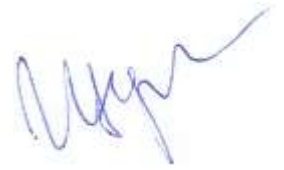


На правах рукописи



Щурова Екатерина Игоревна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТОЧНОГО
СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В КРУПНОГАБАРИТНЫХ
ЗАГОТОВКАХ**

Специальность 05.02.07 Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2022

Работа выполнена на кафедре технологии автоматизированного машиностроения Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мазин Петр Германович,
профессор кафедры технологии автоматизированного машиностроения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Артамонов Евгений Владимирович,
заведующий кафедрой станков и инструментов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

кандидат технических наук
Еникеев Булат Азатович,
старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится «25» мая 2022 года в 9:30 на заседании диссертационного совета Д 212.181.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, ауд. 170205.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте (<http://www.osu.ru>) ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет». Автореферат диссертации размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (vak.ed.gov.ru).

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Шерстобитова Вероника Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1 Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

В производстве различных изделий существенную долю занимает изготовление крупногабаритных деталей. Такие детали как обшивки, панели, шпангоуты изготавливаются для авиакосмической техники, в судостроении, наземном транспорте. Весомую долю всех операций изготовления составляет сверление отверстий для заклепочных соединений. Необходимость сопряжения отверстий обуславливает применение позиционных допусков на их расположение. Для сверления таких отверстий применяются специальные и модульные сверлильные станки (СиМСС), которые применяются взамен дорогих крупногабаритных традиционных станков. Все чаще в качестве обрабатывающего оборудования применяются и робототехнические комплексы (РТК). Однако, несмотря на преимущества, использование указанного оборудования все еще ограничено, что связано с одним из его существенных недостатков – большой податливостью и, как следствие, большими смещениями инструмента от сил резания. В частности, в начальный момент времени сверления отверстий на инструменте возникает радиальная составляющая суммарной силы резания, которая обуславливает как деформации самого сверла, так и деформации такого оборудования. В этот момент режущая часть сверла смещается от требуемого идеального положения, что вызывает смещение оси получаемого отверстия. Зачастую это приводит к появлению негодных деталей. В связи с этим при проектировании технологической операции сверления с использованием податливого оборудования технологу необходимо спрогнозировать вероятность появления негодных деталей и при необходимости вместе с конструкторами изменить инструмент или это оборудование. Для реализации такого прогноза необходимо иметь соответствующее программное обеспечение, в основе которого лежат математические модели инструмента, оборудования и процесса сверления. Большой рост количества научных публикаций, посвященных данной тематике, и указанное выше сдерживание применения СиМСС для процессов резания показывают, что данная задача все еще до конца не решена. Таким образом, обеспечение необходимой точности расположения отверстий, полученных сверлением с использованием податливого оборудования, путем компьютерного моделирования операций обработки на основе универсальных комплексных математических моделей сверл, этого оборудования и процессов сверления является актуальной задачей машиностроения.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является совершенствование элементов технологической системы на основе разработки методик расчета спиральных сверл, податливого технологического оборудования, увода этих сверл в момент засверливания для повышения точности расположения осей отверстий в крупногабаритных заготовках.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие задачи.

1) Разработать единую универсальную дискретную твердотельную модель стандартных спиральных сверл с учетом их стандартизованных геометрических характеристик.

2) Разработать способ получения дискретной твердотельной и на основе ее малоразмерной конечно-элементной моделей для податливого технологического обрабатывающего оборудования.

3) Произвести верификацию данных моделей путем расчета облаков точек вокселей и на основе этого конечно-элементных моделей для ряда представителей таких элементов технологической системы, а также путем проведения натурных экспериментов.

4) Разработать МКЭ-SPG модель процесса стружкообразования стандартным спиральным сверлом заготовок из металлов и композитов и выполнить тестовый расчет этого процесса в начальный момент засверливания с определением радиальной составляющей суммарной силы резания на сверле.

5) Разработать методику расчета точности сверления, включающую методики расчета инструментов, податливого технологического оборудования, разработать на их основе программное обеспечение и верифицировать их натурным экспериментом. Разработать усовершенствованный инструмент и дополнительные устройства для податливого технологического оборудования, направленные на повышение точности обработки отверстий сверлением. Реализовать результаты исследований в производстве и учебном процессе.

Научная новизна работы: Впервые разработаны численные математические трехмерные модели спиральных сверл, податливого технологического оборудования и фрагментов заготовок из гомогенных и композитных материалов, отличающиеся единой дискретной (воксельной) основой, и связанные с этими моделями конечно-элементные и SPG модели стружкообразования при засверливании, объединяющая их математическая модель точности сверления с указанным технологическим оборудованием, позволившие обоснованно усовершенствовать на такой базе данные спиральные сверла и оборудование. Новизна соответствует п. 4 паспорта специальности (см. ниже).

Теоретическая и практическая значимость работы. *Теоретическая значимость работы* заключается в решении задачи дискретного твердотельного моделирования группы инструментов – стандартных спиральных сверл и компонентов податливого технологического оборудования механообработки, что позволяет получать их геометрические и на этой основе физические (конечно-элементные) модели для последующего определения смещений данных элементов технологической системы от сил резания и, таким образом, через увод сверл определять смещения осей отверстий получаемых деталей. *Практическая значимость работы* заключается в решении актуальной технологической задачи – предоставление разработчикам технологических операций средств прогнозирования точности расположения получаемых в деталях отверстий путем автоматизированного расчета деформаций стандартных спиральных сверл и податливого технологического оборудования от действующих в процессе обработки отверстий сил резания и предоставление на этой основе возможностей по целенаправленному совершенствованию инструментов и данного оборудования.

Методология и методы исследования. *Объектом исследования* являются инструменты, податливое технологическое оборудование и процесс начала сверления отверстий стандартными спиральными сверлами с использованием такого

оборудования. **Предметом исследования** является зависимость радиального смещения режущей части спирального сверла в процессе засверливания от жесткости этого сверла и податливости обрабатываемого технологического оборудования. **Направленность исследований** связана с обеспечением технически эффективного процесса обработки, а именно, с обеспечением повышенной точности сверления отверстий в крупногабаритных заготовках в условиях использования податливого технологического оборудования. **Методика исследования как система конкретных приемов, способов его осуществления:** получение на основе численных подходов математических зависимостей, позволяющих в виде множеств узловых точек описать поверхности, тела инструментов и податливого технологического оборудования, максимально соответствующие их реальным аналогам и получение на этой основе численных (МКЭ-SPG) моделей для физического моделирования процесса стружкообразования сверлением путем расчета сил резания и деформаций элементов технологической системы. Разработка на основе этих зависимостей устройств для повышения точности получения отверстий сверлением в крупногабаритных заготовках. **Аппаратная и программная база исследований:** модульные станки с ЧПУ, стандартные спиральные сверла, измерительная аппаратура исследования процессов резания, вычислительная техника, средство разработки компьютерных программ Delphi 7, академические версии программ численного моделирования ANSYS и LS-DYNA. **Соответствие темы работы приоритетным или прогнозным направлениям развития научных исследований:** данная тема отвечает технологическому направлению «Фабрики будущего», плана мероприятий («дорожной карты») «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы, одобренной 14 февраля 2017 года на заседании президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России.

