

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.91.01/.02:004.94(043.3)

ПОРТЯНКО
Сергей Анатольевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СБОРНЫХ ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ
ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО РЕЗАНИЯ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПЛАСТИКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ 3D-ПЕЧАТЬЮ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.08 – технология машиностроения

Минск, 2022

Научная работа выполнена в учреждении образования «Полоцкий государственный университет».

Научный
руководитель

ПОПОК Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительного производства» учреждения образования «Полоцкий государственный университет»

Официальные
оппоненты:

ДАНИЛОВ Виктор Алексеевич,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологическое оборудование» Белорусского национального технического университета;

ЛЕБЕДЕВ Владимир Яковлевич,
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории физики поверхностных явлений ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая
организация

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Защита состоится 4 марта 2022 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «1» февраля 2022 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.03
доктор технических наук, профессор

О. Г. Девойно

© Портянко С.А., 2022
© Белорусский национальный
технический университет, 2022

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при обработке поверхностей корпусных деталей и тел вращения широко используется фрезерование, в частности, сборными торцовыми и концевыми фрезами, количество которых на отдельных предприятиях достигает 50 % от общего объема применяемого режущего инструмента. На отечественных предприятиях проектирование и серийное производство этого типа режущих инструментов ограничивается высокими технологическими требованиями по их точности и качеству. В основном фрезы закупаются за рубежом, что повышает стоимость выпускаемой продукции.

Анализ разработок и результатов исследований сборных режущих инструментов, выполненных ведущими инструментальными фирмами: Sandvik Coromant (Швеция), Iskar (Израиль), Hermle (Германия), Korloy (Южная Корея), Mitsubishi (Япония), Seiko (Япония) и др., и известными учеными показывает, что многие вопросы технологий проектирования и изготовления конструкций сборных торцовых фрез решены: предлагаются различные системы режущих инструментов, методы их моделирования и расчета, прогрессивные модульные конструкции и технологии их производства. Однако в связи с интенсивным развитием высокоскоростной обработки (скорость резания более 500 м/мин) широкое использование сборных торцовых фрез сдерживается их сравнительно большими габаритами и весом, аэро- и гидравлическим сопротивлением и инерционностью масс конструктивных элементов и, как следствие, падением мощности и производительности резания. Недостаточно внимания уделяется оптимизации формы и геометрических параметров сборных торцовых фрез, учету условий обтекания воздушными и гидравлическими потоками смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) и обеспечению стружко- и теплоотведения, статической и динамической балансировке в процессе высокоскоростного резания. Хотя в смежных областях техники, например, самолето- и кораблестроении эти вопросы исследованы достаточно полно с представлением физических и математических моделей аэро-гидродинамики.

Для изготовления сборных торцовых фрез используются различные методы, в частности, обработки давлением и резанием, порошковой металлургии и 3D-печати. Для каждого из этих методов требуется проектирование такой конструкции сборной торцовой фрезы, которая бы учитывала функциональное назначение, например, для высокоскоростного фрезерования, и особенности технологий ее изготовления (обработки и сборки). При этом не в достаточной степени используются возможности технологии проектирования, включающей 3D-печать модельных деталей и узлов. Требуется конструкторско-технологические решения по оптимальным аэро- и гидродинамическим параметрам формы и расположению конструктивных элементов, в частности режущих лезвий и стружко-потокоотводящих канавок, а также использования модулей балансировочных.

Решение этой задачи возможно при разработке технологии проектирования, предусматривающей математическое моделирование и 3D-печать моделей конструкции из пластиковых материалов, физическое моделирование условий эксплуатации сборных торцовых фрез и выработку рекомендаций по технологиям проекти-

рования и изготовления сборных торцовых фрез из металлического материала, обеспечивающих сокращение временных и финансовых затрат на подготовку их производства. Решению этой важной и актуальной задачи посвящена данная работа.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Технология и оборудование машиностроительного производства» учреждения образования «Полоцкий государственный университет» и соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг. п. 3 «Промышленные и строительные технологии и производство: высокоскоростные, высокоточные станки и инструменты», утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 № 166, а также приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларуси на 2021–2025 гг. п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные технологии: машиностроение и машиноведение; аддитивные технологии» (Указ от 7 мая 2020 г., № 156).

Ряд результатов, составляющих содержание данной диссертационной работы, получен в рамках выполнения заданий по грантам Министерства образования Республики Беларусь и заданиям государственных программ научных исследований по темам:

– ГБ 1017 «Совершенствование конструкций блочно-модульных торцовых фрез на основе исследования характеристик процесса резания (сроки выполнения с 01.03.2017 г. по 20.12.2017 г., номер госрегистрации 201720717);

– ГБ 1019 «Проектирование и исследование технологии обработки поверхностей деталей типа тел вращения путем применения высокоскоростной лезвийной обработки на станках с ЧПУ» (сроки выполнения с 01.03.2019 г. по 20.12.2019 г., номер госрегистрации 20191248);

– ГБ №1719 «Научные и технологические основы создания высокоскоростных и высокоточных процессов, станков и инструментов для обработки материалов с заданными свойствами» (сроки выполнения с 2016 по 2020 гг., номер госрегистрации 20200182);

– ГБ 1.55/1419 «Моделирование и проектирование формообразующей оснастки для технологий изготовления конструктивно сложных машиностроительных изделий» (сроки выполнения с 2019 по 2020 гг., номер госрегистрации 20192603).

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка технологии проектирования сборных торцовых фрез для высокоскоростного резания на основе моделирования конструкций из пластиковых материалов, получаемых 3D-печатью.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

– установить на основе анализа сборных торцовых фрез и условий их эксплуатации при высокоскоростном резании основные пути совершенствования конструкций за счет улучшения аэро-гидродинамической формы модулей корпусных и стружко-потокоотводящих канавок;

- разработать методики экспериментальных исследований сборных торцовых фрез, в том числе параметров аэро- и гидродинамики 3D-макетов из пластиковых материалов;

- разработать математические, компьютерные и физические 3D-модели, описывающие параметры форм модулей корпусных и стружкоотводящих элементов сборных торцовых фрез с учетом условий резания и их обтекания потоками жидкости и воздуха;

- установить зависимости параметров точности макетов пластиковых деталей фрез от усадки материалов при 3D-печати и технологических характеристик обработки поверхностей деталей металлическими сборными торцовыми фрезами от режима резания;

- разработать технологию проектирования сборных торцовых фрез на основе применения 3D-печати моделей из пластиковых материалов и выработать рекомендации по совершенствованию конструкций и технологии изготовления металлических сборных торцовых фрез.

Научная новизна

1. Математическая модель процесса резания материалов сборными торцовыми фрезами, отличающаяся учетом одновременного воздействия силы резания и напора потоков СОТС и позволяющая определить оптимальные параметры обтекаемой геометрической формы их модулей корпусных и расположения стружко-потокоотводящих канавок при высокоскоростном резании.

2. Компьютерная и физическая модели, отличающаяся имитацией работы сборных торцовых фрез, полученных 3D-печатью из пластиковых материалов и традиционным методом из металла при силовом и тепловом воздействиях, и позволяющая установить оптимальные значения параметров формы обтекания потоками СОТС корпусных деталей и расположения стружко-потокоотводящих канавок при различных частотах вращения сборных торцовых фрез.

3. Установленные зависимости параметров геометрической формы модулей корпусных и стружко-потокоотводящих канавок от действия силы резания и потоков СОТС при работе 3D-моделей из пластиковых материалов и металлических сборных торцовых фрез.

4. Установленные диапазоны точностных параметров сборных торцовых фрез для высокоскоростного резания при 3D-печати конструкций из пластиковых материалов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса высокоскоростного резания материалов сборными торцовыми фрезами, учитывающая направление стружко-потокоотводящих канавок, влияние значений угла наклона режущей кромки и размеров пластины режущей одновременно на динамические характеристики стружкообразования и аэро-гидравлические потоки смазочно-охлаждающей технологической среды, позволяющая определить оптимальный диапазон изменения угла схода стружки у сборных торцовых фрез, обеспечивающий минимальные значения силы резания и однонаправленность потоков воздуха, жидкости и стружки при заданных условиях высокоскоростной обработки.

2. Компьютерная и физическая модели процессов обтекания потоками воздуха, жидкости и сыпучей среды (пылевидной и мелкодисперсной для имитации направления схода стружки) вращающихся сборных торцовых фрез, полученных с использованием программного обеспечения Solid Works Flow Simulation, Cinema 4D, 3D-печатью и вертикального обрабатывающего центра с ЧПУ Robodrigill α -D21LiB, учитывающие их конструкцию, материал, диапазон частот вращения, а также свойства смазочно-охлаждающей технологической среды, позволившие установить параметры форм модулей корпусных в виде двух сопрягаемых торов и расположения стружко-потокоотводящих канавок идентичных направлению схода стружки и потоков воздуха, жидкости и сыпучей среды, что обеспечивает ориентированный теплоотвод из зоны высокоскоростного резания.

