

УДК 536:621.9

DOI:10.30987/2223-4608-2021-7-29-40

Е.С. Киселёв¹, д.т.н.,

М.В. Илюшкин², к.т.н.,

К.С. Савельев¹, аспирант

(¹Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32;

²Ульяновский научно-исследовательский институт
авиационной технологии и организации производства,
г. Ульяновск, ул. Врача Михайлова, д. 34)

E-mail: kec.ulstu@mail.ru

Компьютерное моделирование процессов резания заготовок из труднообрабатываемых материалов с использованием цифровых двойников

Рассмотрено создание компьютерных моделей обработки резанием заготовок из труднообрабатываемых титановых сплавов на примере процесса сверления. Представлены результаты численных исследований сверления отверстий в титановых заготовках с использованием программ математического моделирования, позволяющие полностью имитировать технологические процессы в компьютере (цифровой двойник).

Ключевые слова: процесс резания; труднообрабатываемые материалы; титановые сплавы; цифровой двойник; энергетические показатели.

E.S. Kiselev¹, Dr. Sc. Tech.,

M.V. Ilyushkin², Can. Sc. Tech.,

K.S. Savelyev¹, Post graduate

(¹Uliyanovsk State Technical University, 32, Severny Venets Str., Uliyanovsk, 432027;

²Uliyanovsk Scientific Research Institute of Aircraft Technology and Production Organization,
34, Vrach Mikhailov Str., Uliyanovsk)

Computer simulation of hard-to-machine billet cutting using digital twins

The formation of computer models of hard-to-machine titanium alloy billet cutting by the example of drilling is considered. There are presented results of numerical investigations of hole drilling in titanium billets using mathematical modeling software allowing the full imitation of engineering processes in computer (a digital twin).

Keywords: cutting; hard-to-machine materials; titanium alloys; digital twin; energy readings.

Существующая тенденция к снижению материалоемкости выпускаемых изделий за счет создания их из сравнительно нежестких, но прочных конструктивных элементов, и возрастающие потребности промышленности в легких конструкциях обусловили непрерывный рост объема производства деталей из

труднообрабатываемых высокопрочных сплавов. Среди них наиболее перспективными являются сплавы титана. Несмотря на относительно высокую стоимость данных материалов, удельный вес использования титановых сплавов в качестве конструктивных материалов увеличивается год от года и прежде

всего в конструкциях летательных аппаратов и высокоскоростного наземного и водного транспорта. Титан относится к самым распространенным в земной коре элементам периодической системы. Однако большие энерго- и трудозатраты на получение титана из руды и высокая себестоимость изготовления деталей из них путем снятия припусков при механической обработке в совокупности со сложностью обеспечения требуемых характеристик качества поверхностного слоя, ограничивает их применение даже в сравнении с дорогостоящими коррозионностойкими и жаропрочными сталями. Поэтому, на каждом этапе жизненного цикла конструкций из титановых сплавов необходимо минимизировать затраты на их реализацию.

Одним из таких этапов является технологическая подготовка производства, в ходе которой, несмотря на наличие многочисленных

каталогов и рекомендаций по выбору режущих инструментов и элементов режима резания, при поиске оптимальных условий выполнения технологических операций, как правило, приходится выполнять длительные и дорогостоящие станочные испытания. Однако их можно исключить, если перевести исследования процессов резания заготовок из труднообрабатываемых материалов на использование математического моделирования цифровых двойников, реализуемых с помощью современных компьютерных программ.

Рассмотрим возможность реализации данного процесса на примере формообразования отверстий в заготовках из титанового сплава ВТ-6 на операции сверления.

Исходная модель сверления (а) и принятая модель снятия припуска одной режущей кромкой (лезвием) представлена на рис. 1.

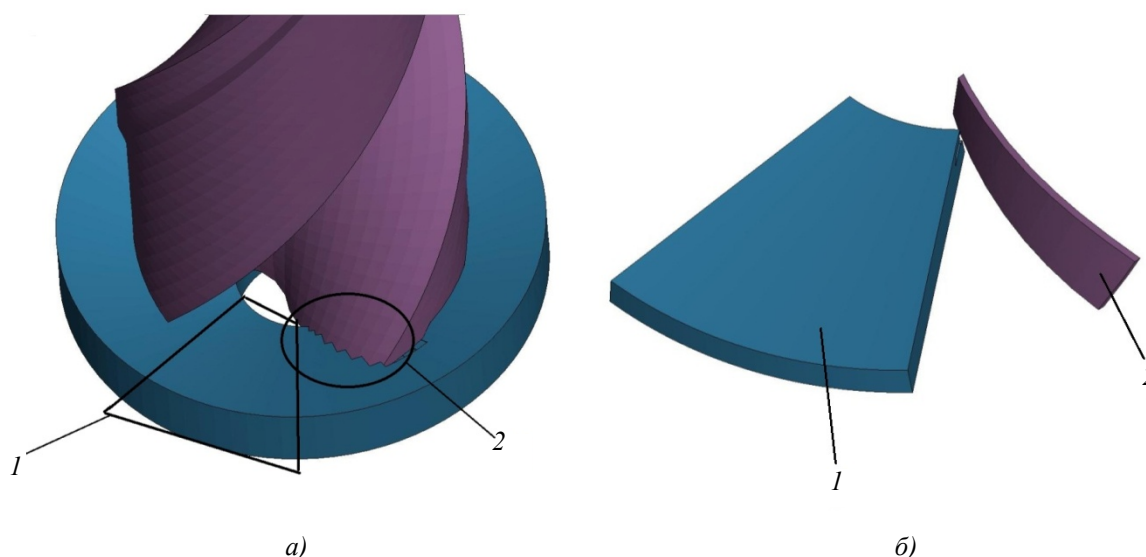


Рис. 1. Исходная (а) и принятая модель (б) сверления одной режущей кромкой (лезвием):

1 – исследуемый сектор заготовки; 2 – лезвие сверла

Модель состояла из двух частей: сектора заготовки 1 и лезвия сверла 2. Фиксация заготовки осуществлялась по нижней части заготовки. Скорость вращения сверла 38 об/с; подача 0,1 и 0,2 мм/об.