Положения, выносимые на защиту:

– численная математическая модель точности обработки отверстий стандартными спиральными сверлами с податливым технологическим оборудованием, в которой установлена математическая взаимосвязь между стандартными параметрами конструктивных элементов сверл, твердотельными моделями оборудования, параметрами фрагментов обрабатываемых заготовок и параметрами режима обработки, с одной стороны, и смещением режущей части сверл в период засверливания, определяющим положение осей этих отверстий в получаемой детали, с другой стороны. *Модель отличается от известных использованием в ней в качестве единой основы численного (воксельного) геометрического моделирования и связанного с ним конечно-элементного и SPG физического моделирования объектов и процессов в технологической системе;*

– единая универсальная математическая модель рабочей части стандартных спиральных сверл в составе модели точности, объединяющая в себе дискретную твердотельную (воксельную) и конечно-элементные модели. *Модель отличается использованием в ней численного (воксельного) геометрического моделирования сверл, что обеспечивает ее универсальность;*

– методика расчета вокселей податливого оборудования на основе его твердотельных моделей и расчета на этой основе регулярных малоразмерных конечно-элементных сеток, отличающуюся использованием эквивалентных деталей для сборок технологического оборудования и эквивалентных деталей их передаточных узлов приводов подач. *Методика отличается расчетом общей воксельной сетки оборудования на основе его представления как одной детали и представления его передаточных узлов приводов подач эквивалентными деталями;*

– методика расчета координат точки пересечения оси получаемого отверстия с поверхностью детали на основе расчета деформаций элементов технологической системы (стандартных спиральных сверл и податливого оборудования), *отличающаяся единством расчетов на основе дискретных твердотельных моделей, сеток конечных элементов и связанных с этим МКЭ и SPG расчетов сил резания с использованием моделей фрагментов заготовок из однородных и композитных материалов;*

– результаты верификации предложенных моделей, методик, компьютерных программ на основе реализации натуральных экспериментов, связанных с определением деформаций выбранных сверл и податливого технологического оборудования и определением положений осей отверстий при сверлении с использованием указанных элементов технологической системы;

– конструкции усовершенствованных сверл, отличающихся подточкой поперечной режущей кромки двумя плоскостями, расположенными под углами в плане сверла с образованием правильной пирамиды у его оси, и технологического оборудования, отличающегося наличием дополнительной перемещаемой опоры, расположенной между двумя группами узлов оборудования – группой переноса и группой обработки.

Степень достоверности и апробация результатов. Полученные на основании разработанных математических моделей результаты расчетов были верифицированы натурными экспериментами: рассчитанные смещения выбранного технологического сверлильного оборудования отклонялись от смещений в натуральных экспериментах не более, чем на 18%; рассчитанные изгибы выбранных сверл отличались от изгибов в натуральных экспериментах не более, чем на один процент; рассчитанные величины смещений рабочей части выбранного сверла при обработке заготовки из АЦ4Мг на выбранном технологическом оборудовании отличаются от отклонений полученных в натуральных экспериментах осей отверстий не более, чем на 20%. *Материалы диссертации были доложены* на отечественных и международных конференциях в период с 2013 по 2021 г.г. Исследования данной работы были проверены при реализации выигранного ее автором в 2020 году конкурса «Умник».

Соответствие работы паспорту специальности 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки». Работа отвечает формуле паспорта: «Изучение связей (механических... размерных) на этапах их [технических средств] создания осуществляется с целью ... совершенствования существующих ... технических средств, обеспечивающих высокую конкурентоспособность за счет качества формируемых деталей». Соответствие направлению исследований: «4. Создание, включая ... расчеты ... параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически ... эффективные процессы обработки.»

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 11 статей в SCOPUS (по одной в Q1 и Q2) и два патента РФ на изобретение. Личный вклад автора отражен в 11 статьях, написанных без соавторов.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 246 наименований, 10 приложений. Работа изложена на 245 страницах машинописного текста, содержит 66 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана область исследования, обоснована актуальность темы диссертации, приведены цель, задачи и другие характеристики диссертации.

В первой главе приведены сведения из производственной практики и научных исследований в области производства крупногабаритных деталей авиационной техники и связанных с ними расчетов сверл и компонентов СИМСС с ЧПУ для точного сверления отверстий. Показаны причины низких темпов внедрения такого оборудования в промышленность. Показано, что для внесения необходимых корректировок в характеристики сверл или дооснащения оборудования разработчику в каждом случае необходимо многократно выполнять проектные расчеты для прогнозной оценки точности обработки. Установлено, что САД/САМ/САЕ технологии позволяют достаточно точно описывать элементы технологической системы и процессы обработки, однако в указанных выше сложных случаях высокая трудоемкость и индивидуальный подход для каждой конкретной технологической операции сдерживают такие проекты. В литературе не удалось обнаружить примеров применения комплексных универсальных систем автоматизированного выполнения всех таких расчетов; на практике они все еще не получили широкого распространения. Одним из способов решения данной задачи является разработка универсальных математических моделей рассматриваемых инструментов и оборудования, а также фрагментов заготовок, включая композитные, для точного расчета сил резания. Такие модели позволили бы разработать методики расчета и получить компьютерное обеспечение с автоматизацией всех указанных проектных задач.

Поскольку такая задача связана с деформациями сверл, деформациями оборудования и расчетом сил резания при сверлении заготовок из заданных материалов, то далее были проанализированы научные публикации по каждому из этих **трех** направлений. Анализ научных публикаций в области моделирования сверл и других мерных инструментов показал, что наряду с традиционными геометрическими подходами, которые нашли отражение в работах Г.А. Алексева, М.М. Алиева, О.Б. Арбузова, Е.В. Артамонова, В.А. Аршинова, А.И. Бокова, Ю.Л. Борового, Л.Г. Дибнера, В.А. Гречишников, Г.Г. Иноземцева, А.С. Каменковича, А.С. Киселева, С.В. Кирсанова, Д.В. Кожевникова, В.И. Кокарева, В.М. Матюшина, С.А. Попова, А.А. Рыжкина, Г.Н. Сахарова, И.С. Семенченко, А.Г. Схиртладзе, К.Г. Щучева и других исследователей наиболее широкое применение получило использование аналитической геометрии, векторной алгебры и дифференциального исчисления. По работам В.П. Астахова, Б.В. Лупкина, Н.А. Киштопы, П.Р. Родина было установлено, что этот аналитический подход поз-