3. Экспериментально установленные зависимости влияния усадки различных пластиковых материалов на линейные и угловые размеры конструктивных элементов сборных торцовых фрез (модуля корпусного, блока резцового с державкой, винтом и пластины режущей, стружко-потокоотводящих канавок), позволившие скорректировать геометрию трехмерных моделей для обеспечения параметров точности макетов деталей сборных торцовых фрез, полученных 3D-печатью на этапе подготовки производства металлических сборных торцовых фрез.

4. Результаты экспериментальных исследований геометрических параметров элементов разработанной конструкции сборных торцовых фрез (форма модуля корпусного, направление стружко-потокоотводящих канавок) на технологические характеристики процесса резания (параметр шероховатости Ra обработанной поверхности, уровень вибрации, температура на выходе из зоны резания), что позволило установить преимущества разработанных конструкций сборных торцовых фрез по сравнению со стандартными.

Личный вклад соискателя ученой степени

Совместно с научным руководителем д.т.н., профессором Н. Н. Попок выбрано научно-техническое направление, сформулированы цель и задачи исследования, методологические подходы к их решению, разработаны математическая и физическая модели сборных торцовых фрез и процесса высокоскоростного резания, проведена подготовка экспериментов, анализ результатов экспериментальных исследований, формулировка выводов и рекомендаций по технологии проектирования и совершенствованию конструкций сборных торцовых фрез с учетом их 3D-печати из пластиковых материалов.

Совместно с А. С. Максимчуком, А. В. Сидикевичем и В. С. Анисимовым проводились экспериментальные исследования по выявлению зависимостей характеристик процесса резания от геометрических параметров металлических сборных торцовых фрез и режимов резания.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Представленные в диссертационной работе результаты доложены и обсуждены на 26 научных мероприятиях, таких как: XI Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 2016 г.); IV Международная научно-практическая конференции «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машиностроении» (г. Минск, 2016 г.); V Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии, автоматизация и

механотроника в машино- и приборостроении» (г. Минск, 2017 г.); 9-я Международная конференция молодых ученых «Европейский и национальный контексты в научных исследованиях» (г. Новополоцк, 2017 г.); I Международная научно-практическая конференция, посвященная 50-летию Полоцкого государственного университета (г. Новополоцк, 2018 г.); V Международная научно-практическая конференция «Техника и технологии: инновации и качество» (г. Барановичи, 2018 г.); 10-я Международная конференция молодых ученых «Европейский и национальный контексты в научных исследованиях» (г. Новополоцк, 2018 г.); 34-ая Международная научно-техническая конференция «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (г. Минск, 2019 г.); 11-я Международная конференция молодых ученых «Европейский и национальный контексты в научных исследованиях» (г. Новополоцк, 2019 г.); Международная научно-практическая конференция, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета (г. Новополоцк, 2020 г.); 12-я Международная конференция молодых ученых «Европейский и национальный контексты в научных исследованиях» (г. Новополоцк, 2020 г.); 13-я Международная конференция молодых ученых «Европейский и национальный контексты в научных исследованиях» (г. Новополоцк, 2021 г.); 35-ая Международная научно-техническая конференция «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (г. Минск, 2021 г.); Международная научно-техническая конференция «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 2021 г.).

Результаты исследований внедрены в производство научно-технологического парка Полоцкого государственного университета (г. Новополоцк), образовательный процесс в Полоцком государственном университете на кафедре «Технология и оборудование машиностроительного производства» при изучении дисциплин «Теория резания», «Режущий инструмент», «Технология инструментального производства», «САПР технологических процессов», «Аддитивные технологии в производстве», «Промышленный дизайн», «Конструирование и расчет изделий», «Материалы аддитивного синтеза» студентами по специальностям 1–36 01 01 «Технология машиностроения» и 1–36 07 02 «Производства изделий на основе трехмерных технологий».

Опубликование результатов диссертаций

По материалам диссертации опубликовано 36 работ, в том числе 5 статей в научных изданиях по перечню ВАК (2,2 авт. л.), 20 – материалов конференций, 6 – других публикаций (3,1 авт. л.), 4 тезиса докладов в сборниках материалов научных конференций (0,5 авт. л.). Подана 1 заявка на патент на изобретение Республики Беларусь.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Объем диссертации составляет 179 страниц. Работа содержит 71 рисунок, 39 таблиц, библиографический список, содержащий 164 источника, включая список публикаций соискателя 36 наименований на 14 страницах, 5 приложений на 52 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит анализ современного состояния развития конструирования и изготовления сборных торцовых фрез, существующих проблем их эксплуатации при высокоскоростном резании, возможностей технологии проектирования сборных торцовых фрез на основе 3D-печати конструкций из пластиковых материалов для совершенствования сборных торцовых фрез и сокращения времени подготовки их производства.

В первой главе приведен анализ конструкций сборных торцовых фрез ведущих мировых производителей, таких как Sandvik Coromant (Швеция), Iskar (Израиль), Hermle (Германия), Korloy (Южная Корея), Mitsubishi, Seiko (Япония) и др. Рассмотрены результаты исследований фрезерования, аэро-гидродинамики вращающихся тел, применения технологий 3D-печати, в том числе режущих инструментов. Выявлены тенденции в использовании конструкций сборных торцовых фрез обтекаемой формы, состоящих из взаимозаменяемых модулей, получаемых на основе различных технологий. Определены цели и задачи исследований.

Во второй главе предложены методики 3D-проектирования сборных торцовых фрез и их параметрических моделей конструктивных элементов и модулей в среде CAD-системы; пластиковые материалы для реализации аддитивной технологии с использованием CAD-систем и 3D-принтера; экспериментального исследования гидро- и аэродинамических свойств сборных торцовых фрез. В качестве объекта исследований была принята конструкция сборной торцовой фрезы, в которой используются унифицированные резовые блоки и оригинальные модули зажимные пластины режущих и блоков резовых. В основу формирования сборных торцовых фрез положен модульный принцип (рисунок 1), согласно которому вначале исходя из конфигураций обрабатываемых поверхностей и конструктивных элементов деталей выбираются пластины режущие, затем подбираются блоки резовые с требуемой формой пазов для установки пластины режущей, выбираются конфигурации модуля корпусного для установки блоков резовых, устанавливается модуль балансировочный и окончательно формируется сборная торцовая фреза с модулем присоединительным для установки в инструментальном магазине или приспособлении станка с ЧПУ.

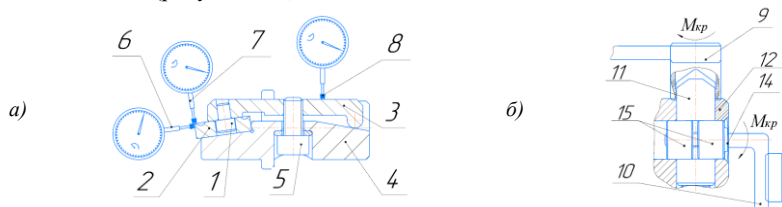


Рисунок 1. – Конструктивные элементы сборных торцовых фрез

Экспериментальные образцы конструктивных элементов сборных торцовых фрез были получены из десяти марок пластиковых материалов, в частности, модули корпусные – из пластикового материала марки ABSplus-P430 на 3D-принтере Stratasys Mojo и марки PLA Wanhao на 3D-принтере Mass Portal Pharaoh XD 30. На видеоизмерительном микроскопе модели NVM-4030D фирмы NORGAU измерялись линейные размеры конструктивных элементов и изучалась структура полученной наружной поверхности конструктивных элементов сборных торцовых фрез. Параметр шероховатости поверхностей деталей оценивался на профилографе-профилометре модели «Абрис-ПМ7». Температура в зоне сопла экструдера, на столе принтера, а также в зоне резания измерялась пирометром модели «Optris LB-217».

Для отработки конструктивных параметров сборных торцовых фрез и проверки математических и компьютерных моделей было проведено физическое моделирование работы сборных торцовых фрез в сыпучей и жидкой средах. Использовались макеты из пластиковых материалов разработанной сборной торцовой фрезы и фрезы фирмы «Seiko» из металлических материалов, которые устанавливались на вертикально-обрабатывающем центре с ЧПУ модели Robodrilл α -D21LiB фирмы «Fanuc» и погружались в емкость со средой; с помощью фото- и видеокамеры фиксировались направления потоков среды при различных частотах вращения сборных торцовых фрез.