Для уменьшения объема вычислений сектор заготовки вырезался из конической модели с отверстием (наружный диаметр модели составлял 5,4 мм, диаметр отверстия 2 мм), величина конуса исходной модели соответствовала углу при вершине сверла (140°). Размеры сектора заготовки составляли 1,7×1,4×0,15 мм. Исходное сверло имело диаметр 4,7 мм. Размеры лезвия сверла

1,7×0,4 мм. Размеры элементов заготовки 0,05×0,05×0,015 мм. Размеры элементов у сверла составляли 0,03 мм. Сама модель заготовки содержала 17 020 элементов и 1440 элементов лезвия сверла. Для моделирования исследуемых процессов использовалась программа динамического анализа LS-DYNA [1]. В качестве материала исходной заготовки применялся титан ВТ6, задаваемый моделью *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY с определением критерия разрушения Gissmo в карте MAT_ADD_EROSION. Данные модели материала позволили задавать кривые упрочнения в зависимости от скорости деформации,

используя табличные данные в карте DEFINE_TABLE, а критерий разрушения от напряженного состояния с помощью параметров триаксилити и Lode. Тепловые свойства материала задавались в карте MAT_THERMAL_ISOTROPIC где определялась его теплопроводность и теплоемкость [1, 2].

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

Лезвие сверла задавалось как недеформируемый материал с помощью модели материала *MAT_RIGID с параметрами быстрорежущей стали. Для инструмента определялся тип элемента *SECTION_SOLID с пониженным интегрированием. Контакт между сверлом и заготовкой определялся картой *ERODING_NODES_TO_SURFACE [2], этот контакт позволял учесть разрушения элементов в процессе резания и обеспечил контакт с последующими внутренними элементами заготовки. Коэффициент трения в зоне контакта принимали в размере 0,05. Для отсутствия проникновения отхода в заготовку определялся самоконтакт с помощью карты CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE [1, 2]. Для обеспечения вращения лезвия сверла задавалась карта BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID,

определение графика вращения осуществлялось с помощью карты DEFINE_CURVE [1, 2]. Подача задавалась непосредственно в модели смещением сверла относительно верхней плоскости заготовки на 0,1 мм (для подачи 0,2 мм/об) и 0,05 мм (для подачи 0,1 мм/об). Данные значения связаны с тем, что при сверлении в процессе участвует 2 лезвия сверла.

Для проведения прочностного расчета совместно с тепловым определялась карта *CONTROL_SOLUTION и использовались тепловые карты CONTROL_THERMAL для определения настроечных параметров теплового расчета. На все элементы модели определялась начальная температура 20°C с помощью карты INITIAL_TEMPERATURE_SET [1, 2]. Для вывода параметров тензора деформации на заготовке определялась карта DATABASE_EXTENT_BINARY с заданием параметра STRFLG = 1.

В начале исследования для подтверждения адекватности используемой модели материала, а также для установления сеточной зависимости моделировали процесс одноосного растяжения образца из сплава ВТ6 с характеристиками, используемыми в основной модели сверления. С этой целью была создана модель образца для растяжения, один из торцов модели был зафиксирован, а на второй прикладывалось перемещение вдоль оси образца в направлении растяжения (рис. 2).

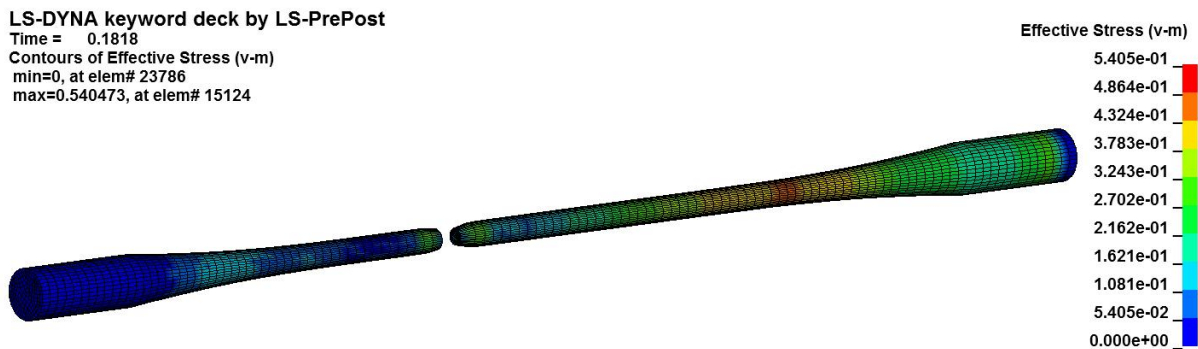


Рис. 2. Разрыв исходного образца из сплава ВТ6 при моделировании на одноосное растяжение

По результатам моделирования, представленным на рис. 2 и рис. 3, сравнивали соответствие усилия при моделировании с усилием при эксперименте и строили кривую упрочнения в сравнении с исходной кривой. Кривая упрочнения строилась для разрушаемого элемента образца по графику stress-strain. Форма образца после разрушения, а также

графики показали хорошее соответствие с реальным экспериментом. Такие же размеры сеточных элементов заготовки применяли и в основном моделировании процесса сверления [2, 3]. Результаты моделирования содержали выходные данные по напряженно-деформированному состоянию (НДС); температуре; энергосиловым параметрам процесса.