воляет установить связь уравнений поверхностей сверл с особенностями их изготовления. Однако основная цель таких расчетов – определение угловых параметров режущих лезвий данных инструментов. Примеров разработки на этой основе универсальных трехмерных моделей спиральных сверл и расчета их жесткости обнаружить не удалось. Получившее в последние десятилетия благодаря широкому применению компьютерной техники классическое твердотельное моделирование позволяет на основе решения систем уравнений поверхностей инструментов создавать их адекватные геометрические модели. Установлено, что все виды моделей можно разделить на две основные группы: модели с упрощенными поверхностями-аналогами и модели с точными аналитически описываемыми поверхностями. Модели первой группы достаточны для последующего применения в расчетах, например, жесткости инструментов, однако в расчетах процессов резания такие модели могут показать неадекватные результаты: заточка задней поверхности сверл по цилиндру или по винтовой поверхности обуславливает разные силы резания в процессе обработки. Анализ элементов лезвий с использованием таких моделей представляется сомнительным. В связи с этим все большее развитие получают модели второй группы, включая описание сверл с инструментами второго порядка, что нашло отражение в работах Ю.М. Панкратова. Модели с точным описанием отдельных поверхностей сверл нашли отражение и в публикациях зарубежных авторов: J-F. Hsieh, P.D. Lin, K. Sambhav, S. G. Dhande, P. Tandon, S.G. Dhande, J.D. Jovanovic, O. Spaic, E. Abele¹, M. Fujara и др., однако в таких моделях сверло или описывается не полностью, или такое описание требует итерационных расчетов и дополнительных слабо формализованных методик. Проблема аналитического подхода заключается в том, что зачастую невозможно получить решение системы сложных уравнений, которые описывают смежные участки двух и более поверхностей инструмента. Было установлено, что все чаще применяются численные твердотельные модели на основе алгебры множеств. К таким дискретным твердотельным моделям относятся и воксельные модели для станков с ЧПУ, отраженные в публикациях Г.К. Горанского и его учеников. Таким образом, анализ позволил установить, что в настоящее время отсутствуют универсальные твердотельные математические модели с точным описанием поверхностей спиральных сверл. Соответственно, невозможно в автоматизированном варианте проектирования получать сетки конечных элементов таких инструментов для выполнения расчетов их жесткости и точного расчета сил резания при сверлении.

Далее были проанализированы публикации по расчету сил резания путем применения численных моделей. Было установлено, что метод конечных элементов (МКЭ) все чаще заменяется другими сеточными и бессеточными методами, имеющими известные преимущества в подобных расчетах (ALE, SPH, SPG, EFG и т.д.). Все чаще моделируется резание не только резцами, но и сверлами. При этом начинают появляться публикации по моделированию сверления композитных материалов, широко применяемых в авиакосмической технике. Вместе с тем было установлено, что задача расчета сил резания при сверлении в начальный момент обработки не рассматривается, а именно в этот момент происходит образование начальной конической поверхности, которая далее становится базисующей и определяет поло-

жение оси сверла. Было установлено, что моделирование композитов все еще основывается на идеализированном описании наполнителей и, таким образом, снижает адекватность моделирования резания композитных заготовок.

Анализ третьей группы публикаций связан с расчетом податливости СиМСС и РТК. Такие расчеты нашли отражение в современных публикациях (Ю.В. Василевич, С.С. Довнар, Б.А. Еникеев, С.В. Каменев, А.Н. Поляков, М.А. Рубцов, В.И. Туромша, M.D. Anand, R. Arora, M. Bugday, J. Cai, S.S. Dhami, R. Du, H. Fang, L. Fang, K. He, G. Constantin, M. Karali, N. Prabhu, C. Pupaza, L.E. Ruban, A. Singh, Y. Singh, L. Sun, X. Wang, J. Zhang, E. Zhou и др.) и показали одну из проблем: эти расчеты, основанные на первоначальном создании САД моделей и последующим расчете по ним сеток конечных элементов (КЭ), обуславливают получение КЭ моделей с несколькими миллионами узлов. Особое затруднение вызывает учет контактных пар. Такие расчеты сегодня возможны только с использованием суперкомпьютерной техники и не могут быть использованы для повседневной практики технологов на имеющихся у них компьютерах. Кроме того, для таких расчетов требуются полноценные САД модели данных устройств, что является коммерческой тайной их разработчиков. Следовательно, необходимо разработать методику для практического решения этой задачи. На основании анализа была сформулированы цель и задачи работы, определены методологические вопросы исследования.

Во второй главе приведены результаты разработки дискретных математических моделей элементов технологической системы и процесса резания.

В первом подразделе второй главы были приведены зависимости для дискретного твердотельного моделирования стандартных спиральных сверл. В качестве параметров модели были приняты параметры сверл, отраженные в государственных стандартах. **На первом этапе были определены зависимости для поверхностей стружечных канавок.** Расчетная схема в радиальном сечении сверла отражена на рисунке 1, а. Исходными данными являются параметры из стандартов: d – диаметр сверла; d_1 – диаметр сверла по спинкам; f – ширина ленточки, которая может меняться по некоторому закону в зависимости от координаты z – оси сверла; a – половина толщины сердцевины; B – ширина пера; ω – угол наклона винтовой канавки; φ – угол в плане; L – общая длина сверла; l – длина рабочей части сверла, L_1 – длина режущей части сверла. Кроме того, к числу исходных данных относятся и параметры фрезы для получения стружечных канавок сверла: B_m – ширина фрезы; r – радиус дуги большей окружности профиля фрезы; r_1 – радиус дуги меньшей окружности профиля фрезы; b – расстояние от левого торца фрезы до центра окружности меньшего радиуса; c – расстояние от левого торца фрезы до риски; расстояние от наружного диаметра фрезы до центра большей окружности h ; ψ – угол между линией правого торца фрезы и ее прямолинейной кромкой; α_f и α_{hf} – углы подточек ленточек; f , f_1 , f_h и f_{h1} – размеры по ширине полных и подточенных участков ленточек; l_1 и l_{h1} – длины подточенных участков ленточек.

Для трех основных диапазонов варьирования полярного угла φ_f в системе стружечной канавки (Рисунок 1, в, г) получены следующие зависимости, позволя-

ющие определить точки вокселей внутри канавок (нестрогое неравенство) или на их поверхностях (строгое равенство):

$$\varphi_f = -\psi \dots 90 - \psi, \quad R_{\gamma_i} \leq r_1 / \cos(\varphi_f); \quad (1)$$

$$\varphi_f = -\tau \dots -\psi, \quad R_{\gamma_i} \leq r_1, \quad (2)$$

$$\varphi_f = -\tau \dots -270, \quad R_{\gamma_i} \leq (r - r_1) \cos(\varphi_f - \eta) + \sqrt{\left((r - r_1) \cos(\varphi_f - \eta) \right)^2 - (r - r_1)^2 + r^2}, \quad (3)$$

где в формуле (1), как это следует из рисунка 1, г, угол φ_f изменяется от оси x по часовой стрелке, при этом от точки P_1 до точки P_2 используется уравнение прямой линии в полярной системе координат; в формуле (2) от точки P_2 до точки P_3 угол φ_f изменяется от оси x по часовой стрелке на величину $\varphi_f = -\psi$ до угла $\varphi_f = \tau$, при этом $\tau = \pi - \eta + \psi$. Угол η определяется по одному из двух вариантов в зависимости от того, какой параметр чертежа использует конструктор. В работе получены все необходимые зависимости для подстановки в вышеприведенные формулы.

