

На правах рукописи



Назаров Михаил Вадимович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА НЕЖЕСТКИХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПУТЁМ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭТАПОВ ТПП И ВВЕДЕНИЯ В ЗОНУ РЕЗАНИЯ ЭНЕРГИИ УЗ-ПОЛЯ

Специальность 2.5.5. - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2021

Работа выполнена на кафедре "Инновационные технологии в машиностроении" и в «Региональном технологическом центре промышленного интернета в машиностроении» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ).

Научный руководитель: **Киселёв Евгений Степанович**, заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор, директор Регионального технологического центра промышленного интернета в машиностроении, профессор кафедры «Инновационные технологии в машиностроении» УлГТУ

Официальные оппоненты: **Гузев Виктор Иванович**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология автоматизированного машиностроения» ФГБОУ ВО «Южно-уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет) (г. Челябинск)

Приходько Вячеслав Михайлович, Член - корреспондент АН РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология конструкционных материалов» ФГБОУ ВО «Московский государственный автомобильный университет (МАДИ)»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «**Пермский национальный исследовательский политехнический университет**»

Защита диссертации состоится 27 декабря 2021 г. в 13-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.001.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, г.Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445667, г.Тольятти, ул. Белорусская, д. 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, главный учебный корпус, ауд.211.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте: www.ulstu.ru и в библиотеке ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет».

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Веткас Н.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современный этап развития машиностроения характеризуется тем, что в условиях изготовления деталей в мелкосерийном и единичном производстве и использования высокопроизводительного металлорежущего оборудования и инструмента всё чаще возникают ситуации, когда процесс механической обработки заготовки становится менее продолжительным, нежели процесс его технологической подготовки. Поэтому, основным ключом к снижению себестоимости продукции машиностроения становится сокращение затрат на инженерную работу путём использования систем автоматизированного проектирования программ управления и автоматизации ряда процессов, требующих многократного повторения.

Одним из таких процессов является назначение режима механической обработки для каждого планируемого перехода, при котором инженер-технолог должен подобрать рациональное сочетание элементов режима резания, позволяющее обеспечить заданные параметры качества, начиная с обеспечения требуемого допуска обрабатываемого элемента и шероховатости поверхности, и заканчивая состоянием поверхностного слоя (ПС), например, уровнем технологических остаточных напряжений (ТОН). Сложность данного процесса заключается в отсутствии рекомендаций от производителей режущего инструмента (РИ) по обработке заготовок, прежде всего, из труднообрабатываемых титановых, жаропрочных др. сплавов, и, отличающихся пониженной температурой плавления и существенно меньшей прочностью с хорошей обрабатываемостью - алюминиевых сплавов, особенно при изготовлении нежестких деталей с тонкостенными элементами, во взаимосвязи параметров качества с режимом резания. Изготовление нежестких деталей из таких материалов сопряжено с опасностью возникновения в поверхностном слое ТОН, величина которых бывает достаточной для объемного коробления и пространственного изменения взаимного положения обработанных поверхностей в процессе их временной релаксации. В первом случае это объясняется малой теплопроводностью (у титановых сплавов в 4-5 раз меньшей чем у сталей), во втором - близостью контактных температур в зоне резания к температуре плавления алюминиевых сплавов. В обоих случаях имеется большая вероятность возникновения ТОН термического и структурно-фазового характера из-за высокой теплосиловой напряженности процесса снятия припусков. На практике это вызывает необходимость существенного снижения элементов режима, а в некоторых случаях - опытного подбора последовательности изготовления. Механическую обработку заготовок подобных деталей чаще всего ведут на современных обрабатывающих центрах, для которых подобные потери производительности недопустимы. Предотвращение этого может быть достигнуто введением в зону обработки энергии ультразвукового (УЗ) поля, способствующей уменьшению теплосиловой напряженности в зоне контакта режущего инструмента с заготовкой, что доказано многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых. Однако возможности введения в зону обработки энергии УЗ поля до настоящего времени не учитываются при разработке программ для многоцелевых обрабатывающих

центров при использовании систем автоматизированного проектирования программ управления и автоматизации процессов.

Перспективным направлением в решении комплекса вопросов по обеспечению точности фрезерной обработки нежестких заготовок является совершенствование моделей расчета составляющих силы резания и построение на их основе четко структурированных алгоритмов расчета прогиба нежестких деталей в процессе их изготовления. Разработка адекватных математических моделей и автоматизированный расчет элементов режима фрезерования с учетом введения в зону обработки энергии модулированного УЗ поля, генерируемого двумя источниками, обеспечивающих точность нежестких деталей, позволит использовать в максимальной степени потенциальные возможности повышения производительности современных многоцелевых обрабатывающих центров.

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности производства нежестких деталей в единичном и мелкосерийном производстве за счёт сокращения затрат на ТПП и интенсификации процесса механической обработки посредством введения в зону обработки энергии УЗ-поля.

Для достижения цели работы в диссертации решены **следующие задачи:**

1. Разработать математическую модель упругих деформаций обрабатываемых тонких стенок заготовок нежестких деталей под действием возникающих сил резания;
2. Предложить методику и алгоритм поиска рационального режима резания при учёте условий жесткости обрабатываемого элемента;
3. Определить пути автоматизации расчёта резания на основе геометрических данных обрабатываемого элемента заготовки и режущего инструмента;
4. Определить возможности применения методов снижения теплосиловой напряженности в зоне резания при обработке нежестких заготовок деталей машин за счет введения в зону формообразования энергии УЗ поля;
5. Выполнить теоретико - экспериментальные исследования процесса формирования ТОН и фазового состава ПС заготовок из алюминиевых и титановых сплавов при механической обработке.
6. Разработать технологические рекомендации по применению алгоритма поиска рационального режима резания при учёте условий жесткости обрабатываемого элемента и введения энергии УЗ поля в зону обработки для снижения теплосиловой напряженности;
7. Провести расчет ожидаемой экономической эффективности от внедрения результатов исследований в действующее производство.

Научная новизна работы заключается в том, что на основе теоретико-экспериментальных исследований удалось разработать математические модели упругих деформаций обрабатываемых элементов нежестких деталей в процессе фрезерования и предложить эффективные пути их снижения путём введения в зону формообразования новых поверхностей энергии УЗ-поля.

Основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель расчёта упругих деформаций обрабатываемого элемента в процессе механической обработки под действием сил резания;
- методика поиска рационального режима резания при учёте обеспечения условий жесткости обрабатываемого элемента;
- методика и алгоритм автоматического расчёта режима резания на основе геометрических данных обрабатываемого элемента и режущего инструмента;
- результаты теоретико - экспериментальных исследований процесса формирования ТОН и фазового состава ПС деталей из алюминиевых и титановых сплавов при механической обработке.
- регрессионные математические модели зависимости ТОН и ФС от элементов режима фрезерования с введением в зону обработки тонкостенных заготовок из титановых и алюминиевых сплавов энергии УЗ поля;
- результаты экспериментальных исследований зависимости деформаций обрабатываемых элементов деталей от элементов режима резания при обработке тонкостенных заготовок из алюминиевых сплавов концевыми фрезами.

Методы исследования. Реализация цели и решение поставленных задач в работе обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, теории резания, теории упругости, теории автоматического управления, математического моделирования. Экспериментальные исследования проведены на современном технологическом и вычислительном оборудовании с использованием методов неразрушающего контроля ТОН и ФС в ПС заготовок, программного продукта NX компании Siemens. При обработке экспериментальных данных применялись методы статистической обработки результатов.

Практическая значимость. Представлены методика и алгоритм автоматизированного назначения режима резания при фрезеровании заготовок нежестких деталей машин, обеспечивающие минимальную себестоимость технологической подготовки производства при заданных ограничениях. Система ограничений учитывает конструкцию детали, характеристики инструмента и технологического оборудования.

Разработаны технологические рекомендации по использованию результатов исследования в условиях современного единичного и мелкосерийного машиностроительного производства.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования, аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных, применением статистических методов обработки результатов и сопоставлением полученных результатов с работами других авторов.

Личный вклад автора. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Основная роль в получении и обработке теоретико-экспериментальных данных, анализе и обобщении результатов принадлежит автору работы. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводилась совместно с научным

руководителем и соавторами публикаций. Основопологающие положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

Реализация результатов работы. Основные положения диссертации апробированы и реализованы в РТЦПИМ УлГТУ, ООО «Рубикон» и ООО «Промоснастка» при разработке и оптимизации технологических процессов изготовления тонкостенных корпусов из алюминиевых и титановых сплавов. Расчётный годовой экономический эффект от внедрения результатов исследований в технологические процессы ООО «Рубикон» составил 1 млн 368 400 рублей.

Апробация результатов работы. Материалы диссертационного исследования докладывались и обсуждались в рамках научно-технических конференций (НТК) и семинарах ФГБОУ ВО УлГТУ в 2015-2020 гг. и на многочисленных международных НТК в Севастополе 2015-2019 г.г., Тольятти 2015г., Пенза 2016 г., Волгоград 2017 г., Братск 2016 г., Ростов-на-Дону 2018 г. и др.

Публикации. Результаты исследований представлены в 20 публикациях, в том числе: в 6-ти изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 4-х свидетельствах об официальной регистрации программ для ЭВМ и 4-х публикациях Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы 193 страницы, 84 рисунка, 33 таблиц и 104 наименований литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, методы исследований, положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая значимость и апробация работы.

В первой главе определены основные требования к технологическому процессу обработки заготовок нежестких деталей, оборудованию и режущему инструменту, основные направления развития технологии, показаны результаты научных исследований в области фрезерования заготовок нежестких деталей.

Научными исследованиями в этой области отмечены работы Безъязычного В. Ф., Бердникова Л.Н., Гузеева В.И., Н.И. Носова, Ю.Л. Чигиринского; в области применения энергии УЗ поля в процессе механической обработки известны работы Асташева В.К., Кумабэ Д., Маркова А.И., Нерубая М.С., Подураева В.А., Приходько В.М. и других отечественных и зарубежных исследователей.

В качестве средств снижения величины упругих деформаций нежестких заготовок в процессе механической обработки отмечены: занижение режима фрезерования, применение подходов высокоскоростной обработки (ВСО), введение в зону резания энергии ультразвукового поля. Ввиду высоких требований к металлорежущему оборудованию при ВСО, наиболее перспективным выбрано применение УЗК в зоне резания в качестве основного средства снижения силы резания.

Анализ достижений в области автоматизации процесса проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ показал широкое распространение алгоритмов распознавания типовых элементов (карманы, пазы, отверстия, цапфы, стенки),

позволяющих применять типовые технологии для их механической обработки. Однако выявлено отсутствие алгоритмов оценки жесткости обрабатываемых стенок, не позволяющее рассчитать рациональный режим их фрезерования на стадии проектирования УП. Отсутствует возможность учёта наличия УЗК в зоне резания при расчёте рационального режима фрезерования.

На основании анализа научно-технической и патентной литературы определены цель и задачи исследования, выполненного автором.

Вторая глава посвящена разработке алгоритма автоматического назначения элементов режима резания при фрезеровании заготовок нежестких деталей машин, в ходе которой были разработаны: алгоритм распознавания типа обрабатываемого элемента; методика расчёта величины упругих деформаций стенок в процессе фрезерования; алгоритм проверки условий жесткости обрабатываемого элемента; алгоритм расчета рационального режима резания.

Установлены математические зависимости деформации стенок от элементов режима резания, полученные аналитическим путём. Предложены методики расчёта деформаций нежестких стенок от возникающих сил резания, как отдельно стоящих, так и соединенных с другими конструктивными элементами.

Применение системы инженерного анализа NX CAE позволило оценить адекватность разработанных методик расчёта упругих деформаций.

Определены подходы к снижению теплосилового напряжения за счет введение энергии ультразвукового поля в зону резания, влекущее за собой снижения затрат на трение в зонах контакта режущего инструмента с заготовкой и интенсификацию процесса фрезерования.

Алгоритм автоматизированного назначения режима фрезерования, представленный на рисунке 1, позволяет решить вопрос поиска рациональных элементов режима резания путем расчёта исходя из технических требований, заданных чертежом.

