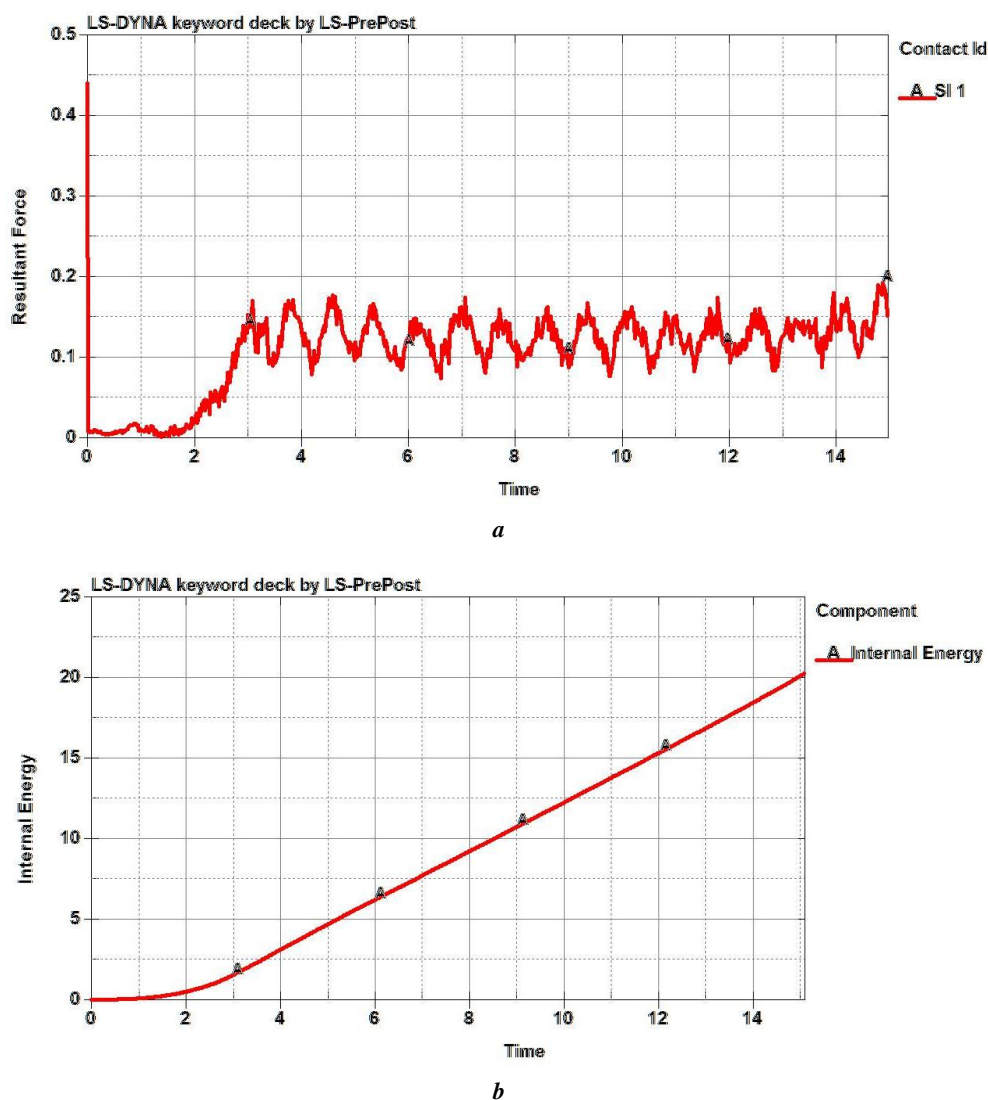


Рис. 5. Усилия сверления (а) и энергия деформирования заготовки (б)
Рис. 5. Усилия сверления (а) и энергия деформирования заготовки (б)

Результаты моделирования (рис. 6–8) показывают, что наложение колебаний способствует снижению усилия сверления. Введение колебаний при частоте 10 кГц (высокочастотные колебания) приводит к уменьшению усилия на 5 %, при частоте 20 кГц (УЗК) – на 30 %, при частоте 40 кГц (УЗК) – на 50 %. Полученные данные позволяют рассчитывать на повышение точности обработки и повышения стойкости режущего инструмента за счет снижения результирующей силы [18; 19]. По затрачиваемой энергии результаты обратные, воздействие частоты 10–20 кГц приводит к увеличению энергии на 20 %, а частоты 40 кГц – на 37 %.