Методика исследования жесткости закрепления режущих пластин в блоке резцовом и блока резцового в модуле корпусном сборной торцовой фрезы включает измерение перемещения пластины режущей и конструктивных элементов блока резцового с помощью индикаторов модели ИЧ-1 ГОСТ 577 (рисунок 2, а) при создании момента затяжки на крепежном винте и державке блока с помощью динамометрического ключа (рисунок 2, б).



1 – штифт; **2** – режущая пластина; **3** – прихват; **4** – державка; **5** – винт блока резцового; **6, 7, 8** – индикатор модели ИЧ-1; **9, 10** – ключ динамометрический; **12** – модуль корпусной; **14** – винт модуля зажимной; **15** – модуль зажимной
Рисунок 2. – Схема измерения: **а** – перемещений пластины режущей (**2**) и конструктивных элементов блока резцового (**11**); **б** – момента «страгивания» блока резцового (**11**) в модуле зажимном (**15**)

Исследования работоспособности экспериментальных образцов сборных торцовых фрез из металлических материалов проводились в соответствии с ГОСТ 26596 и 23726. Условия эксперимента: фрезерный станок – модели 6P12; тип инструмента – разработанные сборные торцовые фрезы и стандартная конструкция ВНИИ инструмента; диаметр – 125 мм; число режущих зубьев – 8; пластина режущая – пятизубчатая с отверстием типа 10113 ГОСТ 19065; материал режущей части – твердый сплав марки ВК8; обрабатываемый материал заготовки – сталь 40Х; смазочно-охлаждающая технологическая среда – ЭТ-2; режимы резания в соответствии с техниче-

скими характеристиками станка: $n = 500\text{--}1250 \text{ мин}^{-1}$ – частота вращения инструмента; $S = 85\text{--}330 \text{ мм/мин}$ – подача; $t = 0,5\text{--}3,0 \text{ мм}$ – глубина резания. Обработывалась партия заготовок при различных сочетаниях режима резания; оценивалось изменение параметра шероховатости обработанной поверхности, уровня вибрации и температуры на выходе из зоны резания при варьировании значений одного из режимов обработки заготовки. Уровень вибрации технологической системы измерялся с помощью портативного вибрметра Октава-110А.

В третьей главе приведено теоретическое обоснование оптимальных значений параметров форм корпусных модулей и стружко-потокоотводящих элементов сборных торцовых фрез; рассмотрены результаты компьютерного и физического моделирования, свойств и технологических характеристик конструкций сборных торцовых фрез из пластиковых и металлических материалов.

Разработаны варианты конструкций сборных торцовых фрез, включающих сочетание различных поверхностей форм в виде дисков, цилиндров, конусов, торов и др., описываемых известными формулами, а также возможные направления потоков воздуха и жидкости при обтекании этих поверхностей.

По аналогии с физическими моделями обтекания вращающихся тел потоками воздуха и жидкости, например, ротационной вертушки, завихрения воздушных потоков в закрытых полостях, а также компьютерными моделями обтекания препятствий различных форм предложены модели обтекания тороидальной поверхности модуля корпусного и стружко-потокоотводящих канавок потоками воздуха и жидкости.

Рассмотрена модель образования стружки и потокоотведения СОТС при различных углах наклона режущей кромки. Для определения параметров формы и расположения канавок в модуле корпусном сборной торцовой фрезы, отводящих стружку и СОТС, представленных на рисунке 3, используются известные из теории резания формулы для определения угла схода стружки: $\text{tg} \eta_{ci} = \text{tg} \lambda_i \cdot \cos \gamma_i$, и из теории аэрогидродинамики – формулы, связывающие изменение параметров препятствия (∂u и S) с характеристиками (∂W и F) и свойствами (μ) обтекающей его жидкости: $\partial u = \mu \cdot \partial W \cdot S / F$.

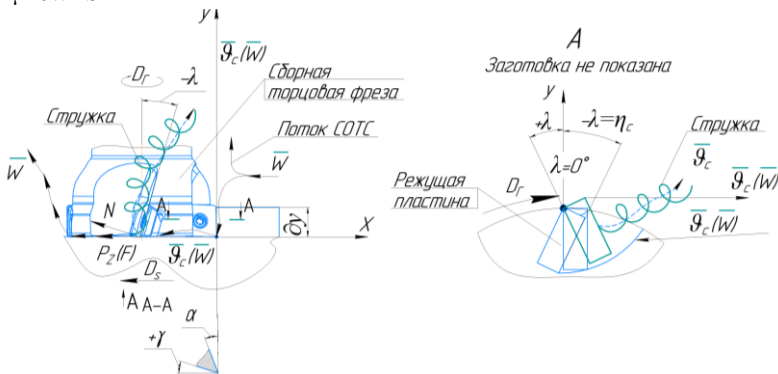


Рисунок 3. – Схемы для расчета угла схода стружки и размеров пластины режущей при высокоскоростном резании с применением СОТС

Сход стружки при температуре в зоне высокоскоростного резания представляется как процесс, протекающий в вязко-текучей среде, образованной СОТС и приконтактными слоями обрабатываемого материала и инструмента. В этих условиях процессы сдвига в твердых телах и распределение напряжений в потоке жидкости аналогичны.

После математических преобразований формулы для расчета η_{ci} и ∂y приведены к виду:

$$\eta_{ci} = \operatorname{arctg} \left[\cos \gamma_i \cdot \operatorname{tg}(\nu \pm \arccos \left[\frac{N \cdot \cos \nu \cdot \cos \theta}{P_z \cdot \cos(\theta + \gamma_i)} \right]) \right], \quad (1)$$

$$\partial y = \frac{\mu \cdot \partial \vartheta_c \cdot S \cdot \cos \nu \cdot \cos \theta}{P_z \cdot \cos(\lambda_i - \nu) \cdot \cos(\theta + \gamma_i)}. \quad (2)$$

в которых учитываются наряду с геометрическими параметрами лезвия (угол наклона режущей кромки λ_i и передний угол γ_i); динамические (главная составляющая P_z и нормальная N силы резания) и деформационные (скорость схода стружки $\vartheta_c = \vartheta / k_l$, где ϑ – скорость резания, $\nu = \operatorname{arctg}(P_y / P_z)$ и – вспомогательные углы, k_l – коэффициент укорочения стружки) характеристики процесса резания, а также динамическая вязкость μ СОТС и площадь поверхности препятствия (пластины режущей) S . Режим резания выбирается исходя из обрабатываемого материала – сталь 40Х, материала пластины режущей – твердый сплав ВК8: $n = 1250 \text{ мин}^{-1}$, $t = 1 \text{ мм}$, $s = 315 \text{ мм/мин}$.

Алгоритм совместного решения этих уравнений включает определение угла схода стружки η_c через угол наклона режущей кромки λ и передний угол γ лезвия инструмента, скорости резания ϑ и скорости схода стружки ϑ_c , действующей силы резания P_z , а также изменения координаты ∂y нормальной к линейной скорости среды, связанного с углом наклона λ_i , вязкостью технологической среды μ , скоростью потока W , площадью препятствия S и силой сопротивления среды F .

Результаты расчетов по формулам (1) и (2) представлены на рисунках 4 и 5.

С точки зрения теории резания с увеличением абсолютных значений угла наклона режущей кромки λ_i нормальная сила N уменьшается, причем ее значения тем меньше, чем больше значения переднего угла γ_i (рисунок 4, а). Уменьшение N способствует увеличению η_{ci} (рисунок 4, б), угол η_{ci} также возрастает при увеличении λ_i (рисунок 4, в). При увеличении соотношений P_x/P_z и P_y/P_z нормальная сила несколько возрастает, что необходимо учитывать при выборе значений λ_i и η_{ci} .

