

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российская академия наук
Российская академия архитектуры и строительных наук
Администрация Белгородской области
ФГБОУ ВО Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова
Международное общественное движение инноваторов
«Технопарк БГТУ им. В.Г. Шухова»

Национальная конференция с международным участием
**Международная научно-техническая
конференция молодых ученых
БГТУ им. В.Г. Шухова,
посвященная 300-летию Российской академии наук**



Сборник докладов

Часть 7

***Высокоэффективные технологические процессы
машиностроительных производств, технологическая
робототехника***

Белгород
18- 20 мая 2022 г.

УДК 005.745

ББК 72.5

М 43

М 43

Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук: эл. сборник докладов [Электронный ресурс]: Белгород: БГТУ, 2022. – Ч. 7. – 92 с.

ISBN 978-5-361-01020-2

В сборнике опубликованы доклады студентов, аспирантов и молодых ученых, представленные по результатам проведения Национальной конференции с международным участием «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова», посвященная 300-летию Российской академии наук.

Материалы статей могут быть использованы студентами, магистрантами, аспирантами и молодыми учеными, занимающимися вопросами высокоэффективных технологических процессов машиностроительных производств, технологической робототехникой, а также в учебном процессе университета.

УДК 005.745

ББК 72.5

ISBN 978-5-361-01020-2

©Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2022

Оглавление

Борисова Е.А., Ларских Е.Л. ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ	5
Брижанев А.А., Мамченкова А.А. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ШПИНДЕЛЯ КАК БАЗОВОГО ЭЛЕМЕНТА.....	7
Волошкин А.А., Попов П.Д., Шмаков Д.А. ОБЗОР ПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ СКРУЧИВАНИЯ НИТЕЙ.....	10
Волошкин А.А., Салихов Д.Д., Ласунова С.В. РАЗБОР СПОСОБОВ РЕВЕРСИВНОГО ИНЖИНИРИНГА.....	17
Волошкин А.А., Скитова В.М., Ноздрачева А.В. СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ	22
Гаврилов Д.В., Мамченкова А.А. АНАЛИЗ ВЕЛИЧИН И НАПРАВЛЕНИЙ ВОЗМОЖНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПРИ БЕСЦЕНТРОВОЙ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ.....	31
Гаврилов Д.В., Мамченкова А.А., Чуев К.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ БЕСЦЕНТРОВОЙ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ.....	34
Гончаров П.С., Медведев А.И. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ В ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ ОПЕРАЦИЯХ.....	38
Иванов Б.Г., Морозов Д.В., Поляков С.А. ПРИБЛИЖЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕТАЛЛООБРАБОТКИ НА СУДОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ.....	43
Одобеско И.А., Прокопов М.В.	

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРУДЕРОМ ДЛЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОЙ ПЕЧАТИ	47
Погудина А.С., Матюнина А.С., Тиханов А.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ИМПУЛЬСА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СИЛЫ ТОКА НА ЗНАЧЕНИЯ ТВЕРДОСТИ СТАЛИ У10А	50
Поляков В.А., Чуев К.В.	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ.....	53
Саранчук И.А., Сафонов М.С., Рязанцев В.Г.	
СВЕРХТОНКИЙ ПОМОЛ МАТЕРИАЛОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ С ПОМОЩЬЮ РЕАКТОРА РОТОРНО-ВИХРЕВОГО ТИПА	59
Слезкин Д.В., Кучиев Р.Н., Кириченко А.В.	
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «ПЛИТА НИЖНЯЯ»	66
Ткачев И.С, Волков В.В, Баранов Д.С.	
МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	72
Токмачёва И.С.	
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА	76
Ушаков К.А.	
МЕТАЛЛЫ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ	78
Чуев К. В., Гаврилов Д.В., Мамченкова А.А., Чередников И. И.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВРАЩЕНИЯ БАНДАЖА ЦЕМЕНТНОЙ ПЕЧИ В MSC ADAMS	81
Чуев К. В., Гаврилов Д.В., Мамченкова А.А., Чуева Ю. А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ РАСПОЛОЖЕНИЯ БАЗОВЫХ ОПОРНЫХ ТОЧЕК ШАРНИРОВ ДЛЯ ВЕРХНЕЙ ПОДВИЖНОЙ ПЛАТФОРМЫ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ПОДВИЖНОСТИ	86

Борисова Е.А., Ларских Е.Л.

*Научный руководитель: Павлова О.С., канд. искусств., доц.
Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия*

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Механической обработке подвергается большинство деталей машин. С ее помощью изготавливаются детали высокой точности, сложной формы и с повышенными требованиями по надежности в эксплуатации. Около 85% всех деталей получают окончательные размеры и форму при обработке резанием.

Большой полюс обработки резанием в существенном разнообразии инструментов, с помощью которых можно совершать самые различные операции, достигая необходимых результатов. Широкое распространение получили точение, сверление и фрезерование. Чтобы и дальше повышать эффективность методов, а также улучшать технические показатели необходимо "решать" задачи стоящие перед теорией резания.

Одной из таких задач является обеспечение надежности и стабильности процесса резания.

Так как сейчас все больше влияние имеет автоматизация и роботизация необходимо обеспечить стабильный рабочий процесс, наибольшую надёжность, при этом обеспечив экономичность процесса. Ведь многое зависит от качества инструментов, их точности и прочности.

Для лучшей работы необходимо выявлять закономерности влияний условий резания на напряжение и разрушение рабочей части инструмента. Для повышения надёжности режущего инструмента, возможно использовать метод прогнозирования износостойкости путем измерения температуропроводности твердого сплава. При сравнении в практике предложенный метод показывает наилучшие результаты, что позволяет наиболее точно предугадать возможные поломки.

Так же активно развивается разработка надежных систем информации о состоянии режущих свойств инструментов без остановки процесса обработки.

Это помогает выявить неисправности в самом начале их появления, а значит, вовремя сменить неисправную деталь, увеличив срок службы всей машины. Ещё диагностические системы помогают

определить в целом техническое состояние сборочных единиц, а также предотвратить отказы.

Такие предосторожности дают возможность наиболее полно использовать ресурс машины, при этом снижая затраты на техническое обеспечение и ремонт.

В условиях работы автоматических линий большое значение приобретает управление процессом стружкообразования. При этом есть некоторые моменты, на которые стоит обратить внимание, такие как улучшить условия удаления стружки из зоны обработки, транспортировка от станка стружки, а также уменьшить отрицательное влияние стружки на шероховатость поверхности. Важно уделить внимание безопасности рабочим.

Эти задачи, представленные стружкой, будоражили умы как российских, так и зарубежных ученых. Конечная цель таких мысленных работ заключается в сведении отрицательных свойств, стружки до минимума. Одной из самых опасных считается сливная стружка.

Важной задачей является создание новых инструментов, обладающих повышенной размерной стойкостью. Для этого необходимо работать не только над самими материалами, улучшая их свойства и создавая новые, но и над износостойкими покрытиями рабочих поверхностей.

Свойства инструмента начинают развиваться в процессе литья, формовки и механической обработки. По мере выполнения этих операций отображаются прочностные характеристики и другие показатели долговечности. Применяя новые методы изготовления заготовок и новые материалы, такие как металлокерамика, пластмассы и композиты, можно кардинально изменить характеристики инструментов.

Так же решается задача по разработке смазочно-охлаждающих технологических сред с повышенной эффективностью их действия. Эта проблема особенно актуальна при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов [1].

Всего различают 4 типа смазочно-охлаждающих технологических сред:

- газообразные;
- жидкие;
- пластичные;
- твердые.

Смазывающее действие СОЖ заключается не только в том, что такие элементы, как углерод, кислород, сера, фосфор и другие элементы, содержащиеся в составе, реагируют с поверхностью металла

с образованием граничной смазки в условиях высокого давления, напряжения и высокой температуры. Он диффундирует не только в тонкую пленку, но и в тончайший поверхностный слой на поверхности трущихся металлов, образуя эвтектический сплав с низким коэффициентом трения. В результате активизируются процессы трения металла и пластической деформации.

Это лишь малая часть плюсов использования СОЖ, однако и отрицательные стороны есть, например, вредные вещества как для обслуживающего персонала, так и для окружающей среды или достаточно небольшой срок службы СОЖ (от двух недель до месяца, при этом, что каждый раз потребляя от нескольких десятков до десятков тысяч тонн в год). И над этими проблемами тоже работают современные ученые [2].

Как уже было сказано в начале работы, обработка детали резанием обладает самыми высокими технико-экономическими показателями, поэтому она так популярна. Именно поэтому нельзя останавливаться в изучении и дальнейшей разработке задач, связанных с этим методом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кирсанов С.В. Пути повышения точности обработки отверстий мерными инструментами. – М.: ВНИИТЭМР. 1992. – 48 с.
2. Полетика М.Ф., Подворчан А.И. Научно-технические технологии в машиностроении и приборостроении. – Рыбинск: РАТИ, 1994. – С.57-58.

УДК 62.77

Брижанев А.А., Мамченкова А.А.

*Научный руководитель Булгаков С.Б., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ШПИНДЕЛЯ КАК БАЗОВОГО ЭЛЕМЕНТА

В действующих реалиях российской экономики и промышленных технологий стоит обратить внимание на проблемы, с которыми сейчас столкнулась сфера производства. С одной стороны, ограничительные меры дали возможность России снизить зависимость от импортной продукции и найти новые источники доходов от экспорта, другой стороной медали, оказался тот факт, что импортозамещение по-

прежнему сильно зависит от зарубежных технологий, оборудования и комплектующих.

В данной статье обратим внимание на «шпиндель», как на один из базовых элементов устройств, используемых в производстве.

Деталь «шпиндель» является частью узла резцового 15.001. Служит элементом вращения резцового узла. Деталь имеет форму вала. Габаритные размеры детали $\varnothing 25 \times 52 \text{ мм}$.

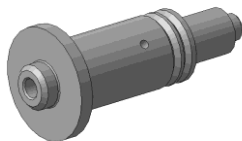


Рис. 1. Шпиндель [3].

Деталь «Шпиндель» – ответственная нагруженная деталь, являющаяся «стержнем» в сборочном узле, она воспринимает и передает движение смежным деталям, что требует от шпинделя высокой прочности и твердости. [2] Деталь в работе испытывает однонаправленные циклические нагрузки, поэтому наиболее вероятными видами разрушения могут стать истирание внутренних поверхностей глухого отверстия. Сам термин в основном применяется в таких направлениях как станкостроение, металлообработка и деревообработка.

Исходя из вышеизложенного стоит подвергнуть глубокому анализу, существующий технологический процесс, с целью выяснения недостатков, выявления мероприятий, которые позволят повысить эффективность технологического процесса.

Шпиндель РИ15.001 разработан для условий крупносерийного производства и требует выполнения анализа его технологического процесса для улучшения его технических и экономических характеристик.

Зачастую, анализ технологического процесса проходит по основным пунктам:

– соответствие метода получения заготовки данному масштабу производства, её соответствие чертежу по размерам, припусков на обработку и технических условий.

Существующий технологический процесс предусматривает получение заготовки из прутка, что не отвечает выбранному типу производства (крупносерийное). Коэффициент использования

материала равен 0.2, что говорит о большом припуске на обработку. В связи с этим, при выборе заготовки необходимо предусмотреть другой метод получения заготовки с целью приближения формы заготовки к форме детали. Для сравнения произведем расчет коэффициента использования материала и себестоимость штампованной заготовки полученную на ГКМ.

– анализ базирования. Правильность выбора баз на всех операциях и соблюдение принципа единства баз.

На токарной операции ведётся коррекция центровых отверстий после черновой обработки наружных поверхностей. Измерительной базой является торцевая поверхность, которая ошибочно указана в существующем тех. процессе. Технологической базой является посадочные шейки шпинделя, которые в свою очередь совпадают с конструкторскими базами, соблюдение принципа единства баз выполняется. [4]

– соответствие последовательности операции достижению заданной точности детали.

Последовательность операций для достижения заданной точности выбрана ошибочно. Сверлить отверстия нужно после термической обработки, для предотвращения поломки сверла и траты времени на замену. Для восстановления центровых отверстий после термической обработки следует ввести внутришлифовальную операцию. На токарной операции при коррекции центровых отверстий не соблюдается правило совмещения технологической базы с измерительной, что, как следствие, повлияет на обеспечение допуска радиального биения посадочной шейки. Поэтому нужно совместить конструкторскую базу (шейку) с измерительной базой (торцом). Последовательность операций соответствует достижению заданной точности.

– соответствие оборудования требованиям данной операции по точности, габаритным размерам, производительности (прогрессивным режимам резания). [1]

В существующем технологическом процессе на токарных операциях применяется токарный станок повышенной точности 1М61П. Класс точности станка по ГОСТ 8-82 – Н (Нормальная точность) Мощность электродвигателя – 4 кВт. По габаритным размерам и рабочему пространству этот станок подходит. На черновых токарных операциях высоких требований по точности обрабатываемых поверхностей не предъявляются, поэтому станки повышенной точности для таких операций не требуются. Подобным образом анализируем

остальные операции. На остальных операциях оборудование выбрано правильно, в соответствии с требованиями.

– соблюдение технологического процесса на операциях, соответствие заданной точности и качества фактическим, полученным на станках. Оснащение базового техпроцесса не является высокопроизводительным, поэтому есть необходимость предусмотреть усовершенствование.

Исходя из разбора критериев технологического процесса шпинделя, можно сделать вывод, что это необходимая часть при процессе усовершенствования и повышения эффективности технологий. Но не стоит упускать экономические показатели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т./ В. И. Ануриев. – 9-е изд., перераб. и доп. / под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 2. – 2001. – 960 с.

2. Бочков А.Л. Трехмерное моделирование в системе Компас-3D/ А.Л. Бочков – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 80 с.

3. Схиртладзе А.Г. Технологические наладки изготовления деталей и сборка в машиностроении: учеб. пособие / Схиртладзе, В. В. Морозов, В. Н. Жарков, В. А. Горохов и др. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2003. – 278 с.

4. Торопов Ю. А. Припуски, допуски и посадки гладких цилиндрических соединений. Припуски и допуски отливок и поковок: справочник / Ю. А. Торопов. – СПб.: Профессия, 2004. – 598 с.

УДК 62-234

Волошкин А.А., Попов П.Д., Шмаков Д.А.

Научный руководитель: Уральская Л.С., доц.

*Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия.*

ОБЗОР ПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ СКРУЧИВАНИЯ НИТЕЙ

В последнее время популярность начали приобретать устройства, которые основаны на закручивании кабелей или нитей. Данные изобретения очень универсальны в использовании и очень востребованы в таких направлениях робототехники, как манипуляторы, захваты и экзоскелеты. Конструкции, основанные на скручивании,

имеют ряд преимуществ, такие как размеры устройства, простота сборки и установки, универсальность, но также присутствуют недостатки, которые заключаются в дороговизне оборудования и сложности изготовления отдельных деталей. Рассмотрим какие технические решения применяются в этой области.

1. Мехатронный привод на скрученных нитях. На (рисунке 1) показан привод в разобранном состоянии, состоящий из крышек, корпусов, нитей, электродвигателя и драйвера электродвигателя, который нужен для передачи сигналов на сам электродвигатель. Мехатронный привод представляет собой электромеханическое устройство с числовым программным управлением, которое способно самостоятельно отслеживать состояние рабочего органа на основе данных, полученных с датчика положения вала и датчика силы. Основным плюсом данной конструкции, заключается в расположении основных компонентов в корпусе, это упрощает установку, дает универсальность и независимость использования [1].

2.

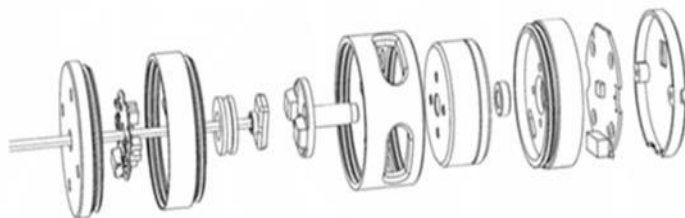


Рис.1 Мехатронный привод на скрученных нитях в разобранном виде.

3. Устройство на основе модуля закручивания нитей для реабилитации. Привод состоит из корпуса, в котором находятся другие элементы конструкции, а именно: крепление, находящееся на внешней стороне корпуса; коллекторный двигатель постоянного тока; муфта, на которую установлен датчик положения угла; оптический датчик силы, играющий одну из важных ролей; подшипник; нити [2]. Схема устройства показана (рисунке 2).

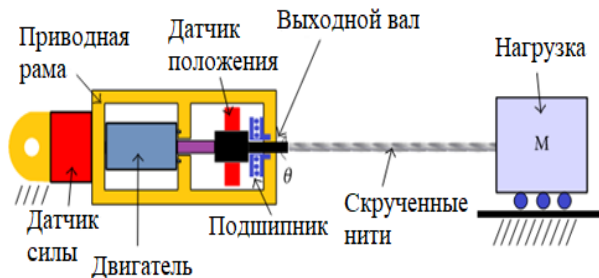


Рис.2 Схема устройства для реабилитации.

В этой установке все компоненты системы привода интегрированы в один элемент, что оптимизирует нагрузку на систему. Основным плюсом этой конструкции является нахождение основных деталей в одном элементе модуля, что позволяет гораздо проще установить конструкцию. К минусам же можно отнести сложность изготовления корпуса и деталей для него; наличие коллекторного двигателя постоянного тока, что увеличивает модуль в размерах.

4. Система приведения в действие скрученных нитей. Основная идея системы приведения в действие довольно проста и схематично проиллюстрирована на (рисунке 3). Нити, закрепленные параллельно к электродвигателю на одном конце, а на другом к действующей нагрузке. Вращение, навязываемое нитям электродвигателем, уменьшает их длину, создавая линейное движение со стороны нагрузки. Эта система работает, благодаря высокому передаточному отношению, что позволяет использовать электродвигатели меньших размеров, это упрощает разработку [3].

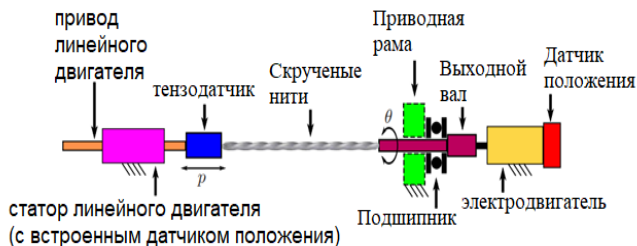


Рис.3 Схема конструкции.

Экспериментальное устройство, показанное на (рисунке 4), состоит из электродвигателя и нескольких нитей, выровненных вдоль оси вращения двигателя.

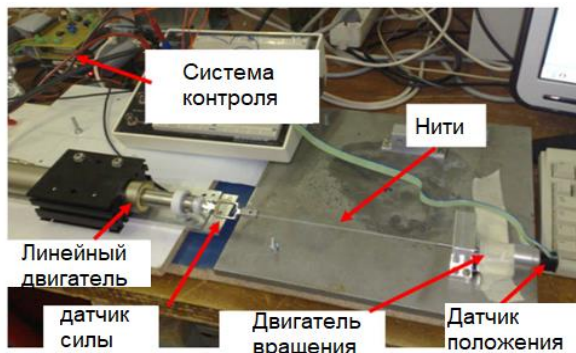


Рис.4 Экспериментальная установка.

Эта система довольно простая в изготовлении, имеет небольшой вес (по сравнению с другими конструкциями) и подходит для разных типов устройств, например, роботизированные руки или модули для реабилитации.

Благодаря приводу на основе скручивания кабеля(троса). Впервые удалось разместить все привода и двигатели в ортезе руки, при условии, что обеспечены все основные степени подвижности руки [4].