Некоторое смещение оси сверла относительно оси заготовки (рис. 9) приводит к уменьшению усилия сверления на 15–20 % (рис. 10). При этом энергия деформирования увеличивается на 0,8–1 Дж. Однако этот прием связан с опасностью возникновения увода сверла, что особенно опасно при глубоком сверлении [19; 20].

Данные результаты необходимо учитывать при разработке программ роботизированной групповой обра-

ботки отверстий сверлением в процессе технологической подготовки производства.

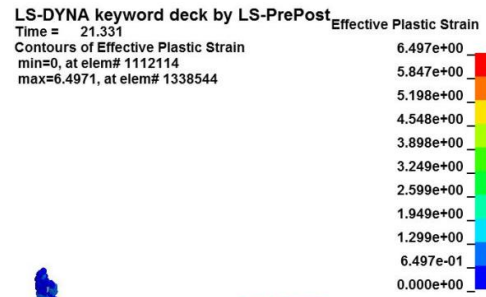
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании представленных результатов исследования построены модели процесса сверления, решенные методами Лагранжа и Галеркина. Данные модели позволили провести исследование влияние режима обработки на силы и внутреннюю энергию без использования дорогостоящего процесса обработки на реальном технологическом оборудовании. Разработана методика создания конечной модели процесса сверления для труднообрабатываемого материала – титанового сплава. Получена модель, которая способна оценить влияние ультразвуковых колебаний на силы резания.

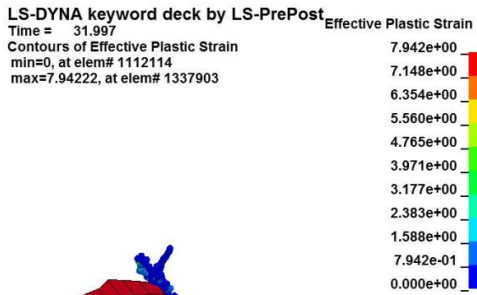
Следует отметить, что при моделировании процесса резания методом конечных элементов в качестве оценки влияния факторов приняты величины максимальных значений результирующей силы.



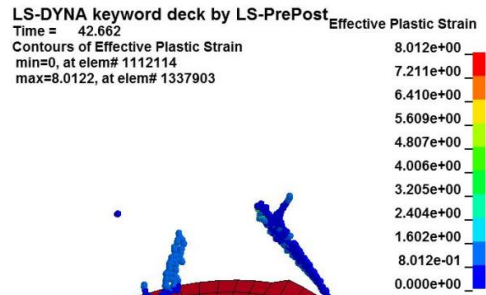
a



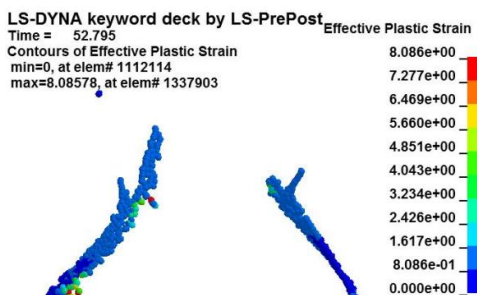
b



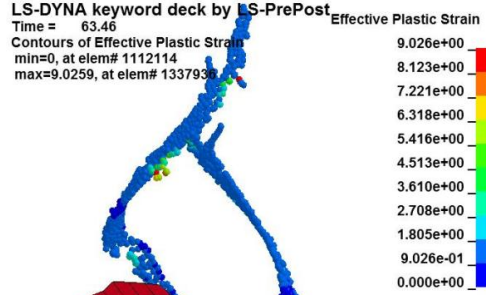
c



d



e



f

Рис. 6. Результаты сверления трубной заготовки по пластической деформации. Показаны последовательные во времени результаты моделирования (a, в, с, d, e, f)
Рис. 6. Результаты сверления трубной заготовки по пластической деформации. Показаны последовательные во времени результаты моделирования (a, в, с, d, e, f)