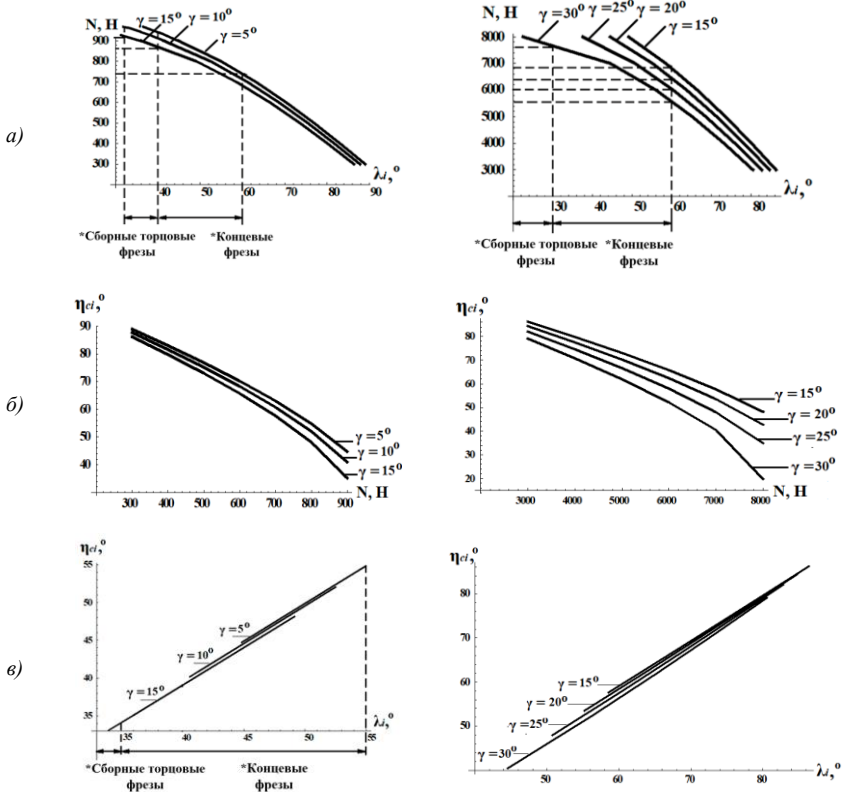


Рисунок 4. – Зависимости нормальной силы N от угла наклона режущей кромки λ_i (а), угла схода стружки η_{ci} от нормальной силы N (б) и угла наклона режущей кромки λ_i (в) при различных значениях переднего угла γ_i
 *данные из справочников

Как следует из графиков на рисунке 5, с увеличением скорости схода стружки ϑ_c (потока W) (рисунок 5, а, б) и площади поверхности пластины режущей (препятствия) S (рисунок 5, в), а также уменьшения N (силы сопротивления F) увеличение угла λ_i приводит к снижению значений координаты ∂y и его влияние тем больше, чем больше скорость схода стружки ϑ_c и скорость потока W (рисунок 5, з). При этом установлен диапазон изменений значений $\lambda_i = 35\text{--}55^\circ$, при котором координата ∂y принимает минимальные значения. Характер данных зависимостей сопоставим с полученными для угла схода стружки η_{ci} (см. рисунок 4) и позволяет определить условия однонаправленности потоков СОТС и стружки.

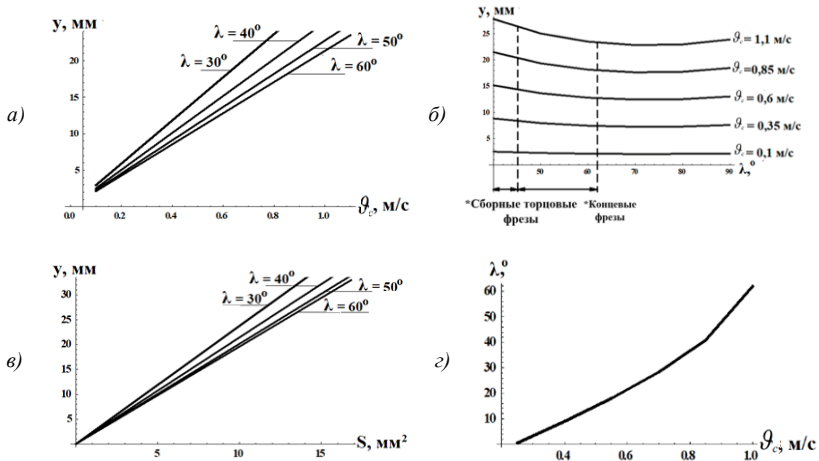


Рисунок 5. – Зависимости изменения координаты y от скорости стружки v_c (а), угла λ_i (б), площади S (в), и угла λ_i от скорости стружки v_c (г)
*данные из справочников

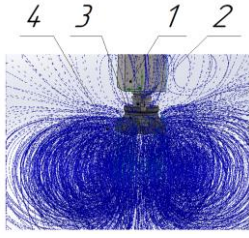
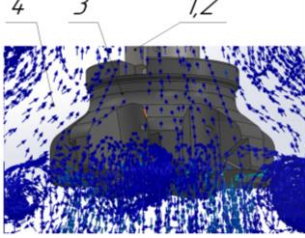
Для обеспечения производительной обработки поверхностей детали и интенсивного отвода стружки и потоков СОТС из зоны резания при назначении линейных и угловых параметров расположения канавок в корпусном модуле сборной торцевой фрезы необходимо, во-первых, учитывать свойства обрабатываемого и инструментального материалов, а также СОТС, значения линейных скоростей резания, схода стружки и потока СОТС, параметры размеров площадок контакта пластины режущей со стружкой и угла ее наклона, во-вторых, рекомендуется выбирать из расчетных значений угол наклона стружко-потокоотводящих канавок сборных торцевых фрез не менее $35\text{--}55^\circ$ при обработке углеродистых конструкционных сталей, что подтверждается данными по геометрическим параметрам лезвий из справочников (см. рисунок 4 и 5).

Для проверки рекомендаций и уточнения размерных параметров корпусных модулей и стружко-потокоотводящих канавок сборных торцевых фрез, полученных на основе математических зависимостей, было рассмотрено компьютерное моделирование работы сборных торцевых фрез при их обтекании потоками воздуха и жидкости с использованием программных продуктов Solid Works Flow Simulation и Cinema 4D.

В Solid Works была создана трехмерная модель сборной торцевой фрезы, выбрана метрическая система, вид моделирования (вращение), скорость перемещения потоков жидкости и воздуха и другие граничные условия. Был проведен расчет следующих моделей: № 1 – предлагаемой сборной торцевой фрезы (PP NSA065-12-20) с поверхностью модуля корпусного в виде тора и большими значениями угла наклона стружко-потокоотводящих канавок и № 2 – фрезы (FF FWX D066-05-22-08), имеющей стандартные параметры модулей корпусных и стружко-потокоотводящих канавок. Имитировалось обтекание потоками воздуха сборных торцевых фрез с изменением частоты их вращения: 1, 100, 1000 и 10000 мин⁻¹.

Фрагменты результатов компьютерного моделирования работы сборных торцовых фрез представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Фрагменты компьютерного моделирования работы сборных торцовых фрез в потоках воздуха

Обозначение сборной торцовой фрезы	
PP NSA065-12-20 (№ 1)	FF FWX D066-05-22-08 (№ 2)
	
1 – шпиндель вертикально-обрабатывающего центра; 2 – хвостовик; 3 – сборная торцовая фреза; 4 – траектория движения частиц воздуха	

Анализ результатов исследований показывает, что увеличение частоты вращения сборной торцовой фрезы приводит к увеличению концентрации воздушных потоков. Характер распределения потоков воздуха для сборных торцовых фрез различный. Для сборной торцовой фрезы № 1 характерно распределение потоков воздуха по форме поверхности модуля корпусного фрезы, т. е. торообразное. Причем при частоте 1000 мин^{-1} и 10000 мин^{-1} максимальная концентрация потоков воздуха наблюдается у торца и на периферии сборной торцовой фрезы, что способствует более эффективному стружко-потокоотводу от модуля корпусного сборной торцовой фрезы. Для сборной торцовой фрезы № 2 характерно «разлетание» потоков воздуха по параболическим кривым, особенно при малых значениях частоты вращения (до 100 мин^{-1}), что снижает эффективность охлаждения модулей корпусных. Таким образом, рекомендованные по результатам математических расчетов параметры формы модуля корпусного сборной торцовой фрезы в виде двух сопрягаемых торцов и стружко-потокоотводящих канавок с большими значениями угла их наклона подтверждаются компьютерным моделированием.

Для компьютерного моделирования работы сборных торцовых фрез в жидкой среде был использован плагин «RealFlow» программы Cinema 4D. Метод позволяет моделировать взаимодействие частиц между собой, которые в зависимости от расстояния могут «слипаться» или «отталкиваться». Каждая частиц имеет свою массу и так называемую «длину сглаживания», которая определяет расстояние, на котором частицы или притягиваются, или отталкиваются.

В таблице 2 представлены фрагменты результатов компьютерного моделирования работы сборных торцовых фрез № 1 и 2 в среде COTC.