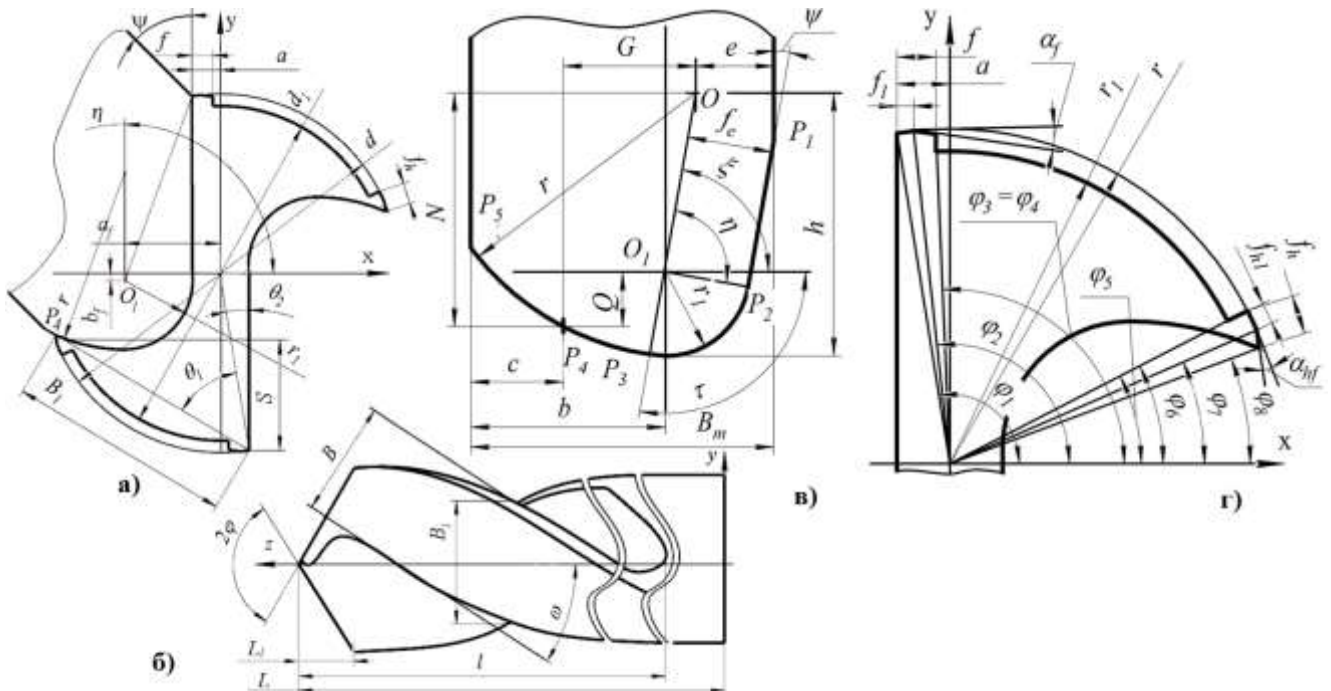


Рисунок 1 – Радиальное сечение сверла (а), его вид сбоку (б), осевое сечение фрезы для получения винтовой канавки сверла (в) и радиальное сечение сверла для определения параметров ленточки и спинки (г)

Одним из важных параметров для расчета поверхностей канавок сверла являются координаты центра системы координат канавки в системе координат сверла: a_f и b_f , которые, как видно из рисунка 1, а, определяются соотношениями:

$$a_f = -\eta_1 - a, \quad b_f = S + Q / \cos(\psi) - 0.5d + \{r_1(1 - \cos(2\pi(n - 1) / n - \pi))\}, \quad (4)$$

где η_1 и a – параметры из стандартов, описанные выше; выражение в скобках учитывает возможное количество перьев n для других инструментов. Также были получены все остальные необходимые параметры (S и Q), которые необходимо использовать в итоговой зависимости для расчета координат точек поверхностей пер-

вой и второй стружечных канавок ($j=1$ и $j=2$), а именно координат вектора $\vec{\rho}(x_{fi}, y_{fi}, z_{fi})$ в системе координат этих канавок. Каждый такой вектор соответствует вектору $\vec{\rho}(x_i, y_i, z_i)$ текущей точки с номером i в системе координат сверла для чего используется общеизвестное уравнение преобразования систем координат вида:

$$\begin{pmatrix} x_{fi} \\ y_{fi} \\ z_{fi} \end{pmatrix} = M_z(-\chi - \omega_f) \left(M_z(\chi + \omega_f) \begin{pmatrix} a_f \\ b_f \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \right), \quad (5)$$

где $M_z(\dots)$ – матрица преобразований поворота; $\chi=(0,\pi)$ – угол, отражающий первую и вторую стружечные канавки, соответственно; ω_f – угол поворота текущего радиального сечения сверла, в зависимости от текущего значения аппликаты z , связанного с винтовой направляющей линией стружечной канавки. Были получены зависимости для расчета профилей стружечной канавки сверла для различных условий касания участков этого профиля с окружностью его сердцевины

На втором этапе расчета сверл определены зависимости для поверхностей ленточек и спинок сверла. По аналогии с формулами (1)...(3) определены формулы для расчета граничных полярных углов $\varphi_1 \dots \varphi_8$, характеризующих элементы лезвий на калибрующей части сверла (см. рисунок 1, г). Для этих диапазонов получены уравнения прямых линий и дуг окружностей в полярной системе координат (нестрогое неравенство дает координаты точек вокселей тела, а равенства – поверхностей сверла):

$$\varphi = \varphi_1 \dots \varphi_2, \quad R_{\alpha 1} \leq 0.5d, \quad (6)$$

$$\varphi = \varphi_2 \dots \varphi_3, \quad R_{\alpha 1} \leq 0.5d \cos(\alpha_f) / \cos(\varphi - 0.5\pi - \alpha_f - \varphi_2), \quad (7)$$

при этом, если $z \leq L - L_1 - l_1$, то $R_{\alpha 1} = 0.5d$,

$$\varphi = \varphi_3 \dots \varphi_4, \quad R_{\alpha 1} \leq (f - a) / \cos(\varphi), \quad (8)$$

$$\varphi = \varphi_4 \dots \varphi_5, \quad R_{\alpha 1} \leq 0.5d_1, \quad (9)$$

$$\varphi = \varphi_5 \dots \varphi_6, \quad R_{\alpha 1} \leq 0.5f_{h1} / \cos(\varphi - \psi_h), \quad \psi_h = 0.5(\varphi_6 + \varphi_7), \quad (10)$$

$$\varphi = \varphi_6 \dots \varphi_7, \quad R_{\alpha 1} \leq 0.5d, \quad (11)$$

$$\varphi = \varphi_7 \dots \varphi_8, \quad R_{\alpha 1} \leq 0.5d \cos(\alpha_f) / \cos(\varphi - 0.5\pi - \alpha_f - \varphi_7), \quad (12)$$

при этом, если $z \leq L - L_1 - l_{h1}$, то $R_{\alpha 1} = 0.5d$.

Далее были получены зависимости, отражающие изменения параметров сверла в его осевой плоскости. **На третьем этапе расчета сверл были получены зависимости для расчета их главных задних поверхностей.** По отдельности были рассмотрены четыре случая заточки сверл: по плоскости, по цилиндрической, по коническим поверхностям и по винтовой поверхности.