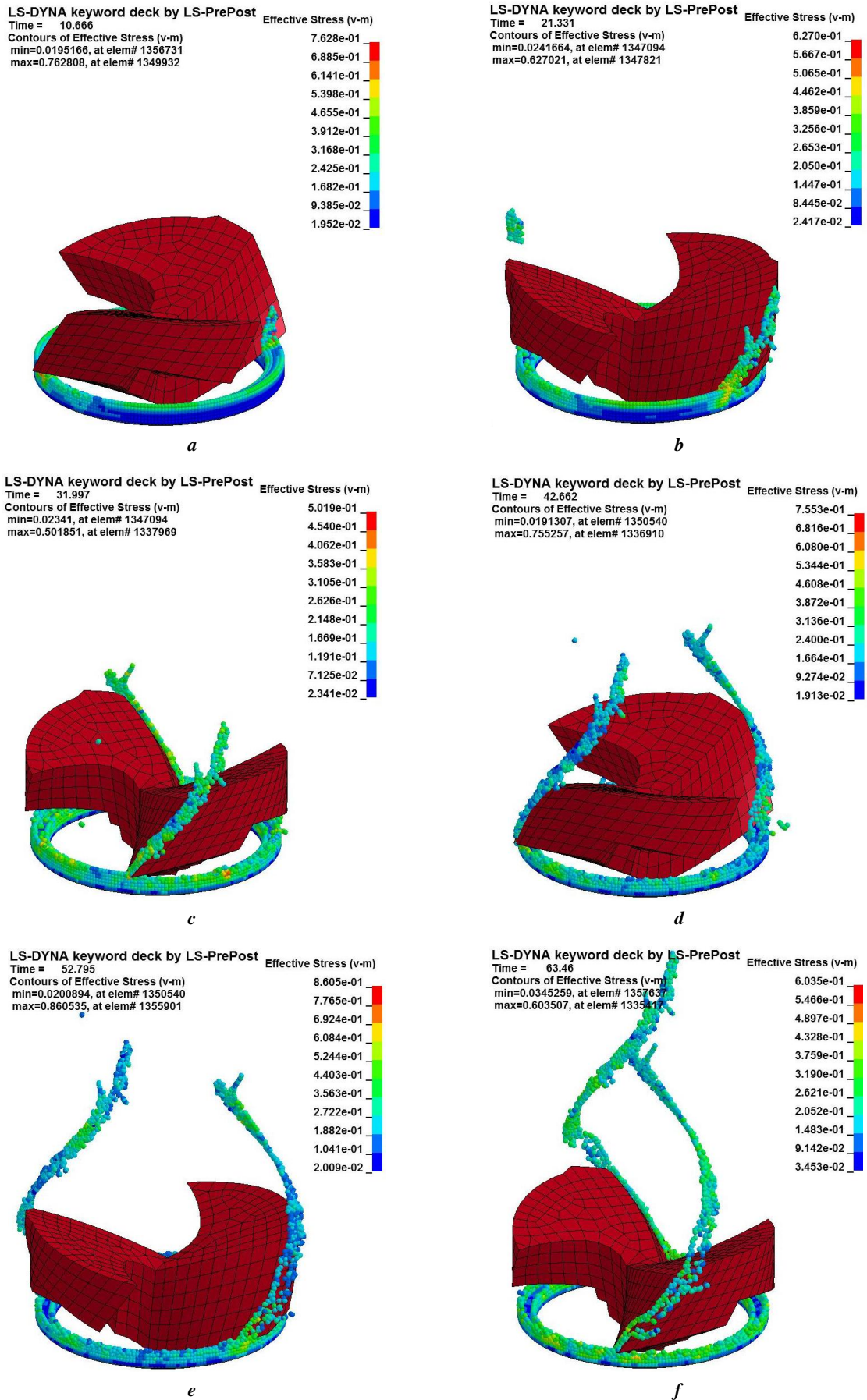
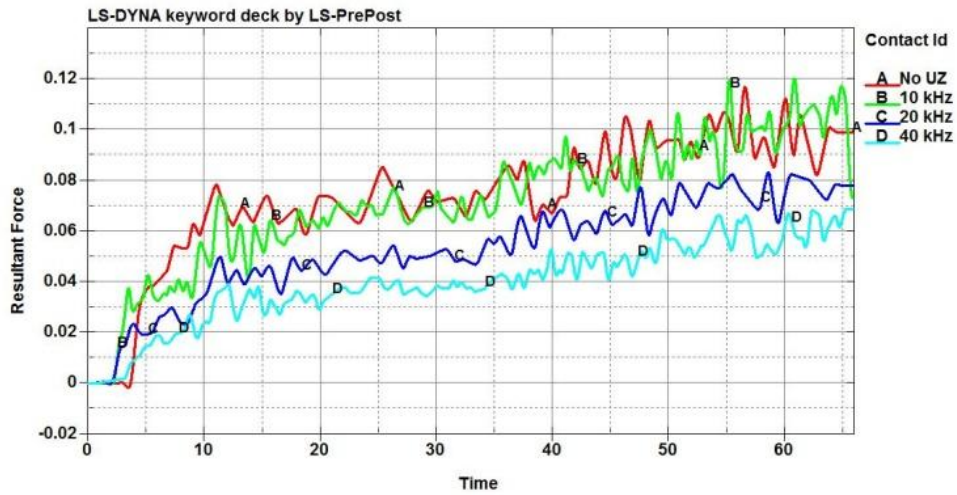