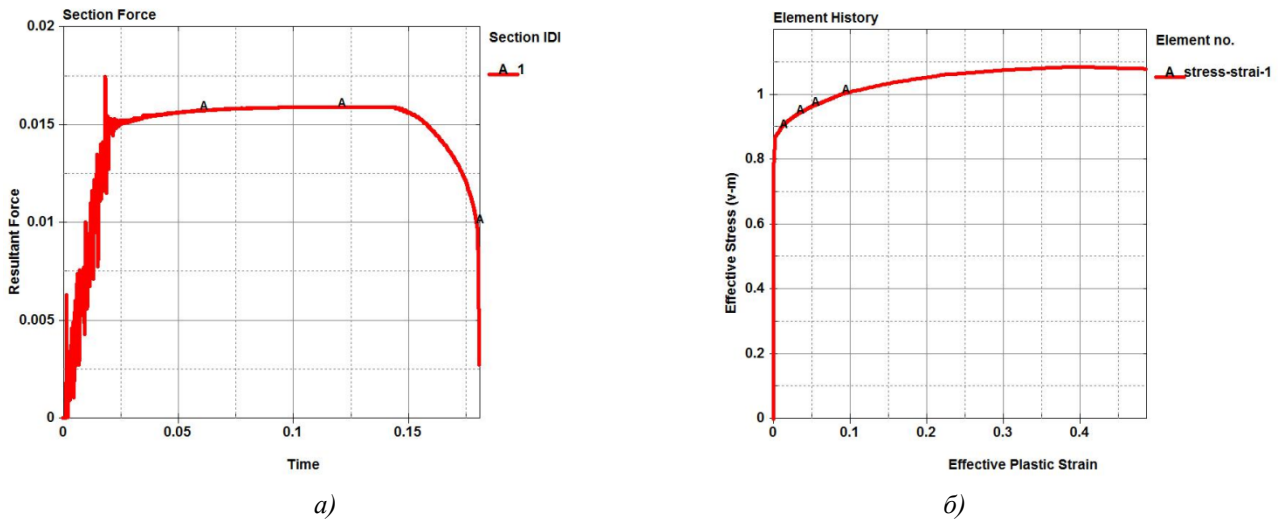


Рис. 3. Результаты моделирования на одноосное растяжение: *a* – кривая усилия, кН; *б* – кривая упрочнения

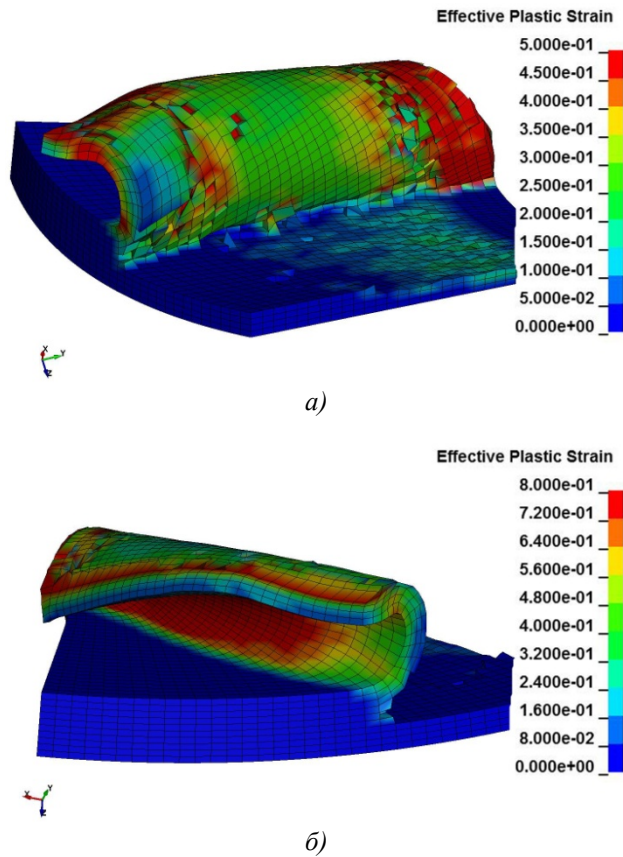


Рис. 4. Пластические деформации в зоне реза (*a*) и с обратной стороны (*б*) в процессе сверления

Исследовали этапы отделения отхода при сверлении. Как видно из результатов, представленных на рис. 4, наибольшей пластической деформации подвергается внутренняя часть стружки (отхода), при этом на основной заготовке после отделения отхода пластические деформации значительной меньше. Распределение напряжения von mises на заготов-

ке сходно с распределением пластической деформации (рис. 5).

Этапы сверления и результаты в виде палитры цвета по пластической деформации, напряжению von mises и температуре для подачи 0,1 мм/об и 0,2 мм/об приведены на рис. 6 – 9.

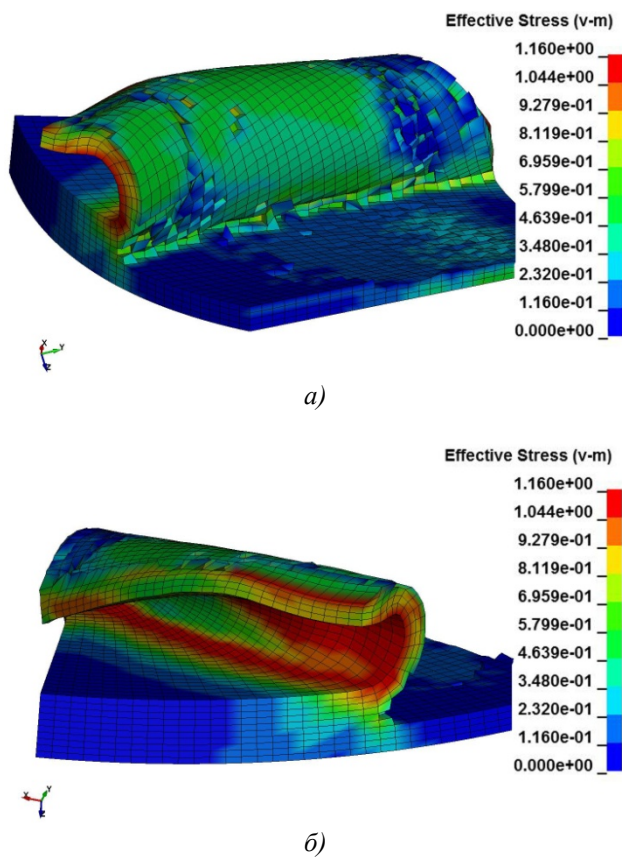


Рис. 5. Напряжение von Mises в зоне реза (а) и с обратной стороны (б) в процессе сверления