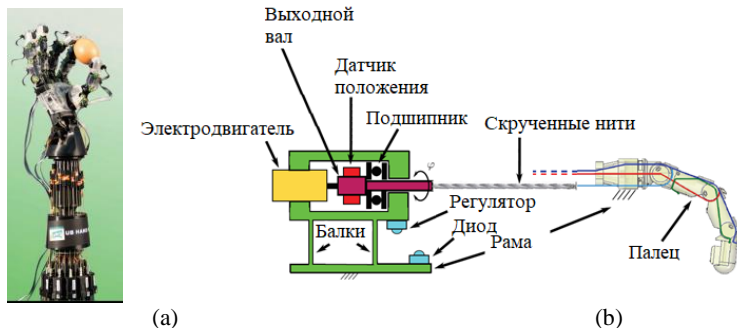


Рис.5 Схематическое изображение ручного привода протеза DEXMART.

Данные приводы позволяют обеспечить усилие равное 10 Н, при этом наиболее слабым местом системы является гибкий кабель (трос).

Согласно с кинестатической модель исполнительской системы витой струны представлено в статье [5], отношения между углом поворота двигателя φ и длиной передачи p могут быть легко полученный из геометрии спирали, образованной пряди:

$$L = \sqrt{\varphi^2 r^2 + p^2} \quad (1)$$

$$\sin \alpha = \frac{\varphi r}{L}, \quad \cos \alpha = \frac{p}{L}, \quad \tan \alpha = \frac{\varphi r}{p} \quad (2)$$

где α – угол наклона спирали, а L - длина нити. Из уравнения (3) и (2) следует:

$$\dot{L} = \dot{p} \cos \alpha + \dot{\varphi} r \sin \alpha \quad (4)$$

Из уравнения (3) следует, что максимальную скорость срабатывания можно вычислить, пренебрегая конечной жесткостью пряди и предполагает постоянную длину нити, по следующей формуле:

$$\dot{L} = 0 \Rightarrow \dot{p} = \dot{\varphi} r \tan \alpha = \dot{\varphi} \frac{\varphi r^2}{p} = \frac{\dot{\varphi}}{h} \quad (5)$$

Где $h = \frac{p}{\varphi r^2}$ – коэффициент передаточного отношения, который зависит от конфигурации оборудования. Отношение между крутящим моментом двигателя τ_m и силой, возникающей в каждой из нитей F_i равно:

$$\tau_m = 2rF_i \sin \alpha \quad (6)$$

Тогда результирующая сила приведения в действия F_z равна:

$$F = 2F_i \cos \alpha = -\tau_m = F_z r \tan \alpha = F_z \frac{\varphi r^2}{p} = \frac{F_z}{h} \quad (7)$$

Стоит отметить, что силой, приложенной к скрученным струнам двигателем, можно эффективно управлять, используя только силу обратной связи, в то время как измерение углового перемещения и скорости или положения нагрузки и скорости, ни точное знание параметров системы не являются обязательными. Еще одна важная особенность этой системы передачи заключается в том, что благодаря высокому коэффициенту редукции, система передачи по витой струне (практически) не имеет обратного хода, что вместе с тем, позволяет поддерживать большие силы захвата без необходимости непрерывной

подачи питания на двигатели, и что позволяет значительно уменьшить общий контроль, а это положительно сказывается на энергопотреблении.

5. Манипуляторы параллельной структуры. Кроме приводов по скручиванию особую популярность получили роботы, которые используют кабели вместо выдвигаемых штанг. Чаще всего такие устройства состоят из механизма, который соединен с платформой при помощи кабелей или нитей. Роботы применяются для сборки, окраски, 3-D печати крупногабаритных изделий, а также в устройствах для реабилитации.

Робот «Charlotte». Первый робот, который работал по такой схеме был «Charlotte» и появился он в 1995. Его задачи состояли в чтении информации с дисплеев устройств, переключения выключателей и передачи видео с МКС для обратной связи с Землей [6].

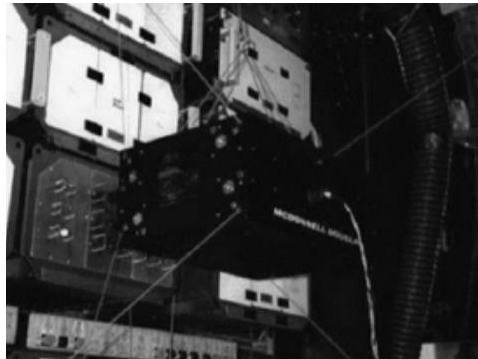


Рис.6 Робот «Charlotte».

«Robocrane». Еще одним примером робота, который использует кабели в качестве параллельных звеньев и лебедок в качестве приводов является «Robocrane». В зависимости от того, что подвешено к его рабочей платформе, он может применяться на суше, в воздухе, воде и в космосе. Предназначался такой робот для погрузки и разгрузки тяжелых материалов, спасения персонала, демонтаж оборудования, подводной прокладки труб [7-8].



Рис.7 «NIST Robocrane».

Конструкции, основанные на скручивании кабелей или нитей достаточно просты и универсальны в использовании. Они могут быть интегрированы в различные роботизированные устройства, что только повысит характеристики. Однако, потенциал таких систем ещё не раскрыт до конца, нужны годы исследований, чтобы реализовать модули. Требуется более детальное рассмотрение областей, таких как дистанционное управление модулем и оптимизация работы устройства. Также нужен поиск новых областей, где можно использовать эти приводы, что приведет к более интенсивному развитию данного направления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российский патент, МПК F16H35/00 // Мехатронный привод на скрученных нитях RU 2750258// Гапонов И.Ю., Неделчев С.И. заявлено 30.12.2020; опубл. 24.06.2021, Бюл. 12. – С. 1.
2. Hosseini, M., Meattini, R., Palli, G. and Melchiorri, C., A wearable robotic device based on twisted string actuation for rehabilitation and assistive applications. *Journal of Robotics*, 2017, Pp. 1–5.
3. Wuertz T., May C., Holz B., Natale C., Palli G., Melchiorri C. *The Twisted String Actuation System: Modeling and Control*. 2010. Pp. 1-2.
4. Palli G., Melchiorri C., Vassura G., Scarcial U., Moriello L.// *The DEXMART hand: Mechatronic design and experimental evaluation of synergy-based control for human-like grasping* // *The International Journal of Robotics Research* 2014, Vol. 33(5). Pp. 799–824.

5. Gaponov I., Popov D.// Twisted String Actuation Systems: A Study of the Mathematical Model and a Comparison of Twisted Strings // IEEE/ASME Transactions on mechatronics, vol. 19, NO. 4, 2014. Pp. 1331-1342.

6. Perry D. Campbell, Patrick L. Swaim and Clark J. Thompson. Charlotte Robot Technology for Space and Terrestrial Applications. Vol. 104, Section 1: JOURNAL OF AEROSPACE (1995), pp. 641-648.

7. Albus, J.S., Bostelman, R.V., Dagalakis, N., "The NIST ROBOCRANE," Journal of Robotics System, Vol. 10, No. 5, pp 709-724.

8. Гапоненко Е.В., Рыбак Л.А., Холошевская Л.Р. Структурный анализ и классификация роботизированных систем с приводными механизмами на основе кабельных элементов. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №9. С 126-136.

УДК 004.93

Волошкин А.А., Салихов Д.Д., Ласунова С.В.

Научный руководитель: Соболь Т.Г., доц.

***Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия***

РАЗБОР СПОСОБОВ РЕВЕРСИВНОГО ИНЖИНИРИНГА

Чаще всего процесс проектирования связан с разработкой новых технических решений, однако существуют случаи, когда необходимо создать новое техническое решение на базе существующего изделия. В случае 3D моделирования, необходимо перенести существующее изделие в пространство моделирования. Для решение этой задачи применяют методы реверсивного инжиниринга. Одним из способов реверс-инжиниринга является 3D сканирование. Технология 3D сканирования берет начало во второй половине 20го века. Первое устройство, с помощью которого можно было провести оцифровку поверхности трехмерного объекта, с целью получения твердотельной модели, появилось в 1960 году. Но данное устройство было очень ограничено своим функционалом. Изменения в сканерах начали вноситься с 1985 года, на них начали устанавливаться источники белого света, затемнение для более качественного охвата сканируемого тела, так же начали применяться лазеры [1,7]. В наши дни устройства 3D сканирования более совершенны, нежели их предшественники. На данный момент существует два типа сканеров:

– Контактные, это сканеры, по своей концепции представляют собой манипулятор, вместо выходного устройства которого крепится измерительная головка с рубиновым шариком на конце. При помощи этого типа сканеров возможно зондировать объекты с высокой точностью, однако для этого требуется большое количество времени.

– Бесконтактные, это сканеры, которые, используя определенные виды излучений (световых, ультразвуковых, рентгеновских и т.д.), сканируют объект. Главные преимущества бесконтактных сканеров заключаются в их мобильности и применению к телам с любой сложностью геометрии [2].

С совершенствованием и популяризацией 3D сканирования, получил новый виток развития Реверс-инжиниринг (обратное проектирование), это процесс создания чертежей и 3D моделей на основе уже существующих тел [3]. Суть заключается в том, что при помощи 3D сканирования оцифровываются внешние поверхности объекта в полигональную 3D-модель в формате STL, строится параметрическая модель, далее при помощи CAD систем осуществляется дальнейшее твердотельное моделирование [4].

Рассмотрим один из примеров Реверс-инжиниринга, используемый в разработке роботизированной системы для реабилитации нижних конечностей. В статье [5] рассмотрено проектирование роботизированной системы (РС) для реабилитации, состоящей из активного манипулятора и пассивного ортеза, закрепленного на регулируемом кресле (рисунок 1). Соединение между активным манипулятором и пассивным ортезом должно быть шарнирным.



Рис.1 Концепт РС для реабилитации нижних конечностей.

Для осуществления данной задачи необходимо использовать методы реверсивного инжиниринга для построения цифрового двойника пассивного ортеза. Это позволит осуществлять моделирование подвесной рычажной системы с использованием метода цифрового твердотельного моделирования «В контексте сборки», суть которого заключается в построение моделей с использованием геометрии цифрового двойника, что позволяет выполнять сложные шарнирные соединения с возможностью дальнейшего кинематического и динамического анализа.

Для проведения эксперимента был изготовлен ортез на основе гипсового слепка ноги испытуемого с отметками предполагаемого крепления (рисунок 2*а*). На стадии формовки ортеза были добавлены вкладыши для крепления подвесного рычажного механизма (рисунок 2*б*).

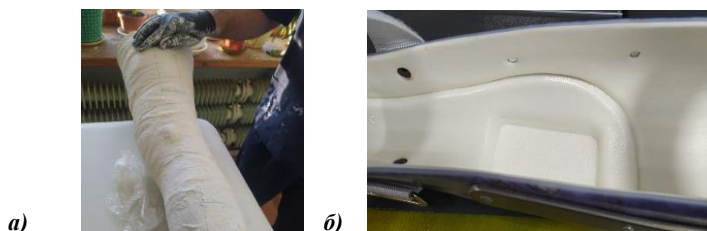


Рис. 2. Изготовление ортеза: *а* – формирование гипсового слепка ноги испытуемого, *б* – готовый ортез

Изначально по гипсовому слепку ноги пациента изготавливается пассивный ортез, после чего устанавливается на роботизированную систему, которая помогает пациенту выполнить упражнения реабилитации [6].

Далее нам необходимо выбрать метод, с помощью которого мы проведем измерения геометрических параметров ортеза. Первый, ручной способ, который заключается в том, что мы вручную снимаем размеры с ортеза при помощи штангенциркуля, определяем погрешность измерений с помощью метода обработки прямых измерений. На основе полученных значений создаем 2D чертеж и далее 3D модель ортеза. Второй метод, бесконтактный, заключается в том, что при помощи бесконтактного 3D сканера возможно произвести измерение геометрии ортеза, при этом получим полигональную 3D модель, которую загрузим в рабочую область САД системы для дальнейшего твердотельного моделирования. И третий метод, контактный, заключается в том, что мы при помощи КИМ (контактно-

измерительной машины) проводим оцифровку поверхности ортеза. Воспользуемся Мостовым КИМ, расположим наш ортез на прецизионной поверочной плите, закрепим его, дождемся завершения зондирования, далее поступаем по аналогии, как и во втором случае после получения полигональной 3D модели. В нашем случае, идеальным методом оцифровки поверхности ортеза будет второй (бесконтактный). Из всех рассматриваемых способов оцифровки, бесконтактный – самый быстрый, при этом достигается более высокая точность, чем при ручном способе, но уступает в точности контактному. При измерении ортеза точность, обеспечиваемая бесконтактным способом достаточна, поэтому, с учетом скорости выполнения, бесконтактный способ самый оптимальный. Исходя из этого мы будем проводить измерения геометрических параметров ортеза бесконтактным способом.

После примерки испытуемым изготовленного ортеза был создан цифровой двойник при помощи методов цифрового копирования (рис. 3а). При помощи 3D сканера CREALITY CR-Scan 01 был получен STL файл, который был загружен в рабочую область CAD системы для дальнейшего твердотельного моделирования (рисунок 3б).

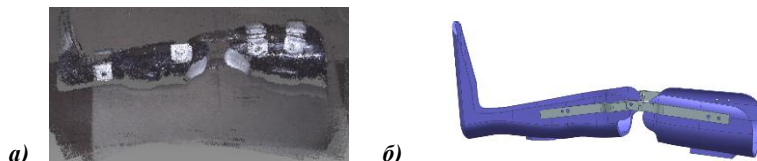


Рис. 3. Создание цифрового двойника ортеза: *а* – 3D модель, полученная с помощью сканера, *б* – обработанная 3D модель ортеза

На основе 3D сканирования и реверсивного инжиниринга нами была разработана роботизированная система для реабилитации нижних конечностей (рисунок 4).

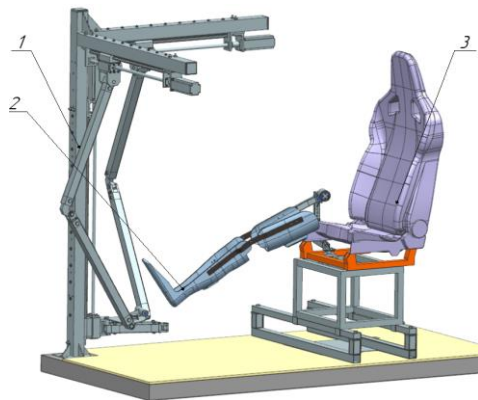


Рис. 4. Роботизированная система для реабилитации нижних конечностей

При разработке роботизированной системы активно использовалась технология реверсивного инжиниринга. Был проведен анализ средств 3D сканирования, в результате которого был выбран, наиболее целесообразный для данного изделия, бесконтактный метод измерения поверхности. Основными достоинствами бесконтактного метода является скорость анализа измеряемой поверхности с одновременным построением цифровой модели, для чего был использован 3D сканер CREALITY CR-Scan 01. Точность проведенных измерений порядка 1-2 мм, что связано с большими габаритами ортеза. При помощи системы автоматизированного проектирования NX была создана полноценная, редактируемую модель роботизированной системы, сборка которой осуществлялась с учетом построенной геометрии цифровой модели ортеза. Благодаря реверсивному инжинирингу есть возможность совершенствования различного типа оборудование, экономя при этом значительную часть времени. Так же реверс-инжиниринг широко используется в медицине, архитектуре, градостроительстве, робототехнике и многих других отраслях. Использование данного метод значительно упростило создание роботизированной системы для реабилитации нижних конечностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шкуро А. Е., Кривоногов П.С. Технологии и материалы 3D-печати: учеб. Пособие // под ред. А.Л. Ленской. – Екатеринбург. Изд-во Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 99 с.

2. Синьков А. В., Тышкевич В. Н. Технология 3D сканирования и 3D печати: учебно-методическое пособие // под ред. Матвеева Н.И. – Волгоград. Изд-во (филиал) ВолгГТУ, 2019. – 80 с.

3. Сергеев М.Е. // Реверсивный инжиниринг // Старт в науку: актуальные вопросы техники и технологий. Москва, 2017. С. 39-43.

4. Уваров К.А., Борисов А.П. // Анализ методов 3D - сканирования и разработка 3 – D сканера // Современный взгляд на будущее науки. Пермь, 2016. С. 76-79.

5. Voloshkin, A., Virabyan, L. G., Mamaev, V. A., Kholoshevskaya, L. R. "Design of mechanisms of a robotic system for rehabilitation of the lower limbs", Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering" ToPME 2020.

6. Волошкин А.А., Попов П.Д., Чередников И.И., Черкасов В.В. // Проектирование роботизированной системы для реабилитации с учетом различного индекса массы тела // Образование. Наука. Производство. XIII Международный молодежный форум. Белгород, 2021. С. 1715-1721.

7. Гапоненко Е.В., Рыбак Л.А., Анциферов С.И., Вирабян Л.Г. Основы проектирования роботизированного комплекса с модулями относительного манипулирования. – М.: Белгород, 2019. – 144 с.

УДК 62-883

Волошкин А.А., Скитова В.М., Ноздрачева А.В.

Научный руководитель: Рыбак Л.А., проф.

*Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В настоящее время в практическом здравоохранении существует ряд задач, оптимальным способом решения которых является применение роботизированных средств. Данные задачи касаются не только лечения, но и осуществления функций манипулятора в анализаторе биологической жидкости, а также её хранения. Следует отметить, что потребность в создании роботизированных средств помощи людям в средах неблагоприятных для здоровья неуклонно растет.

Конструкция робота Delta широко используется в нескольких промышленных задачах, таких как сортировка и 3D-печать. Очевидное преимущество перед другими конструкциями, такими как как декартово манипулятор, это более высокое ускорение, которое может быть достигнуто из-за небольшой движущейся массы.

Этот робот был изобретен в 80-х годах Клавелем [1]. Затем он был представлен на рынке, сначала для операций по сортировки и упаковки, затем для тактильных задач и другие цели (например, медицинские и фармацевтические), и не в последнюю очередь для 3D-печать [2, 3]. Кинематика дельта-робота с вращающимися исполнительными механизмами предложена в [4], а в [5] кинематический анализ выполнен для дельта-робота с призматическими приводами, с особое внимание к особенностям. Что касается динамики, существует три метода определения сил исполнительных механизмов в динамических условиях [7]: способ Ньютона-Эйлера, принцип виртуальных произведений и уравнение Лагранжа с формализмом множителей. Принцип виртуальной работы был применен для расчета динамики призматического дельта-робота. В Лагранжев подход использовался для исследования динамики дельта-робота с вращательных приводов, но, насколько известно, этот подход еще не был применен к дельта-роботу с призматическими приводами.

Моделирование при помощи системы автоматизированного проектирования (САПР) является неотъемлемой частью кинематического и динамического анализа. Любой аналитический расчет механизма может быть дополнительно проанализирован и подтвержден в САПР системе.

Моделирование робота параллельной структуры на основе поступательных приводов позволит создать работоспособную 3D модель, которая будет является основой для детального проектирования и оптимизации геометрических параметров системы.

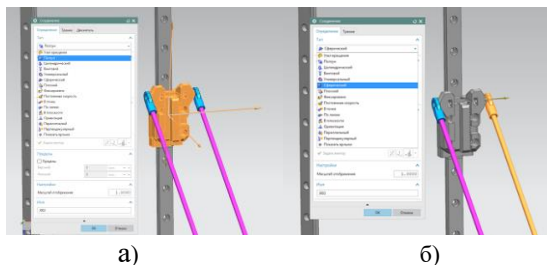


Рис. 3 а) Создание кинематического соединения в среде симуляции типа «ползун»; б) Создание кинематического соединения в среде симуляции типа «сферический шарнир»

Данный тип соединения может иметь ограничения передвижения относительно базовой координаты (относительно точки в которой, находится звено), а также широкий спектр настройки непосредственно самого движения. Помимо «ползуна», кинематические цепи delta-робота на поступательных парах, содержат сферические шарниры (рисунок 3 (б)).