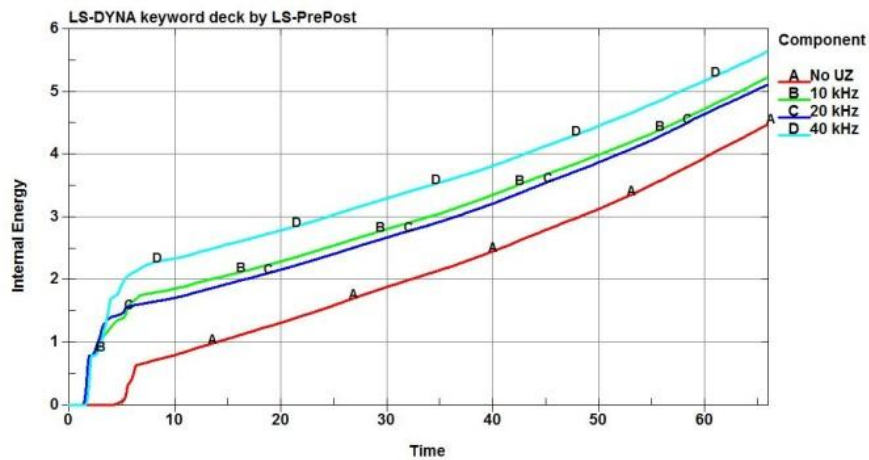