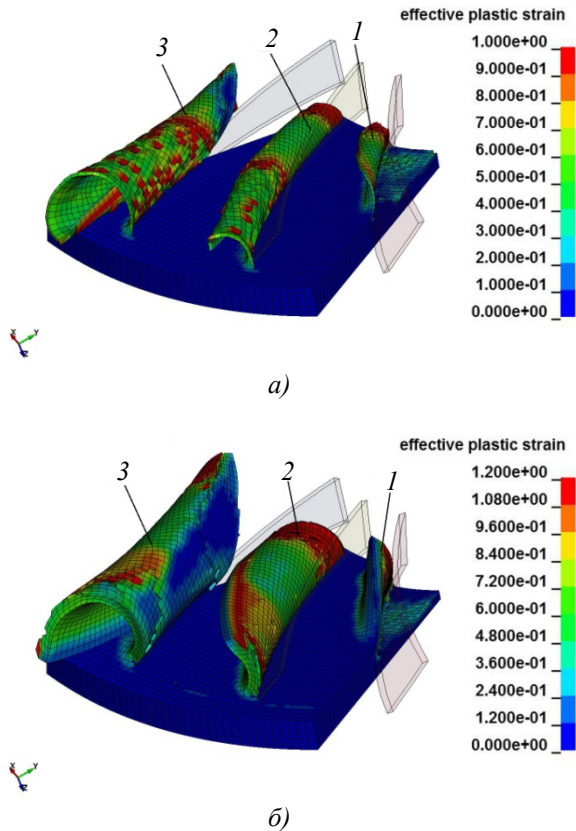


Рис. 6. Пластическая деформация в зоне резания при сверлении заготовок из титанового сплава ВТ6 с подачей 0,1 мм/об (а) и 0,2 мм/об (б) для разных скоростей резания v :
 1 – $v = 0,34$ м/с; 2 – $v = 2,17$ м/с; 3 – $v = 3,3$ м/с

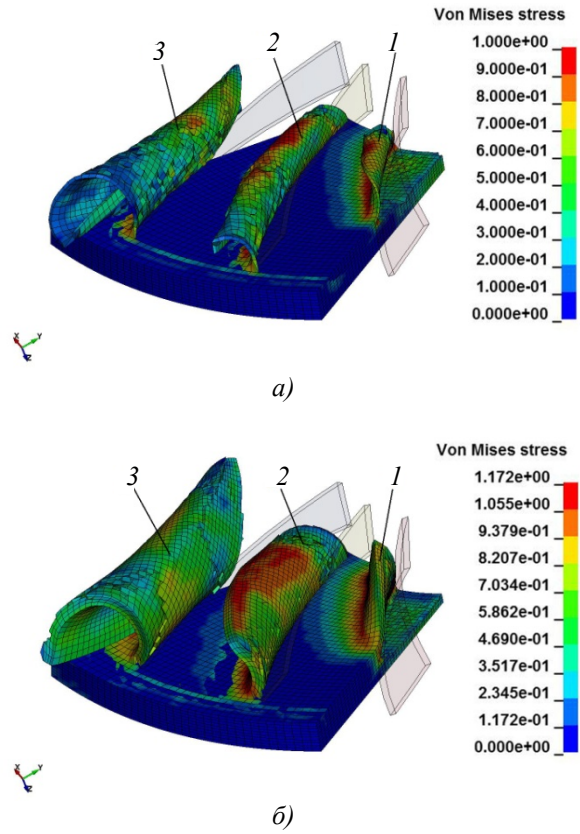


Рис. 7. Напряжения von mises в зоне резания при сверлении заготовок из титанового сплава ВТ6 с подачей 0,1 мм/об (а) и 0,2 мм/об (б) для разных скоростей резания v :
 1 – $v = 0,34$ м/с; 2 – $v = 2,17$ м/с; 3 – $v = 3,3$ м/с

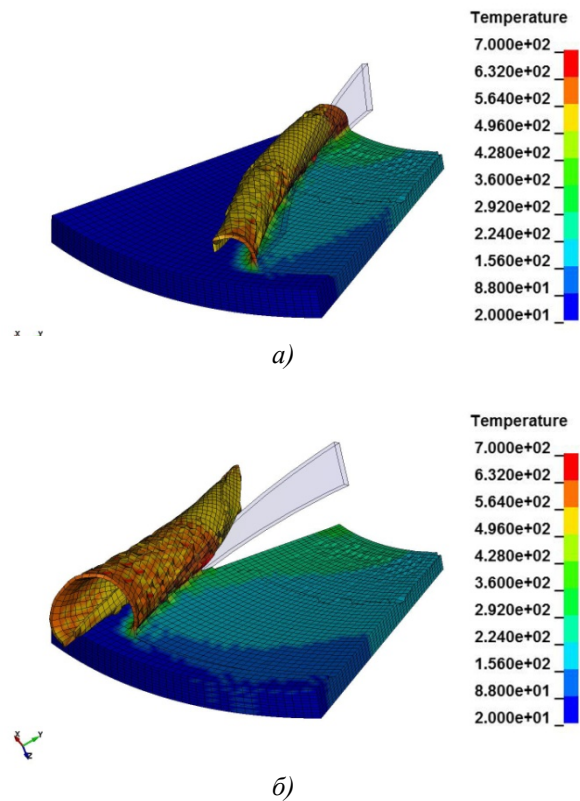


Рис. 8. Контактные температуры в зоне резания при сверлении заготовок из титанового сплава ВТ6 с подачей 0,1 мм/об для разных скоростей резания $v = 2,17$ м/с (а) и $v = 3,3$ м/с (б)

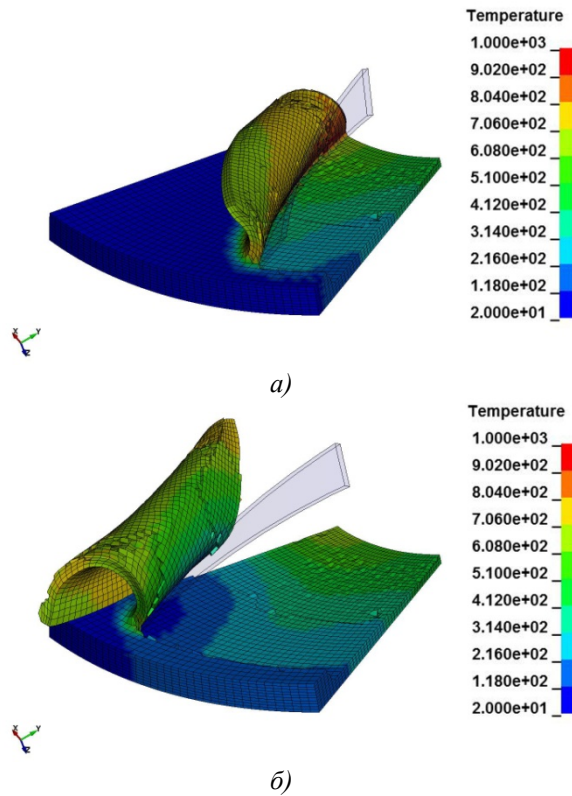


Рис. 9. Контактные температуры в зоне резания при сверлении заготовок из титанового сплава ВТ6 с подачей 0,2 мм/об для разных скоростей резания $v = 2,17$ м/с (а) и $v = 3,3$ м/с (б)

При подаче 0,1 мм/об стружка сильнее закручена по сравнению с результатами, полученными при подаче 0,2 мм/об. Это связано с меньшим количеством срезаемого материала.