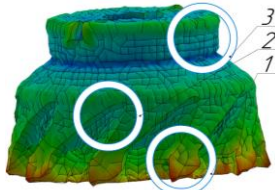
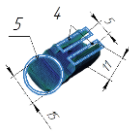
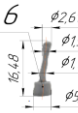
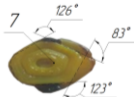
Таблица 2. – Фрагменты компьютерного моделирования работы сборных торцовых фрез в потоках жидкости

Обозначение сборной торцевой фрезы	
PP NSA065-12-20 (№ 1)	FF FWX D066-05-22-08 (№ 2)
	
1 – сборная торцевая фреза; 2 – область взаимодействия (образования) «воронки»	

Для сборных торцевых фрез в положении «над средой» характерно образование «воронки» со стороны торцевой поверхности, причем для сборной торцевой фрезы № 1 – она наибольшая по диаметру, что свидетельствует о более эффективном охлаждении торцевой поверхности этой сборной торцевой фрезы по сравнению со сборной торцевой фрезой № 2. Для сборной торцевой фрезы № 1 в положении «в среде» диаметр воронки больше, а степень разбрызгивания меньше, чем у сборной торцевой фрезы № 2, что свидетельствует о более плавной работе и более равномерном захвате канавками потоков жидкости у сборной торцевой фрезы № 1.

При моделировании теплового воздействия на конструктивные элементы сборных торцевых фрез из пластикового материала марки ABS Plus осуществлялся их нагрев с помощью промышленного фена модели «Stern HG2000ACN», а также использовался программный продукт Solid Works Flow Simulation для исследования температурных деформаций. Температура нагрева не превышала 150 °С, что соответствует температуре плавления пластикового материала марки ABS Plus и рекомендованным значениям температуры нагрева корпусных деталей в процессе высокоскоростного резания. Некоторые результаты компьютерного и физического моделирования представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Изменение формы и размеров конструктивных элементов сборной торцевой фрезы из пластикового материала марки ABS Plus при тепловом воздействии ($T_{max} = 150\text{ °C}$)

при компьютерном моделировании	при физическом моделировании		
 <p>модуль корпусной</p>			
	державка	винт блока резового	пластина режущая

Как видно из таблицы 3, при компьютерном моделировании модуля корпусной сборной торцевой фрезы в Solid Works Flow Simulation, он подвергается наибольшему тепловому воздействию в области 1 концентрации деформаций резания. При этом наблюдаются изменения размеров отверстий модуля корпусной для размещения блоков резовых. Увеличение температуры от 0 до 150 °С приводит к деформа-

циям конструктивных элементов сборной торцевой фрезы в пределах 5–7 %. В области 2 концентрации деформаций модуля корпусного усадка материала составляет 0,4–0,6 %. В области 3 температура не превышает значения 60 °С.

Физическое моделирование дает более достоверную картину изменений формы и размеров конструктивных элементов при тепловом воздействии. Анализ температурных деформаций конструктивных элементов сборных торцевых фрез показывает, что, например, блок резовый испытывает максимальную тепловую деформацию в области 4 буртиков паза для крепления прихвата и, в области 5 – паза для крепления пластины режущей, винт 6 блока резового удлиняется и пластина режущая 7 деформируется; при температуре свыше 120 °С увеличиваются его габаритные размеры блока резового более чем на 6 %. В целом изменение размеров конструктивных элементов сборных торцевых фрез при тепловом воздействии составляет порядка 10–15 %, что учитывается при проектировании резьбовых и других соединений в блоке резовом и модуле корпусном сборных торцевых фрез из металлических материалов.

При оценке соответствия параметров точности размеров конструкций сборных торцевых фрез заданным на чертеже использовались 10 державок блока резового и 2 модуля корпусных из различных пластиковых материалов (ABS, ABS-GF, PA-GF, PC, PLA, SBS, TPU-GF, FLEX, PET, PETG).

Анализ результатов измерений, фрагмент которых представлен в виде графика отклонений одного из линейных размеров от номинального значения (53,0 мм), позволяет сделать выводы о том, что степень усадки минимальна для пластикового материала марки PETG, PLA и ABS-GF – отклонение линейных размеров не превышают соответственно 0,13, 0,26 и 0,32 %, максимальные отклонения установлены для пластиковых материалов марки FLEX и PA-GF – 1,3 и 0,43 % (рисунок 6, а).

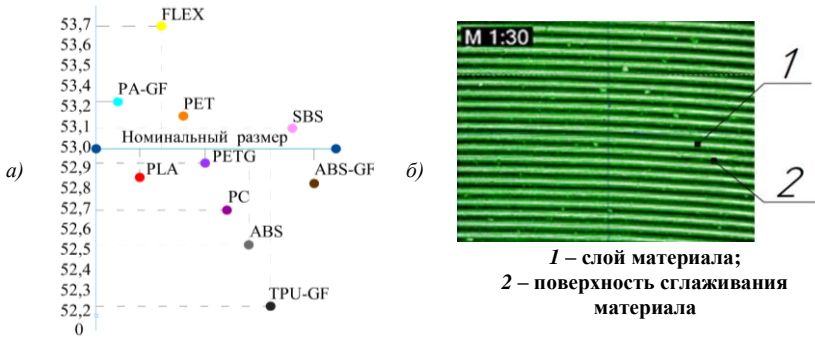


Рисунок 6. – График отклонений линейного размера державки от номинальных значений (сплошная линия) для различных пластиковых материалов (а); вид структуры поверхности сборной торцевой фрезы, полученной на 3D-принтере Stratasys Mojo из пластикового материала марки ABSplus-P430 (б)

Размеры конструктивных элементов сборных торцевых фрез зависят от структуры наружных поверхностей, которая различна для разных марок пластиковых материалов (рисунок 6, б). В свою очередь, параметры этой структуры зависят от толщины слоя материала в начале и на выходе печати, степени заливки материала и влияют на параметр шероховатости получаемой поверхности. Так, например, при

степени заливки материала 100 % и 50 % значения параметра шероховатости поверхности Ra составляет 3,2 и 6,3 мкм соответственно.

В четвертой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований, разработки технологий проектирования и изготовления сборных торцовых фрез.

Были проведены расчеты и эксперименты по определению сил зажима пластины режущей и блока резцового, обеспечивающих их надежное закрепление. Установлено, что предлагаемый модуль зажимной обеспечивает с 10-ю кратным запасом закрепление пластин режущих, а для блока резцового наиболее надежен двуклиновой модуль зажимной, с усилием зажима равным 70 Н при значении момента затяжки винта равным 10 Н·м. Полученные данные использовались при проектировании сборных торцовых фрез.

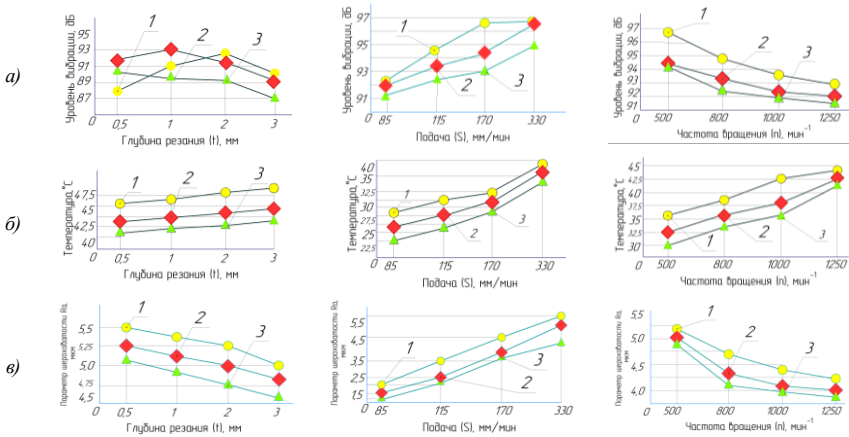
Спроектированы и изготовлены экспериментальные конструкции сборных торцовых фрез с цилиндрической формой корпусов и «свободным» стружкоотводом для установки в хвостовике ВТ40 (рисунок 7, а, б) и ВТ30 (рисунок 7, в), а также с формой модуля корпусного в виде сопрягаемых торцовых поверхностей без (рисунок 7, г) и со стружко-потокоотводящими канавками с различными значениями угла наклона режущей кромки (рисунок 7, д–ж).



Рисунок 7. – Экспериментальные конструкции сборных торцовых фрез в форме диска (а), диска и конуса (б и в), цилиндра (г) и тора (д–ж)

Экспериментальные исследования работы сборных торцовых фрез в жидкой и сыпучей средах показали, что также, как и при компьютерном моделировании с торцевой стороны фрезы образуется воронка, в которую направлены потоки среды, потоки захватываются стружко-потокоотводящими канавками и направляются в разработанных сборных торцовых фрез на периферию, а во фрезе «Seiko» – к оси вращения фрезы. Периферийный отвод потоков свидетельствует об оптимальных значениях параметров геометрической формы и расположения стружко-потокоотводящих канавок и характеризует более эффективное охлаждение разработанных сборных торцовых фрез.