Для расчета точек сверла для заточки по плоской главной задней поверхности (рисунок 2, а) получены зависимости:

$$\rho \leq R_{a,1}(\varphi_i, z), \quad (13)$$

$$R_{\alpha}(\varphi_i, z) = D^* / \cos(\varphi_i - \arctan(V/W)), \quad D^* = -(Fz + D). \quad (14)$$

$$V = \sin(\alpha_0), \quad W = \cos(\alpha_0) / \operatorname{tg}(\varphi), \quad F = \cos(\alpha_0), \quad D = a \sin(\alpha_0) - L \cos(\alpha_0). \quad (15)$$

где p – параметр винтового движения, τ – угол между плоским торцом абразивного инструмента и осью сверла; C_c и $C(\varphi_i)$ – параметры установки и движения абразивного инструмента.

Полученные координаты были использованы в формуле, аналогичной (13).

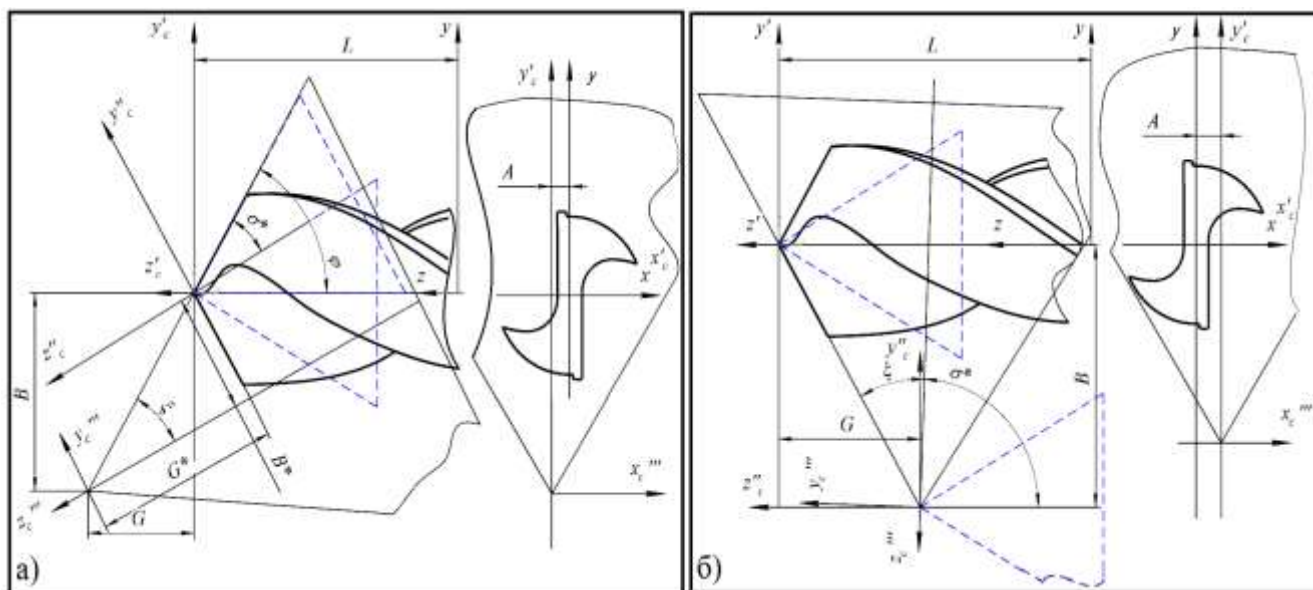


Рисунок 3 – Осевое и радиальное сечения сверла и коническая главная задняя поверхность: а) тип заточки 1, б) тип заточки 2

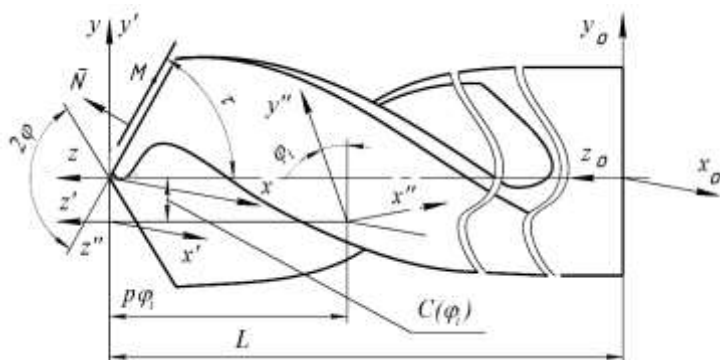


Рисунок 4 – Осевое сечение сверла и след производящей поверхности абразивного круга с произвольной точкой M

На четвертом, завершающем этапе расчета спиральных сверл были получены *итоговые зависимости расчета вокселей их тел и поверхностей*. Полученные выше зависимости (1)...(18) и другие зависимости, описанные в диссертации, позволяют с учетом нижеприведенных формул определить координаты вокселей тел (19) и поверхностей (20) этих инструментов.

$$(\rho \leq R_{\gamma_i}) \cup (\rho \leq R_{\alpha_1}) \cup (\rho \leq R_{\alpha,1}) \cup (\rho \leq R_{\alpha,2}), \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & ((\rho = R_{\gamma_i}) \cup (\rho \leq R_{\alpha_1}) \cup (\rho \leq R_{\alpha,1})) \cap \\ & ((\rho = R_{\gamma_i}) \cup (\rho \leq R_{\alpha_1}) \cup (\rho \leq R_{\alpha,2})) \cap \\ & ((\rho \leq R_{\gamma_i}) \cup (\rho = R_{\alpha_1}) \cup (\rho \leq R_{\alpha,1})) \cap \\ & ((\rho \leq R_{\gamma_i}) \cup (\rho = R_{\alpha_1}) \cup (\rho \leq R_{\alpha,2})) \cap \\ & ((\rho \leq R_{\gamma_i}) \cup (\rho \leq R_{\alpha_1}) \cup (\rho = R_{\alpha,1})) \cap \\ & ((\rho \leq R_{\gamma_i}) \cup (\rho \leq R_{\alpha_1}) \cup (\rho = R_{\alpha,2})) \end{aligned} \quad (20)$$

В выражении (20) первая строка является условием принадлежности вокселей передней поверхности и стружечной канавке для первого режущего клина сверла, вторая строка, аналогично, для второго; третья строка является условием принадлежности вокселей к главной задней поверхности первого режущего клина сверла, четвертая, аналогично для второго; пятая строка необходима для принадлежности вокселей к ленточке и спинке, примыкающей к первому режущему клину и шестое аналогично для второго клина. Повторный учет главных задних поверхностей в данном выражении отличает его от аналогичных решений для других инструментов

Выполненные исследования показали, что созданная единая дискретная твердотельная модель сверл, устанавливающая взаимосвязь между координатами узловых точек множеств вокселей поверхностей и тел почти всех стандартных сверл и определенных в таких стандартах параметров этих инструментов, является достаточной для получения указанных множеств и на основе этого сеток их конечных элементов.