Результаты вывода информации по усилию в зоне сверления и моменту на сверле показаны на рис. 10.

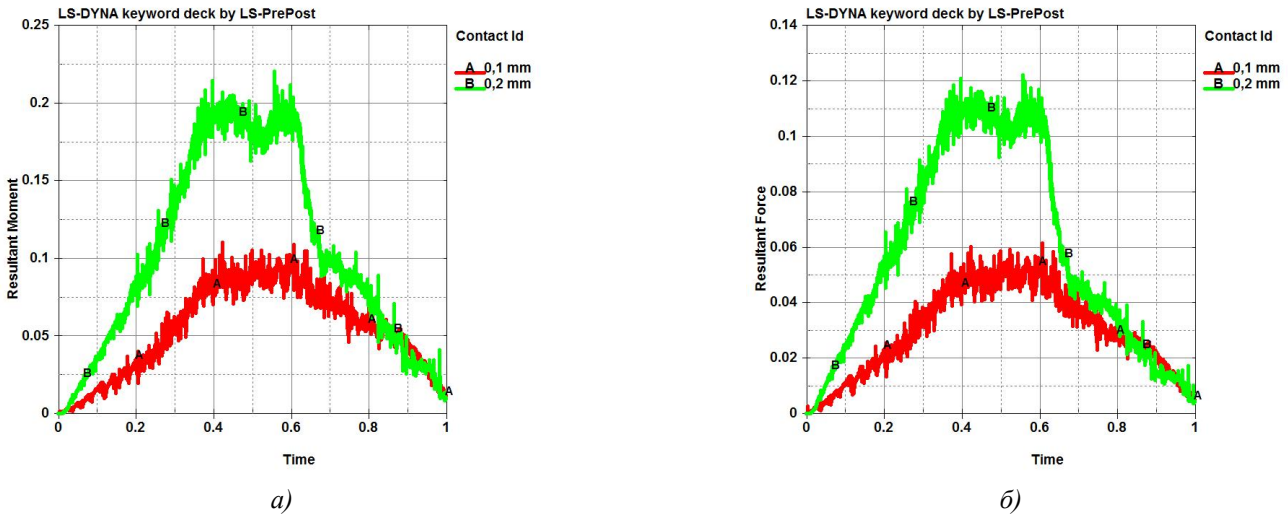


Рис. 10. Результаты численного моделирования по моменту, кН*мм (а) и усилию на лезвии сверла, кН (б)

Графики представляют собой трапецию, где сначала происходит увеличение усилия реза (момента), в этот период происходит врезание лезвия сверла в металл, далее идет установившейся процесс, когда все лезвие оказывает воздействие на металл заготовки и далее

усилие (момент) падает, происходит выход лезвия из металла. Для оценки данных параметров использовали значения усилия сверления и момент при установившемся режиме. Момент на лезвии сверла составлял 0,09 кН·мм при подаче 0,1 мм/об и 0,18 кН·мм

при подаче 0,2 мм/об. Усилие на лезвии сверла составляет 0,055 кН при подаче 0,1 мм/об и 0,11 кН при подаче 0,2 мм/об. С увеличением подачи соответственно увеличивались усилие сверления и момент.

Были проведены численные исследования по определению НДС и температуры на различных элементах заготовки и стружки (рис. 11).

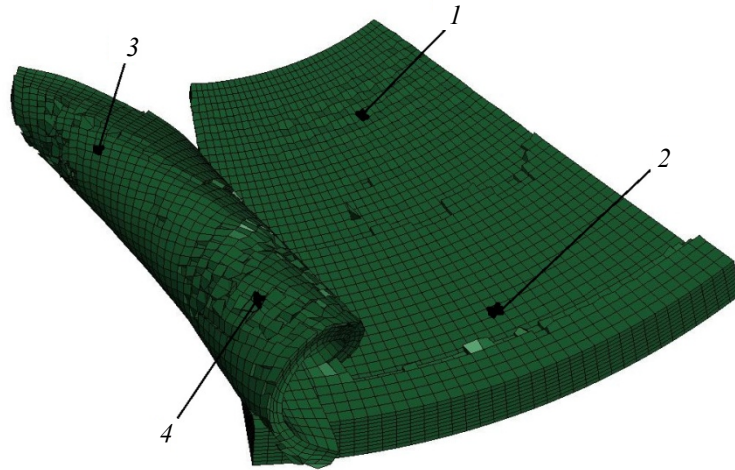
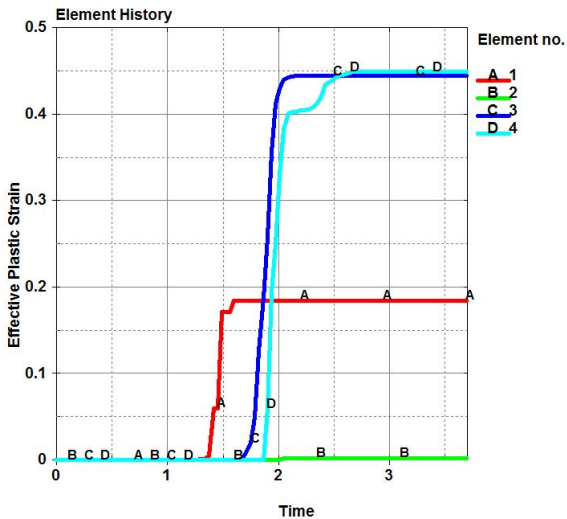