Определение типа обрабатываемого элемента, необходимое в процессе проектирования операции его обработки, предложено определять по алгоритму, представленному на рисунке 2.

Возможность формировать базу данных (БД) состоящую из наборов входных (геометрические параметры обрабатываемого элемента, применяемый РИ, материал заготовки) и выходных (режим резания, метод врезания, параметры качества обработанной поверхности) параметров позволяет использовать опыт пользователей при создании новых технологий изготовления деталей машин, существенно сокращая временные затраты на ТПП, а также вероятность возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором (см. рисунок 3).

Для реализации алгоритма автоматизации определяли, относится ли обрабатываемый элемент к жестким или обладает значительной податливостью, являющейся препятствием для его механической обработки (рисунок 4).

Отдельно стоящую вертикальную стенку можно представить в виде пластины прямоугольного сечения с длиной WL , толщиной S и высотой l (рисунок 5).

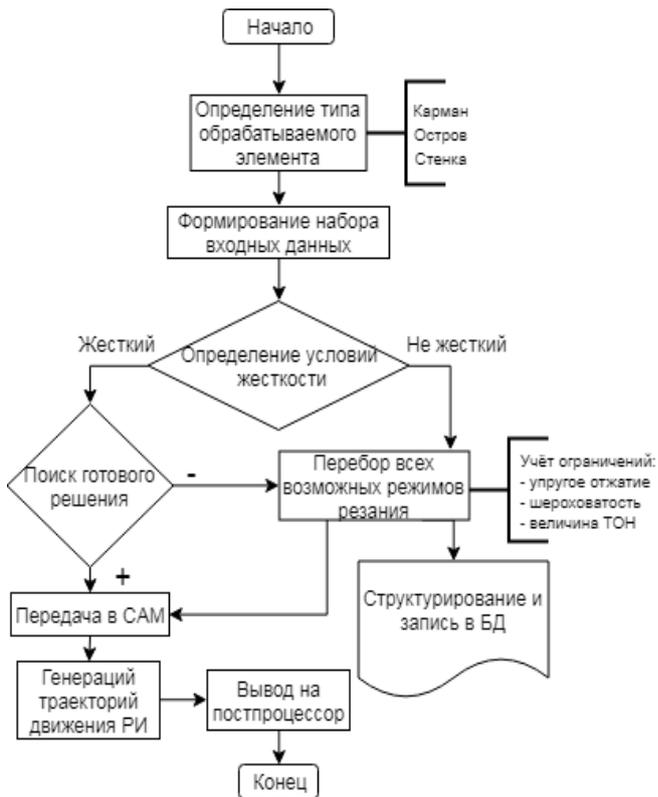


Рисунок 1. Укрупнённый алгоритм поиска рационального режима резания

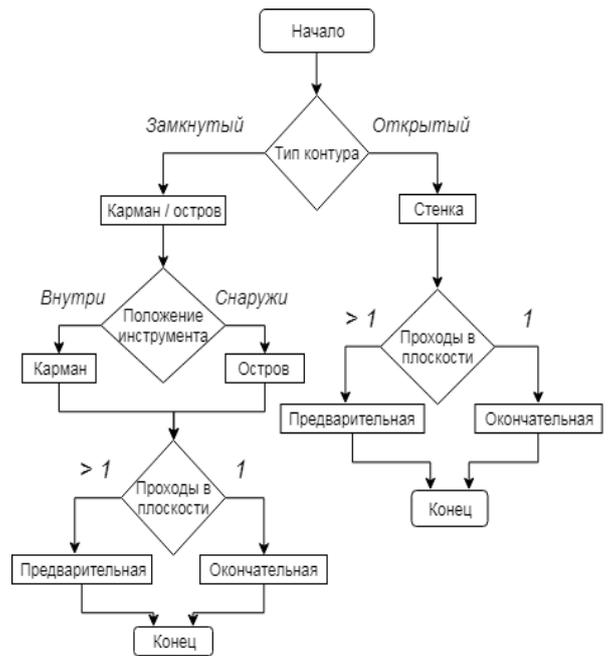


Рисунок 2. Алгоритм распознавания типа обрабатываемого элемента

В процессе механической обработки точка приложения силы P_y перемещается по линии, параллельной оси инструмента, что объясняется геометрией РИ, а именно спиралевидной режущей кромкой. Точка перемещается по линии в диапазоне от 0 до B (ширина срезаемого слоя), где 0 соответствует верхней точке контакта инструмента с заготовкой, а B – нижней точке. В расчётах рассматривается верхняя точка приложения силы, наиболее удалённую от основания стенки, величина возможной упругой деформации которой наибольшая. Расчёт деформации производили по полученной в ходе диссертационного исследования зависимости:

$$w(x, y) = \frac{2P}{D \times WL} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2 \left(\frac{\pi n}{WL}\right)^3} \cos\left(\frac{\pi n}{WL}(y - y_0)\right) \left(\frac{\pi n}{WL}(x - x_0) \cosh\left(\frac{\pi n}{WL}(x - x_0)\right) - \sinh\left(\frac{\pi n}{WL}(x - x_0)\right) + C_{n,1} \cosh\left(\frac{\pi n}{WL}x\right) + C_{n,2} \sinh\left(\frac{\pi n}{WL}x\right) + C_{n,3}x \cosh\left(\frac{\pi n}{WL}x\right) + C_{n,4}x \sinh\left(\frac{\pi n}{WL}x\right)\right) \quad (1)$$

где: P_y – радиальная составляющая силы резания, Н; x, y – координаты точки приложения силы P_y , мм; WL – длина стенки, мм; D – цилиндрическая жесткость стенки H^* мм; n – число точек расчётной сетки; C_n – константы.

Кроме выше рассмотренных существуют детали, в которых нежесткие стенки примыкают к другим конструктивным элементам (рисунки 6, 7).