Для создания сферических шарниров необходимо определить центр сферы, относительно которой будет происходить вращение. Данный тип соединения имеет 3 степени свободы, вращение относительно X, Y и Z. Дополнительные параметры позволяют задать трение при движении.

В результате была собрана 3D модель, обладающая кинематическими ограничениями. Для проведения динамического анализа системы необходимо провести кинематический расчет и решить обратную задачу кинематики.

Кинематический расчет.

Архитектура дельта-робота с призматическими шарнирами изображена на (рисунке 4). Робот представляет собой параллельную машину, состоящую из платформы и трех опор, каждая из которых является последовательной кинематической цепью типа П (CC) 2. Благодаря наличию параллелограммов на каждой ноге, платформа может перемещаться только в трех направлениях.

Призматические приводные шарниры являются вертикальными и соединяют три ползуна с фиксированным основанием. Точки A_1 , A_2 и A_3 являются средней линией коротких сторон параллелограммов (AP) соединенных с ползунами, а точки P_1 , P_2 и P_3 находятся в центре противоположных сторон, подвижной платформы. Точки B_1 , B_2 и B_3 - это вертикальные проекции точки A_1 , A_2 и A_3 на плоскости основания. Фиксированная система отсчета OXYZ расположена в центре

основания, ось X параллельна отрезку B_1B_2 и ориентирована от B_1 до B_2 , а ось Y ориентирована на точку B_3 .

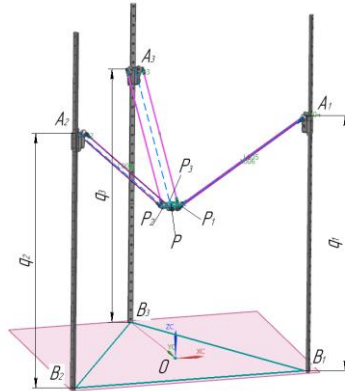


Рис. 4 Архитектура дельта-робота с призматическими шарнирами

Обе тройки $B_1B_2B_3$ и $P_1P_2P_3$ обозначьте равносторонние треугольники, прикрепленные к основанию и платформе соответственно. Длины сторон этих треугольников обозначены как s_B (треугольник в основании) и s_P (треугольник подвижной платформы). Точка P находится в центре платформы.

Степени степеней свободы призматических шарниров обозначены q_1, q_2 и q_3 и представляют координаты по оси Z точек A_1, A_2 и A_3 относительно фиксированной ссылки Рамка.

$$\begin{aligned} OB_1 + B_1A_1 + A_1P_1 + P_1P &= OP \\ OB_1 + B_1A_1 + A_1P_1 + P_1P &= OP \\ OB_1 + B_1A_1 + A_1P_1 + P_1P &= OP \end{aligned} \quad (1)$$

Предполагая, что длина сегментов A_1P_1, A_2P_2 и A_3P_3 постоянна во времени и равна l , возможно вывести следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \left(x_P + \frac{s_B}{2} - \frac{s_P}{2}\right)^2 + \left(y_P + \frac{s_B}{2\sqrt{3}} - \frac{s_P}{2\sqrt{3}}\right)^2 + (z_P - q_1)^2 &= l^2 \\ \left(x_P - \frac{s_B}{2} + \frac{s_P}{2}\right)^2 + \left(y_P + \frac{s_B}{2\sqrt{3}} - \frac{s_P}{2\sqrt{3}}\right)^2 + (z_P - q_1)^2 &= l^2 \\ x_P^2 + \left(y_P - \frac{s_B}{\sqrt{3}} + \frac{s_P}{\sqrt{3}}\right)^2 + (z_P - q_1)^2 &= l^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Известные q_1 , q_2 и q_3 и их первая и вторая производные по времени, прямая кинематическая задача позволяет вычислить координаты x_p , y_p и z_p точки P и их производные по времени. Поскольку система (2) не линейна, ее можно решить итерационным методом, например, методом Ньютона Рафсона или алгоритм пересечения трех сфер [6].

Скорости легко вычисляются, решая линейную систему, полученную при дифференцировании системы (2). Эти уравнения можно записать более компактно, используя матричную запись:

$$J_x \begin{Bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{z}_p \end{Bmatrix} = J_q \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

где J_c и J_q - матрицы Якоби. Таким образом

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{z}_p \end{Bmatrix} = J_x^{-1} J_q \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Ускорения получаются путем дифференцирования системы уравнений (4) и выражаясь в матричной записи и имею вид

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{y}_p \\ \ddot{z}_p \end{Bmatrix} = J_x^{-1} \left(J_q \begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} x_p^2 + y_p^2 + (z_p - q_1)^2 \\ x_p^2 + y_p^2 + (z_p - q_2)^2 \\ x_p^2 + y_p^2 + (z_p - q_3)^2 \end{Bmatrix} \right) \quad (4)$$

Решение обратной задачи кинематики.

Обратная задача проще, так как совместные параметры q_1 , q_2 и q_3 могут быть выражены явным образом как функция координат платформы:

$$q_1 = z_p \pm \sqrt{l^2 - \left(x_p + \frac{S_B}{2} - \frac{S_P}{2}\right)^2 + \left(y_p + \frac{S_B}{2\sqrt{3}} - \frac{S_P}{2\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$q_1 = z_p \pm \sqrt{l^2 - \left(x_p - \frac{S_B}{2} + \frac{S_P}{2}\right)^2 + \left(y_p + \frac{S_B}{2\sqrt{3}} - \frac{S_P}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (6)$$

$$q_1 = z_p \pm \sqrt{l^2 - x_p^2 + \left(y_p - \frac{S_B}{\sqrt{3}} + \frac{S_P}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

Скорость определим по следующей системе:

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{Bmatrix} = J_q^{-1} J_x \begin{Bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{z}_p \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Ускорение определим по следующей системе:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{Bmatrix} = J_q^{-1} \left(J_x \begin{Bmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{y}_p \\ \ddot{z}_p \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} x_p \dot{z}_p^2 + y_p \dot{z}_p^2 + (z_p - q_1)^2 \\ x_p \dot{z}_p^2 + y_p \dot{z}_p^2 + (z_p - q_2)^2 \\ x_p \dot{z}_p^2 + y_p \dot{z}_p^2 + (z_p - q_3)^2 \end{Bmatrix} \right) \quad (8)$$

Таким образом при моделировании становится возможным задать перемещение каждого из ползунков и переместить выходное звено в необходимую точку в модуле симуляции.

Симуляция трехмерной кинематической модели.

Для проведения симуляции необходимо задать движение каждого из ползунков (рисунок 5 (а)), при этом движение представляет собой нелинейную функцию, так как предполагаем, что движение начинается из состояния покоя.

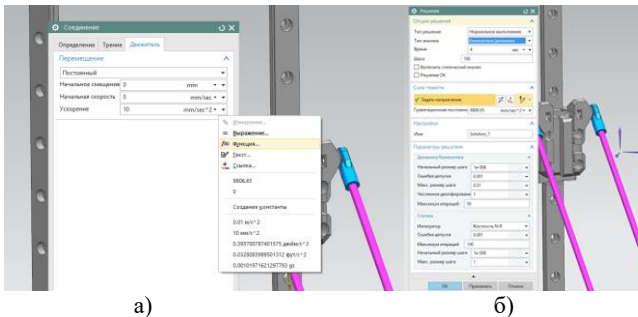


Рис. 5 а) Назначение параметров движения ползуна; б) Назначение параметров решателя.

После того как движения были заданы определяем параметры решателя (рисунок 5 (б)). На данном этапе происходит назначение таких

основных переменных как: время симуляции, количество шагов симуляции за отведенное время, сила тяжести и её направление.

После того как решатель создан, происходит расчет симуляции. В результате была получена динамическая модель перемещения delta-робота на поступательных парах (рисунок 6) со всеми основными характеристиками движения (рисунок 7).

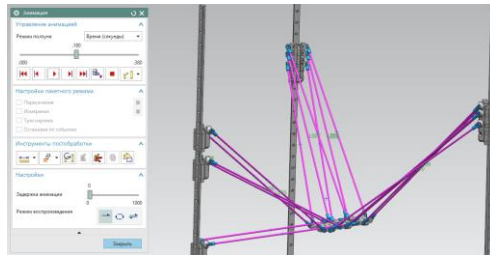


Рис. 6 Анимация с последовательным изображением звеньев механизма.

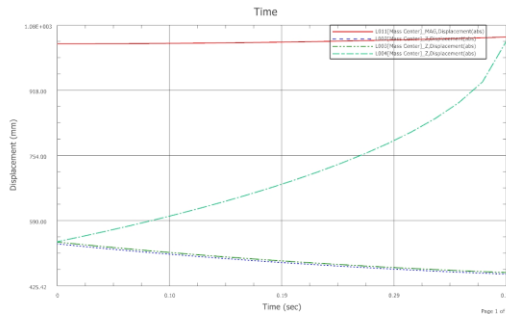


Рис. 7 График перемещения ползунков за отдельно взятый промежуток времени.

Симуляция delta-робота на поступательных парах производил по входным данным указанным в (таблице 1).

Таблица 1 - Параметры симуляции, рассчитанные аналитическим образом

№	q_1 мм.	q_2 мм.	q_3 мм.	X	Y	Z	l	S_h	S_p
1	498,7 8	498,7 8	498,7 8	0,00	0,00	0,00	848,4 0	1327,3 0	138,6 0
2	497,0 0	501,7 8	503,5 1	2,00	2,00	2,00	848,4 0	1327,3 0	138,6 0

3	298,2 6	576,4 2	562,1 9	100,0 0	50,0 0	10,0 0	848,4 0	1327,3 0	138,6 0
4	290,7 4	584,1 2	560,9 4	105,0 0	48,0 0	12,0 0	848,4 0	1327,3 0	138,6 0
5	282,7 7	591,7 1	559,6 2	110,0 0	46,0 0	14,0 0	848,4 0	1327,3 0	138,6 0
6	274,3 0	599,2 0	558,2 3	115,0 0	44,0 0	16,0 0	848,4 0	1327,3 0	138,6 0
7	265,2 8	606,5 9	556,7 6	120,0 0	42,0 0	18,0 0	848,4 0	1327,3 0	138,6 0
8	255,6 2	613,8 8	555,2 2	125,0 0	40,0 0	20,0 0	848,4 0	1327,3 0	138,6 0
9	245,2 2	621,0 7	553,6 0	130,0 0	38,0 0	22,0 0	848,4 0	1327,3 0	138,6 0

В позиции №1 (таблица 1) значения $q_1, q_2, и q_3$ являются проверочной точкой, при которой значения перемещения ползунков должны быть равны. В позиции №2 (таблица 1) значения $q_1, q_2, и q_3$ определяют смещение выходного звена в заданную точку для проверки, так как эта точка заранее известна.

В результате была получена трехмерная динамическая модель delta-робота на поступательных парах, которая позволяет изучать динамические параметры системы с различными входными данными. Данная трехмерная модель позволит выполнять подбор основных параметров системы для создания полноценной системы управления.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по гранту FZWN-2020-0017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Clavel, R.: Delta, a fast robot with parallel geometry. In: Proceedings of the 18th International Symposium on Industrial Robots, 1988. P. 91–100.
2. Zhao, Y.: Singularity, isotropy, and velocity transmission evaluation of a three translational degrees-of-freedom parallel robot. *Robotica* 31(2), P. 193–202 (2013).
3. Biagiotti, L. Melchiorri, C.: *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Springer, Heidelberg (2010)
4. López, M., Castillo, E., García, G., Bashir, A.: Delta robot: inverse, direct, and intermediate Jacobians. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 220(1), 103–109 (2006)

5. Zhao, Y.: Singularity, isotropy, and velocity transmission evaluation of a three translational degrees-of-freedom parallel robot. *Robotica* 31(2), 193–202 (2013)
6. Biagiotti, L. Melchiorri, C.: *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Springer, Heidelberg (2010)
7. Tsai, L.W.: *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*. Wiley, NY (1999)
8. Brinker, J., Corves, B., Wahle, M.: A comparative study of inverse dynamics based on Clavel's Delta robot. In: *The 14th IFToMM World Congress, Taipei (Taiwan)*, pp. 89–98
9. Staicu, S., Carp-Ciocardia D.C.: Dynamic analysis of Clavel's Delta parallel robot. In: *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, no. 3*, pp. 4116–4121 (2003)
10. Malyshev D. I., Nozdracheva A. V., Kholoshevskaya L. R. Identification of the parallel 3-PRRR manipulator parameters considering the workspace boundaries and the passive orthosis movements. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. T. 1582. N. 1. C. 012062

УДК 62.77

Гаврилов Д.В., Мамченкова А.А.

***Научный руководитель: Хуртасенко А.В., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия***

АНАЛИЗ ВЕЛИЧИН И НАПРАВЛЕНИЙ ВОЗМОЖНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПРИ БЕСЦЕНТРОВОЙ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ

Для анализа величин и направлений возможных отклонений, образующих профиля поперечного сечения при наличии погрешности формы в виде овальности выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния бандаж, установленного на двух роликах в САЕ системе. Результаты показали характер и величины деформаций детали при различных угловых положениях детали в процессе вращения. На (рисунке 1). показаны результаты симуляции для одного из угловых положений (90 град).

Такие же расчеты выполнены для угловых положений при угловых положениях: 0°, 30°, 60°, 90° и 120° бандаж, базирующегося на двух опорных роликах.

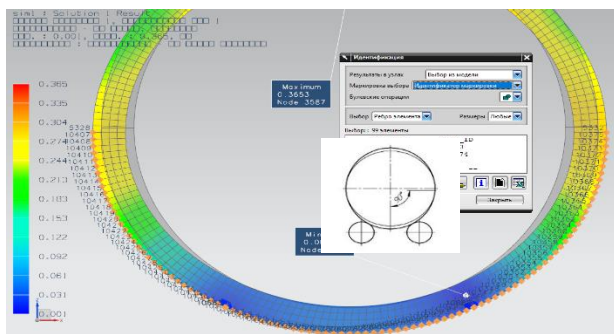


Рис. 1 Результаты моделирования деформированного состояния при угловом положении 90°.

На (рисунке 2) представлены расчетные смещения наружного контура поверхности при различных угловых положениях.

Величины смещения образующей контура поперечного сечения бандажа при деформации в процессе вращения различны при различных угловых положениях детали на опорных роликах. Вектор направления наибольшего смещения для всех точек контура в рассмотренной зоне направлен примерно по радиусу из центра детали.

Смещение точек образующей в результате наличия дефектов и учёта деформированного состояния в некоторых случаях достигает 0,3 мм, что может быть соизмеримо с величиной настраиваемой глубины резания. Следовательно, оно должно быть компенсировано настройкой при лезвийной обработке и может не требоваться при абразивной обработке в силу правильно настроенной жесткости исполнительного органа в направлении плоскости обработки (плоскости резания).

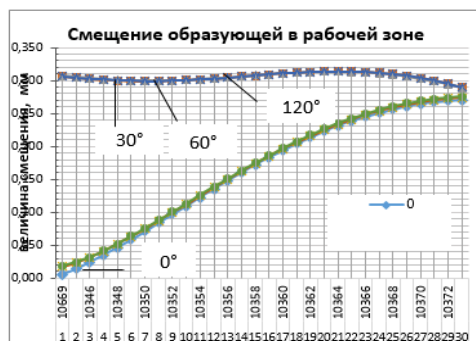


Рис. 2 Отклонения наружной поверхности в результате наличия погрешности

формы и деформации при угловых положениях: 0°, 30°, 60°, 90° и 120°

Также разработана методика и выполнено исследование для определения величины погрешности формы по результатам измерения биений. Для этого выполнено моделирование процесса измерения биений для различных величин погрешности. Построены диаграммы, которые отображают закономерности распределения значений отклонения формы для угловых положений бандажа.

– Установлено, что значениям биений наружной поверхности детали, имеющей погрешность формы в виде овальности и могут быть сопоставлены различные величины фактических погрешностей формы.

– Измерения величин биения поверхности во всех зонах возможно производить при настройке измерительного устройства на размер номинального диаметра.

Данные измерений позволят создавать массивы баз данных, которые могут использоваться для определения фактических значений погрешностей формы на основе алгоритмов и программных модулей идентификации погрешностей формы.

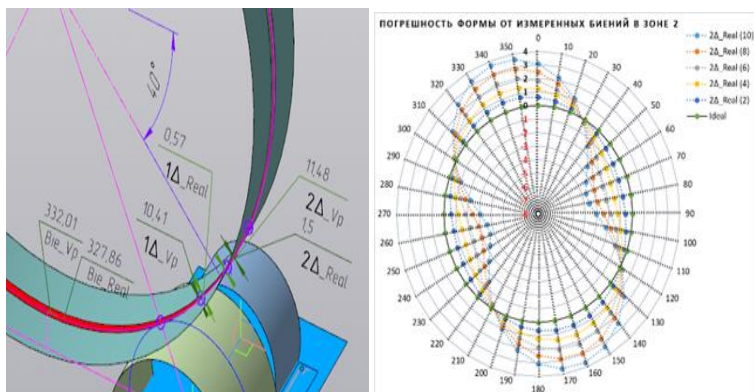


Рис. 3. Имитационная модель для измерения биений и круглограмма результатов измерений для различных видов погрешности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка и исследование способа восстановления работоспособности насадных и вварных бандажей вращающихся цементных печей в условиях эксплуатации: Отчет о НИР заключительный / Белгородский технол. ин-т стр. матер. БТИСМ; Руководитель В.Н. Бондаренко – №ГР 01850061334. – Белгород, 1985-

88.: ил. – Отв. исполн. В.И. Рязанов; Соисполн. БТИСМ, А.А. Погонин, И.В. Шрубченко, А.И. Полунин и др. – Библиогр.: 106 с.

2. Хуртасенко, А.В. Технология восстановительной обработки крупногабаритных деталей с использованием методов активного контроля: Дисс. канд. техн. наук /А.В. Хуртасенко; БГТУ им. В.Г.Шухова – Белгород, 2007. – 170с.

3. Шрубченко, И.В. Некоторые особенности реконструкции бандажей вращающихся технологических барабанов с использованием мобильных технологий. / И.В. Шрубченко, А.С. Черняев, Л.В. Мuryгина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2012. №4. С. 96-99.

УДК 62.77

Гаврилов Д.В., Мамченкова А.А., Чуев К.В.

*Научный руководитель: Хуртасенко А.В., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ БЕСЦЕНТРОВОЙ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ

Повышение эффективности восстановительной ремонтной и предмонтажной обработки крупногабаритных деталей в условиях неопределённости базирования, таких как бандажи вращающихся печей, возможно на основе разработки новых технологических подходов, учитывающих влияние погрешностей формы на базирование самой детали при обработке [1-3]. Одной из технических задач является разработка и исследование эффективных схем обработки [4].

На (рисунке 1(а)) представлена разработанная схема обработки поверхности бандажей, которая имеет следующие размерные характеристики:

- длина плеча l - 1116 мм.;
- длина плеча l_1 - 1255 мм.;
- угол положения плоскости обработки $\beta = 62^\circ$;
- угол положения базовой точки $\varphi = 59,23^\circ$.

Методика исследования формообразования реализована на основании цифровой имитационной модели (рисунок 1(б)), которая функционирует в соответствии с разработанной новой технологической схемой обработки и предполагает следующие этапы:

1 Изменение углового положения модели бандажа на роликах с помощью изменения значения угла отклонения полуоси бандажа от

исходного (горизонтального) ее положения. Угол отсчитывается в плоскости поперечного сечения модели опоры.

2 Выполнена настройка имитационной модели путем параметрического изменение значения вылета инструмента h (рисунок 1(а)) до касания поверхности контура модели бандажа. Эта настройка выполняется изменением значения параметра с шагом 0,1 мм.