Во втором подразделе второй главы были приведены зависимости для дискретного твердотельного моделирования СиМСС. Показано, что для расчета податливости такого оборудования, которое представляет собой сборочное изделие, в первом приближении можно применить эквивалентную этому оборудованию деталь. Тогда на основании полных или упрощенных триангулированных (для сохранения технической тайны) его САД моделей можно получить регулярные сетки вокселей дискретного твердотельного моделирования. С этой целью было предложено использовать следующие зависимости:

$$x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \cup y_{\min} \leq y_i \leq y_{\max} \cup z_{\min} \leq z_i \leq z_{\max}, \quad (21)$$

$$x_{\min} = \min\{x(y_i, z_i)\}, x_{\max} = \max\{x(y_i, z_i)\}, \quad (22)$$

$$y_{\min} = \min\{y(x_i, z_i)\}, y_{\max} = \max\{y(x_i, z_i)\}, \quad (23)$$

$$z_{\min} = \min\{z(x_i, y_i)\}, z_{\max} = \max\{z(x_i, y_i)\}, \quad (24)$$

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x, y_{i+1} = y_i + \Delta y, z_{i+1} = z_i + \Delta z, \quad (25)$$

где x_i, y_i и z_i – координаты каждой i -той узловой точки вокселя сетки;

$x(y_i, z_i)$, $y(x_i, z_i)$ и $z(x_i, y_i)$ – координаты точек поверхностей САД моделей, включая триангулированные STL модели, для соответствующих значений координат узлов вокселей, определяются по уравнениям поверхностей деталей СиМСС.

\min и \max – означает: для x , соответственно, слева и справа; для y , соответственно, спереди и сзади; для z , соответственно, снизу и сверху для каждого отрезка линии внутри устройства. Отрезки должны лежать на прямых линиях, параллельных координатным осям и проходящим через узел текущего вокселя с координатами (x_i, y_i, z_i) ; $\Delta x, \Delta y$ и Δz – шаги воксельной сетки.

В диссертации приведены формулы для расчета по приведенным зависимостям сетки узлов восьми-узловых конечных элементов оборудования.

В третьем подразделе второй главы были приведены зависимости для моделирования процесса резания спиральными сверлами фрагментов заготовок из металлических и композитных материалов. Были использованы КЭ модели инструментов и SPG модели заготовок, для чего были отобраны феноменологические модели материалов и выполнено моделирование волоконно-армированных и

дисперсно-армированных композитов. Отличительной особенностью моделей последних стали исходные данные, полученные на основе предложенного авторского подхода: сканирования на планшетном сканере частиц наполнителя. Это позволило получить модели, наиболее близкие к реальным композитным структурам.

Таким образом, во второй главе были отражены результаты теоретических исследований, связанных с разработкой единой комплексной твердотельной модели стандартных спиральных сверл F_1 , численной модели сверлильного оборудования на основе его CAD моделей F_2 , дискретной твердотельной модели фрагментов металлических и композитных заготовок F_4 , а также модели F_3 расчета сил резания на основе МКЭ-SPG методов расчета и моделей F_1 и F_4 . Объединение всех этих трех моделей дает модель точности сверления отверстий с податливым оборудованием, а именно: величину смещения вершины сверла Δr :

$$\Delta r = F\{F_1(d, d_1, f, a, B, \omega...); F_2((x(y, z), y(x, z)), z(x, y)); F_3(F_1, F_4(x_w(...), y_w(...), z_w(...)), n_{св}, s_{occ})\} \quad (26)$$

В третьей главе приведены результаты верификации полученных выше моделей и методик расчета. В первом и втором ее подразделах произведена верификация математической модели стандартных спиральных сверл путем расчета облаков точек вокселей их поверхностей и расчета их КЭ (рисунок 5, а), расчета деформаций (рисунок 5, б), проведения натуральных экспериментов по определению жесткости сверл (рисунок 5, в).

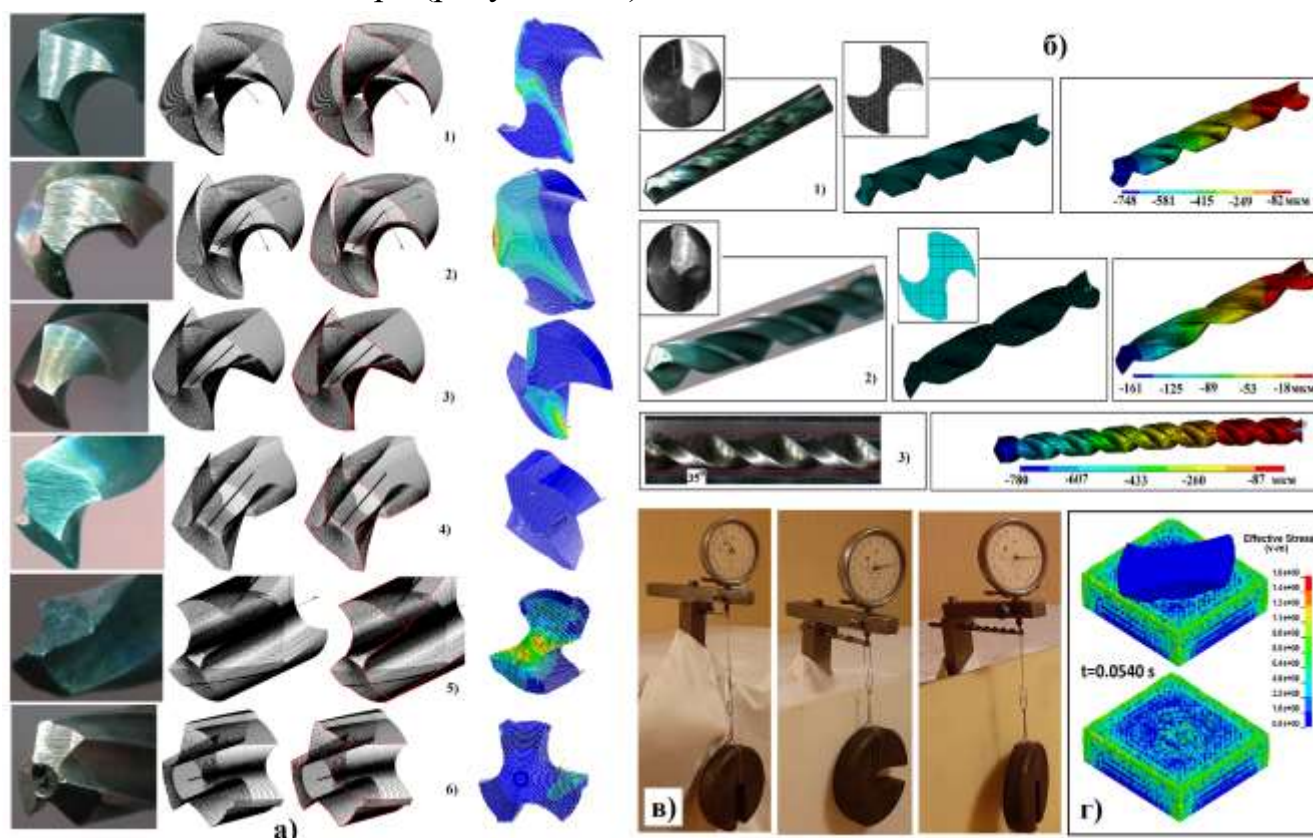


Рисунок 5 – Инструменты, их узловые точки и КЭ (а), расчеты деформаций сверл и зенкера (б), натурные эксперименты (в), моделирование сверления (г)

Расчеты были выполнены для семи сверл и зенкера. На рисунке 5, а видно, что воксельные и КЭ сетки повторяют поверхности сверл. Расчеты жесткости

трех сверл были сопоставлены с натурными экспериментами. Отклонение экспериментальных и расчетных данных не превысило 1%.