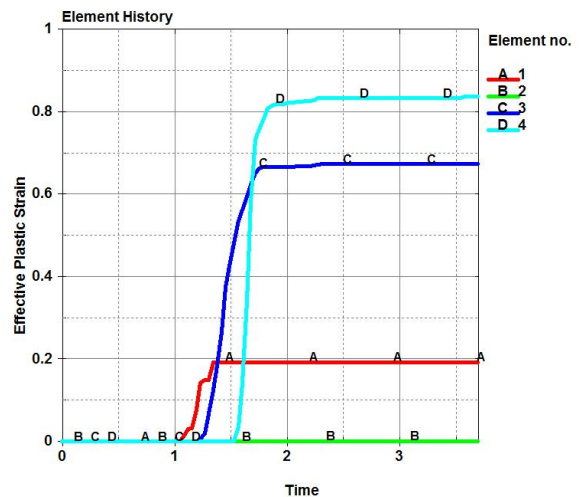
Рис. 11. Контрольные (расчетные) элементы на заготовке в процессе сверления: 1, 2 – на части заготовки после сверления; 3, 4 – на стружке

Как показали исследования, пластическая деформация на стружке превышает деформацию на поверхности заготовки после сверления (рис. 12). Кроме этого увеличение вели-

чины подачи приводит к увеличению значения пластической деформации на стружке, при этом величина на поверхности заготовки после сверления меняется незначительно.



а)



б)

Рис. 12. Пластическая деформация на контрольных элементах в зависимости от величины подачи: а – 0,1 мм/об; б – 0,2 мм/об

Увеличение подачи также приводит и к увеличению теплоты, выделяемой в зоне контакта инструмента с заготовкой. Температура на стружке повышается с 550 С° при подаче

0,1 мм/об до 750 С° при подаче 0,2 мм/об. На поверхности заготовки после сверления повышается с 150...220 С° при подаче 0,1 мм/об до 220...440 С° при подаче 0,2 мм/об (рис. 13).

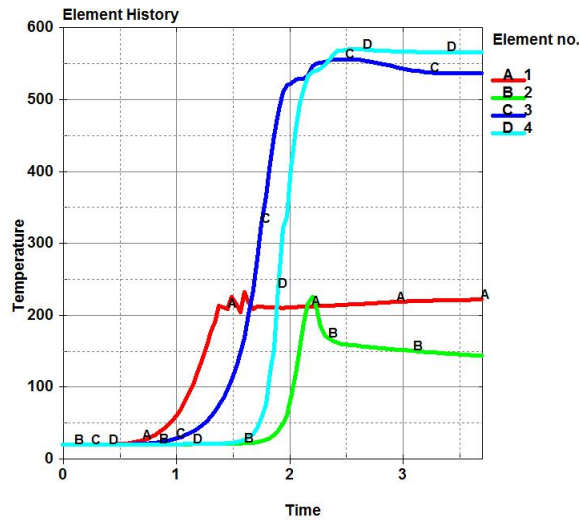
В процессе численных исследований были изучены величины эффективных пластических и главных деформаций вдоль траектории зоны реза (рис. 14). Как показали результаты расчетов, представленные в виде графиков на рис. 15, максимальная пластическая деформация достигает 35% и расположена ближе к центру оси заготовки и примерно одинакова для обеих подач.

Интересно, что пластические и главные деформации в основном сосредоточены в части заготовки ближе к её оси, что может быть связано с началом врезания лезвия. Значения главных деформаций (минимальной и максимальной) лежит в пределах 8...10% для пода-

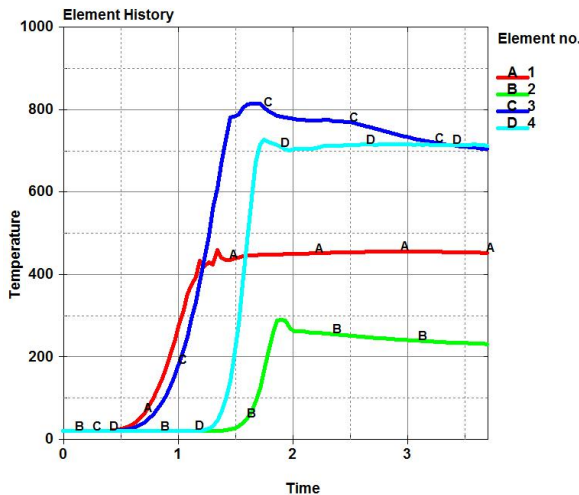
чи 0,1 мм/об и 9...14% для подачи 0,2 мм/об.

Для оценки адекватности результатов численных исследований реальным условиям обработки была осуществлена экспериментальная проверка при сверлении отверстий на обрабатывающем центре DMU 50 Premium (рис. 16).

Диаметр сверла составлял 4,7 мм, материал заготовки ВТ6. Как следует из анализа результатов, с увеличением подачи увеличивалась осевая сила резания. При этом обработка отверстий сверлом с углом при вершине $2\phi = 140^\circ$, как и при численных исследованиях, более эффективна, чем с углом при вершине $2\phi = 145^\circ$.



a)



б)

Рис. 13. Контактная температура на контрольных элементах в зависимости от величины подачи: а – 0,1 мм/об; б – 0,2 мм/об

В связи с этим был проведен сравнительный анализ результатов эксперимента и моделирования. Поскольку исходная модель для моделирования содержала внутреннее отвер-

стие, то значения, полученные при экспериментальном исследовании, коррелировали с результатами моделирования. Полагали, что отношения усилия сверления при наличии от-

верстия и без него составляет величину 0,6, тогда усилие составляло при угле сверления 140° для подачи 0,2 мм/об – $295 \cdot 0,6 = 177$ Н, для подачи 0,1 мм/об – $200 \cdot 0,6 = 120$ Н.

Поскольку при моделировании исследовали только одно лезвие, то для получения полного усилия данное значение умножали на 2, тогда для подачи 0,2 мм/об усилие при моделировании составляло – $110 \cdot 2 = 220$ Н, для подачи 0,1 мм/об – $55 \cdot 2 = 110$ Н.

Результаты сравнительного анализа представлены в виде диаграммы, приведенной на рис. 17.

Сравнение полученных усилий позволило определить отклонение эксперимента от моделирования. Для подачи 0,2 мм/об отклонение составило 24 %, для подачи 0,1 мм/об – 9 %. Таким образом, адекватность результатов численных исследований реальным условиям обработки очевидна.