3 Выполнена имитация вращения бандажа на опорных роликах путем последовательного изменения величины угла отклонения полуоси бандажа с заданным шагом до совершения моделью бандажа полного оборота.

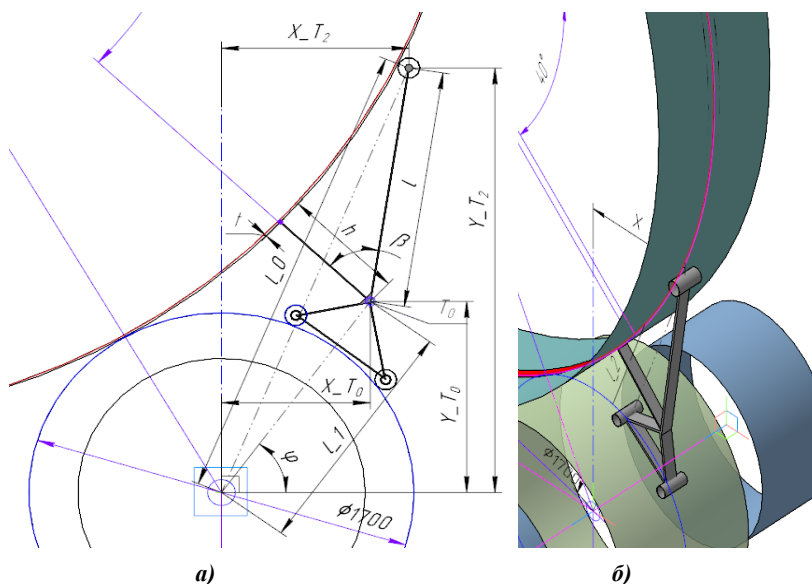


Рис. 1 Исследование формообразования при восстановительной обработке бандажа: а - разработанная технологическая схема обработки; б - имитационная модель

4 Изменение исходного контура модели бандажа в соответствии с новыми параметрами формы. Обновление параметрических связей в имитационной модели.

5 Повторение цикла моделирования формообразования до уменьшения погрешности формы до регламентированных значений.

Результаты моделирования обработки с использованием рассмотренной выше имитационной модели представлены на графиках и диаграммах, демонстрирующих параметры процесса резания при

выполнении многопроходной обработки в соответствии с принятыми технологическими схемами.

На (рисунке 2) представлены диаграммы изменения радиальных размеров детали при многопроходной обработке.

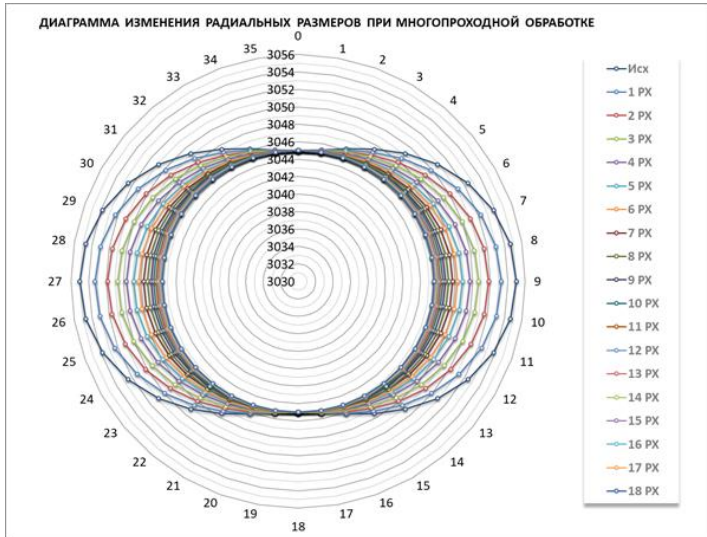


Рис. 2 Изменение радиальных размеров в поперечном сечении.

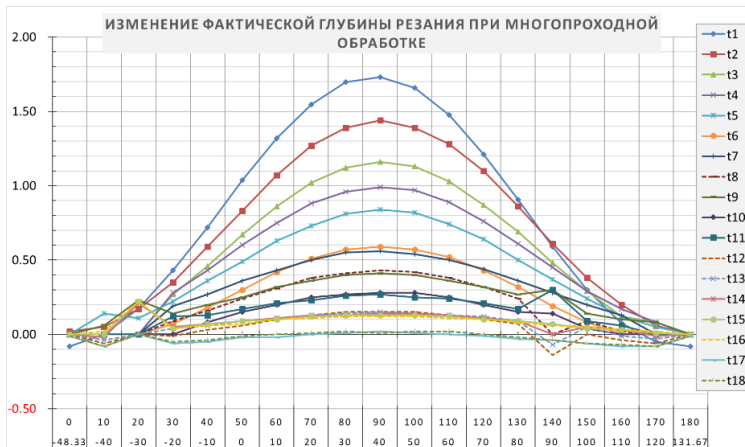


Рис. 3 Значения фактической глубины резания.

На (рисунке 3) показаны графики изменения глубины резания для всех угловых положений радиальных сечений детали на каждом рабочем ходе при выполнении многопроходной обработки. Характер изменения кривых представленных на графиках позволяет сделать выводы, что:

– Максимальные значения глубины резания соответствуют расположению максимальной погрешности формы в радиальном направлении практически для всех проходов;

– Некоторые экстремальные увеличения значения глубины резания на рабочих ходах 9, 11, 16, выделенные на графиках длинным пунктиром, соответствующих угловым положениям сечений 20° и 140° наблюдаются в силу специфики базирования детали на двух роликах и наличия погрешности формы. Однако при этом значения глубины резания не превышают величины погрешности формы, определяющей максимальный припуск на обработку;

– Отрицательные значения глубины резания, отображаемые на графиках в зонах, выделенных коротким пунктиром (красный цвет) свидетельствуют об отсутствии резания.

Характер изменения радиальных размеров (рисунок 2) позволяет сделать следующие выводы:

– При выполнении многопроходной обработки на каждом рабочем ходе во всех угловых положениях радиальных сечений наблюдается уменьшение радиальных размеров, определяемых радиус-вектором из центра детали;

– Форма детали с погрешностью в виде овальности с каждым рабочим проходом постепенно приближается к форме вписанной окружности;

– В сечениях, имеющих минимальное или равное «0» значение погрешности формы, изменение величины радиальных размеров не наблюдается, т.е. нет снятия припуска.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка и исследование способа восстановления работоспособности насадных и сварных бандажей вращающихся цементных печей в условиях эксплуатации: Отчет о НИР заключительный / Белгородский технол. ин-т стр. матер. БТИСМ; Руководитель В.Н. Бондаренко – №ГР 01850061334. – Белгород, 1985-88.: ил. – Отв. исполн. В.И. Рязанов; Соисполн. БТИСМ, А.А. Погонин, И.В. Шрубченко, А.И. Полунин и др. – Библиогр.: 106 с.

2. Хургасенко, А.В. Технология восстановительной обработки

крупногабаритных деталей с использованием методов активного контроля: Дисс. канд. техн. наук /А.В. Хуртасенко; БГТУ им. В.Г.Шухова – Белгород, 2007. – 170с.

3. Шрубченко, И.В. Некоторые особенности реконструкции бандажей вращающихся технологических барабанов с использованием мобильных технологий. / И.В. Шрубченко, А.С. Черняев, Л.В. Мурыгина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2012., №4, С. 96-99.

4. Хуртасенко А.В., Шрубченко И.В., Тимофеев С.П. Методика определения формы наружной поверхности качения опор технологических// Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 3. С.85–89.

5. Колобов, А. В. Технологическое обеспечение условий контакта при сборке и эксплуатации опор технологических барабанов: дис. канд. техн. наук. Белгород, 2009. 190с.

УДК621

Гончаров П.С., Медведев А.И.

*Научный руководитель: Чепчуров М.С., д-р техн. наук, проф.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г Белгород, Россия*

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ В ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Станки, которые осуществляют операции по обработке и нарезанию цилиндрических прямозубых, косозубых и червячных колёс, называются зубофрезерными станками. Станки этой группы бывают ручные и полуавтоматы. Обычно зубофрезерные станки используются на предприятиях для изготовления запасных деталей, или деталей ремонта. Станки применяют метод обкатки. Существуют горизонтальные и вертикальные зубофрезерные станки.

При изготовлении изделия из заготовки на зубофрезерном станке применяется метод огибания, он заключается в том, что направляющая линия воссоздается вращением заготовки, а образующая линия, следовательно, как огибающая кривая к последующим положениям к режущей кромке режущего инструмента, говоря иными словами, передача движения, происходящего при зацеплении зубчатого колеса с зубчатой рейкой (рисунки 1) [5].

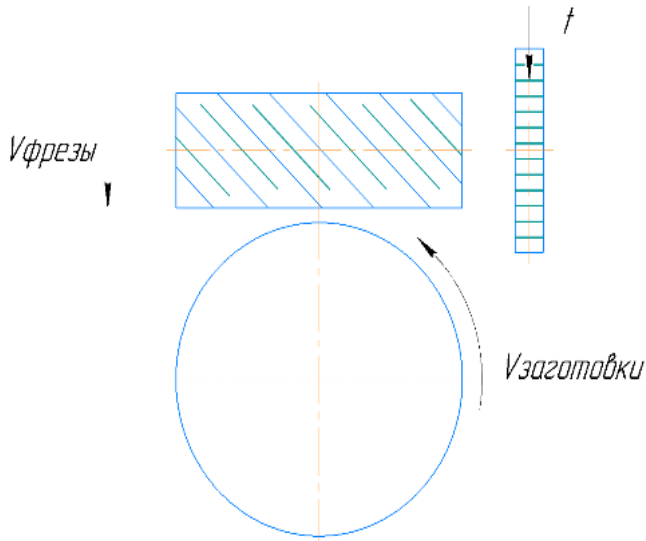


Рис. 1 Схема нарезания червячных колес с радиальной подачей

Что бы выполнить автоматизацию в зубофрезерной операции, нужно понимать, что в станках для зубофрезерной обработки есть основные и второстепенные подачи [1, 6]. К основным подачам относят: вращение заготовки, вращение режущего инструмента (червячная фреза). К второстепенным подачам относят: подача перемещения режущего инструмента, эти перемещения возникают в трех координатах X , Y и Z . Для нарезания колес с использованием радиальной подачи следует знать методику нарезания колес. Методика нарезания колес с применением радиальной подачи- включают механизмы станка, приводящие во вращательные движения фрезу и стол с нарезаемой заготовкой и обеспечивающие радиальную подачу стола на фрезу. Вертикальную подачу включают, гитара дифференциала не работает. Перед тем как нарезать колеса, настраиваются гитары скоростей, подач и деления, причем гитара скоростей и деления настраивается так же, как и для нарезания цилиндрических колес, а для настройки гитары подач формула, вытекающая из кинематической схемы станка, модели 5К324 (рисунок 2).



Рис. 2 Зубофрезерный станок модели 5K324

За один оборот стола винт горизонтального перемещения стола с шагом 10 мм. Должен предоставить радиальную подачу S_p (мм/об).

Уравнение кинематической цепи

$$S_p = 1 \text{ об. стола} \times \frac{96}{1} \times \frac{35}{35} \times \frac{33}{33} \times \frac{2}{26} \times \frac{44}{44} \times i_{\text{под}} \times \frac{39}{65} \times \frac{45}{50} \times \frac{34}{61} \times \frac{1}{36} \times 10 = 0,62i_{\text{под}}$$

Откуда следует что $i_{\text{под}} = \frac{a_2}{b_2} = 1,6S_p$

Сближение фрезы и заготовки до тех пор, пока расстояние между двумя их осями не будет равным заданному межосевому расстоянию нарезаемой червячной подачи (Рис. 3). Во время получения необходимой высоты зуба, для автоматического активирования подачи требуется установить упор. Нарезание колёс с использованием тангенциальной передачи. Для этого требуется установка тангенциального суппорта, вместо обычного. При работе устройств, обеспечивающих вращение фрезы и стола с заготовкой и обеспечивающих тангенциальную подачу (Рис. 4). Необходимо синхронизировать вращение стола с вращением фрезы для получения требуемого числа зубьев и с тангенциальной подачей, сообщающей столу дополнительный поворот, пропорциональный величине подачи. Исходя из этого, можно сделать выводы, что должны быть правильно настроены гитары скоростей деления, поворот, пропорциональный величине подачи и дифференциала. Процесс подбора колёс гитар

скоростей и деления подбирают также, как и при нарезании косозубых цилиндрических колёс [3, 4].

Формулы для настройки гитар и дифференциала имеет следующий вид:

$$i_{\text{под}} = \frac{a_2}{b_2} = \frac{C_2 \times S_T}{k}; i_{\text{диф}} = \frac{a_2}{b_3 \times C_3 \times d_3} = \frac{C_3}{k m}$$

Где S_T - тангенциальная подача, мм/об; k - число заходов фрезы; T - осевой модуль нарезаемого колеса, мм; C_2 и C_3 -коэффициенты, зависящие от кинематики данного станка и суппорта [5, 6].

Значение коэффициента C_3 является табличным.

Существует два способа нарезания колёс: по окружности, по спирали. Более действенным методом является метод нарезания колёс по спирали, так как можно задать подачу червячной фрезы на межосевое расстояние после полного оборота заготовки ещё до начала выполнения работы, следовательно, этот метод будет быстрее, чем метод нарезание колёс по окружности. При окружном способе придётся после оборота стола с заготовкой уменьшать межосевое расстояние, что потребует дополнительные действия во время работы и увеличения такта выпуска [2].

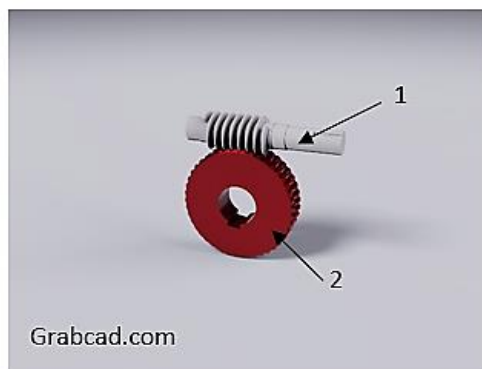


Рис. 3 3D-модель нарезания зубьев червячной фрезой (1-червячная фреза; 2-зубчатое колесо)

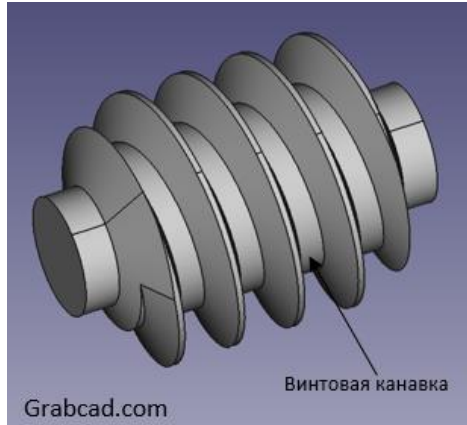


Рис. 4 3D-модель фрезы червячной

При оценке возможностей автоматизации зубофрезерного станка мы выявили, что автоматизация с внедрением ЧПУ не имеет смысла, так как это не сильно увеличит производительность, или точность станка, что не окупает затраченных средств, для автоматизации. Для производства полностью подходят полуавтоматические зубофрезерные станки, нарезающие спиральным способом и для простоты расчётов можно использовать САРР-системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чепуров М. С., Жуков Е. М., Схиртладзе А. Г., Оборудование с ЧПУ машиностроительного производства / - Старый Оскол: ТНТ, 2018. - 248 с.
2. Чепчуров М.С. Табекина Н.А. Снижение временных затрат при получении изделий на прутковых полуавтоматах с устройством сортировки. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 6 (113). С. 64-72.
3. Чепчуров М.С. Табекина Н.А. Вороненко В.П. Контроль геометрических параметров в технологической системе на базе автоматов продольного точения. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 89-95.
4. Чепчуров М.С. Феофанов. А.Н. Управление специальным станочным модулем при восстановительной обработке поверхностей

крупногабаритных деталей. Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2012. № 11. С. 03-06.

5. Гомельский М.В. Расчёт технических характеристик металлорежущих станков. Тольятинский политехнический институт, 2000 Тольяти.

6. Тихомиров Р.Н. Жарков В.Н. Обоснование технических характеристик приводов металлорежущих станков. Владимирский государственный университет, Владимир 2002.

УДК 67.02

Иванов Б.Г., Морозов Д.В., Поляков С.А.

Научный руководитель: Воронин К.П., канд. техн. наук, доц.

*Военно-морской политехнический институт Военный учебно-научный центр
Военно-Морского Флота «Военно-морская академия
им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова»,
г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Россия*

ПРИБЛИЖЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕТАЛЛООБРАБОТКИ НА СУДОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Приближенная модель является результатом построения четкого формального (математического) описания технологического процесса с необходимой степенью точности [1].

Так как математическая модель является системой соотношений, определяющих зависимость характеристик процесса от его параметров и времени, то первым делом следет решить задачу о выборе характеристики процесса (функции цели, критерия оптимизации) и системы параметров. Характеристика процесса должна удовлетворять следующим требованиям:

- измеряла эффективность технологического процесса;
- была количественной, однозначной и статистически эффективной;
- должна иметь простой и ясный физический смысл;
- иметь ограниченную область определения и экономическую природу.

Следует отметить взаимосвязь энергетических и технологических режимов в большинстве производственных процессов машиностроения и металлообрабатывающих предприятий. [2]. Как правило оптимальный энергетический режим достигается максимальной

производительностью технологического оборудования при минимальных удельных расходах энергии. Следовательно, действительный удельный расход энергии является обобщающим показателем технико-экономического уровня (энергоэффективности) производства в целом[3]. По этой причине в статье в качестве характеристики технологического процесса выбран удельный расход электроэнергии поточной линии производства изделий, как удовлетворяющий всем изложенным выше требованиям.

Исполнять роль входных переменных могут следующие величины:

– вектор - функция суммарных объемов обрабатываемого материала

$$\bar{Z} = (Z_{3Г}; Z_{из3}; Z_{д}), \quad (1)$$

где $Z_{3Г}$; $Z_{из3}$; $Z_{д}$ - суммарные объемы заготовок, изделий, деталей соответственно, т;

– вектор - функция скоростей подачи станков

$$\bar{u} = (u_1; u_2; u_3; u_4) \quad (2)$$

– среднечасовые производительности $A_0(t)$ и $A_3(t)$ поточной линии по объему обработанного сырья за суммарное операционное T_0 и эффективное T_3 время соответственно;

– общий объем электроэнергии $W_0(t)$ и $W_3(t)$ на технологические операции за суммарное операционное и эффективное время соответственно.

Тогда математической моделью технологического процесса металлообработки могут служить соотношения вида

$$d_0(t) = f_1(t, \bar{Z}, \bar{u}, A_0, W_0); \quad (3)$$

$$d_3(t) = f_2(t, \bar{Z}, \bar{u}, A_3, W_3). \quad (4)$$

В действительности модель получается весьма громоздкой, её получение оказывается весьма трудоемким делом из-за того, что выходные характеристики технологического процесса являются явными функциями от его входных переменных и времени. Для того, чтобы построение математической модели для каждой операции не представляло особого труда технологический процесс металлообработки разделяется на ряд различных видов обработки

(литье, термическая обработка, механическая обработка, обработка давлением)

В таком случае:

1. Литье

Характеристики операции:

- время заливки $\tau_{\text{ЛИТ}}$ одной отливки;
- среднечасовая производительность $A_{Э1}$ при заливке одной отливки;
- среднечасовая потребляемая мощность $P_{Э1}$ плавильной печи;
- потребляемая электроэнергия $W_{\text{ЛИТ}}$ за время заливки одной отливки.