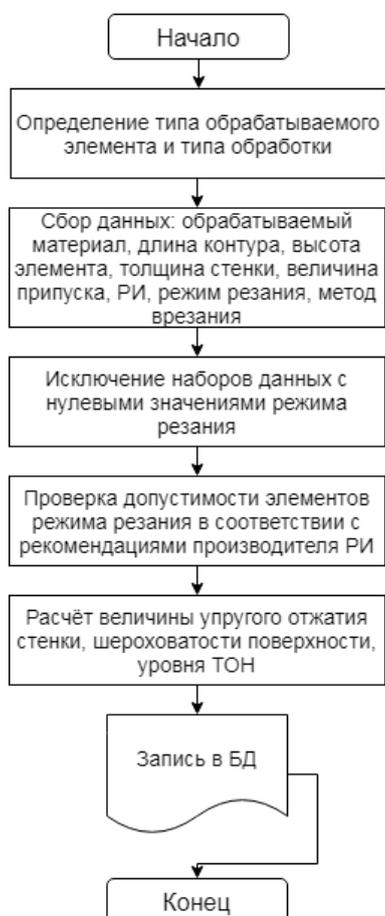


Рисунок 3. Методика аккумуляции опыта групп пользователей



Рисунок 4. Алгоритм выявления нежестких элементов

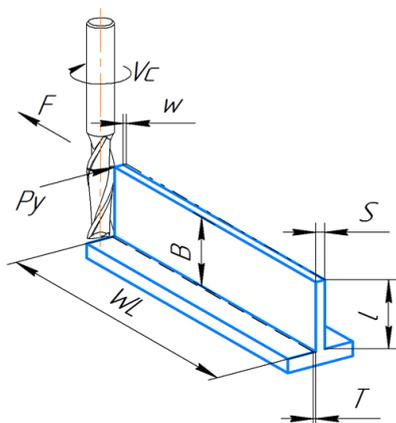


Рисунок 5. Представление стенки в виде пластины, защемленной в основании

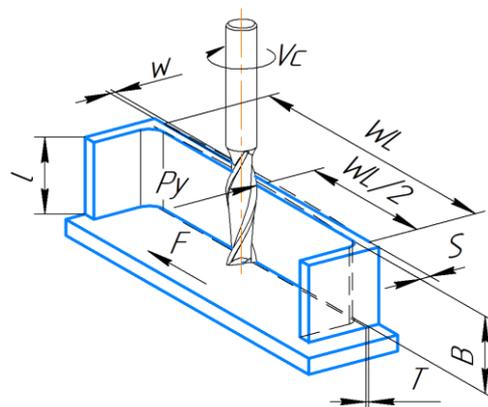


Рисунок 7. Представление стенки в виде пластины, примыкающей к другим нежестким элементам



Рисунок 6. Деталь, состоящая из ряда примыкающих друг к другу нежестких элементов

В этом случае стенку представляли в виде пластины, закреплённой с трёх сторон. Расчёт максимальной упругой деформации стенки в представленном случае осуществляли по следующей зависимости:

$$w = k_w \frac{P_y \cdot (l/4)^2}{D} \quad (2)$$

где: k_w – коэффициент, для середины стенки равный 0,8556; P_y – радиальная составляющая силы резания; H ; l – высота стенки, мм; D – цилиндрическая жесткость стенки, кг*см.

Для проверки работоспособности вышеперечисленных методов выполнены соответствующие расчёты. Используя значение P_y , полученное в результате расчёта по справочным зависимостям или в результате замера с помощью универсального динамометра УДМ-100, рассчитали величину максимальной упругой деформации для стенки, представленной в виде отдельно стоящей пластины в пакете инженерного анализа NX CAE и по аналитическим зависимостям.

Сравнение результатов первого и второго методов расчёта, а именно CAE расчёта и аналитического расчёта прямоугольной балки, показало, что они взаимозаменяемы. При этом разница в расчётах не превышает 7%. Однако, в следствии того, что CAE расчёт является более трудоёмким длительным по времени, в качестве основного способа принят аналитический расчёт отклонения стенки в виде прямоугольной балки. В то же время CAE расчёт применим для проверки результатов аналитических расчётов.

Для расчёта максимальной упругой деформации стенки, представленной в виде пластины создана модель стенки, с прилегающими к ней с трёх сторон конструктивными элементами.

После расчёта в Siemens NX CAE получили массив информации в виде поля рассеяния результатов вычисления. Разница между аналитическим и CAE расчётами составила 4%. В дальнейшем, за основной был принят аналитический метод. CAE анализ использован для проверочных расчётов.

Для определения рационального режима резания необходимо определить ряд ограничений: максимальную частоту вращения шпинделя, максимально допустимую упругую деформацию обрабатываемого элемента, максимальную производительность.

Максимальная частота вращения шпинделя накладывает ограничения на допустимую скорость резания. Предлагаемые производителем РИ значения (в основном, для заготовок из алюминиевых сплавов) зачастую недостижимы из-за технических возможностей основной части используемого на производстве оборудования.

Ограничивающим условием является и максимально допустимая упругая деформация стенки w_{max} :

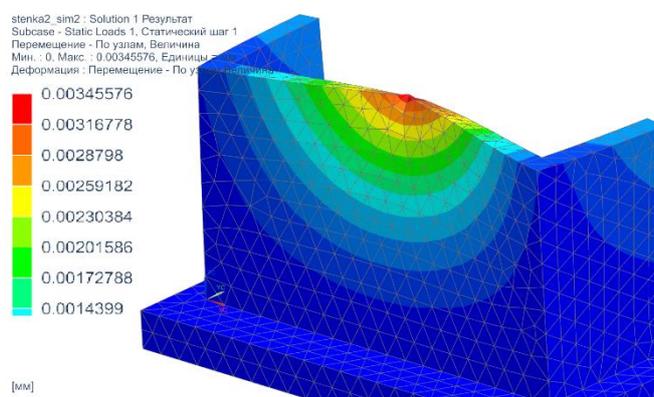


Рисунок 8. Модель стенки с примыкающими конструктивными элементами.

$$w_{max} = \frac{dop}{2} * 0,8, \text{ мм} \quad (3)$$

где: dop – величина допуска линейного размера обрабатываемого элемента, мм; 0,8 – коэффициент, обеспечивающий запас 20%.