В третьем подразделе третьей главы выполнен расчет сил резания путем МКЭ–SPG моделирования процесса стружкообразования спиральными сверлами в начальный период обработки. Полученные картины деформаций и распределения напряжений в стальной заготовке в разные моменты времени сверления (рисунок 5, г), а также полученные графики сил и крутящего момента показали результаты, не противоречащие публикациям других исследователей для условий полного заглупления режущей части сверла.

В четвертом подразделе третьей главы приведены расчеты воксельных и КЭ моделей SiMCC с ЧПУ и верификация этих расчетов натурными экспериментами. Для подтверждения всеобщности разработанной методики расчета в качестве примера первоначально были выполнены расчеты воксельной сетки станка HAAS VF-2-I и на основе этого далее выполнены расчеты его деформаций. Далее были выполнены расчеты для модульного сверлильного станка с ЧПУ. Первоначальная попытка рассчитать его податливость типовыми методами в WorkBench оказалась неудачной по причине размерности сетки свыше одного миллиона с недопустимо различными по величине размерами ее КЭ. В связи с этим по разработанным формулам и созданной программе были рассчитаны воксельные и КЭ сетки для трех характерных положений его узлов и рассчитаны его деформации (рисунок 6, а). Для таких же положений были выполнены эксперименты по определению смещений детали для крепления привода вращения сверла (рисунок 6, б). Оказалось, что экспериментальные и расчетные данные отличаются на порядок.

Анализ позволил установить, что существенные погрешности были внесены неадекватным описанием передаточных узлов приводов подач. Замена их моделей на определенные в экспериментах модели эквивалентных деталей позволили получить новые воксельные и КЭ модели оборудования. Отличия расчетных данных от экспериментальных в этом случае не превысили 18%.

В четвертой главе приведен пример практического применения математических моделей элементов технологической системы и обработки отверстий сверлением, даны методики расчета, предоставлены проекты по усовершенствованию сверл и оборудования. Для рассмотренного выше МСС с ЧПУ и сверла диаметром 3,25 мм с использованием изложенных выше моделей, методики проектирования данной технологической операции, разработанного и заимствованного программного обеспечения был произведен расчет смещений режущей части сверла при обработке заготовки из АЦ4Мг, которые составили 250 мкм. Для этих же условий был реализован и натурный эксперимент (получено 105 конических углублений, рисунок 6, в). Статистическая обработка его результатов показала, что отклонения расчетных и экспериментальных данных не превысили 20%.

По результатам исследований была разработана **методика расчета увода оси сверла** в момент засверливания, включающая в себя расчет сверла, оборудования, процесса стружкообразования. Методика носит итерационный характер: если в результате расчетов смещение сверла выходит за поле позиционного допуска, то сначала вносятся изменения в сверло, расчеты повторяются, и при удовлетворе-

нии точности выполняется расчет сверла на прочность. По результатам такого расчета принимаются дальнейшие рекомендованные в методике решения.

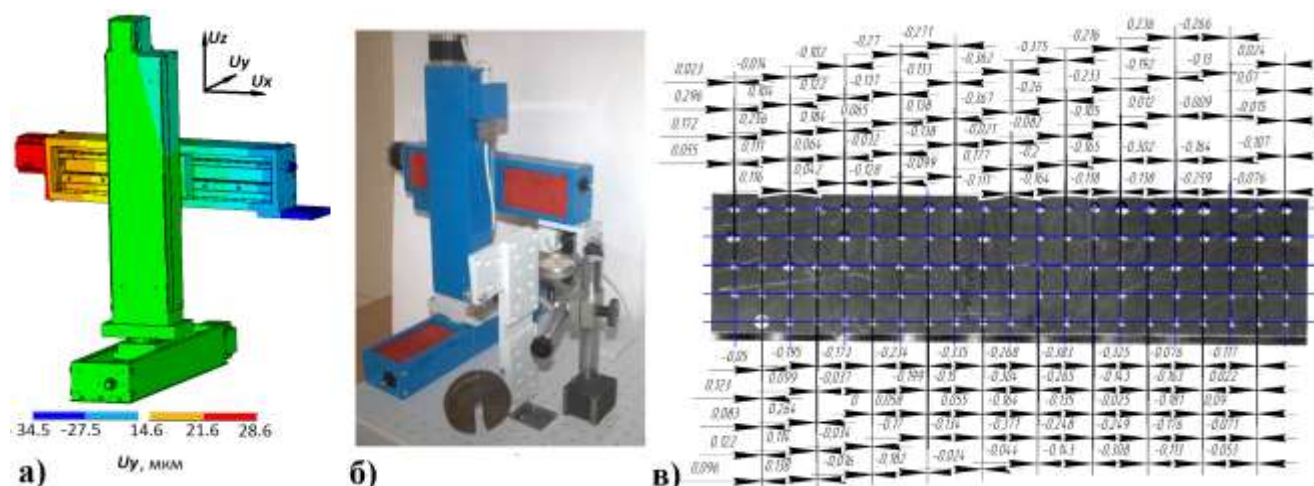


Рисунок 6 – Деформации SiMCC (а), измерение его податливости (б), сетка просверленных отверстий и их отклонения от регулярной сетки прямых линий (в)

Во втором подразделе четвертой главы были рассмотрены усовершенствованные конструкции сверл и оборудования для сверления отверстий. Для уменьшения увода сверл предложен вариант подточки поперечной режущей кромки двумя плоскостями, расположенными под заданными чертежом углами в плане с образованием правильной пирамиды у оси сверла. С использованием модели и программ выполнены прогнозные расчеты и натурные эксперименты, подтвердившие эффективность данного решения. Для SiMCC с ЧПУ балы изготовлена дополнительная магнитная опора, что позволило увеличить зону обработки. Были предложены защищенные двумя патентами усовершенствования опор – внесение дополнительной опоры, расположенной между двумя группами узлов оборудования: группой переноса и группой обработки. Был рассчитан опорный элемент станка переменной жесткости с термоактивируемым композитом: доказана достаточность сил примагничивания для исключения смещения этой опоры от сил резания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НАУЧНЫЕ ВЫВОДЫ

Основные результаты

1. Решена задача совершенствования методики автоматизированного расчета инструментов и податливого оборудования для повышения точности сверления отверстий на основе прогноза отклонения расположения их осей на детали с использованием МКЭ-SPG расчетов по разработанным дискретным твердотельным моделям стандартных спиральных сверл, технологического оборудования, фрагментов заготовок и процесса сверления, а также созданным на их основе методике и программного обеспечения.