Параметры операции:

- скорость заливки u_1 станка;
- коэффициент энергоемкости $c_{Д1}$ электропривода станка;
- постоянная составляющая $P_{\text{Д.ПОСТ1}}$ потребляемой мощности двигателя ротора;

2. Термическая обработка

Характеристики операции:

- время термообработки $\tau_{\text{ТЕР}}$ одного изделия;
- среднечасовая производительность $A_{Э2}$ при термообработке одного изделия;
- среднечасовая потребляемая мощность $P_{Э2}$ печи, используемой при термообработке;
- потребляемая электроэнергия $W_{\text{ТЕР}}$ за время термообработки одного изделия.

Параметры операции:

- скорость термообработки u_2 одного изделия;
- коэффициент энергоемкости $c_{Д2}$ электропривода механизма термообработки;
- постоянная составляющая $P_{\text{Д. ПОСТ2}}$ потребляемой мощности печи, используемой при термообработке;

3. Механическая обработка

Характеристики операции:

- время обработки $\tau_{\text{МЕХ}}$ одного изделия;
- среднечасовая производительность $A_{Э3}$ при обработке одного изделия;
- среднечасовая потребляемая мощность $P_{Э3}$ двигателя ротора станка;

– потребляемая электроэнергия $w_{\text{МЕХ}}$ за время обработки одного изделия.

Параметры операции:

- скорость подачи u_3 режущего инструмента;
- коэффициент энергоемкости $c_{\text{ДЗ}}$ электропривода станка;
- постоянная составляющая $P_{\text{Д.ПОСТ3}}$ потребляемой мощности двигателя ротора;

4. Обработка давлением

Характеристики операции:

- время прессования $\tau_{\text{ДАВ}}$ одного изделия;
- среднечасовая производительность $A_{\text{Э4}}$ при прессовании одного изделия;
- среднечасовая потребляемая мощность $P_{\text{Э4}}$ двигателя пресса;
- потребляемая электроэнергия $w_{\text{ДАВ}}$ за время прессования одного изделия.

Параметры операции:

- скорость прессования u_4 пресса;
- коэффициент энергоемкости $c_{\text{Д4}}$ электропривода пресса;
- постоянная составляющая $P_{\text{Д.ПОСТ4}}$ потребляемой мощности двигателя пресса;

Указанные характеристики и параметры операций связаны между собой следующими соотношениями

$$\tau_{\text{ЛИТ}} = L/u_1; \tau_{\text{ТЕР}} = L/u_2; \tau_{\text{МЕХ}} = L/u_3; \tau_{\text{ДАВ}} = L_{\text{СР}}/u_4, \quad (5)$$

$$A_{\text{Э1}} = V_{\text{БВ}}/\tau_{\text{ЛИТ}}; A_{\text{Э2}} = V_{\text{БВ}}/\tau_{\text{ТЕР}}; A_{\text{Э3}} = V_{\text{БС}}/\tau_{\text{МЕХ}}; A_{\text{Э4}} = V_{\text{Д}}/\tau_{\text{ДАВ}}, \quad (6)$$

$$P_{\text{Э1}} = c_{\text{Д1}}\sqrt{A_{\text{Э1}}} + P_{\text{Д.ПОСТ1}}; P_{\text{Э2}} = c_{\text{Д2}}\sqrt{A_{\text{Э2}}} + P_{\text{Д.ПОСТ2}}; \quad (7)$$

$$P_{\text{Э3}} = c_{\text{Д3}}\sqrt{A_{\text{Э3}}} + P_{\text{Д.ПОСТ3}}; P_{\text{Э4}} = c_{\text{Д4}}\sqrt{A_{\text{Э4}}} + P_{\text{Д.ПОСТ4}}; \quad (8)$$

$$w_{\text{ЛИТ}} = P_{\text{Э1}}\tau_{\text{ОК}}; w_{\text{ТЕР}} = P_{\text{Э2}}\tau_{\text{РАС1}}; w_{\text{МЕХ}} = P_{\text{Э3}}\tau_{\text{РАС2}}; w_{\text{ДАВ}} = P_{\text{Э4}}\tau_{\text{ОБР}}. \quad (9)$$

Суммарные характеристики технологического процесса связаны с характеристиками отдельных операций следующими соотношениями

$$T_{\text{Э1}} = \sum_{i=1}^N \tau_{\text{ЛИТ}}^{(i)}; T_{\text{Э2}} = \sum_{i=1}^N \tau_{\text{ТЕР}}^{(i)}; T_{\text{Э3}} = \sum_{i=1}^N \tau_{\text{МЕХ}}^{(i)}; T_{\text{Э4}} = \sum_{i=1}^N \tau_{\text{ДАВ}}^{(i)}; \quad (10)$$

$$T_{\text{Э}} = T_{\text{Э1}} + T_{\text{Э2}} + T_{\text{Э3}} + T_{\text{Э4}} \quad (11)$$

$$W_{\text{Э1}} = \sum_{i=1}^N w_{\text{ЛИТ}}^{(i)}; W_{\text{Э2}} = \sum_{i=1}^N w_{\text{ТЕР}}^{(i)}; W_{\text{Э3}} = \sum_{i=1}^N w_{\text{МЕХ}}^{(i)}; W_{\text{Э4}} = \sum_{i=1}^N w_{\text{ДАВ}}^{(i)}; \quad (12)$$

$$W_{\text{Э}} = W_{\text{Э1}} + W_{\text{Э2}} + W_{\text{Э3}} + W_{\text{Э4}}; \quad (13)$$

Тогда характеристики технологического процесса имеют вид

$$d_э = \frac{W_э}{Z_{БВ}}; \quad d_o = \frac{W_o}{Z_{БВ}}; \quad A_0 = \frac{Z_{БВ}}{T_0} \quad (14)$$

Указанные соотношения являются приближенной моделью технологического процесса металлообработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аксенов В.А., Евсеев Д.Г., Фомин В.А. Технологические процессы механообработки и сборки при ремонте подвижного состава. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2001. – 520 с.
2. Полетаев В. А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2006. 255 с.
3. Еремина, Ю.А. Предпосылки к созданию методики обеспечения точности обработки мало жестких деталей (МЖД) на основе результатов численного моделирования / Ю. А. Еремина, А. В. Щеняцкий // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. - № 2(50). – С. 59-62.

УДК 62-526

Одобеско И.А., Прокопов М.В.

Научный руководитель: Чепчуров М.С., д-р техн. наук, проф.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРУДЕРОМ ДЛЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Аддитивные технологии – технологии послойного наращивания материала при помощи систем компьютерного моделирования. Существует несколько методов 3D печати, однако все они являются производными аддитивной технологии производства изделий [1]. Вне зависимости от того, какой 3D принтер вы используете, построение заготовки осуществляется путем послойного добавления сырья. Несмотря на то, что термин аддитивные технологии используется отечественными инженерами очень редко, технологии послойного синтеза фактически оккупировали современную промышленность [2].

Укладка материала при получении малых архитектурных форм и архитектурных модулей при использовании промышленного робота, являющегося основой программно – аппаратного комплекса

аддитивной печати, выполняется поочерёдной укладкой слоёв строительного материала, с постепенным наращиваем высоты изделия. Т. е. первым укладывается базовый слой, затем, по мере его схватывания, следующий и т.д. При этом, формирование объёма изделия происходит в соответствующей плоскости. Построение модели перемещения укладки строительной смеси антропоморфным роботом необходимо для генерации программ управления приводами перемещений его соответствующих механизмов [3].

По оси Z перемещения выполняются только при переходе к укладке следующего слоя, профиль изделия формируется в плоскости XU . Шаг перемещения по вертикальной оси связан только с технологическими параметрами процесса, т.е. определяется требуемой высотой слоя укладываемого материала, которая в свою очередь зависит от реологических свойств материала, что устанавливается экспериментальным путём [4].

Перемещения рабочего органа в плоскости XU могут иметь линейную или круговую траекторию, полная траектория перемещения рабочего органа может иметь как линейные, так и круговые участки, полный охват траекторий промышленным роботом указан на (рисунок 1).

Особенностью формирования траектории рабочего органа является то, что она является осью стека формируемого экструдером из строительного материала, как это представлено на (рисунок 2), только для перемещения вдоль оси X со скоростью v [5].

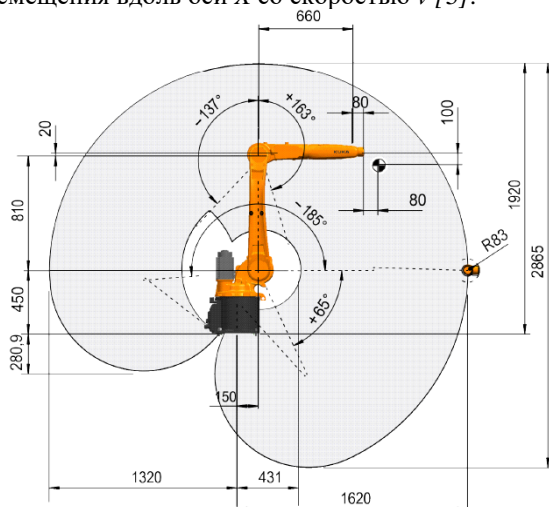


Рис. 1. Схема расположения зон доступа промышленного робота

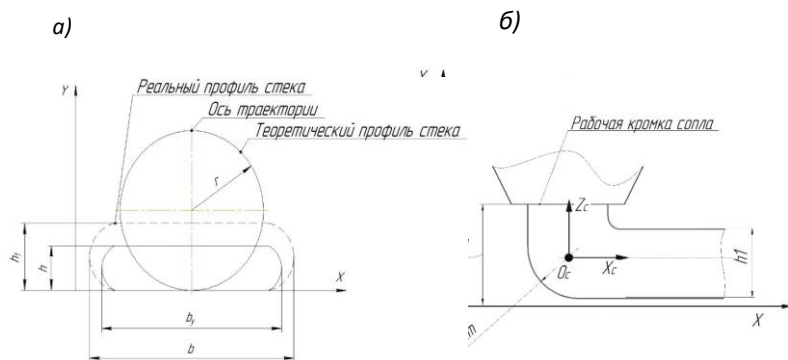


Рис. 2. Схема укладки материала по траектории с формированием стека в поперечном и продольном направлениях



Рис. 3. График зависимости массы стека экструдированного материала от скорости перемещения рабочего органа

Анализ взаимозависимостей технологических параметров показал, что наиболее приемлемым является материал с плотностью $1,95 \text{ т/м}^3$. Технологические режимы перемещения рабочего органа изменялись со скорости 100 мм/мин до 240 мм/мин с шагом в 10 мм/мин, что позволило получать качественные слои изделия. Также эксперименты показали, что основной упор стоит сделать на полимерные композитные материалы с различными металлическими или неметаллическими добавками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ян Гибсон, Brent Staker, Давид Розен. Технологии аддитивного производства Из – во Питер, СПб, 2017, 136 с., ISBN 970 - 4 - 491 - 02031 - 2.
2. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. Из – во Питер, СПб, 2016, 400 с., ISBN 978 - 5 - 496 - 02049 - 7.
3. Чепчуров М.С., Любимый Н.С., Четвериков Б.С., Зубенко И.Н., Одобеско И.А. Реализация способа аддитивной печати реактопластами с использованием двухкомпонентной печатной смеси // Технологии аддитивного производства. 2019. Т. 1. №1. С. 36–46.
4. KUKA System Software 8.3 – Instructions for system integrators.
5. Cherpchurov M.S., Zhukov E.M., Yakovlev E.A., Matveykin V.G. From path models to com-mands during additive printing of large-scale architectural designs. Journal of Physics: Conference Se-ries. Vol. 1015. Iss. 3. 2020. P. 110 – 121.

УДК 621.7

Позудина А.С., Матюнина А.С., Тиханов А.В.

Научный руководитель: Мельчаков М.А., канд. техн. наук, доц.

Вятский государственный университет, г. Киров, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ИМПУЛЬСА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СИЛЫ ТОКА НА ЗНАЧЕНИЯ ТВЕРДОСТИ СТАЛИ У10А

В современном производстве холодная листовая штамповка является одной из самых эффективных и востребованных технологий. Механические свойства материала, который используется в создании матриц и пуансонов формовочных штампов, на прямую влияет на качество производимых изделий, поэтому в настоящее время увеличение цикла работы данных деталей и термическое упрочнение поверхности с соблюдением точности размеров являются актуальными задачами в области машиностроения [1...2]. При изготовлении пуансонов для холодной листовой штамповки применяют углеродистые стали пониженной прокаливаемости, которые обеспечивают высокую твердость на поверхности детали, сохраняя при этом вязкую сердцевину. Инструментальная углеродистая сталь У10А удовлетворяет необходимым требованиям к материалу пуансона, поэтому часто используется при производстве [3].

Данная работа посвящена исследованию оптимальных режимов
л
а

С целью создания наиболее эффективного технологического режима лазерного модифицирования поверхности детали была проведена серия экспериментов. Опыты заключались в проведении лазерного упрочнения образца цилиндрической формы, изготовленного из стали У10А с исходной твердостью 650 НV твердотельным лазером W200 с шириной импульса 9,9 мс и лазерным пятном в фокальной плоскости 0,8 мм [4].

Для исследования процесса модифицирования поверхностных слоев на деталях импульсным лазерным излучением проведен анализ полученных данных. В качестве факторов, влияющие на показатели твердости и глубины прокаливания, были выбраны сила тока и частота импульса. Режимы предварительного исследования лазерного термоупрочнения приведены в (таблице 1).

Таблица 1 – Режимы предварительного исследования лазерного термоупрочнения

Р О В а н д и с	Сила тока, В А																	
	Часто та, Гц																	

Диаметр отпечатка $d_{отп.}=1$ мм, коэффициент перекрытия $K_{перекр.}=0,5$ и время импульса $t=2,0$ мс скорость обработки $V=1500$ мм/мин являются постоянными величинами. Результаты эксперимента приведены в таблице 2).

Таблица 2 – Результаты зависимостей твердости от частоты импульса и силы тока

С Г и	Сила тока, А	Частота, Гц	Твердость поверхностного слоя, НV	Глубина слоя, мм
для повышения прочности оснастки для сталей пониженной прокаливаемости.				

Из полученных экспериментальных значений следует, что существует зависимость между силой тока и частотой обработки. При силе тока равной 30 А и увеличении частоты обработки наблюдается закономерное увеличение откликов, при 60 А и постепенному уменьшению частоты наблюдается тот же эффект увеличения значений твердости и глубины прокаливаемого слоя.

Из проведенных опытов можно выделить два наиболее оптимальных режима лазерной обработки стали У10А, представленных в (таблице 3).

Таблица 3 – Оптимальные режимы лазерного модифицирования поверхностного слоя стали У10А

№	Сила тока, А	Частота обработки, Гц	Время импульса, мс	Диаметр отпечатка, мм	Коэффициент перекрытия	Скорость обработки, мм/мин

Данные режимы позволяют получить наибольшие значения глубины прокаливаемого слоя и твердости поверхностного слоя. Для первого режима эти значения полученных результатов равны 0,094 мм и

режимы позволяют увеличить цикл работы пуансонов за счет увеличения предела прочности, который имеет прямую зависимость от значения твердости [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дзеник, А. Д. Совершенствование проектирования и изготовления пуансонов и матриц / А. Д. Дзеник, Р. В. Гавариев // Научно-методический электронный журнал Концепт. – 2017. – № Т39. – С. 1171-1175. – EDN ZBGLJR.

2. Технологии производства штампов листовой и объемной штамповки: учебное пособие / Л. Л. Григорьев [и др.]; М-во образования и науки Российской Федерации, Балтийский гос. технический ун-т "Военмех". – Санкт-Петербург: БГТУ, 2009. – 191 с. – ISBN 978-5-85546-492-4. – EDN QNCNMN.

3. Костромин, С. В. Структура и свойства поверхностного слоя стали У10А после лазерной закалки / С. В. Костромин // Наука на рубеже тысячелетий. – 2013. – № 11. – С. 49-50. – EDN RZTVWF.

4. Брагин А.А. Лазерная закалка инструментальных сталей. – В сборнике: Образование, наука, производство. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015 г. – 1637-1640 с.

5. Борозинец В.Э., Костромин С.В. Исследование структуры и свойств инструментальных сталей после лазерного упрочнения. – В сборнике: Современные инновации в науке и технике. материалы 3-ой Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор Горохов А.А., 2013 г. – 28-32 с.

УДК 67.05

Поляков В.А., Чуев К.В.

***Научный руководитель: Масловская А.Н., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.
Шухова, г. Белгород, Россия***

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Технологическая оснастка согласно ГОСТ 3.1109-82 представляет из себя «средства технологического оснащения, дополняющие технологическое оборудование для выполнения определённой части

технологического процесса» [1]. Другими словами, это совокупность приспособлений, вспомогательных и иных инструментов и контрольно-измерительных приборов, призванных адаптировать существующее оборудование к регулярно меняющимся технологическим процессам. Технологическая оснастка входит в состав средств технологического оснащения (СТО), к которой также относятся технологическое оборудование (станки, сборочные стеллажи, стеллажи, контрольно-испытательное оборудование) и средства механизации и автоматизации производственных процессов (подъёмно-транспортные устройства, манипуляторы, робототехнические комплексы и т.д.). Среди этих трёх видов орудий технологическую оснастку по важности выделяют два основных фактора. Во-первых, если принять стоимость, например, металлорежущих станков за 100%, то суммарная стоимость инструментов и приспособлений без учёта КИП может стремиться к 30% при среднестатистической норме по отрасли в 10-15% [3]. Во-вторых, из 100% этапа технологической подготовки производства трудоёмкость проектирования технологической оснастки составляет до 80%, а длительность – до 90% [5].

Если говорить о структуре непосредственно самой технологической оснастки, то в ней наибольшую долю занимают приспособления. ГОСТ определяет последние как «технологическую оснастку, предназначенную для установки или направления предмета труда или инструмента при выполнении технологической операции» [1]. Если говорить более конкретно, то приспособления – это вспомогательные устройства, используемые при механической обработке, сборке и контроле изделий. Если принять весь парк приспособлений за 100%, то 80-90% [5] будут составлять станочные приспособления – дополнительные устройства к станкам, применяемые для установки и закрепления деталей. Они позволяют наиболее экономично обеспечить в заданных производственных условиях заложенные в конструкции детали требования к точности размеров, формы, и взаимного положения обрабатываемых поверхностей. Станочные приспособления должны удовлетворять следующим предъявляемым к ним требованиям:

1) Обеспечение заданной точности обработки заготовки на данной операции, т.е. погрешность обработки не должна превышать допуска на заданный геометрический параметр.

2) Получение высокой производительности при обработке заготовки и экономической эффективности от применения приспособления, т.е. предоставление наибольшего ассортимента

товаров наиболее высокого качества по минимально возможным расценкам.

3) Выполнение условий эксплуатации: соблюдение всех правил охраны труда, обеспечение удобства установки и снятия заготовки, обслуживания приспособления и т.д. [2][4].

Также стоит отметить три основные задачи, которые решаются как раз применением приспособлений и в процессе решения которых идёт подгонка технологического процесса под заданные требования:

1) Установка заготовок на станках без выверок, что подразумевает устранение связанных с разметкой и выверкой погрешностей и, как следствие, повышение точности обработки на операции.

2) Повышение производительности труда, то есть сохранение нормы штучного калькуляционного времени, рассчитываемого по формуле:

$$T_{шт.к.} = T_o + T_v + T_{тех.об} + T_{орг.об} + T_{пер} + T_{пз}/n, \quad (1)$$

где T – время: T_o – основное; T_v – вспомогательное; $T_{тех.об}$ – технического обслуживания; $T_{орг.об}$ – организационного обслуживания; $T_{пер}$ – перерывов; $T_{пз}$ – подготовительно-заключительное; n – величина партии деталей. Т.к. в общих трудозатратах на обработку наибольший удельный вес имеют основное и вспомогательное время, то и сокращать надо в первую очередь именно эти показатели. Эффект от такого сокращения можно наблюдать на графике ниже (кривые 1 и 2 отражают снижение трудоёмкости за счёт уменьшения вспомогательного времени и за счёт одновременного уменьшения основного и вспомогательного времени соответственно).