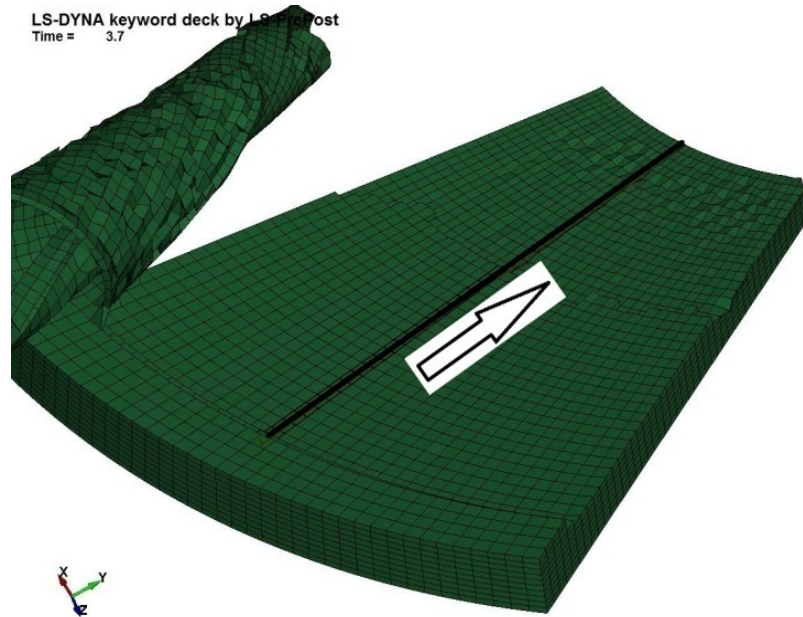


Рис. 14. Исследуемая траектория деформаций на заготовке после сверления

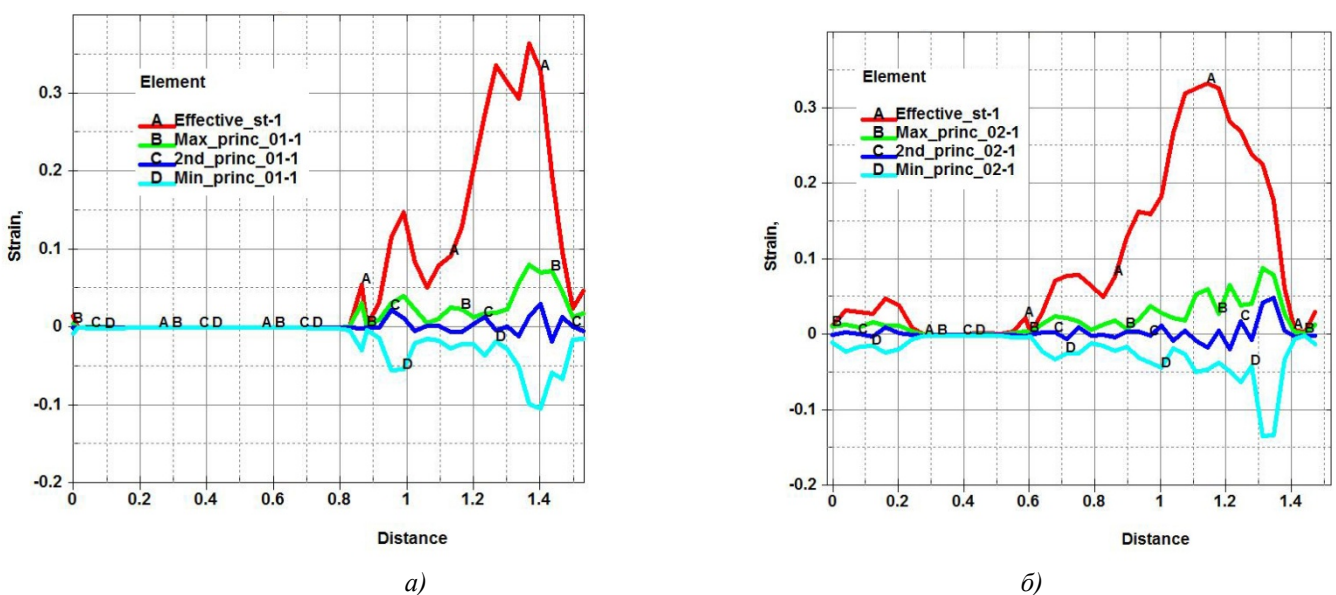


Рис. 15. Эффективные (A) и главные пластические деформации (B, C, D) на заготовке (вдоль траектории движения инструмента) после сверления в зависимости от величины подачи 0,1 мм/об (a) и 0,2 мм/об (б)