Рис. 7. Результаты сверления трубной заготовки по напряжению Von Mises. Показаны последовательные во времени результаты моделирования (а, в, с, d, e, f)

Рис. 7. Результаты сверления трубной заготовки по напряжению Von Mises. Показаны последовательные во времени результаты моделирования (а, в, с, d, e, f)



a



b

Рис. 8. Сравнение по усредненному усилию (фильтр на частоте 400 мс), кН (a) и энергии деформирования, Дж (b) при различной частоте УЗК (А – без УЗК; В – 10 кГц; С – 20 кГц; D – 40 кГц)

Рис. 8. Сравнение по усредненному усилию (фильтр на частоте 400 мс), кН (a) и энергии деформирования, Дж (b) при различной частоте УЗК (А – без УЗК; В – 10 кГц; С – 20 кГц; D – 40 кГц)

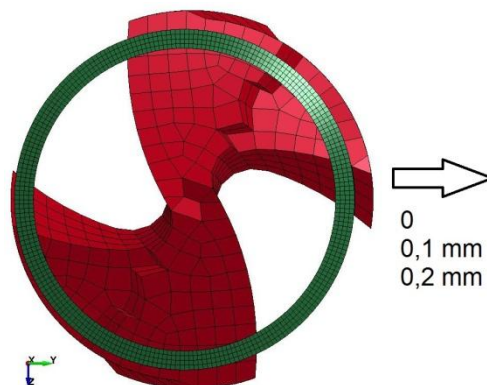
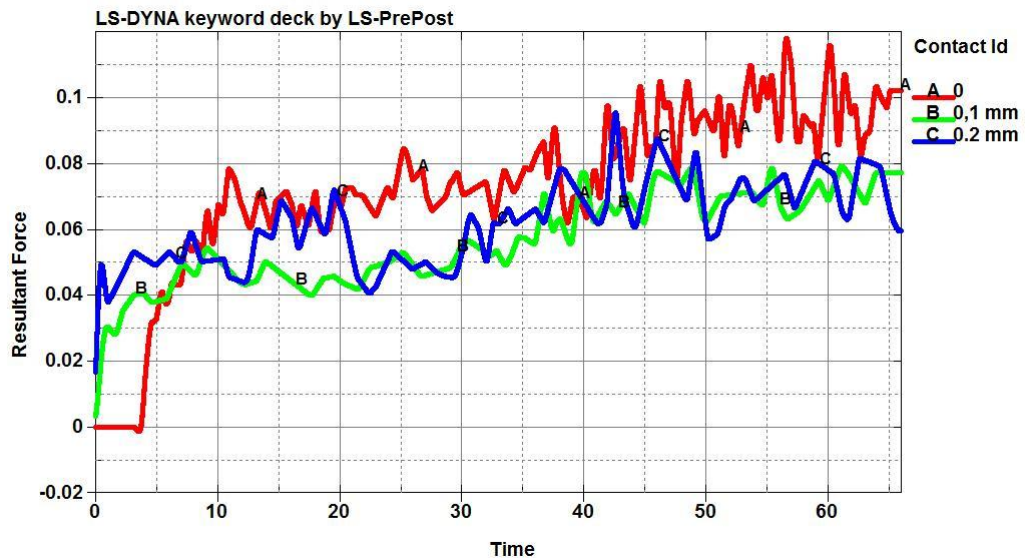
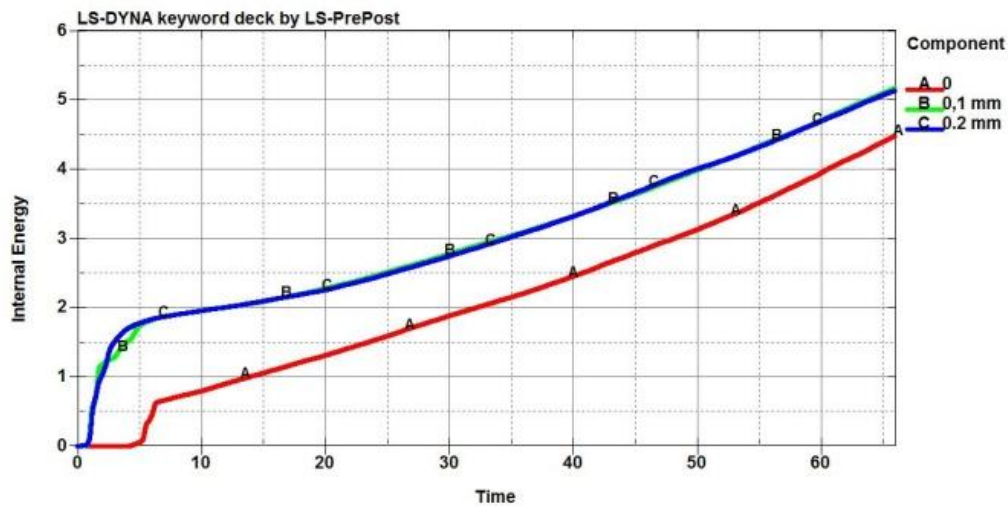


Рис. 9. Смещение продольной оси сверла относительно оси заготовки на 0,1 и 0,2 мм