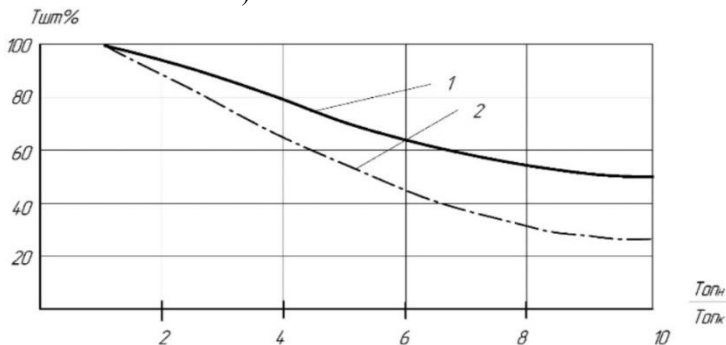


Рис. 1 Влияние уменьшения составляющих оперативного времени на трудоёмкость механической обработки ($T_{опн}$ и $T_{опк}$ – начальное и конечное оперативное время соответственно) [5]

3) Расширение технологических возможностей оборудования, что в первую очередь актуально для т.н. универсальных станков, которыми оснащаются в первую очередь предприятия, ориентированные на крупносерийное производство. Такая задача подразумевает задействование станков одного типа в совершенно разных технологических процессах. Так, изначально одношпиндельным станкам можно заменить головки на многошпиндельные и задействовать их в техпроцессах, требующих использования многошпиндельных станков.

Классифицируются приспособления по-разному в зависимости от: целевого назначения, степени специализации и степени механизации. При классификации по целевому назначению можно насчитать пять видов приспособлений. Начнём с самой многочисленной группы (до 80% от общей номенклатуры) – станочные приспособления для установки и закрепления обрабатываемых заготовок. Они в свою очередь в зависимости от вида оборудования, в котором применяются, подразделяются на токарные, фрезерные, сверлильные, расточные и т.д. Сюда же относятся приспособления спецназначения, например, для гибки или рихтовки.

Далее идут станочные приспособления для установки и закрепления рабочих инструментов. Поскольку последние характеризуются высокой степенью стандартизации, постольку эта особенность характерна и для приспособлений под них. К ним относятся патроны для свёрл, развёрток, метчиков, фрезерные/сверлильные многошпиндельные головки, инструментальные державки токарно-револьверных станков и прочие устройства. При помощи станочных приспособлений обоих видов производится наладка технологической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь».

Сборочные приспособления используются для соединения деталей в изделия. Если точнее, то они нужны для придания правильного положения соединяемых деталей, предварительного деформирования (если речь идёт о пружинах или разрезных кольцах), а также для запрессовки, развальцовки, клёпки и других операций, требующих приложения значительных усилий.

Последними идут контрольные приспособления и приспособления для захвата, перемещения и перевёртывания заготовок и деталей. Контрольными называются приспособления, применяемые для проверки заготовок при промежуточном и окончательном контроле деталей, а также при сборе машин.

По степени специализации станочные приспособления подразделяют на три основные группы: универсальные, переналаживаемые, специальные. К универсальным (УП) относят приспособления, действующие в обработке деталей и заготовок разных форм и габаритов в единичном и мелкосерийном производстве. Будучи устройствами, расширяющими возможности станков, они между собой подразделяются на стандартные (изготавливаемые централизованно), и специальные (изготавливаемые под определённый тип, пусть и разных размеров). Отдельно выделяются универсальные безналадочные приспособления (УБП), используемые для закрепления заготовок широкой номенклатуры и различной конфигурации.

Переналаживаемые приспособления включают в себя универсально-наладочные (УНП), универсально-сборные (УСП), специализированные наладочные (СНП) и сборно-разборные приспособления (СРБ). Общее назначение всех четырёх видов заключается в обработке деталей разных типоразмеров, при этом в силу ограниченной универсальности близких по конструктивно-технологическим признакам, что предопределяет их использование в мелкосерийном и среднесерийном производстве.

Специальные приспособления (СП) предназначены для выполнения строго определённых технологических операций, представляя из себя переналаживаемые приспособления одноцелевого типа. СП применяются в крупносерийном производстве, в условиях которого возможно вкладываться в групповые переналаживаемые приспособления для одновременной обработки группы деталей. При необходимости освоения производства нового изделия необходимо проектировать и изготавливать под него и новые приспособления, что занимает до 80% длительности цикла технологической подготовки производства [5].

Проектирование приспособлений в сути своей теснейшим образом сопряжено с разработкой технологического процесса изготовления. Конструктор приспособлений в своей работе опирается на техзадание, разработанное технологом на основе операционных карт и эскизов, куда входят: выбор заготовки, её масса и материал, способ её получения, схему установки обрабатываемой заготовки, последовательность обработки поверхностей, точность выполняемых геометрических параметров, название и вид приспособления, применяемый станок, режим работы (резание, обдирка и т.д.). Из этих данных впоследствии составляется принципиальная схема необходимого приспособления пример такой схемы приведён на (рисунке 2) [4].

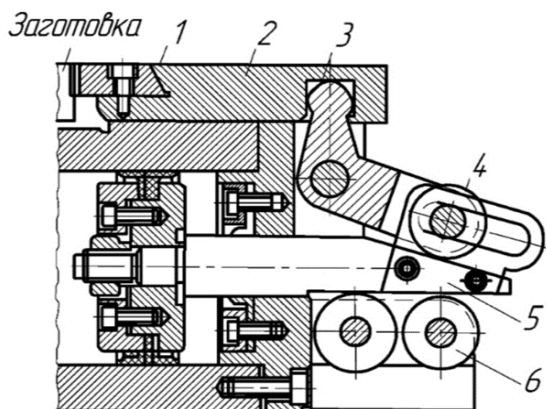


Рис. 2 Станочное приспособление «Зажим рычажный», состоящее из 1 – плавающего зажимного кулачка на ползуне, 2 – ползуна, 3 – передающего рычага, 4 – опорного ролика рычага, 5 – штока, 6 – опорного ролика штока [5]

Работа конструктора приспособлений крайне важна по причине того, что, сохраняя предложенную технологом схему, ему ещё нужно разработать и проанализировать ряд вариантов конструкции, из них выбрать тот, который в наибольшей степени отвечает всем требованиям выполнения операции, а также технико-экономическим расчётам. Также конструктору нужно иметь под рукой все необходимые исходники и вспомогательные материалы, как-то: рабочие чертежи детали и исходной заготовки, операционная карта с эскизом обрабатываемой заготовки на данной операции со схемой базирования и закрепления, годовую программу выпуска деталей, альбом типовых конструкций приспособлений и так далее. Работу по конструированию облегчают развитые системы автоматизированного проектирования, представленные как иностранным (напр. AutoCAD), так и отечественным продуктом (напр. Компас-3D) [6]. Последний умеет работать непосредственно как с ЕСКД, ЕСТД и СПДС, так и с международными стандартами, а также имеет гигантский ассортимент как встроенных, так и загружаемых библиотек типовых конструкций, в том числе, и технологической оснастки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 3.1109-82 «Единая система технологической документации (ЕСТД). Термины и определения основных понятий (с Изменением №1) : ГОСТ от 30 июля 1982 г. №3.1109.82 / Единая

система технологической документации. Сборник ГОСТов. – Текст: электронный // АО «Кодекс». – Москва, 2012. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012103> (дата обращения: 05.05.2022).

2. Надеин, В. В. Проектирование технологической оснастки на основе проведения лабораторных работ по курсу «Обработка конструкционных материалов» / В. В. Надеин. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2019. — № 35 (273). — С. 138-141. — URL: <https://moluch.ru/archive/273/62252/> (дата обращения 05.05.2022).

3. Проектирование технологической оснастки / ОГАУ. – Текст : электронный // StudFiles.net. – 2019. – 27 авг. – URL: <https://studfile.net/preview/9041445/page:14/>

4. Проектирование технологической оснастки: Учебник / А. П. Шулепов, В. А. Шманев, И. Л. Шитарев. Под общей редакцией А. П. Шулепова. Самар, гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1996. 332 с. ISBN 5-230-16991-5. – Текст: непосредственный (дата обращения: 07.05.2022).

5. Тарабарин, О. И. Проектирование технологической оснастки в машиностроении : учебное пособие / О. И. Тарабарин, А. П. Абызов, В. Б. Ступко. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 304 с. — ISBN 978-5-8114-1421-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/211214> (дата обращения: 07.05.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

6. Чепчуров, М. С. Оценка состояния оборудования технологической системы на основе расчетов напряженно-деформированного состояния / М. С. Чепчуров, В. Я. Дуганов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2016. – № 11. – С. 20-23. – EDN WZJOWR.

УДК 621.3.0

Саранчук И.А., Сафонов М.С., Рязанцев В.Г.

Научный руководитель: Герасимов М.Д., канд. техн. наук, доц.

***Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия***

СВЕРХТОНКИЙ ПОМОЛ МАТЕРИАЛОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ С ПОМОЩЬЮ РЕАКТОРА РОТОРНО-ВИХРЕВОГО ТИПА

Измельчение материалов резко активизируется в водной среде, что связано с эффектом адсорбционного понижения прочности материала,

выражающегося в развитии различных дефектов при меньших напряжениях. В результате размолоспособность материалов в водной среде повышается на 15—20 % и полностью устраняется агломерация. Измельчение в водной среде получило широкое распространение при приготовлении цементных сырьевых шихт.

По степени крупности помол бывает 4х типов:

- 1) грубый – 1000...500 мкм,
- 2) средний – 500...100 мкм,
- 3) тонкий помол – 100...40 мкм,
- 4) сверхтонкий помол – <40 мкм. [1]

Измельчение осуществляют поэтапно, последовательным дроблением и размолом в мельницах различных типов. Измельчение — дорогой и высокоэнергоемкий процесс.

В данной статье проводится методика проведенных работ по сверхтонкому помолу шихты в водной среде. Используется установка – реактор роторно-вихревого типа конструкции ООО «ПромЭко», Индустриальный партнёр БГТУ им. В.Г. Шухова, со следующими параметрами, (таблица 1).

Таблица 1 – Технические характеристика реактора роторно-вихревого типа (РРВТ)

Параметры РРВТ					
Напряжение сети, В	Частота, Гц	Мощность, кВт	Рабочий ток, А	Производительность, м ³ /ч	Диаметр рабочей камеры, мм
38	50	12-20	80-90	15	104



Рис. 1 РРВТ, вид общий

Для облегчения тонкого измельчения применяют мокрый размол. Жидкости, хорошо смачивающие измельчаемый материал, особенно растворы поверхностно-активных диспергаторов, в присутствии электролитов проникая в микротрещины, оказывают на частицы расклинивающее действие (эффект Ребиндера), что ускоряет процесс измельчения на 30—60 % и препятствует агрегации. Мокрое измельчение позволяет получать частицы размером 0,2—1 мкм. Однако после мокрого измельчения, как правило, необходимо удалять жидкость. Для этого полученную суспензию пигмента коагулируют, вводя осадители (сульфат алюминия, жидкое стекло) или флокулянты — очень малые количества (0,001—0,5 %) полиэлектролитов (полиакриламида, гидролизованного полиакрилонитрила, карбоксиметилцеллюлозы и др.). Выпавший в осадок пигмент отфильтровывают, дополнительно промывают и сушат. Процесс сушки требует затраты большого количества тепловой энергии и сопровождается фазовым срастанием частиц, что вызывает необходимость дополнительного механического измельчения. Сушка пигментов, модифицированных ПАВ, во взвешенном состоянии в распылительных сушилках значительно снижает повторную агрегацию.

В проводимом эксперименте при участии: к.т.н., доцента Герасимова М.Д., аспиранта И. А. Саранчука, магистранта Сафонова М.С., аспиранта Рязанцева В. Г. использовались ферромагнитные элементы, (рисунок 2), размер, которых 1,6 x 25 мм, 1000 мл воды,

шихта, крупностью <1000 мкм, предоставленная сотрудниками кафедры «Промэкология» БГТУ им. В.Г. Шухова.



Рис. 2 Навеска ферромагнитных элементов.

Подготовленный материал для измельчения, имеющий исходную крупность и влажность поступил в учебно-научно исследовательскую лабораторию БГТУ им. В.Г. Шухова, научн. руководитель – к.т.н., доцент Герасимов М.Д., во влагозащитной упаковке, (рисунок 3). [5]



Рис. 3 Исходный продукт для проведения исследований

Рабочие ферромагнитные тела - гвозди и исходный материал взвешивается на весах, в соотношении: 500 г. пигмента и 1 кг иголок. Количество воды отсчитывается с помощью мерной колбы и равно 1000 мл. Проведение испытаний выполняется в специальном цилиндрическом стакане (рисунок 4) из не магнитного материала, который после загрузки иголок и материала вводится в цилиндрическое пространство корпуса РРВТ.



Рис. 4 Лабораторный стакан для проведения экспериментов



Рис. 5 Процесс пропуска материала через сито

Время выполнения операции измельчения, после включения аппарата, определяется экспериментально. Для этого периодически извлекается стакан, отбирается проба материала и вновь продолжается измельчение. В результате, в течении 5-6 полученных проб, достигается получение оптимального времени измельчения.

После всех проделанных процедур, содержимое из стакана выливается в емкость для последующего отбора пробы, (рисунок 5).

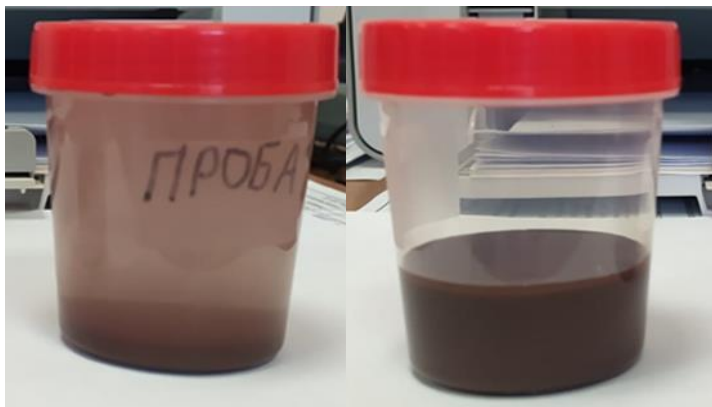


Рис. 6 Образцы полученных проб: а) – начальная стадия осаждения, б) – после слива воды.

Из полученного материала были отобраны 2 пробы в специальные бюксы: первый - сразу после наполнения емкости и второй - по истечении 5 минут, после отстаивания и слива воды, рис.6..

Полученный материал отправлен на обработку в лабораторию Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, для получения результатов измельчения.

Проведенные исследования и отработанная методика их проведения относятся к мокрому помолу. Целесообразно проведение эксперимента сухим способом помола.

Работа выполнена совместно с сотрудниками кафедры «Промэкология» БГТУ им. В.Г. Шухова в соответствии с планом магистерской и аспирантской работы авторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адошев, А. И. Выбор конструкции индуктора ферровихревого аппарата / А. И. Адошев // Методы и технические средства повышения

эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве: сб. науч. тр. - Ставрополь: Издательство Ставропольского государственного университета, 2009. - С. 72- 77.

2. Вершинин Н.П. Установки активации процессов. Иноватор. Ростов-на-Дону.2004г. - 96 с.

3. Гиль Н. А., Жаров В. П., Смехунов Е. А. Факторы конструктивной оптимизации процессов в аппаратах вихревого слоя. Вестник Донского государственного технического университета. 2015, №3(82), 73-80

4. Деревянкин Н. А. Аппараты с вихревым слоем в химической технологии. Обзорная информация. Химическое и нефтеперерабатывающее машиностроение / Н. А. Деревянкин, З. А. Михалёва. — Тамбов, 1989. — 37 с.

5. Кардашев Г. А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г. А. Кардашев. — М.: Химия, 1990. — 205 с.

6. Мищенко М.В., Боков М.М., Гришаев М.Е. Активация технологических процессов обработки материалов в аппаратах с вращающимся электромагнитным полем. Фундаментальные исследования № 2,2015. С. 3508 – 3512.

7. Герасимов М.Д., Локтионов И.О. Технологические решения двойного назначения. Перспективы применения. Вектор ГеоНаук. 2019. Том 2. №1. С. 19 – 26

8. Герасимов М. Д. Алиматов Б. А., Локтионов И. О., Тожиев Р. Ж., Садуллаев Х. М. Повышение эффективности процессов извлечения ценных металлов из отходов ГОК. Материалы международной конференции «Актуальные проблемы внедрения инновационной техники и технологий на предприятиях по производству строительных материалов, химической промышленности и в смежных отраслях». Фергана, 2019, 24-25 мая, 517 с., С. 300-303.

9. Ноу-Хау. № 20190001, от 28.01.2019. Способ определения эффективной вязкости обрабатываемой смеси в аппарате вихревого слоя. Авторы: Герасимов М.Д., Локтионов О.Г., Локтионов И.О., Рязанцев В.Г.

10. Герасимов М.Д., Локтионов И.О., Локтионов О.Г. Результаты сверхтонкого измельчения материалов в реакторе роторно-вихревого типа. Энергосберегающие машины, оборудование и экологически чистые технологии в дорожной и строительной отраслях БГТУ им. В.Г. Шухова. - Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. - С 60-66.

*Слезкин Д.В., Кучиев Р.Н., Кириченко А.В.
Научный руководитель: Архипова Н.А., доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «ПЛИТА НИЖНЯЯ»

Под основной целью технологического процесса или его элемента обычно понимается обеспечение заданных характеристик качества изделия наиболее производительным путем при минимальных затратах. Отсюда вытекает необходимость в построении двух главных критериев оптимальности: максимальной производительности и минимальной себестоимости.

Полученные значения режимов резания необходимо оптимизировать, построив математическую модель.

Для расчета оптимальных значений режимов резания с использованием методов линейного программирования вводим технические ограничения и оценочную функцию приводим к линейному виду логарифмирования.

В качестве оценочной функции при оптимизации по двум параметрам n и S необходимо использовать максимальную производительность:

$$F_{min} = \frac{L}{n \cdot S}, \quad (1)$$

Из формулы следует, что максимальную производительность можно достичь при максимальных значениях частоты вращения шпинделя и подачи.

Технические ограничения выводим на основе известных зависимостей, при этом можно выделить 3 основные группы:

1. Ограничения по техническим характеристиками станка

1.1. Ограничение по мощности электродвигателя привода главного движения определим из условия

$$N_{эф} \leq \eta N, \quad (2)$$

где: $N_{\text{эф}}$ – эффективная мощность, затрачивая на процесс резания, кВт; N – мощность привода главного движения станка, кВт; η – КПД кинематической цепи от электродвигателя к инструменту.