Результаты экспериментальных исследований температуры на выходе из зоны резания, уровня вибрации технологической системы, параметра шероховатости поверхности детали, обработанной разработанными и стандартной сборными торцовыми фрезами конструкции ВНИИ инструмента, представлены в виде их зависимостей от режима резания (рисунок 8).



1 – сборная торцовая фреза ВНИИ инструмента; 2 – сборная торцовая фреза-аналог; 3 – усовершенствованная сборная торцовая фреза; обрабатываемый материал – сталь 40Х, материал режущей части – твердый сплав ВК8, СОЖ – эмульсия ЭТ-2
Рисунок 8. – Зависимости уровня вибрации (а), температуры на выходе из зоны резания (б) и параметра шероховатости Ra обработанной поверхности (в) от глубины резания, подачи и частоты вращения инструмента

Характер зависимостей соответствует общепринятым в теории резания и свидетельствует о меньших значениях (на 10–17 %) физических и технологических характеристик обработки разработанными сборными торцовыми фрезами по сравнению со стандартными фрезами. Рекомендации, полученные в ходе эксперимента, используются при проектировании сборных торцовых фрез.

На основании результатов проведенных исследований разработана технология проектирования сборных торцовых фрез (ТП №202123002), которая отличается от известных использованием моделей, получаемых 3D-печатью из пластиковых материалов. Она включает этапы подготовки к 3D-печати деталей и пост-обработку. Этап подготовки к печати осуществляется настройкой программного продукта Simplify3D, 3D-печать характеризуется температурой сопла экструдера (210–285°) и стола (60–120°), скоростью перемещения экструдера (40 мм/с), а также временем печати и затратами пластикового материала.

Разработаны технологические маршруты механической обработки и сборки деталей металлических торцовых фрез.

Как показала реализация технологий, результаты экспериментов и расчетов, использование пластиковых материалов для изготовления экспериментальных образцов позволяет сократить затраты на материалы до 2–3 раз и время на технологическую подготовку производства сборных торцовых фрез из металлических материалов на 15–20 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе численной реализации математической модели процесса высокоскоростного резания материалов, учитывающей одновременное влияние значений геометрических параметров сборных торцовых фрез на динамические характеристики стружкообразования и аэро-гидравлических потоков смазочно-охлаждающей технологической среды, определены оптимальные диапазоны изменения угла наклона режущей кромки ($\lambda = 30\text{--}80^\circ$) и координаты ∂y (до 30 мм) проекции пластины режущей, что позволило обеспечить снижение значения силы резания и однонаправленность потоков воздуха, жидкости и стружки [4, 9, 19, 21, 29, 30, 34, 36].

2. В результате исследования компьютерной и физической моделей процессов обтекания потоками воздуха, жидкости и сыпучей среды вращающихся сборных торцовых фрез, полученных 3D-печатью из пластикового материала (марка PLA) и традиционным методом из металла (сталь 40X) в воздушной, жидкой и сыпучей средах от диапазона частот вращения ($1\text{--}10\ 000\ \text{мин}^{-1}$), установлены оптимальные параметры формы модулей корпусных в виде двух сопрягаемых торцов и расположения стружко-потокоотводящих канавок на торце и периферии под углом наклона в пределах $35\text{--}55^\circ$, что обеспечивает аэро-гидродинамическую обтекаемость сборных торцовых фрез и направленный отвод теплоты, потоков смазочно-охлаждающей технологической среды и стружки из зоны высокоскоростного резания [1, 3, 5, 10, 11, 12, 17, 24, 25, 27, 32].

3. На основании экспериментальных исследований влияния технологических параметров 3D-печати (марка пластикового материала, степень заливки) конструктивных элементов сборных торцовых фрез на точность их геометрических параметров, установлено, что наибольшие отклонения полученных размеров, для пластиковых материалов марок PETG, PLA, ABS-GF при степени заливки материала 100 и 50 %, от заданных не превышает 0,01 мм по линейным и $15\text{--}20'$ по угловым параметрам, а шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra составляет 3,2 и 6,3 мкм соответственно, что позволяет рекомендовать моделирование 3D-печатью на этапе подготовки производства металлических сборных торцовых фрез [5, 23, 26, 31].

4. В результате экспериментальных исследований влияния формы конструкций сборных торцовых фрез на технологические характеристики процесса резания (шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra, уровень вибрации, температура на выходе из зоны резания) в зависимости от глубины резания (0,5–3,0 мм), подачи (85–330 мм/мин), частоты вращения инструмента ($500\text{--}1250\ \text{мин}^{-1}$), установлено, что разработанная конструкция сборной торцовой фрезы обеспечивает шероховатость поверхности по параметру Ra (0,80–5,15 мкм), уровень вибрации технологической системы (88–94 дБ), температуру обработанной поверхности на выходе из зоны резания (не более $41,2\ ^\circ\text{C}$), что на 10–17 % ниже, чем значения этих характеристик, полученных стандартными сборными торцовыми фрезами [2, 6, 7, 8, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 28, 33, 35].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные технологии проектирования и изготовления сборных торцовых фрез, включающие применение 3D-печати и традиционных методов (ТП

№ 202123002), реализованы в производстве РИУП «Научно-технологический парк Полоцкого государственного университета» при изготовлении различных деталей.

Результаты исследований внедрены в образовательный процесс кафедры «Технология и оборудование машиностроительного производства» Полоцкого государственного университета по специальностям 1–36 01 01 «Технология машиностроения» и 1–36 07 02 «Производства изделий на основе трехмерных технологий» при преподавании дисциплин «Теория резания», «Режущий инструмент», «Технология инструментального производства», «САПР технологических процессов», «Аддитивные технологии в производстве», «Промышленный дизайн», «Конструирование и расчет изделий», «Материалы аддитивного синтеза», «Методы исследований материалов и изделий».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Попок, Н. Н. Совершенствование системы закрепления пластин режущих и блоков резцовых в блочно-модульных режущих инструментах / Н. Н. Попок, А. С. Максимчук, С. А. Портянко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 3. – С. 16–22.
2. Попок, Н. Н. Совершенствование конструкций блочно-модульных торцовых фрез на основе исследования характеристик процесса резания / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, А. С. Максимчук // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 3. – С. 22–28.
3. Попок, Н. Н. Методология исследования работоспособности фрезерных и осевых режущих инструментов на основе 3D-прототипирования / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2020. – № 11. – С. 29–39.
4. Моделирование и регулирование стружкообразования и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды при фрезеровании / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, Е. М. Тихон, В. С. Анисимов // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. – 2021. – № 1 (9). – С. 27–36.
5. Попок, Н. Н. Подготовка производства блочно-модульных фрез с использованием 3D-прототипирования / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2021. – № 1 (40). – С. 94–106.

Материалы конференций и статьи в других изданиях

6. Исследование температуры и шумов в зоне резания при обработке блочно-модульной фрезой [Электронный ресурс] / Н. Н. Попок, А. В. Сидикевич, А. С. Максимчук, С. А. Портянко // Электрон. сб. трудов молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 10 (80). Промышленность / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: Д. Н. Лазовский (гл. ред.) [и др.]. – Новополоцк, 2015. – С. 132–134.
7. Совершенствование конструкций блочно-модульных торцовых фрез / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, А. С. Максимчук, А. В. Сидикевич // Инновационные технологии в машиностроении : материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию академика П. И. Ящерицына и 40-летию машиностроительного факультета Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 28–29 окт. 2015 г. / Полоц. гос. ун-т ; под общ. ред. А. И. Гордиенко, В. К. Шелега. – Новополоцк, 2015. – С. 157–160.
8. Исследование температуры, вибраций в зоне резания и шероховатости поверхности детали при обработке блочно-модульной фрезой [Электронный ресурс] / Н. Н. Попок, А. В. Сидикевич, А. С. Максимчук, С. А. Портянко // Электрон. сб. трудов молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 15 (85). Промышленность / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: Д. Н. Лазовский (гл. ред.) [и др.]. – Новополоцк, 2016. – С. 168–170.
9. Исследование процесса обработки блочно-модульной торцовой фрезой / Н. Н. Попок, А. В. Сидикевич, А. С. Максимчук, С. А. Портянко // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы IV междунар. науч.-практ. конф., Минск, 3–4 фев. 2016 г. / Беларус. нац. техн.

ун-т ; ЗАО «МинскЭкспо» ; редкол.: Ф. И. Пантелеенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 132–133.