Фактором, определяющим применением того или иного набора элементов режима резания, является производительность (величина съёма материала в минуту):

$$Q = \frac{T \times B \times S_z \times n \times N_z}{1000}, \frac{\text{мм}^3}{\text{мин}} \quad (4)$$

где: N_z – число зубьев фрезы; T – глубина фрезерования, мм; B – ширина срезаемого слоя, мм; S_z – подача на зуб, мм/зуб; n – частота вращения РИ, об/мин;

Автоматизация поиска рационального режима резания осуществляется за несколько этапов. На первом этапе формировали таблицу исходных данных, включающую информацию о всех размерах режущего инструмента, максимально допустимые производителем элементы режима резания, геометрические характеристики и материал обрабатываемого элемента. На втором этапе осуществляли расчёт возможных сочетаний элементов резания, и формировали таблицу выходных данных. На третьем этапе – осуществляли поиск рационального режима резания в зависимости от набора ограничивающих условий.

Поиск рационального режима резания осуществляли методом перебора, рассчитывали значения упругой деформации (в качестве лимитирующего может быть задан любой параметр качества) и величину съёма материала в минуту.

Варьируемые параметры: ширина срезаемого слоя B , глубина фрезерования T , подача на зуб S_z . Диапазон варьирования определяется каталогами производителей РИ, в которых представлены максимальные и минимальные значения изменяемых параметров. Шаг варьирования для каждого параметра остаётся неизменным: для ширины срезаемого слоя B – 0,05 мм, для глубины фрезерования T – 0,01 мм, для подачи на зуб S_z – 0,002 мм/зуб. Величина шага определена опытным путём.

Количество наборов параметров режима резания определяли следующим образом:

$$N_n = \frac{B_{max} - B_{min}}{0,05} * \frac{T_{max} - T_{min}}{0,01} * \frac{S_{zmax} - S_{zmin}}{0,002} \quad (5)$$

Алгоритм работы перебора параметров режима резания представлен на рисунке 9.

Среди оставшихся наборов параметров режима резания осуществляли поиск наиболее производительного, величина Q которого максимальна. Полученный набор передавали в САМ систему. Перспективным решением проблем уменьшения теплосилового напряжения процесса обработки, от которой зависит величина P_y и оказывающая наибольшее влияние на упругую деформацию обрабатываемого элемента, является применение комбинированных технологий, реализуемых путем управляемого дополнительного воздействия на инструмент и/или технологическую среду концентрированных потоков дополнительной энергии, в том механических колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты.

Проверку эффективности введения энергии УЗ поля в зону формообразования нежестких тонкостенных заготовок на силы резания и структурно-фазовые превращения, являющиеся основной причиной возникновения технологических остаточных напряжений в современных конструкционных материалах для изготовления деталей, осуществляли при фрезеровании модельных заготовок из высокопрочных титановых сплавов ВТ6 и ВТ22 и алюминиевых сплавов Д16Т и АМг 6.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований. Обоснован выбор образцов, дано описание используемого оборудования. Анализируя номенклатуру изделий из алюминиевых и титановых сплавов, выпускаемых предприятиями аэрокосмической отрасли и приборостроения нашей страны выявлен ряд элементов деталей, процесс обработки которых вызывает затруднения.

Таковыми деталями являются тонкостенные корпуса приборных панелей, корпуса приборов, крышки, выполняющие роль радиатора. Обобщив все нежесткие элементы в анализируемой выборке можно разделить их на две группы: стенки с соотношением толщины к высоте 1:10 и 1:20. Длина таких элементов варьируется от 10 до 300 мм, но большая их часть имеет длину около 50 - 100 мм.

Для экспериментальных исследований влияния УЗК на параметры качества обработанных поверхностей использовалась установка, представленная на рисунке 10. В качестве РИ выбрана твердосплавная монолитная фреза ХАЛТЕК МА2NNN 100 072 000 диаметром 10 мм для работы с цветными сплавами. В процессе исследований определили диапазон варьирования каждого параметра: ширина срезаемого слоя $0,1 < B < 15$ мм, глубина фрезерования $0,05 < T < 5$ мм, подача на зуб $0,01 < S_z < 0,12$ мм/зуб.

Скорость резания принимали постоянной исходя из возможностей используемого оборудования $V = 630$ м/мин. При экспериментах определяли параметры, являющиеся входными для использования в разработанной программе: высота стенки l , цилиндрическая жесткость стенки D , частота вращения шпинделя n .

Основные экспериментальные исследования выполняли на фрезерном обрабатывающем центре DMU 50 ecoline. Обработывали предварительно подготовленные образцы из алюминиевого сплава Д16Т, установленные в тиски.

Обработка осуществлялась со съёмом за один или несколько этапов припуска с одной стороны (другая принималась окончательно обработанной) с применением 10%-ной полусинтетической водной СОЖ Cimstar 620.

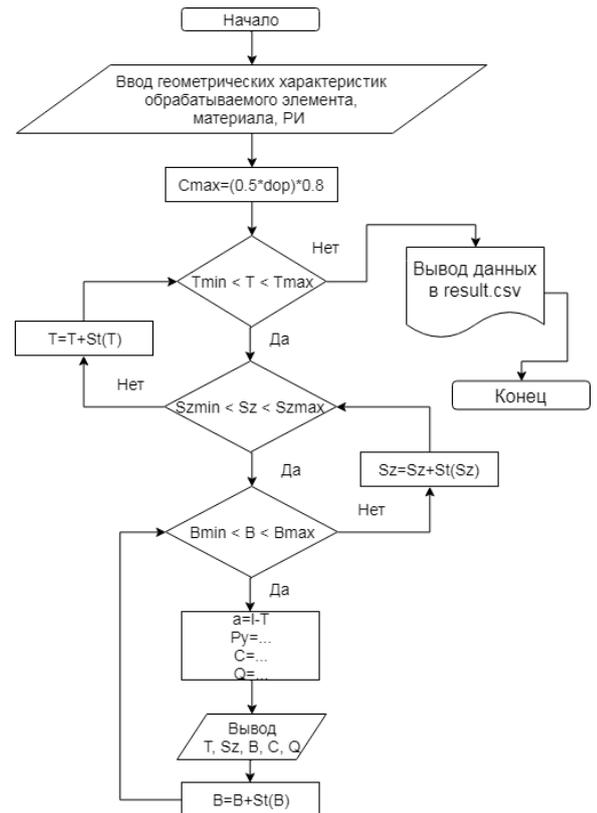


Рисунок 9. Алгоритм перебора

После обработки стенки (50x20x2(1), допуск на толщину обработанной стенки **0,05** мм) со съемом чистового припуска с одной стороны осуществляли измерение положения обработанной поверхности используя контактный датчик с оптической передачей сигнала Renishaw OMP40. Оценивали также уровень ТОН в ПС – измерительным комплексом «Ситон-АРМ»; фазовый состав ПС - рентгеновским методом с помощью прибора «РИКОР-7».