Эффективная мощность, затрачивая на процесс резания определяется по формуле:

$$N_{\text{эф}} = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60}, \quad (3)$$

где: P_z – сила резания, определяется по формуле:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^n \cdot S_z \cdot B^x \cdot z_p \cdot K_m}{D^q \cdot n^w}, \quad (4)$$

Произведя соответствующие преобразования, аналогичные первому ограничению, получим:

$$S_z^y n^{1-w} \leq \frac{1020 \cdot 1000^3 \cdot 60 \cdot N \cdot \eta}{10 \cdot C_p \cdot t^n \cdot B^x \cdot D^{1-q} \cdot \pi \cdot z_p \cdot K_p}, \quad (5)$$

Прологарифмируем данное выражение:

$$y \ln(100S) + (1 - w) \ln(n) \leq \ln \left[\frac{1020 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot N \cdot \eta}{10 \cdot C_p \cdot t^n \cdot B^x \cdot D^{1-q} \cdot \pi \cdot z_p \cdot K_p} \right], \quad (6)$$

Введем обозначения:

$$x_1 = \ln(100S); \quad x_2 = \ln(n) \text{ и } b_1 = \ln \left[\frac{1020 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot N \cdot \eta}{10 \cdot C_p \cdot t^n \cdot B^x \cdot D^{1-q} \cdot \pi \cdot z_p \cdot K_p} \right], \quad (7)$$

получим выражение:

$$y \cdot x_1 + (1 - w)x_2 \leq b_1, \quad (8)$$

1.2. Ограничение по прочности механизма подачи станка. Суммарная сила сопротивления перемещению стола P_h должна быть меньше или равна нагрузке P_s , допускаемой прочностью механизма подачи станка:

$$P_h \leq P_s, \quad (9)$$

Сила подачи Ph при фрезеровании определяется в зависимости от окружной силы Pz в виде Ph/Pz=k, тогда:

$$n^{-w} \cdot S_z^y \leq \frac{P_s \cdot D^q}{10 \cdot C_p \cdot t^{n \cdot B^x} \cdot z_p \cdot k_m \cdot k}, \quad (10)$$

Прологарифмируем данное выражение:

$$y \ln(100S) - w \ln(n) \leq \ln \left[\frac{P_s \cdot D^q}{10 \cdot C_p \cdot t^{n \cdot B^x} \cdot z_p \cdot k_m \cdot k} \right] \quad (11)$$

Введем обозначения:

$$x_1 = \ln(100S); \quad x_2 = \ln(n) \text{ и } b_2 = \ln \left[\frac{P_s \cdot D^q}{10 \cdot C_p \cdot t^{n \cdot B^x} \cdot z_p \cdot k_m \cdot k} \right], \quad (12)$$

получим выражение:

$$y \cdot x_1 - w x_2 \leq b_2, \quad (13)$$

1.3. Ограничение по предельным значениям величины подач:

$$\ln(S_{min}) \leq S \leq \ln(S_{max}), \quad (14)$$

1.4. Ограничение по предельным значениям частоты вращения шпинделя:

$$\ln(n_{min}) \leq n \leq \ln(n_{max}), \quad (15)$$

Ограничения по качеству обработки

1.5. Ограничение по точности обработки предусматривает назначение режимов резания, обеспечивающих обработку заготовки с допустимой точностью.

Примем допущение о том, что лимитирующей погрешностью является погрешность упругих деформаций под действием силы резания. Для контроля точности обработки примем следующее условие $u_f \leq u_{доп} \leq 0,5Td$.

Величина прогиба определяется выражением:

$$y_\phi = \frac{P_x}{\omega}, \quad (16)$$

$$S^y \cdot n^{-w} \leq \frac{T_H \cdot D^q}{10 \cdot C_p \cdot t^{n \cdot B^x} \cdot z_p \cdot k_m \cdot \omega \cdot k}, \quad (17)$$

Прологарифмируем последнее выражение

$$y \ln(100S) - w \ln(n) \leq \ln \left[\frac{T_H \cdot D^q}{10 \cdot C_p \cdot t^n \cdot B^x \cdot z_p \cdot k_m \cdot \omega \cdot k} \right], \quad (18)$$

После замены

$$x_1 = \ln(100S), x_2 = \ln(n) \text{ и } b_3 = \ln \left[\frac{T_H \cdot D^q}{10 \cdot C_p \cdot t^n \cdot B^x \cdot z_p \cdot k_m \cdot \omega \cdot k} \right], \quad (19)$$

получим выражение:

$$y x_1 - w x_2 \leq b_3, \quad (20)$$

1.6. Ограничение по шероховатости поверхности предусматривает выбор режимов резания, обеспечивающих значение шероховатости поверхности равное или меньшее требуемого. Математическое выражение шероховатости поверхности при точении имеет вид:

$$Ra = \frac{S_z \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}, \quad (21)$$

однако в этом выражении отсутствует оптимизируемый параметр n .

После преобразований получаем выражение:

$$S_z \leq 2,82 \cdot r^{0,5} \cdot Ra^{0,5}, \quad (22)$$

Для удобства вычислений введем в выражение следующие обозначения:

$$x_1 = \ln(100S), b_4 = \ln(2,82 \cdot r^{0,5} \cdot Ra^{0,5}), \quad (23)$$

Получим выражение:

$$x_1 \leq b_4, \quad (24)$$

2. Ограничения по техническим возможностям режущего инструмента

2.1. Ограничение по стойкости инструмента получаем из следующих выражений:

$$V = \frac{C_v \cdot D^{q \cdot k}}{T^m \cdot t^u \cdot S^y \cdot B^x \cdot Z^p}, \quad (25)$$

где: T- период стойкости инструмента, мин.; t – глубина резания, мм; d – диаметр заготовки, мм; C_v, m, x, y – коэффициенты, характеризующие условия обработки; K_v – поправочный коэффициент.

После преобразования получим:

$$S^y \cdot n \leq \frac{1000 \cdot C_v \cdot D^{q-1} \cdot k}{T^m \cdot t^u \cdot \pi \cdot B^x \cdot Z^p}, \quad (26)$$

Прологарифмируем данное выражение:

$$y \ln S + \ln n \leq \ln \frac{1000 \cdot C_v \cdot D^{q-1} \cdot k}{T^m \cdot t^u \cdot \pi \cdot B^x \cdot Z^p}, \quad (27)$$

Введем обозначения:

$$x_1 = \ln 100S, x_2 = \ln n, b_5 = \ln \frac{1000 \cdot C_v \cdot D^{q-1} \cdot k}{T^m \cdot t^u \cdot \pi \cdot B^x \cdot Z^p}, \quad (28)$$

получим выражение:

$$yx_1 + x_2 \leq b_5, \quad (29)$$

2.2. Ограничение по прочности режущего инструмента определим из условия:

$$\sigma_n \leq [\sigma]_n, \quad (30)$$

где: σ_n – действующие напряжения в опасном сечении державки реза; $[\sigma]_n$ – предел прочности материала державки, Мпа.

Действующие напряжения в опасном сечении реза определяются по формуле:

$$\sigma_n = \frac{M_n \cdot k_3}{W}, \quad (31)$$

где: M_{из} – изгибающий момент в месте закрепления державки от действия окружной силы P_z, Н·мм, определяется по формуле: M=P_z·L_{вп}; k₃ – коэффициент запаса, учитывающий сложное нагружение,

$k_3=1,3\dots 1,5$; W – момент сопротивления сечения державки резца, мм^3 , вычисляется по формуле: $W=(B \cdot H^2)/6$.

Подставляя данные выражения в первое неравенство и решая его относительно n и S , получим искомое ограничение:

$$n^n \cdot S^y \leq \frac{D^q \cdot [\sigma]_u \cdot W}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot z_p \cdot k_{pz} \cdot L_{вп} \cdot k_3}, \quad (32)$$

Прологарифмируем данное выражение:

$$y \ln(100S) + n \ln(n) \leq \ln \left[\frac{D^q \cdot [\sigma]_u \cdot W}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot z_p \cdot k_{pz} \cdot L_{вп} \cdot k_3} \right], \quad (33)$$

Введем обозначения:

$$x_1 = \ln(100S); \quad x_2 = \ln(n) \text{ и } b_6 = \ln \left[\frac{D^q \cdot [\sigma]_u \cdot W}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot z_p \cdot k_{pz} \cdot L_{вп} \cdot k_3} \right], \quad (34)$$

получим выражение:

$$y_p \cdot x_1 + n x_2 \leq b_6, \quad (35)$$

Полученные ограничений запишем в виде системы неравенств, добавив к ним ограничение по предельным значениям оптимизируемых параметров в логарифмической форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} y \cdot x_1 + (1 - w)x_2 \leq b_1 \\ y x_1 - w x_2 \leq b_2 \\ \ln(S_{min} \cdot 100) \leq x_1 \leq \ln(S_{max} \cdot 100) \\ \ln(n_{min}) \leq x_2 \leq \ln(n_{max}) \\ y x_1 - w x_2 \leq b_3 \\ x_1 \leq b_4 \\ y x_1 + x_2 \leq b_5 \\ y_p \cdot x_1 + n x_2 \leq b_6 \end{array} \right. , \quad (36)$$

Полученная система неравенств решается относительно оптимизируемых параметров с учетом направления экстремума целевой функции. Для вычисления расчетных значений внесем исходные данные и выражения, полученные в ходе преобразований, в приложение MathCAD.

В ходе вычислений, проведенных в приложении MathCAD, были полученные следующие значения оптимизируемых параметров $S=0,34$ мм/об и $n=504$ об/мин.

Таким образом, по результатам проведенного исследования по повышению эффективности обработки детали «Плита нижняя», определили оптимальные режимы резания, которые обеспечивают максимальную производительность и минимальную себестоимость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка технологических процессов в машиностроении: Учеб.пособие/ Л.В. Лебедев, И.В. Шрубченко, А.А. Погонин и др. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004.-177с.
2. Допуски и посадки. Справочник. В 2-х ч. Ч. 1/Под ред. В.Д. Мягкова. 5-е изд., перераб. И доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1979 – с. 544 с., ил.
3. Технология машиностроения. Ч. 1. Основы технологии сборки в машиностроении: Учебное пособие. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. – 236 с.
4. Компьютерное моделирование в системе MathCad: Учебное пособие./В. А. Охорзин – М.: Финансы и статистика, 2006. – 144 с.: ил.
5. Задачи принятия решений и оптимизации в машиностроении: учебное пособие / Т. А. Дуюн, Д. С. Баранов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. – 100 с.

УДК 621.81-022.324

Ткачев И.С, Волков В.В, Баранов Д.С.

Научный руководитель: Архипова Н.А., доц

*Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В современной машиностроительной отрасли показатели механических свойств конструкционных материалов с целью производства элементов деталей машин устанавливают путём тестирований стандартных образцов в стандартных условиях. В реальных конструкциях эти свойства не всегда проявляются в полной

мере. Из числа показателей прочности есть некоторые несоответствия, которые получаются во процессе разных тестирований [1].

Значимой особенностью в проявлении различных механических свойств материалов, реализованного в конструкцию или деталь, объединены с воздействием определенных условий: эксплуатационных, конструктивных и технологических.

Под эксплуатационными условиями определяются назначением деталей и правилами его эксплуатации [2]. Эти показатели определяют выбор использованных материалов для производимой конструкции, сборочного узла или детали.

Более современным в увеличении конструкционной прочности и снижением материалоемкости деталей необходимо достигать, включая технологические условия, которые тесно связаны с некоторыми факторами механической, термической и металлургической переработки материала.

Прочность – это свойство материала или заготовки, которое зависит от набора химического состава и структуры состояния зёрен. Показатель прочности конструкционного материала из-за деформации структурной сетки на несколько режимов ниже теоретической, которая определяется сопротивлением разрыва межатомных связей. Исходя из этого, все технологические методы увеличения конструкционной прочности материалов базируются на создании данного структурного состояния, который обеспечивает сведение к минимальному влиянию существующих дефектов, в том числе, на месте перемещений. Легирование осуществляется предварительной пластической деформацией, химико-термической, термической, термомеханической, обработок [3].

Для повышения повторяющейся прочности и износостойкости используют технологические методы поверхностного упрочнения, поверхностную закалку, химико-термическую обработку (цементацию и азотирование) поверхностное пластическое деформирование (обкатку роликами и обдвку дробью).

В настоящее время для достижения высокой конструкционной прочности часто применяются композиционные материалы, которые состоят из мягкой матрицы и высокопрочных волокон, оптимально направленных по отношению к действующему полю напряжений в детали. Композиты позволяют рационально согласовать «поля напряжений» с полями сопротивлений материала. Они обладают высокой стойкостью, так как при образовании трещин (из-за разрушения волокна) ее распределение задерживается матрицей [4].

Недостатком композитных материалов на неметаллической основе является их активное старение, сопутствующее охрупчиванием.

Принцип равнопрочности всех высоконапряженных деталей, составляющих изделие, осуществить затруднительно. Тем не менее, использование более достоверных расчетных схем в комбинации со способами оптимального конструирования является основным резервом повышения несущей способности изделия, а так-же полноценного использования свойств материала в детали. Высокие показатели использования резерва прочности материала не всегда адекватны экономическим показателям в частности стоимости изделия.

К главным правилам конструирования относят следующие:

Необходимо избегать основных концентраторов напряжений – крупных перепадов жесткостей, глубоких канавок, галтелей малого и большого радиуса. Концентрация напряжений может быть вызвана за счет дефектов материала (раковины, микротрещины), а также действием сопряженной детали, например, при использовании посадок с натягом. Повторяющаяся прочность может резко снижаться при наличии царапин на поверхности, повреждений поверхностного слоя при черновой механической обработке, травлении металла. Исходя из этого, получается, что при проектировании деталей следует обеспечивать специализированные меры по обеспечению и сохранению хорошего состояния поверхности в процессе работы деталей. Для этого применяют специальные покрытия, предотвращающие коррозию металла, водородное и другие виды охрупчивания. Некоторые виды покрытий, например, гальванические, могут снижать циклическую прочность.

В местах резких перемен размеров ступенчатых заготовок целесообразнее использовать конические переходы, эллиптические или поднутренные галтели, а так-же декомпенсаторы в виде канавок на поверхности большого размера. Кромки отверстий подвергают обчеканке или обжатию. Наилучшее расположение пятна контакта в зонах контакта сосредоточенных нагрузок добивается приданием поверхности бочкообразной формы (бомбинированием), применением смазок, созданием контактируемых поверхностей с кривизной одинакового знака, заменой пятна контакта линейным.

Степень остаточных напряжений в деталях машин, в том числе монтажных напряжений, должна быть сведена до минимального значения. Нужную несущую способность соединений с гарантированным натягом лучше обеспечивать не за счет натяга, а за счет длины контактируемых поверхностей. При этом соединяемые детали должны владеть приблизительно одинаковой жесткостью в

радиальном направлении. Для сведения к минимуму деформаций при сварке и снижения сварочных напряжений используют конструкции с симметричным положением швов, избегают их пересечения, делают сварные швы прерывистыми, не располагают их вблизи элементов жесткости [5].

Коэффициент использования металла по критериям прочности и жесткости следует значительно повысить применением оптимальных сечений с усилениями наиболее нагруженных зон (двутавровой балки), полых деталей в виде труб, коробок, тонкостенных элементов других форм, подкрепленных поперечными и диагональными связями (раскосами), ребрами или гофрами, а также второстепенных деталей. Эффективными могут оказаться сборочные узлы или конструкции, в которых несущие элементы, действующие при высоких напряжениях (на кручение и изгиб), изменены элементами, работающими на растяжение и сжатие. Иногда остаточные напряжения сжатия формируются различными способами в местных зонах для «умножения» концентрации напряжений.

Конструкции узлов, работающих при высоких или низких температурах, особенно изотермических условиях, должна исключать возможность возникновения высоких температурных векторов, отличающихся от идеальных условий и приводящих к термическим напряжениям. С данной задачей в каждой конструкции следует использовать материалы с близкими коэффициентами линейного расширения и одинаковой теплопроводностью [6].

Спад температуры эксплуатации изделия сопутствуется повышением вероятности хрупкого разрушения несущих элементов конструкции, особенно в зонах сварных швов. В этих случаях очень важно избегать высоких концентраций напряжений любой природы, применять геометрические формы конструкций, исключая работу материала при 2-х и 3-х осном растяжении, гарантировать малые запасы упругой энергии в силовых элементах. В отдельных случаях необходимо предусматривать специальные «ловушки», стопорящие развивающуюся трещину.

Из всего перечисленного можно сделать вывод, что опыты отказов машин показывают то, что резервы увеличения конструкционной прочности материалов возможны в осуществлении. Помимо развития методов расчета и рационального конструирования, главную роль имеет технологическое обеспечение установленных показателей качества и строгое соблюдение регламентируемых условий использования изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Материаловедение и технология конструкционных материалов; Академия Москва, 2009. – 448 с.
2. Производство композитных материалов в машиностроении; - Москва, 2008. – 639 с.
3. Технология судостроения; Профессия - Москва, 2003. – 344 с.
4. Гноевой А.В. Основы теории течений бингамовских сред; ФИЗМАТЛИТ/ А.В. Гноевой, Д.М. Климов, В.М. Чесноков. - Москва, 2004. – 272 с.
5. Зайцев С.А. Метрология, стандартизация и сертификация в машиностроении / С.А. Зайцев, А.Н. Толстов, Д.Д. Грибанов, А.Д. Куранов. Академия Москва, 2009. 288 с.
6. Звягольский Ю.С. Технология производства, режущего инструмента / Ю.С. Звягольский, В.Г. Солоненко, А.Г. Схиртладзе. Высшая школа - Москва, 2010. - 336 с.

УДК 621.4

Токмачёва И.С.

*Научный руководитель: Маслов И.Н., канд. техн. наук, доц.
Казанский Государственный Энергетический Университет, г.Казань, Россия*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

На данный момент весь мир стремится создать высокоэффективные и чистые с точки зрения экологии энергосистемы, которые были бы способны на удовлетворение всех нужд в энергетике при минимальных затратах материальных ресурсов. По исследованиям зарубежных специалистов, наиболее подходящим решением данного вопроса является повсеместное внедрение энергопреобразующих систем, работающих на основе двигателей Стирлинга [1].

Машины Стирлинга – это машины, работающие по замкнутому термодинамическому циклу, в котором процессы сжатия и расширения происходят при различных температурах, а управление потоками рабочего тела осуществляется через изменения его объема.

По конструкции машины представляют собой сочетание в одном массивном агрегате компрессора, детандера и теплообменных устройств (теплообменник нагрузки, регенератор и холодильник). Рабочим телом, как правило, является гелий, азот или воздух.

К преимуществам машин Стирлинга относят такие свойства, как

- энергетическая эффективность,
- многотопливность двигателей (помимо базовых источников теплоты можно использовать еще и солнечную радиацию, древесину, торф, уголь и т.д.),
- экологическая чистота рабочих тел, а также отработанных сред,
- универсальность термодинамического цикла, которая позволяет создавать преобразователи прямого и обратного циклов,
- двигатель неприхотлив, так как не портится из-за пыли, грязи и любых солей в воздухе,
- можно использовать упрощенную коробку передач с двумя-тремя передачами, так как имеется широкий диапазон.

Двигатель Стирлинга можно использовать во всех областях промышленности, где нужно преобразовывать тепловую энергию в механическую.

В качестве показательного примера рассмотрим энергетическую установку с двигателем Стирлинга, работающими на нетрадиционном газовом топливе (биогаз, свалочный газ, попутный нефтяной газ). Стирлинг-генератор мощностью 100 кВт может обеспечить электроэнергией вахтовый поселок до пятидесяти человек. Таким образом, исключается вред окружающей среде, и не нужны завозить топливо с материка [2].

Помимо преимуществ, машины Стирлинга имеют и свои недостатки по сравнению с двигателями внешнего сгорания. Среди них:

- материалоемкость, появляющаяся из-за радиаторов для охлаждения,
- высокое давление и газ с малой молекулярной массой,
- тепло не подводится к рабочему телу через стенки теплообменников, из-за чего КПД становится ниже. Теплообменник следует изготавливать из высококачественных материалов [3].

Двигатель Стирлинга очень часто используется в автомобилях. Philips 4-215 DA, наиболее известный, устанавливается на легковые автомобили. В конструкцию был добавлен внешний регенератор теплоты, через который происходит перекачка воздуха из верхней части цилиндра в нижнюю.