Рис. 9. Смещение продольной оси сверла относительно оси заготовки на 0,1 и 0,2 мм



a



b

Рис. 10. Сравнение по усредненному усилию (фильтр на частоте 400 мс), кН (а) и энергии деформирования, Дж (б) при различном смещении сверла (А – без смещения; В – 0,1 мм; С – 0,2 мм)

Рис. 10. Сравнение по усредненному усилию (фильтр на частоте 400 мс), кН (а) и энергии деформирования, Дж (б) при различной смещении сверла (А – без смещения; В – 0,1 мм; С – 0,2 мм)

Для более подробного анализа и учета всех технологических параметров (механические свойства теплофизические характеристики титанового сплава, режимы резания, инструмент, СОЖ) на процесс сверления, очевидно, требуется большее число экспериментов с уменьшением шага по скорости движения осевой подачи, на разных частотах вращения шпинделя, с использованием энергии ультразвукового поля. Необходимо отметить, что на ЭВМ с характеристиками «процессор – Intel I7-9700KF 8×3,6 ГГц; Озу – Hyperx Kingston 32 Гб, 3600 МГц» расчет занимает более 5 дней.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, выполненные численные исследования показывают, что их использование позволяет существенно сократить длительность проведения экспериментальных исследований и оценить влияние элементов режима резания и конструктивных параметров формообразования новых поверхностей деталей машин. Однако для полной верификации результатов численных исследований необходимо осуществить их экспериментальную проверку и выполнить внесение полученных корректив в расчетные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышев В.И. Становление и развитие науки о резании материалов. Тольятти: ТГУ, 2015. 508 с.
2. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1974. 252 с.
3. Цвиккер У. Титан и его сплавы. М.: Metallurgiya, 1979. 362 с.
4. Vijayabaskar P., Hynes N.R.J. Simulation of Friction Stir Drilling Process // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1953. Article number 140109. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5033284>.
5. Кирсанов А.Р. Методика оценки повреждаемости ГТД на этапах его создания, изготовления и эксплуатации от поражающего воздействия птиц : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 205 с.
6. Wang P., Wang D. Study on ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V using 3-flute drill in the finite element simulation // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020. Vol. 234. № 7. P. 1298–1310. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406219893001>.
7. Su Y., Chen D.D., Gong L. 3D Finite Element Analysis of Drilling of Ti-6Al-4V Alloy // Proceedings of the International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications. 2015. P. 907–911. DOI: <https://doi.org/10.2991/cisia-15.2015.245>.
8. Abdelhafeez A.M., Soo S.L., Aspinwall D., Dowson A., Arnold D. A Coupled Eulerian Lagrangian Finite Element Model of Drilling Titanium and Aluminium Alloys // SAE International Journal of Aerospace. 2016. Vol. 9. № 1. P. 198–207. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-2126>.
9. Дударев А.С., Илюшкин М.В., Николаев И.Ф. Моделирование процесса сверления слоистого материала в LS-DYNA // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2020. Т. 22. № 2. С. 64–74.
10. Dudarev A., Volegov K., Kurzanov G. Rheonomic phenomenon shrinkage of holes drilled in fibreglass and carbon fibre-reinforced polymer composites // Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes. 2017. Vol. 3. № 1. Article number 17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40759-017-0033-1>.
11. Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургиздат, 1958. 390 с.
12. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
13. Киселев Е.С., Малышев В.И., Ковальногов В.Н. Новые ультразвуковые технологии изготовления деталей машин. Тольятти: ТГУ, 2014. 327 с.
14. Киселёв Е.С., Благовский О.В. Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей. СПб.: Лань, 2020. 140 с.
15. Percin M., Aslantas K., Uzun I., Kaynak Y., Cicek A. Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: the effects of cooling/lubricating // Precision Engineering. 2016. Vol. 45. P. 450–462. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2016.02.015](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.02.015).
16. Li Z., Zhang D., Jiang X., Qin W., Geng D. Study on rotary ultrasonic-assisted drilling of titanium alloys (Ti6Al4V) using 8-facet drill under no cooling condition // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 90. № 9-12. P. 3249–3264. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9593-1>.
17. Wang T., Liu Z., Qiu Y., Feng Y., Han X. Removal Mechanism of Titanium Alloy Material in Ultrasound Vibration Drilling // Materials Science Forum. 2020. Vol. 993. P. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.993.3>.
18. Lu Danni. Study on Ultrasonic Vibration Boring Technology of Difficult-to-machine Materials (TC4). Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2018. 241 p.
19. Wang T., Liu X., Liu Z., Liu Y., Zhang Y., Wang Z. ANSYS is used on drilling Inner Blind Hole on Deep Hole // Wireless Personal Communications. 2018. Vol. 103. № 1. P. 1077–1088. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5497-8>.
20. Liang W., Xu J., Ren W., Yu Z., Liu Q., Yu H. Experimental Study on Ultrasonic Vibration Assisted Drilling of Ti-6Al-4V at Different Amplitudes // 2019 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO. 2019. P. 20–23. DOI: [10.1109/3M-NANO46308.2019.8947411](https://doi.org/10.1109/3M-NANO46308.2019.8947411).