2. Разработаны дискретная твердотельная модель стандартных спиральных сверл и податливого технологического оборудования (по предоставленным его твердотельным моделям) и основанные на этих моделях их конечно-элементные модели, МКЭ-SPG модели процесса резания сверлами фрагментов заготовок из металлов и композитных материалов.

3. На основе созданных экспериментальных установок проведены натурные эксперименты по определению жесткости сверл, податливого технологического оборудования и точности сверления для верификации разработанных моделей, методики расчета и компьютерной программы.

4. Спроектированы и изготовлены усовершенствованный инструмент – сверло с плоскими подточками поперечной режущей кромки и дополнительные опоры для податливого оборудования, позволяющие снизить такую податливость и, как следствие, повысить точность обработки.

Основные научные выводы

1. Полученная численная математическая модель точности обработки отверстий стандартными спиральными сверлами и податливым оборудованием, включающая в себя дискретную твердотельную модель этих сверл и оборудования, фрагментов заготовок и МКЭ-SPG модель процесса сверления, является достаточной для автоматизированного расчета смещений режущей части сверла в начальный момент времени обработки и прогнозирования на этой основе отклонения оси получаемого на детали отверстия. Отклонения расчетных по этой модели и экспериментальных данных не превышают 20%.

2. Доказано, что созданная дискретная твердотельная модель стандартных спиральных сверл является геометрически точной, поскольку включает в себя точное (без допущений) описание геометрии всех элементов этих инструментов; универсальной, поскольку охватывает подавляющее большинство конструкций таких сверл из всех государственных стандартов на данные инструменты и комплексной, поскольку позволяет рассчитать не только геометрические характеристики данных инструментов, но и получить сетки конечных элементов для решения физических задач: расчета жесткости инструментов и моделирования с их использованием процесса резания.

3. Предложенная методика дискретного твердотельного моделирования податливого технологического оборудования на основе принимаемых в качестве исходных данных его твердотельной модели является достаточной для расчета податливости, при этом является обоснованной замена сборки оборудования его эквивалентной деталью, а также является обоснованной замена передаточных узлов приводов подач такого оборудования их эквивалентными по жесткости деталями. Необходимое для практического использования количество узлов конечно-элементной модели в этом случае не превышает одного миллиона. Отклонения расчетных и экспериментальных смещений в этом случае не превышают 18%.

Публикации, отражающие результаты работы:

Публикации в журналах перечня ВАК

1. Щурова, Е.И. Дискретное твердотельное моделирование стандартных спиральных сверл // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20.– № 2. – С. 70–80.

2. Щурова, Е.И. Расчетное экспериментальное определение жесткости манипуляционных роботов, применяемых для операций сверления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 60 –71.

3. Щурова, Е.И. Численное моделирование стружкообразования при резании композитных заготовок / И.А. Щуров, И.С. Болдырев, А.В. Никонов, Е.И. Щурова // СТИН. – 2019. – № 11. – С. 18–22. (Переводная версия Shchurova, E.I. Chip Formation in the Cutting of Composites / I.A. Shchurov, I.S. Boldyrev, A.V. Nikonov, E.I. Shchurova // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol.40. – pp. 336–339. (Q2)

Публикации в изданиях базы данных SCOPUS

4. Shchurova, C.I. A Methodology to Design a 3D Graphic Editor for Micro-modeling of Fiber-reinforced Composite Parts // Advances in Engineering Software. – 2015. – Vol. 90. – pp. 76–82. (Q1)

5. Shchurova, E.I. A New File Format to Describe Fiber-reinforced Composite Work-piece Structure for Additive Technology Machines / E.I. Shchurova, A.V. Shchurova // Procedia Engineering. – Vol 129, 2015. – pp. 105–110.

6. Shchurova, E.I. Modeling of the Ceramics Structure for the Finite Element Analysis // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – pp. 179–184.

7. Shchurova, E.I. Voxel and Finite Element Models for Analysis of Ballistic Impact on Ceramic-polymer Composite Panels / S.B. Sapozhnikov, E.I. Shchurova // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – pp. 182–187.

8. Shchurova, E.I. Voxel Micro-Modeling of Composite Structures Based on Scanning of Material Real Objects // IEEE Xplore 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). – 2018 – pp. 1–6.

9. Shchurova, E.I. Voxel and Finite Element Modeling of the Ceramic–Polymer Composite Panel for Ballistic Impact Description // ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2018. – pp. 277–284.

10. Shchurova, E.I. Voxel and Finite Element Modeling of the Twist Drill // ICIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – pp. 181–190.

11. Shchurova, E.I. Machining Accuracy Improving with the Use of Mobile Mechatronic Systems as Industrial Robots End Effectors / E.I. Shchurova, P.G. Mazein // ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – pp. 171–180.

12. Shchurova, E.I. Industrial Manipulating Robot Finite Element Mesh Generation Based on Robot Voxel Model // ICIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2021. – pp. 232–239.

13. Shchurova, E.I. Radial Force Calculation at the Start of Drilling Operation Using the SPG Method // ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – pp. 119–128.

14. Shchurova, E.I. Design of a Magnetic Clamp for a High-Rigid Manipulating Robot for Machining of Precise Parts / E.I. Shchurova, P.G. Mazein // ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – pp. 156–164.

Публикации в других изданиях и патенты.

15. Щурова, Е.И. Компьютерное моделирование на основе использования трехмерного растрового редактора и воксельного подхода композитной структуры деталей для их изготовления методами аддитивных технологий // Сб. науч. труд. I Междун. заоч. н-техн. конф. «Технологическое обеспечение машиностроительных производств». – Челябинск: ЮУрГУ. – 2013. – С. 600–606.

16. Щурова, Е.И. Моделирование с использованием растрово-векторного 3D редактора и отображение на трехмерных дисплеях волоконно-армированных композитных деталей для их последующего изготовления методами аддитивных технологий // Материалы II междун. заоч. н-практ. конф. «Автоматизированное проек-

тирование в машиностроении». НОЦ «МС». – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ. – 2014. – С. 69–73.

17. Щурова, Е.И. Моделирование волоконно-армированных композитных деталей на основе растрово-векторного 3D редактора для их последующего изготовления методами аддитивных технологий // Прогрессивные технологии в машиностроении. Челябинск. – 2014. – С. 39–44.

18. Щурова, Е.И. Дискретное твердотельное и конечно-элементное моделирование стандартных спиральных сверл // Научный поиск. Мат.11 науч. конф. аспирантов и докторов. ЮУрГУ. – 2019. – С. 44–51.

19. Щурова, Е.И. Разработка манипуляционного робота повышенной жесткости для механической обработки точных деталей / Е.И. Щурова, П.Г. Мазеин // Наука ЮУрГУ. Секции техн. наук. Мат. 72-й науч. конф. – 2020. – С. 263–270.

20. Патент RU №2718025 С1. Робот манипуляционный промышленный / Е.И Щурова, П.Г. Мазеин. Оpubл. 30.03.2020 Бюл. № 10.

21. Патент RU №2756901 С1. Опорное устройство робота манипуляционного промышленного (варианты) / Е.И Щурова. Оpubл. 06.10.2021 Бюл. № 28.

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 22.03.2022. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 57/102.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76