10. Portsianko, S. Using of 3D modeling and rapid prototyping technologies during the design of constructions of block-module surface cuttings [Electronic resource] / S. Portsianko, N. Popok // European and national dimension in research. Technology : electronic collected materials of IX Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, April 26–27, 2017 / Polotsk State University ; ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2017. – P. 214–215.

11. Применение технологий 3D-моделирования и быстрого прототипирования при проектировании конструкций блочно-модульных торцовых фрез / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, А. С. Максимчук, Г. И. Гвоздь // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы V междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 фев. 2017 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; ЗАО «Минск-Экспо» ; редкол.: А. М. Маляревич (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 95–96.

12. Формирование баз данных для автоматизированного проектирования блочно-модульных режущих инструментов / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, М. В. Черневич, Г. И. Гвоздь // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы V междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 фев. 2017 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; ЗАО «МинскЭкспо» ; редкол. : А. М. Маляревич (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 97–98.

13. Portsianko, S. 3D-modeling of block-module face-milling cutter constructions [Electronic resource] / S. Portsianko, N. Popok // European and national dimension in research. Technology : electronic collected materials of X Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, May 10–11, 2018 / Polotsk State University ; ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2018. – P. 61–62.

14. Попок, Н. Н. 3D-моделирование конструкций блочно-модульных торцовых фрез [Электронный ресурс] / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, Г. И. Гвоздь // Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018) : электрон. сб. ст. I междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2018. – С. 190–192.

15. Partsianka, S. 3D-making of team cutting tools for high-speed processing [Electronic resource] / S. Partsianka, N. Popok // European and national dimension in research. Technology : electronic collected materials of XI Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, May 23–24, 2019 / Polotsk State University ; ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2019. – P. 137–138.

16. Попок, Н. Н. Моделирование конструкции расточного патрона на основе быстрого прототипирования / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Техника и технологии: инновации и качество : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 20 дек. 2018 г. / БарГУ ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2019. – С. 51–52.

17. Портянко, С. А. Технология FDM-печати конструкции блочно-модульной торцовой фрезы / С. А. Портянко, Н. Н. Попок // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 24–25 окт. 2019 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2019. – С. 38.

18. Моделирование влияния теплового воздействия на основные элементы режущего инструмента в SolidWorks [Электронный ресурс] / Н. Н. Попок, С. А. Стотик, С. А. Портянко, А. А. Портянко, С. А. Стотик, Р. Г. Дмитриев, Е. С. Бедрицкая, В. А. Кудрякова, Е. А. Глинский, Д. Е. Матвеев // Электрон. сб. трудов молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 35 (105). Промышленность / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: Д. Н. Лазовский (гл. ред.) [и др.]. – Новополоцк, 2020. – С. 222–225.

19. Моделирование работы торцовых фрез в программе Cinema 4D [Электронный ресурс] / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, А. А. Портянко, С. А. Стотик, Р. Г. Дмитриев, Е. С. Бедрицкая, В. А. Кудрякова, Е. А. Глинский, Д. Е. Матвеев // Электрон. сб. трудов молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 35 (105). Промышленность / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: Д. Н. Лазовский (гл. ред.) [и др.]. – Новополоцк, 2020. – С. 226–231.

20. Сравнительный анализ 3D-принтеров на основе FDM и SLA технологий [Электронный ресурс] / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, А. А. Портянко, С. А. Стотик, Р. Г. Дмитриев, Е. С. Бедрицкая, В. А. Кудрякова, Е. А. Глинский, Д. Е. Матвеев // Электрон. сб. трудов молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 35 (105). Промышленность / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: Д. Н. Лазовский (гл. ред.) [и др.]. – Новополоцк, 2020. – С. 232–236.

21. Моделирование воздушных потоков в Solid Works Flow Simulation [Электронный ресурс] / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, А. А. Портянко, С. А. Стотик, Р. Г. Дмитриев, Е. С. Бедрицкая, В. А. Кудрякова, Е. А. Глинский, Д. Е. Матвеев // Электрон. сб. трудов молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. 35 (105). Промышленность / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: Д. Н. Лазовский (гл. ред.) [и др.]. – Новополоцк, 2020. – С. 237–241.

22. Matsveyankou, D. Automation of production preparation based on 3D-layout of technological equipment [Electronic resource] / D. Matsveyankou, N. Popok, S. Partsianka // European and national dimension in research. Technology : electronic collected materials of XII Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, May 13–14, 2020 / Polotsk State University ; ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2020. – P. 31–32.

23. Matsveyankou, D. Modern 3D-printing technologies of products and parts [Electronic resource] / D. Matsveyankou, N. Popok, S. Partsianka // European and national dimension in research. Technology : electronic collected materials of XII Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, May 13–14, 2020 / Polotsk State University ; ed. D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2020. – P. 33–35.

24. Попок, Н. Н. Автоматизация подготовки производства на основе 3D-макетирования технологической оснастки / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы VIII междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19 марта 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; ЗАО «МинскЭкспо» ; редкол.: А. М. Маляревич (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 95.

25. Попок, Н. Н. Подготовка машиностроительного производства на основе 3D-прототипирования технологической оснастки [Электронный ресурс] / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Инновационные технологии в машиностроении : электрон. сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию науч.-технол. парка Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 21–

22 апреля 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: Н. Н. Попок [и др.]. – Новополоцк, 2020. – С. 41–42.

26. Попок, Н. Н. Исследование технологических возможностей 3D-макетирования режущих инструментов / Н. Н. Попок, С. А. Портыанко, Е. М. Тихон // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь : сб. докл. Междунар. науч.-практ. симп., Минск, 30 сент. 2020 г. / Нац. акад. наук Беларуси ; ГНПО порошковой металлургии ; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 127–130.

27. Попок, Н. Н. Конструирование сборных режущих инструментов на основе 3D-прототипирования / Н. Н. Попок, С. А. Портыанко, Е. М. Тихон // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2021 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2021. – С. 71–72.

28. Simulating the influence of thermal exposure on the main elements of a cutting tool in SolidWorks [Electronic resource] / D. Maksimenko, N. Popok, S. Portyanko // European and national dimension in research. Technology : electronic collected materials of XIII Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, May 17–21, 2021 / Polotsk State University ; ed. Yu. Holubeu [et al.]. – Novopolotsk, 2021. – P. 90–92.

29. Modeling the operation of end mills in the Cinema 4D program [Electronic resource] / R. Dmitriev, N. Popok, S. Portyanko, D. Matveenkov // European and national dimension in research. Technology : electronic collected materials of XIII Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, May 17–21, 2021 / Polotsk State University ; ed. Yu. Holubeu [et al.]. – Novopolotsk, 2021. – P. 93–97.

30. Airflow simulation in Solid Works Flow Simulation [Electronic resource] / D. Abragimovich, N. Popok, S. Portyanko, Issa Abakar Ahmad Ilyass // European and national dimension in research. Technology : electronic collected materials of XIII Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, May 17–21, 2021 / Polotsk State University ; ed. Yu. Holubeu [et al.]. – Novopolotsk, 2021. – P. 98–101.

31. Comparative analysis of 3D-printers based on FDM and SLA technologies [Electronic resource] / D. Maksimenko N. Popok, S. Portyanko, V. Kudryakova // European and national dimension in research. Technology : electronic collected materials of XIII Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, May 17–21, 2021 / Polotsk State University ; ed. Yu. Holubeu [et al.]. – Novopolotsk, 2021. – P. 102–105.

Тезисы докладов

32. Технология проектирования блочно-модульных режущих инструментов с использованием 3D-принтера / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, А. С. Максимчук, Г. И. Гвоздь // Современные проблемы машиноведения : XI Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 20–21 окт. 2016 г. : тез. докл. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. С. И. Тимошина. – Гомель, 2016. – С. 34–35.

33. Теоретическая и экспериментальная оценки жесткости блочно-модульных торцовых фрез / Н. Н. Попок, А.С. Максимчук, Г. И. Гвоздь, С. А. Портянко // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : 31-ая Междунар. науч.-техн. конф., Минск, : тез. докл. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : Ф. И. Пантелеенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 144–146.

34. Попок, Н. Н. 3D-макетирование сборных режущих инструментов для высокоскоростной обработки / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : 33-я междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 марта 2019 г. : тез. докл. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 97–98.

35. Оценка параметров точности и шероховатости поверхностей деталей блочно-модульного режущего инструмента, полученных 3D-печатью / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, В. С. Анисимов, Л. Н. Косяк // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : 35-ая Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 8 апр. 2021 г. : тез. докл. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 91–93.

Патенты и полезные модели Республики Беларусь

36. Многолезвийный блочно-модульный режущий инструмент : заявка № 20200344 / Н. Н. Попок, С. А. Портянко. – Оpubл. 02.12.2020.