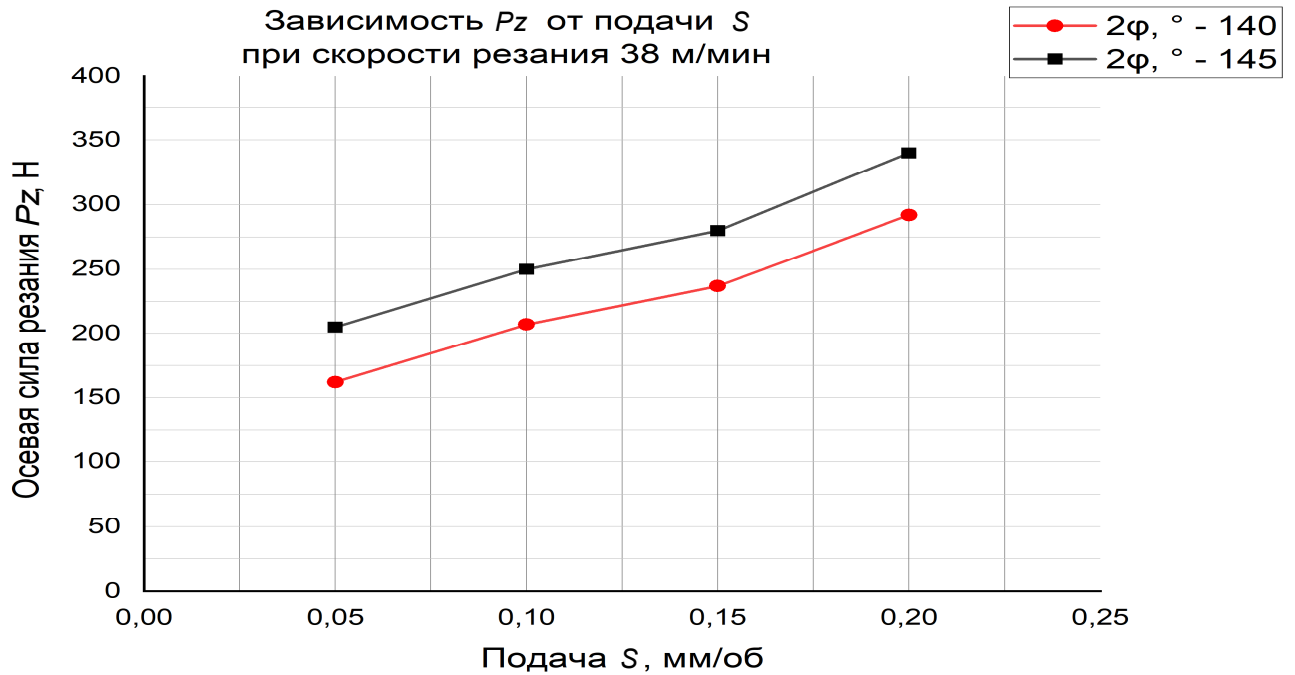


Рис. 16. Экспериментальная проверка результатов численных исследований при сверлении отверстий на обрабатывающем центре DMU 50 Premium (диаметр сверла 4,7 мм; материал заготовки ВТ6)

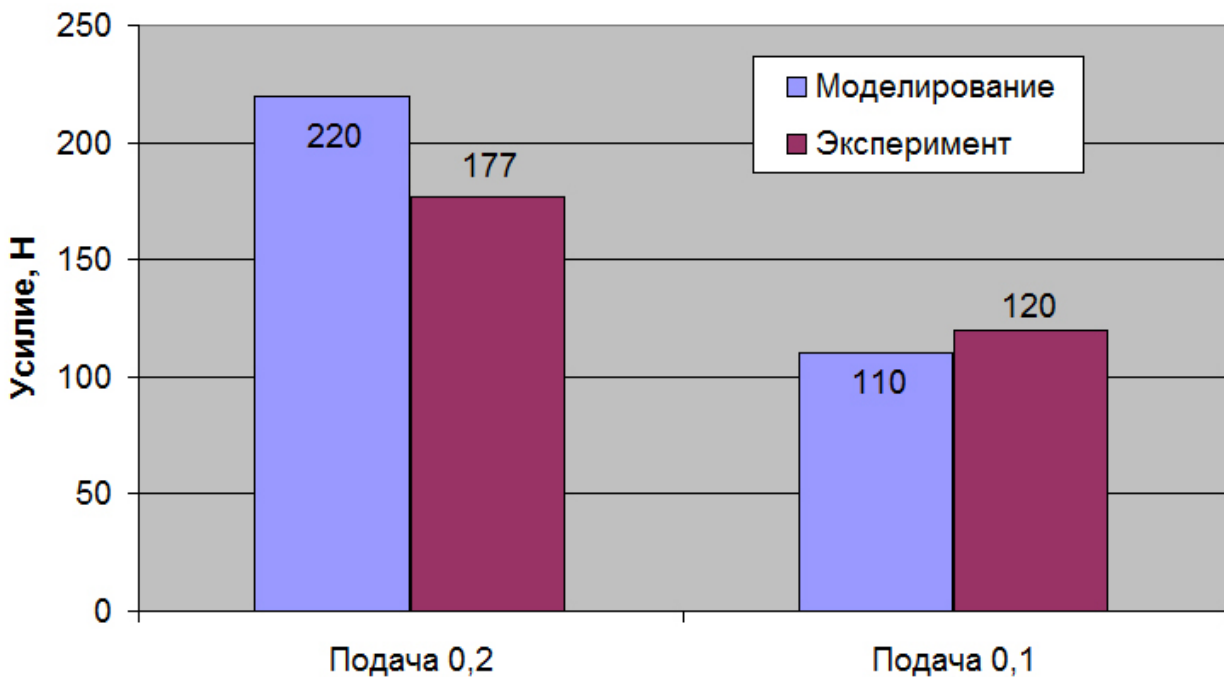


Рис. 17. Сравнение результатов численных исследований и эксперимента при сверлении отверстий на обрабатывающем центре DMU 50 Premium

Заключение

Таким образом, выполненные численные исследования показывают, что их использование позволяет адекватно заменить проведения длительных и неэкономичных эксперимен-

тальных станочных исследований и оценить влияние элементов режима резания и конструктивных параметров инструмента на силовые и энергетические аспекты формообразования новых поверхностей деталей машин. Экспериментальная проверка при сверлении

отверстий в заготовках из титанового сплава BT6 на обрабатывающем центре DMU 50 Premium доказала верификацию численных исследований условиями испытаниям на металлорежущем оборудовании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **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.
2. **Криворучко, Д.В., Залогова, В.О., Корбач, В.Г.** Основы 3D-моделирования процессов механической обработки методом конечных элементов: учебное пособие. – Сумы: Изд-во СумДУ, 2009. – С. 15-22
3. **Савельев, К.С., Илюшкин, М.В., Киселев, Е.С.** Использование цифровых двойников для математического моделирования ультразвукового сверления титановых

заготовок // Вектор науки ТГУ. – 2021. – №1 (55). – С. 42-55.

REFERENCES

1. Kirsanov, A.R. *Procedure for Estimate of GTE Damageability at Stages of Its Development, Manufacturing and Operation Caused by Bird Damaging Impact*. thesis for Can. Sc. Tech. M., 2016. – p. 205.
2. Krivoruchko, D.V., Zaloga, V.O., Korbach, V.G. *Fundamentals of 3D Machining Modeling through Finite Element Method*: manual. – Sumy: SumSU, 2009. – PP. 15-22.
3. Savelyev, K.S., Ilyushkin, M.V., Kiselev, E.S. Digital twin use for mathematical modeling of titanium billet supersonic drilling // *TSU Science Vector*. – 2021. – No.1 (55). – PP. 42-55.

*Рецензент д.т.н.
Вадим Васильевич Куц*