REFERENCES

1. Malyshev V.I. *Stanovlenie i razvitie nauki o rezanii materialov* [Становление и развитие науки о резании материалов]. Tolyatti, TGU Publ., 2015. 508 p.
2. Poduraev V.N. *Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Резание труднообрабатываемых материалов]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 252 p.
3. Tsvikker U. *Titan i ego splavy* [Титан и его сплавы]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 362 p.
4. Vijayabaskar P., Hynes N.R.J. Simulation of Friction Stir Drilling Process. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1953, article number 140109. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5033284>.
5. Kirsanov A.R. *Metodika otsenki povrezhdaemosti GTD na etapakh ego so-zdaniya, izgotovleniya i ekspluatatsii ot porazhayushchego vozdeystviya ptits* [Методика оценки повреждаемости ГТД на этапах его создания, изготовления и эксплуатации от поражающего воздействия птиц]. Diss. kand. tekhn. nauk. Moscow, 2016. 205 p.
6. Wang P., Wang D. Study on ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V using 3-flute drill in the finite element simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, vol. 234, no. 7, pp. 1298–1310. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406219893001>.
7. Su Y., Chen D.D., Gong L. 3D Finite Element Analysis of Drilling of Ti-6Al-4V Alloy. *Proceedings of the International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications*, 2015, pp. 907–911. DOI: <https://doi.org/10.2991/cisia-15.2015.245>.
8. Abdelhafeez A.M., Soo S.L., Aspinwall D., Dowson A., Arnold D. A Coupled Eulerian Lagrangian Finite Element Model of Drilling Titanium and Aluminium Alloys. *SAE International Journal of Aerospace*, 2016, vol. 9, no. 1, pp. 198–207. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-2126>.
9. Dudarev A.S., Ilyushkin M.V., Nikolaev I.F. Modeling the drilling process of layered material in program LS-DYNA. *Vestnik Permskogo natsionalnogo*

- issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. *Mashinostroenie, materialovedenie*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 64–74.
10. Dudarev A., Volegov K., Kurzanov G. Rheonomic phenomenon shrinkage of holes drilled in fibreglass and carbon fibre-reinforced polymer composites. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2017, vol. 3, no. 1, article number 17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40759-017-0033-1>.
 11. Kottrell A.X. *Dislokatsii i plasticheskoe techenie v kristallakh* [Дислокации и пластическое течение в кристаллах]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1958. 390 p.
 12. Kumabe D. *Vibratsionnoe rezanie* [Вибрационное резание]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 424 p.
 13. Kiselev E.S., Malyshev V.I., Kovalnogov V.N. *Novye ultrazvukovye tekhnologii izgotovleniya detaley mashin* [New ultrasonic technologies of machine parts production]. Tolyatti, TGU Publ., 2014. 327 p.
 14. Kiselev E.S., Blagovskiy O.V. *Upravlenie formirovaniem ostatochnykh napryazheniy pri izgotovlenii otvetstvennykh detaley* [Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей]. Sankt Petersburg, Lan Publ., 2020. 140 p.
 15. Percin M., Aslantas K., Uzun I., Kaynak Y., Cicek A. Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: the effects of cooling/lubricating. *Precision Engineering*, 2016, vol. 45, pp. 450–462. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2016.02.015](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.02.015).
 16. Li Z., Zhang D., Jiang X., Qin W., Geng D. Study on rotary ultrasonic-assisted drilling of titanium alloys (Ti6Al4V) using 8-facet drill under no cooling condition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 90, no. 9-12, pp. 3249–3264. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9593-1>.
 17. Wang T., Liu Z., Qiu Y., Feng Y., Han X. Removal Mechanism of Titanium Alloy Material in Ultrasound Vibration Drilling. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 993, pp. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.993.3>.
 18. Lu Danni. *Study on Ultrasonic Vibration Boring Technology of Difficult-to-machine Materials (TC4) [D]*. Xi'an, Xi'an Shiyou University Publ., 2018. 241 p.
 19. Wang T., Liu X., Liu Z., Liu Y., Zhang Y., Wang Z. ANSYS is used on drilling Inner Blind Hole on Deep Hole. *Wireless Personal Communications*, 2018, vol. 103, no. 1, pp. 1077–1088. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5497-8>.
 20. Liang W., Xu J., Ren W., Yu Z., Liu Q., Yu H. Experimental Study on Ultrasonic Vibration Assisted Drilling of Ti-6Al-4V at Different Amplitudes. *2019 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO*, 2019, pp. 20–23. DOI: [10.1109/3M-NANO46308.2019.8947411](https://doi.org/10.1109/3M-NANO46308.2019.8947411).

Использование цифровых двойников для математического моделирования ультразвукового сверления титановых заготовок

© 2021

Илюшкин Максим Валерьевич^{1,3}, кандидат технических наук, заместитель директора

Савельев Кирилл Сергеевич^{2,4}, аспирант кафедры «Инновационные технологии в машиностроении»

Киселев Евгений Степанович^{*2,5}, доктор технических наук, профессор, директор Регионального технологического центра промышленного центра в машиностроении

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

²Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

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

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

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0473-4699>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

Abstract: В статье рассматривается создание и исследование компьютерных моделей сверления заготовок из титанового сплава методом Лагранжа и Галеркина. Разработанные конечно-элементные модели предназначены для проведения исследований процесса механической обработки и оптимизации технологических параметров резания. Представлены результаты численных исследований сверления титановых заготовок с использованием программ математического моделирования, позволяющие полностью имитировать технологические процессы в компьютере (цифровой двойник). В качестве программы для моделирования процесса съема припуска с титановой заготовки применяли программный многоцелевой продукт конечно-элементного моделирования и анализа высоко-линейных динамических процессов с использованием различных схем интегрирования по времени Ls-DYNA. Применение метода Галеркина позволяет адекватно описать процесс сверления с введением в зону обработки энергии ультразвукового (УЗ) поля, существенно сокращает длительность проведения экспериментальных исследований и дает возможность оценить влияние элементов режима резания и конструктивных параметров инструмента на силовые и энергетические аспекты формообразования новых поверхностей деталей машин. Оба метода пригодны для создания различных процессов механообработки, однако метод Лагранжа менее чувствителен к энергии ультразвукового поля. Введение в зону сверления заготовок из труднообрабатываемых титановых сплавов энергии ультразвукового поля позволяет существенно снизить энергетические затраты. В результате моделирования был получен расчетный файл, содержащий процесс симуляции, решение которого визуально отражает процесс сверления титановой заготовки, максимально приближенный к реальной ситуации, со снятием стружки. Однако для полной верификации результатов численных исследований необходимо осуществить экспериментальную проверку и выполнить введение полученных коррективов в расчетные данные.

Keywords: цифровой двойник; моделирование; резание; ультразвук; титан; сверление; энергия деформирования.

Acknowledgements: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 18-47-730005.

For citation: Фамилия И.О., Фамилия И.О., Фамилия И.О. Название статьи. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 00–00. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-00-00.