РЭЗІЮМЭ

Парцянка Сяргей Анатольевіч

Тэхналогія праектавання зборных тарцовых фрээ для высакахуткаснага рэзання на аснове мадэліравання канструкцый з пластыкавых матэрыялаў, атрыманых метадам 3D-друку

Ключавыя словы: тэхналогія, тэхналогія праектавання, фрээраванне, зборныя тарцовыя фрэзы, высакахуткаснае рэзанне, габлюшка-патокаадводныя канаўкі, мадэліраванне, мадэль, паток, змазачна-астуджальнае тэхналагічнае асяроддзе, тэхналагічны маршрут, макет, пластыкавы матэрыял, 3D-друк.

Мэта працы: распрацаваць тэхналогію праектавання зборных тарцовых фрээ для высакахуткаснага рэзання на аснове мадэліравання канструкцый з пластыкавых матэрыялаў, якія атрымліваюцца 3D-друкам.

Метады даследаванняў і выкарыстаная апаратура: аналітычны і эксперыментальны, пры эксперыментальных даследаваннях працаздольнасці зборных тарцовых фрээ, а таксама іх аэра- і гідрадынамічнай абцякальнасці выкарыстоўваліся вертыкальна-фрээрны станок мадэлі 6P12 і вертыкальна тэхнічны цэнтр з ЛПК «Robodrilл α -D21LiB», вымярэнне тэмпературы ў галіне рэзання ажыццяўлялася з дапамогай інфрачырвонага пірометра мадэлі «Optris ЛБ – 217», вібрацыі – віброметра «Актава-110А», шурпатасці паверхні – профілографа-профілометра «Абрыс-ПМ7», параметраў дакладнасці лінейных і кутніх памераў, а таксама структуры паверхні – відзавымяральнага мікраскопа мадэлі «NVM-4030D» фірмы Norgau.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: прапанавана матэматычная мадэль працэсу рэзання матэрыялаў зборнымі тарцовымі фрэзамі, адрозная ўлікам адначасовага ўздзеяння сіл рэзання і напору патокаў ЗАТА; распрацаваны камп'ютарная і фізічная мадэлі, адрозныя імітацыяй працы зборных тарцовых фрээ, атрыманых 3D-друкам з пластыкавых матэрыялаў і традыцыйным метадам з металу пры сілавым і цеплавым уздзеянні, і якія дазваляюць усталяваць аптымальныя значэнні параметраў формы абцякання корпусных дэталей і размяшчэння габлюшка-патокаадводных канавак пры розных частотах кручэння зборных тарцовых фрээ; устаноўлены залежнасці параметраў геаметрычнай формы модуляў корпусных і габлюшка-патокаадводных канавак ад дзеяння сілы рэзання і патокаў ЗАТА пры працы 3D-мадэляў з пластыкавых матэрыялаў і металічных зборных тарцовых фрээ; устаноўлены дыяпазоны дакладнасных параметраў зборных тарцовых фрээ для высакахуткаснага рэзання на аснове 3D-друку канструкцый з пластыкавых матэрыялаў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: распрацаваныя тэхналогіі праектавання і вырабу зборных тарцовых фрээ, якія ўключаюць прымяненне 3D-друку і традыцыйных метадаў, забяспечваюць эканомію выдаткаў на матэрыялы ў 2–3 разы і скарачэнне часу на канструктарскую і тэхналагічную падрыхтоўку вытворчасці да 15–20 % у залежнасці ад тыпу памеру зборнай тарцовай фрэзы.

Галіна выкарыстання: машынабудаванне, механічная апрацоўка плоскіх паверхнасцей.

РЕЗЮМЕ**Портянко Сергей Анатольевич****Технология проектирования сборных торцовых фрез для высокоскоростного резания на основе моделирования конструкций из пластиковых материалов, получаемых 3D-печатью**

Ключевые слова: технология, технология проектирования, фрезерование, сборные торцовые фрезы, высокоскоростное резание, стружко-потокоотводящие канавки, моделирование, модель, поток, смазочно-охлаждающая технологическая среда, технологический маршрут, макет, пластиковый материал, 3D-печать.

Цель работы: разработать технологию проектирования сборных торцовых фрез для высокоскоростного резания на основе моделирования конструкций из пластиковых материалов, получаемых 3D-печатью.

Методы исследования и использованное оборудование и аппаратура: аналитический и экспериментальный, при экспериментальных исследованиях работоспособности сборных торцовых фрез, а также их аэро- и гидродинамической обтекаемости использовались вертикально-фрезерный станок модели 6P12 и вертикально-обрабатывающий центр с ЧПУ Robodrill α -D21LiB, измерение температуры в области резания осуществлялось с помощью инфракрасного пирометра модели «Opttris LB-217», вибрации – вибрметра «Октава-110А», параметра шероховатости поверхности – профилограф-профилометр «Абрис-ПМ7», параметров точности линейных и угловых размеров, а также структуры поверхности – видеоизмерительного микроскопа модели NVM-4030D фирмы NORGAU.

Полученные результаты и их новизна: предложена математическая модель процесса резания материалов сборными торцовыми фрезами, отличающаяся учетом одновременного воздействия сил резания и напора потоков СОТС; разработаны компьютерная и физическая модели, отличающиеся имитацией работы сборных торцовых фрез, полученных 3D-печатью из пластиковых материалов и традиционным методом из металла при силовом и тепловом воздействии, и позволяющие установить оптимальные значения параметров формы обтекания корпусных деталей и расположения стружко-потокоотводящих канавок при различных частотах вращения сборных торцовых фрез; установлены зависимости геометрических параметров формы модулей корпусных и стружко-потокоотводящих канавок от действия силы резания и потоков СОТС при работе 3D-моделей из пластиковых материалов и металлических сборных торцовых фрез; установлены диапазоны точностных параметров сборных торцовых фрез для высокоскоростного резания на основе 3D-печати конструкций из пластиковых материалов.

Рекомендации по использованию: разработанные технологии проектирования и изготовления сборных торцовых фрез, включающие применение 3D-печати и традиционных методов, обеспечивают экономию затрат на материалы в 2–3 раза и сокращение времени на конструкторскую и технологическую подготовку производства до 15–20 % в зависимости от типоразмера сборной торцовой фрезы.

Область применения: машиностроение, проектирование сборных режущих инструментов, высокоскоростная обработка корпусных деталей и тел вращения.

SUMMARY

Partsianka Siarhei

The technology of designing prefabricated end mills for high-speed cutting based on the modeling of structures made of plastic materials obtained by 3D-printing

Keywords: technology, design technology, milling, prefabricated end mills, high-speed cutting, chip-flow grooves, modeling, model, flow, lubricating and cooling process medium, technological route, layout, plastic material, 3D-printing.

Purpose of research work: to develop a technology for designing prefabricated end mills for high-speed cutting based on the modeling of structures made of plastic materials obtained by 3D-printing.

The results and their novelty: analytical and experimental, during experimental studies of the operability of prefabricated end mills, as well as their aero- and hydrodynamic flowability, a vertical milling machine model 6P12 and a vertical CNC machining center robodrill α -D21lib machine were used, temperature measurement in the cutting area was carried out using an infrared pyrometer model "Optris Ib-217", vibration-vibrometer "Octave-110A", surface roughness – profilograph-profilometer "Abris-PM7", accuracy parameters of linear and angular dimensions, as well as surface structure – video measuring microscope model NVM-4030D company NORGAU.

Methods of research and used equipment: a mathematical model of the process of cutting materials with prefabricated end mills is proposed, which is characterized by taking into account the simultaneous impact of cutting forces and the flow pressure of the STS; computer and physical models have been developed that differ in the simulation of the operation of prefabricated end mills obtained with 3D-printing from plastic materials and the traditional method of metal under force and heat exposure, and allow to establish optimal values of the parameters of the shape of the flow around the body parts and the location of chip-flow grooves at different rotational speeds of prefabricated end mills; the dependences of the geometric parameters of the shape of modules and housing chip-flow grooves on the action of cutting force and flows of STS during the operation of 3D-models made of plastic materials and metal prefabricated end mills are established; ranges of accuracy parameters of prefabricated end mills for high-speed cutting based on 3D-printing of structures made of plastic materials are established.

Recommendations for application: the developed technologies for the design and manufacture of prefabricated end mills, including the use of 3D-printing and traditional methods, provide material cost savings of 2–3 times and reduction in time for design and technological preparation of production up to 15–20 %, depending on the size of the prefabricated end mill.

Fields of Application: mechanical engineering, design of prefabricated cutting tools, high-speed processing of body parts and bodies of rotation.