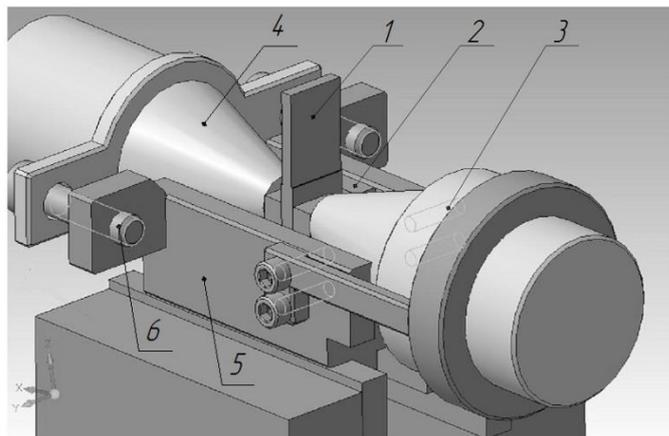


Рисунок 10. Схема ультразвуковой установки: 1 - заготовка; 2-упор; 3-отражатель; 4- УЗ-излучатель; 6-винты; 5-кронштейн;

В четвертой главе представлены результаты многофакторных экспериментов.

Для получения регрессионных зависимостей составляющих силы резания P_z , P_x , P_y и величины технологических остаточных напряжений σ от элементов режима обработки применялся метод многофакторного планирования эксперимента с последующим регрессионным анализом. Найдено сочетание форм модулированных сигналов, подаваемых на УЗ излучатели, обеспечивающее снижение сил резания на 15%, а также уменьшение на 26% величины ТОН в ПС обработанных поверхностей заготовок из алюминиевых сплавов: сигнал первого канала – синусоидальная форма, сигнал второго – квадратная форма, со смещением фазы на 90° . График распределения ТОН по глубине ПС представлен на рисунке 11.

Сопоставление результатов расчета сил резания с результатами экспериментов, проведенных для соответствующих точек многофакторного пространства, показало, что при уровне доверительной вероятности 0,95, наибольшая погрешность не превышает 16 %. Удовлетворительное согласование подтверждает адекватность полученных регрессионных моделей и свидетельствует о их достоверности. Применение полученных зависимостей на стадии ТПП позволяет подобрать рациональное сочетание элементов режима резания не только по величине максимальной упругой деформации обрабатываемого элемента, но и по величине ТОН в ПС обработанных поверхностей, в том числе при наличии ультразвуковых колебаний в зоне резания.

До настоящего времени ни одна САМ-система не учитывала в процессе проектирования управляющих программ наличие УЗК в зоне обработки.

В процессе экспериментов был определен диапазон соотношений толщины к высоте стенок, в котором предложенный метод расчёта величины упругой деформации работоспособен. Фрезеровали стенки различной толщины при одинаковом режиме резания.

После обработки определялось реальное положение обработанной поверхности относительно прогнозируемого (рисунок 12, таблица 1).

Реальное отклонение положения обработанной поверхности попадает в пределы, рассчитанные при помощи ранее предложенной зависимости.

На третьем этапе осуществлялась проверка предложенных разработанной программой рациональных режимов резания при обработке заготовок из алюминиевого сплава Д16Т со стенками с соотношением толщины к высоте 1:20.

Обработанная стенка: толщина 1 мм, высота 20 мм, длина 50 мм.

Как и в первой серии программа обозначила невозможность обработки за один проход фрезой $\varnothing 10$, рекомендовано использовать РИ меньшего диаметра. Выбрали фрезу Халтек МА2NNN 060 070 000 $\varnothing 6$ мм. Ширина срезаемого слоя 20 мм; глубина фрезерования 0,1 мм; скорость резания 226 м/мин; подача 0,009 мм/зуб.

Ожидаемое значение упругой деформации – 0,031 мм. Величина смещения траектории движения РИ в сторону обрабатываемой поверхности – 0,031 мм.

Экспериментально определенная величина упругой деформации – 0,029 (рисунок 13) расходится с расчётным на 8% в меньшую сторону. Соответственно обеспечивается попадание требуемого отклонения в поле допуска, заданного чертежом.

Следующим этапом исследований была проверка возможности интенсификации процесса фрезерования при наложении УЗК на заготовку.

Обработанная стенка: толщина 1 мм, высота 20 мм, длина 50 мм.

Программой предложено обработать стенку фрезой $\varnothing 6$ мм вместо $\varnothing 10$ мм.

Глубина фрезерования 0,1 мм; фрезерования 20 мм; скорость резания 226 м/мин; подача на зуб 0,01 мм/зуб; рассчитанное значение упругой деформации 0,03 мм; величина смещения траектории движения РИ в сторону обрабатываемой поверхности 0,03 мм;

В ходе эксперимента установлено, что измеренная величина упругой деформации (рисунок 14) 0,027 мм отличается от прогнозируемой на 10% в

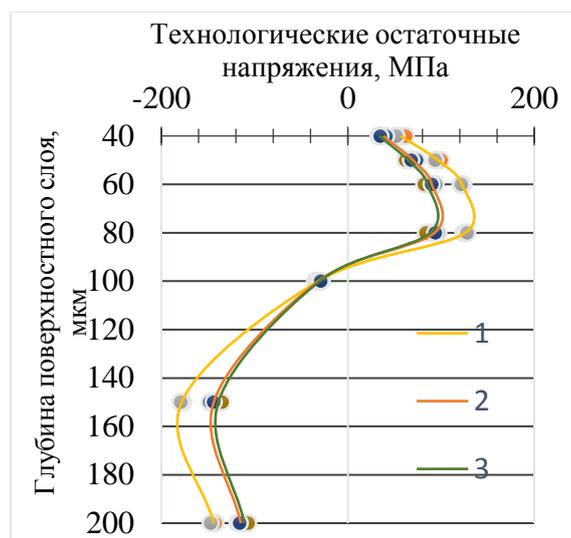


Рисунок 11. Изменение ТОН с введением в зону обработки заготовки из алюминиевого сплава Д16 УЗ колебаний, генерируемых сигналом синусоидальной формы. 1 - без УЗ сигнала; 2 - с УЗ сигналом без смещения фазы колебаний второго канала; 3- со смещением фазы на 90°;

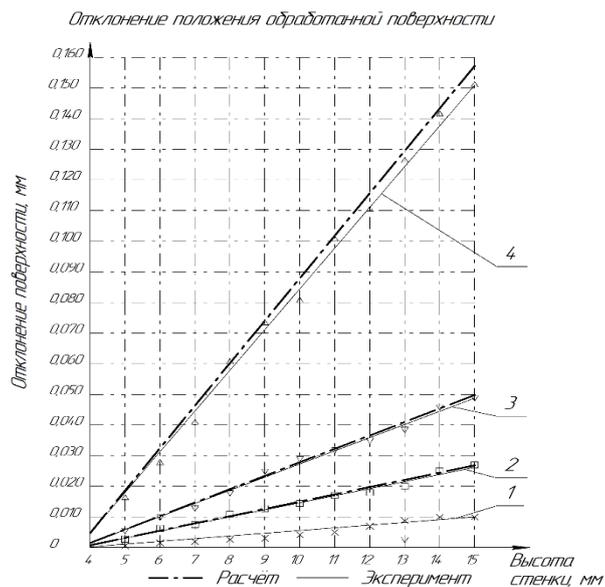


Рисунок 12. Отклонение положения обработанной поверхности в зависимости от соотношения толщины к высоте обрабатываемой стенки: 1 – 1:5; 2 – 1:10; 3 – 1:15; 4 – 1:30.

меньшую сторону, что обеспечивает попадание линейного размера толщины стенки в границы поля допуска. При этом величина минутной подачи составила 240 мм/мин против 216 мм/мин при фрезеровании без УЗК. Это в свою очередь сократило время обработки образца на 10% с 13,9 до 12,5 секунд.

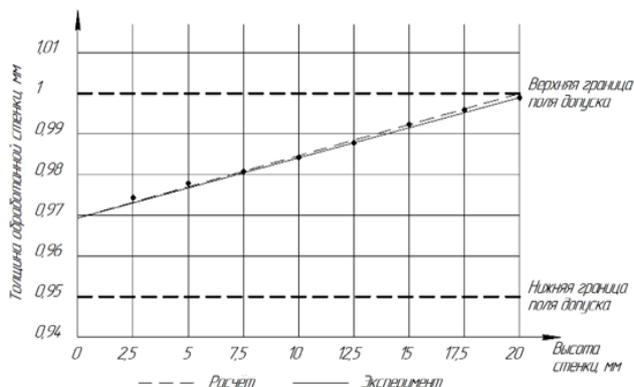


Рисунок 13. Изменение толщины стенки в зависимости от её высоты

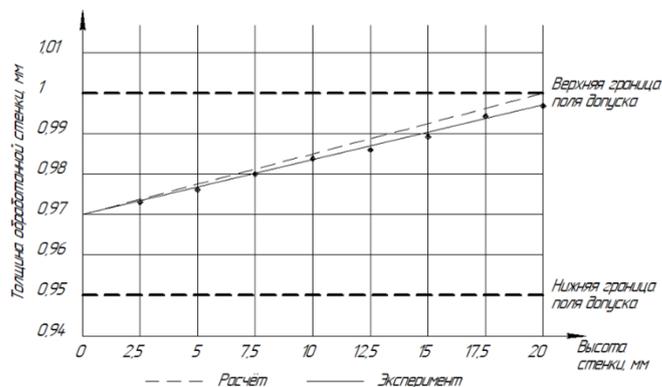


Рисунок 14. Изменение толщины стенки в зависимости от её высоты при фрезеровании с УЗК

Таблица 1. Расчётная и экспериментальная упругая деформация стенки в процессе обработки

Соотношение толщины к высоте стенки	1:5	1: 10	1:15	1:30
Экспериментальная деформация, мм	0,008	0,026	0,047	0,151
Расчётная деформация, мм	0,008	0,027	0,050	0,156

Полученные во второй главе зависимости для расчета величины упругой деформации обрабатываемых стенок в процессе их окончательной обработки были использованы при расчете данного параметра на примере обработки заготовок из алюминиевого сплава Д16Т. Наиболее близкое значение расчетного критерия Фишера к табличному (расчетное значение равно 4,38, табличное – 4,46) получили при расчете величины упругой деформации по предлагаемой во второй главе методике.

Расхождение результатов расчета величины упругой деформации и экспериментального определения в лабораторных условиях не превышает 10 %, что свидетельствует об адекватности разработанных математических зависимостей реальным условиям обработки, а также о возможности использования этих зависимостей для прогнозирования величины упругих деформаций обрабатываемых стенок в процессе окончательной обработки.

В пятой главе произведен расчёт экономической эффективности применения разработанной методики автоматизированного назначения режима резания в многономенклатурном единичном и мелкосерийном производстве, разработаны рекомендации по её применению.

Расчёт экономической эффективности осуществлён на основе изготовления деталей мелкосерийного производства по номенклатуре ООО «Рубикон» (на примере детали «уголок НКГД.746165.031»). Удалось сократить расходы на производство на 12% за счёт сокращения времени простоя станка во время корректировки

исходной программы, необходимой для обеспечения размерной точности. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения полученных результатов составил 1 368 400 рублей.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан алгоритм автоматизированного расчёта рационального сочетания элементов режима резания при обработке заготовок нежестких деталей.

2. Представленная в работе математическая модель расчёта величины упругих деформаций обрабатываемого элемента под действием силы резания, как отдельно стоящего, так и соединенного с другими конструктивными элементами, позволила определить вероятность выхода размеров изготавливаемых нежестких деталей за пределы поля допуска.

3. Предложенная методика автоматизированного назначения элементов режима резания позволила выбрать рациональный режим для фрезерования стенок с соотношением толщины к высоте от 1:5 до 1:20 в ходе ТПП исходя из условий их жесткости, минимизировав время простоя металлорежущего оборудования во время корректировки управляющих программ после предварительной обработки.

4. Разработаны технологические рекомендации по фрезерованию нежестких элементов корпусных деталей машин из алюминиевых и титановых сплавов в условиях единичного и мелкосерийного машиностроительного производства.

5. Выполненные исследования эффективности использования ультразвуковых колебаний при изготовлении нежестких деталей позволили выявить возможности интенсификации процесса фрезерования и прогнозирования параметров качества поверхностного слоя на стадии ТПП.

6. Осуществлена оценка эффективности применения энергии модулированного УЗ поля в зону резания для снижения теплосиловой напряженности при обработке заготовок нежестких деталей машин. Установлено, что максимально эффективным является использование сигнала квадратной формы со смещением фазы второго источника на 90 градусов;

7. Проведены теоретико - экспериментальные исследования процесса формирования ТОН и фазового состава ПС заготовок из алюминиевых и титановых сплавов, получены регрессионные зависимости расчёта величины технологических остаточных напряжений, позволяющие на стадии ТПП осуществлять прогнозирование состояния поверхностного слоя. Максимально достигнутое снижение уровня ТОН в ПС обработанного образца – 26%.

8. Разработаны технологические рекомендации по применению алгоритма поиска рационального режима резания при учёте условий жесткости обрабатываемого элемента и введении энергии УЗ поля в зону обработки для снижения теплосиловой напряженности;

9. Выполнен расчет ожидаемой экономической эффективности от внедрения результатов теоретико - экспериментальных исследований в действующее производство. При внедрении разработанных решений в технологический процесс ООО «Рубикон» расчётный годовой экономический эффект составил 1 368 400 рублей

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Киселев Е.С. Повышение качества твердосплавных инструментов и деталей путем создания заданного уровня остаточных напряжений в поверхностном слое / Е.С. Киселёв, М.В. Назаров // Вектор науки Тольяттинского государственного университета, 2015, № 2, с.81 - 85
2. Храмов А.В. Особенности импортозамещения металлорежущего инструмента в современных условиях/ А.В.Храмов, Е.Н. Лексин, И.В. Семдянкин, М.В.Назаров, Е.С.Киселев// СТИН, 2016, №1, с.21-26
3. Киселёв Е.С. Особенности обеспечения качества нежестких алюминиевых заготовок при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний / Е.С. Киселёв, Ш.А. Имандинов, М.В. Назаров // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 12 (207). С. 14-17.
4. Назаров М.В. Автоматизированный выбор технологии изготовления деталей летательных аппаратов/ М.В. Назаров, А.В. Попович, Е.С. Киселёв // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 8-1. С. 147-153.
5. Киселёв Е.С. К вопросам о технологической подготовке и обработке заготовок нежестких деталей машин / Е.С. Киселёв, М.В. Назаров, Н.В. Мезин // Вектор науки ТГУ. 2019. №1 (47). С. 21-29.
6. Назаров М.В. Фрезерование тонкостенных заготовок из алюминиевых сплавов при учете условий жесткости и автоматизации назначения элементов режима обработки на станках с ЧПУ/Назаров М.В., Киселёв Е.С.// Горное оборудование и электромеханика. - 2019. - №6. - С. 42-46.
7. Киселёв Е.С. Научноёмкая технология повышения эффективности изготовления нежестких деталей из титановых и алюминиевых сплавов / Киселёв Е.С., Назаров М.В. // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2020. №7. – С. 12-19.

Свидетельства интеллектуальной собственности

8. Свид. 2019610381 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Агрегатор параметров операции механической обработки "глубинное фрезерование" в среде Siemens NX / М.В. Назаров, Е.С. Киселёв, А.В. Попович; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО УлГТУ (RU). – №2018664994; заявл. 24.12.18; опубл. 10.01.19, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
9. Свид. 2019610383 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Фильтр неактуальных параметров операций механической обработки в сам модуле Siemens NX / М.В. Назаров, Е.С. Киселёв, А.В. Попович; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО УлГТУ (RU). – №2018664997; заявл. 24.12.18; опубл. 10.01.19, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
10. Свид. 2019610384 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Классификатор параметров операции механической обработки в сам модуле Siemens NX / М.В. Назаров, Е.С. Киселёв, А.В. Попович;

заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО УлГТУ (RU). – №2018664998; заявл. 24.12.18; опубл. 10.01.19, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

11. Свид. 2020613565 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчёт режима резания при учёте условий жесткости и других ограничивающих условий/ К.С. Савельев, М.В. Назаров, Е.С. Киселёв; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО УлГТУ (RU). – №2020612600; заявл. 11.03.2020; опубл. 18.03.20, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Публикации в изданиях, входящих в Scopus, Web of Science.

12. Khramov A. Improving the performance of metal-cutting tools / A. Khramov, E. Leksin, I. Semdyankin, E. Kiselyov, M. Nazarov//Russian Engineering Research. 2016. Т. 36. № 8. pp. 684-689.

13. Nazarov M. Using of machine parts abstract elements in nc-programs developing for the cnc machines / Nazarov M., Kiselev E., Popovich A. // MATEC Web Conf. 2018. №224. pp. 401-404.

14. Nazarov M. Milling of thin walled components from aluminum alloys by considering the conditions of rigidity and automation assignment elements of a cutting mode on CNC machines / Nazarov M., Kiselev E.// MATEC Web of Conferences 297, 01010 (2019)

15. Nazarov M.V. Automatically search of a rational cutting mode for milling non-rigid blanks with the specified quality parameters / Nazarov M., Kiselev E.S., Savelev K.S.// IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 709 044069 (2020)

Назаров Михаил Вадимович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА НЕЖЕСТКИХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПУТЁМ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭТАПОВ ТПП И ВВЕДЕНИЯ В ЗОНУ РЕЗАНИЯ ЭНЕРГИИ УЗ-ПОЛЯ

Автореферат

Подписано в печать2021. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 Экз. Заказ .

Типография УлГТУ. 432027, Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.