Проблема экологии – одна из самых важных в мире. Важность ее решения имеет преимущество почти во всех отраслях промышленности. Традиционные двигатели не соответствуют установленным требованиям экологичности. Именно двигатели Стирлинга продолжают модифицировать, так как на них возложена надежда на решение данной проблемы [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Двигатели Стирлинга. Пер. с англ. Под ред. В.М.Бродянского. М.: Мир, 1975. С. 150-155.
2. Кириллов Н.Г. Двигатели Стирлинга – технологический прорыв в автономной энергетике 21 века. 2022 <https://www.sovmash.com/node/98> (дата обращения: 25.04.2022).
3. Фаргер С.В. Актуальность двигателя Стирлинга в современном автомобильном мире. 2022 https://omgtu.ru/general_information/institutes/energy_institute/department_of_quot_thermal_quot/educational_activities_department_quot_teloenergetika_quot/uchebnyu_protsest_tekushchiy_god/bakalavriat/%D0%A4%D0%B0%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%80.pptx (дата обращения 25.04.2022).
4. Уокер Г. Двигатели Стирлинга // Двигатели Стирлинга для автомобильного транспорта. М.: Энергия, 1985. Глава 14. С. 380-382.

УДК 621.81-21

Ушаков К.А.

Научный руководитель: Чуев К.В.

*Белгородский государственный технологический университет
им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

МЕТАЛЛЫ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

На протяжении длительного периода времени неупругая деформация считалась абсолютно невозвратимым процессом. Однако в начале 60-х годов XX в. был обнаружен широкий спектр металлических материалов, в которых элементарный акт неупругой деформации осуществляется за счёт структурного превращения. В данных сплавах процесс неупругой деформации является обратимым. Процесс самостоятельного возвращения изначально заданной формы называется: Эффектом памяти формы или сокращённо - «ЭПФ»). Данное явление может наблюдаться при изменении температуры материала, а так же в изотермических условиях. При температурных изменениях металлы с эффектом памяти формы могут неоднократно подвергаться обратимым деформациям. [1]

Эффект памяти формы обладает следующими основными характеристиками:

- Марка сплава с жёстким соблюдением химического состава
- Температура мартенситных превращений

На соответствующем температурном интервале, в ходе наблюдения эффекта памяти формы фигурируют - прямое мартенситное превращение, которое возникает при деформации материала, а так же обратное, действие которого происходит при нагреве этого материала.

Если в результате брака при производстве, либо намеренно были произведены небольшие отклонения в химическом составе сплава, то это приведёт к значительному сдвигу температурных интервалов прямого и обратного превращений. Поэтому современное в металлургическое производство данных сплавов необходимо внедрять высокотехнологичное оборудование, которое позволяет соблюдать постоянство химического состава, а, следовательно, проявление эффекта памяти формы будет происходить строго в определённых интервалах температур. [2, 3]

Среди свойств металлов с ЭПФ существуют деформации ориентированного превращения и аномальный возврат деформации, имеющие большой смысл как с теоритической, так и с практической стороны. Проявление первого свойства заключается в следующем. Если нагруженное тело, подвергающееся понижению температуры, в температурном интервале прямого превращения будут сняты напряжения, то при дальнейшем охлаждении, наиболее вероятно, деформации будут нарастать, словно тело всё ещё находится под напряжением. В противном случае проявляется второе свойство - при понижении температуры наблюдается интенсивный возврат. Данный свойства возникают вследствие увеличением образовавшихся под напряжением кристаллом мартенсита положительной и отрицательной направленности.

Внутри группы материалов с ЭПФ наибольшую популярность заслужил никелид титана, так как он обладает большой сферой применения, и его свойства наиболее исследованы. Изделия из нитинола могут использоваться не только в роли средства измерения, но и исполнительного устройства, принцип действия которых основан на изменении температуры. Данный сплав высокопрочен, очень эффективно сопротивляется коррозии, обладает силой восстановления до 800 МПа, а деформирования до 8% бесследно обратимы. Так же никелид титана не наносит вреда человеческому организму, что позволяет использовать его при изготовлении сложного медицинского оборудования. [4]

Но данный материал всё же обладает и недостатками. Благодаря присутствию титана, открытому воздуху данный сплав легко окисляется, во избежание этому при производстве применяется вакуумирование. Расплатой за высокопрочность сплава является трудность обработки на металлорежущем оборудовании. Вследствие данных факторов на рубеже XX-XXI веков цена данного материала приближалась к цене серебра.

В нынешнее время производство никелида титана осуществляется в электродуговой печи с плавящимся электродом в среде инертных газов, либо вакуумно-гарнисажной печи. В качестве шихты используют брикетированный иодидный титан либо титановую губку, а так же никель Н-0 либо Н-1. Для поддержания постоянства химического состава по всему объёму получаемого слитка предлагается двойной или тройной переплав. [5]

Таблица 1 – Основополагающие свойства нитинола и прочих сплавов с эффектом памяти формы

Свойства	Стали с ЭПФ	Ti-Ni	Cu-Zn-Al
Температура плавления, °С		1300	950-1020
Плотность, г/см ³		6,5	7,8-8
Теплопроводность 20°С		6,8(м);18(А)	84-120(А)
Коэф. температур.расширения		6,6(М);11(А)	17(А);16-18(М)
Коррозионная стойкость	Высокая	Высокая	Удовл.
Биосовместимость	Хорошая	Высокая	Низкая
Предел прочности, МПа	До 1600	800-1100	400-800
Удлинение при разрыве, %	30	15,5-20(А) 40-50(М)	10-15(М)
Предел текучести, МПа	До 1100	50-300(М) 100-800(А)	150-300(М) 150-350(А)
Модуль Юнга	200	28(М) 75-80(А)	70(М) 70-100(А)
Усталостная прочность, МПа (N=10 ⁶)		350	270
Размер зерна, мкм		20-100	50-150

Мехобработка	Хорошая	Удовлетв.	Плохая
Себестоимость	Низкая	Высокая	Средняя

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бледнова Ж.М. Поверхностное модифицирование деталей материалами с эффектом памяти формы с целью обеспечения функционально-механических свойств как фактор ресурсосбережения / Ж.М. Бледнова, М.А. Степаненко // Производство и ремонт машин: Сб. науч. тр. Международ. науч.технич. конф. – Ставрополь: «Агрус» СтГАУ, 2005. – С. 11-18.

2. Хусаинов М.А., Андреев В.А., Афанасьев А.Б.и др. Механическое поведение сплав с памятью формы и их использование в технике /Вестник Новгородского государственного университета. - 2005. - №30. – С. 1-11.

3. Вольченко Д.А. Сплавы с памятью формы // Автомобильная промышленность. – 1991. – №8. – С. 30-31.

4. Солнцев Ю.П. Нанотехнологии и специальные материалы / учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140140 - Техническая физика – Санкт-Петербург: «Химиздат», 2007. С. 112-164.

5. Муслев С.А. Применение материалов с эффектом памяти формы в науке, технике и медицине / Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова – Москва: ООО «Фолиум» 2007. – С. 69-75.

УДК 62.77

Чуев К. В., Гаврилов Д.В., Мамченкова А.А., Чередников И. И.
Научный руководитель: Хуртасенко А.В., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВРАЩЕНИЯ БАНДАЖА ЦЕМЕНТНОЙ ПЕЧИ В MSC ADAMS

Бандажи состоят из одинарной литой стали, подвергаются обработке гладкой цилиндрической поверхности, которая неплотно присоединяется к обечайке печи через различные кронштейны (рисунок

1). Бандаж крепится на паре стальных роликов, обрабатывается гладкой цилиндрической поверхностью, и устанавливается почти на половину диаметра печи. Ролики должны поддерживать печь и обеспечивать безызносное вращение настолько это возможно. [1]

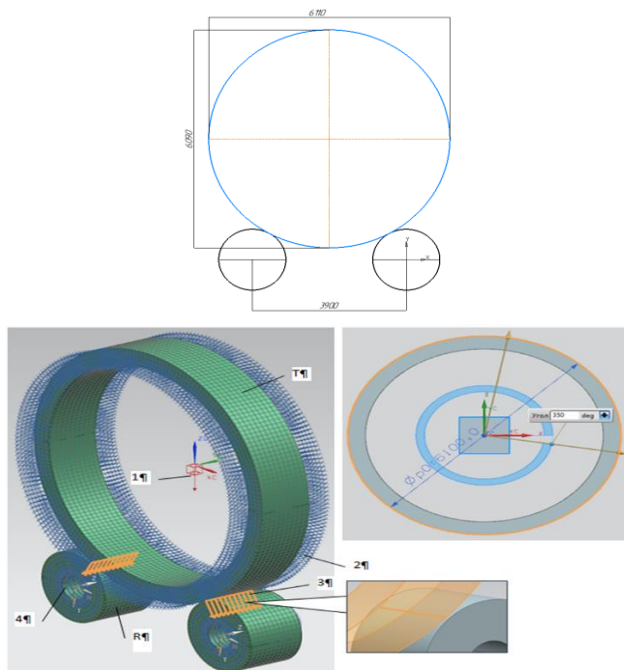


Рис. 1 Контур эллипса бандажа

В силу особенностей конструкции рассматриваемых деталей – бандажей, их размеров, и принципа базирования при эксплуатации их деформации влияют изменение пространственного положения образующих наружных поверхностей катания в процессе вращения детали [2].

Определение возможных величин и направлений отклонения образующих профиля поперечного сечения при наличии погрешности формы в виде овальности с учетом массо-инерционных характеристик позволит оценить влияние их на технологию восстановительной обработки при выборе и реализации технологических схем и параметров настройки [3,4].

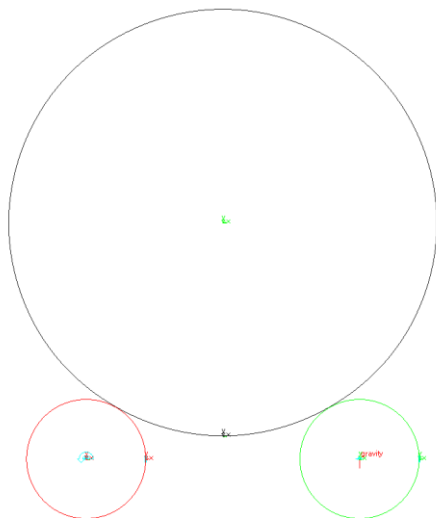


Рис. 2 Информационная модель бандажа печи в MSC Adams

Представленная модель (рисунок 2) позволяет определить характер и прогнозируемые изменения положения образующей в пространстве, связанной с определенным радиальным направлением. Это дает возможность учитывать смещения образующей в ходе наладки обрабатывающего станочного модуля при выполнении размерной настройки обрабатывающего инструмента и её корректировке для выполнения обработки поверхности бандажа, а также при проектировании конструкций станочных модулей для различных типоразмеров деталей опор и условий функционирования. Так как бандаж печи в идеальном состоянии должен быть окружностью, то изменения координат центра бандажа при его вращении не наблюдается. Для проверки адекватности модели была выбрана форма бандажа – эллипс.

Информационная модель выполнена в программном продукте MSC ADAMS [5,6] и имеет следующие характеристики. Опоры бандажа выполнены в виде полнотелых окружностей $\varnothing 1700$ мм закрепленных в пространстве, с возможностью поворота вокруг своей оси на расстоянии 3900 мм. Бандаж печи выполнен в виде полнотелого эллипса с большой осью 6110 мм и малой осью 6090 мм, который касается каждой опоры в одной точке. Опоры и бандаж передают друг другу вращения благодаря встроенной функции RevolutionJoint. К одной из опор приложено вращение, которое передается на бандаж, таки

образом теоретический центр бандажа совершает движение, показанное на (рисунке 3 и рисунке 4).

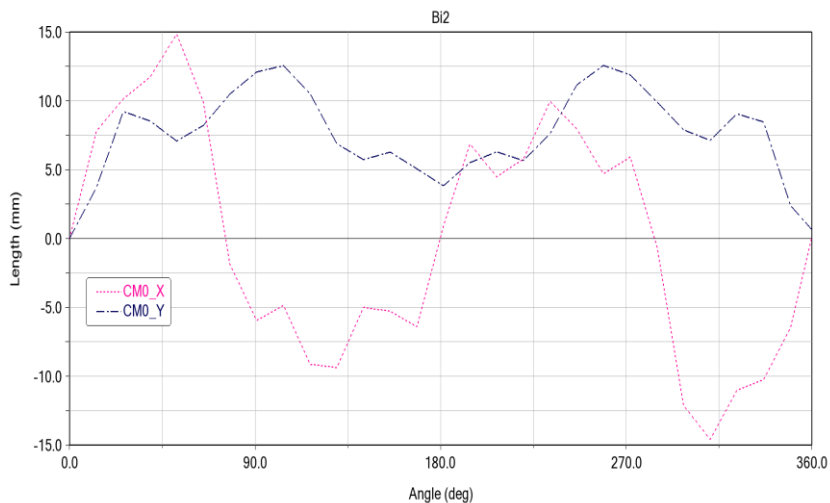


Рис. 3 Зависимость перемещения теоретического центра бандажа от поворота бандажа

Полученная в результате моделирования траектория перемещения центра бандажа, обусловлена неопределенностью его базирования на опорных роликах. Анализ полученной траектории показывает, что перемещение центра бандажа осуществляется в пределах эллипса, который имеет:

большую ось, равную 29,73 мм;

малую ось, равную 12.56 мм;

При этом имеет место смещение центра эллипса в отрицательном направлении оси CМ0_У от 75° до 180° и от 284° до 360°

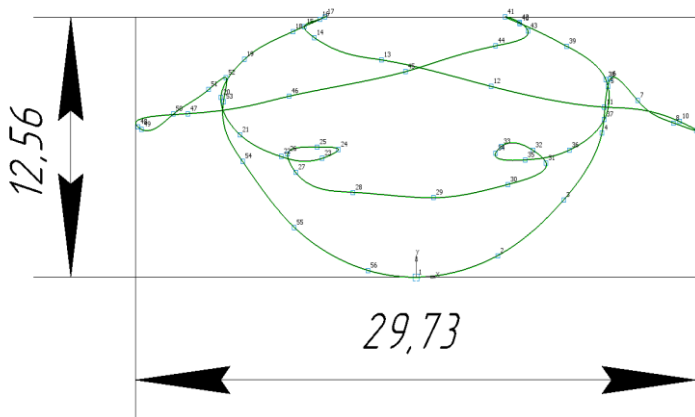


Рис. 4 Траектория перемещения теоретического центра

Данная информационная модель отличается простотой и имеет большой потенциал в научно-исследовательской работе. Вычисленные координаты траектории перемещения помогут выявить максимальные и минимальные отклонения при изменении типоразмеров исследуемого объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка и исследование способа восстановления работоспособности насадных и вварных бандажей вращающихся цементных печей в условиях эксплуатации: Отчет о НИР заключительный / Белгородский технол. ин-т стр. матер. БТИСМ; Руководитель В.Н. Бондаренко – №ГР 01850061334. – Белгород, 1985-88.: ил. – Отв. исполн. В.И. Рязанов; Соисполн. БТИСМ, А.А. Погонин, И.В. Шрубченко, А.И. Полунин и др. – Библиогр.: 106 с.

2. Хуртасенко, А.В. Технология восстановительной обработки крупногабаритных деталей с использованием методов активного контроля: Дисс. канд. техн. наук /А.В. Хуртасенко; БГТУ им. В.Г.Шухова – Белгород, 2007. – 170с.

3. Шрубченко, И.В. Некоторые особенности реконструкции бандажей вращающихся технологических барабанов с использованием мобильных технологий. / И.В. Шрубченко, А.С. Черняев, Л.В. Мурыгина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2012., №4, С. 96-99.

4. Хуртасенко А.В., Шрубченко И.В., Тимофеев С.П. Методика определения формы наружной поверхности качения опор технологических // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 3. С.85–89.

5. Чуев К. В., Дуюн Т. А., Чуева Ю. А. Имитационное моделирование динамических характеристик промышленного робота с использованием программного комплекса MSC Adams / // Всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского: Сборник докладов, Москва, 14 февраля 2020 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2020. – С. 19-23.

6. Хуртасенко А. В., Чуев К. В., Волошкин А. А, Чередников И. И., Гаврилов Д. В. Оптимизация конструктивных параметров роботизированных платформ подвижности для обучения операторов машин на тренажере и реализации требуемых траекторий / // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 4. – С. 101-115.

УДК 621.8-1/9

*Чуев К. В., Гаврилов Д.В., Мамченкова А.А., Чуева Ю. А.
Научный руководитель: Хуртасенко А.В., канд. техн. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ РАСПОЛОЖЕНИЯ БАЗОВЫХ ОПОРНЫХ ТОЧЕК ШАРНИРОВ ДЛЯ ВЕРХНЕЙ ПОДВИЖНОЙ ПЛАТФОРМЫ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ПОДВИЖНОСТИ

В современных технических отраслях все чаще рассматривается применение механизмов, использующих параллельную кинематику. В первую очередь это роботы с кинематическими цепями по параллельной схеме. Такие механизмы могут иметь ряд преимуществ: высокие скорость и ускорения, жесткость, полезная нагрузка [1,2,3].

Таблица 1 – Конструктивные исполнения по расположению опор РПП

Номер варианта исполнения		
1	2	3

Траектории выбраны таким образом, чтобы по возможности получить наиболее нагруженные случаи с точки зрения напряженно-деформированного состояния элементов конструкции [4].

Варианты конструкций по расположению шарнирных опор приведены в (таблице 1). Параметры конструкций приведены в (таблице 2).

Все варианты конструкции выполняли одинаковую траекторию при максимальной скорости с приложенной полезной нагрузкой (9810 Н). В соответствии с техническим заданием и целесообразностью длительности исследований время, за которое выполнялось одно элементарное движение принято равным 1 с.

Таблица 2 – Исследуемые характеристики РПП

Наименование	Об-е	Значение
Условный диаметр расположения опор основания (мм)	D _d	1800
Условный диаметр расположения опор подвижной платформы (мм)	D _u	1800
Высота платформы (мм)	H	1200
Расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на основании (мм)	L _d	100
Расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на подвижной платформе (по вариантам исполнений) (мм)	L _{u1}	900
	L _{u2}	450
	L _{u3}	100

Для идентификации динамических параметров полученных в ходе исследований с помощью имитационного моделирования введены номерные обозначения шарниров платформы, представленные на (рисунке 1).

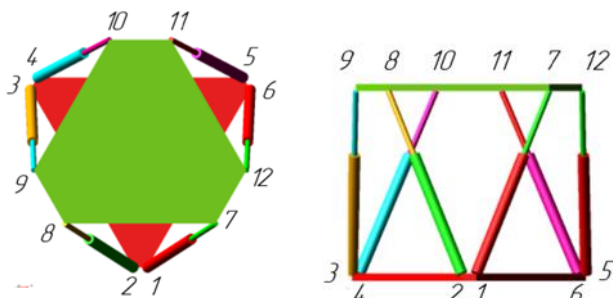


Рис. 1 Принятые обозначения шарниров в структурной схеме РПП: 1,2,3,4,5 и 6 – номера шарниров основания; 7,8,9,10,11, и 12 – номера шарниров верхней подвижной платформы.

Предварительные исследования проведены на основе численного моделирования с использованием динамической имитационной модели РПП выполненной в системе MSC Adams.

Полученные результаты силовых характеристик при обработке принятых к исследованию траекторий для всех трех вариантов конструктивных исполнений приведены в (таблицах 1.4 и 1.5).

Графики показывают изменения силовых реакций в шарнирах в течении времени выполнения траектории. Обозначения графиков H2i1, H2i2, H2i3 – соответствуют трем рассмотренным вариантам конструктивных исполнений верхней подвижной платформы. Кривые FM_M1, FM_M2, FM_M3, FM_M4, FM_M5 и FM_M6 (таблица 4) показывают изменения величины силовых реакций в шарнирах, обозначенных на рис. 1 номерами 1,2,3,4,5 и 6 – соответственно. Кривые FM_M7, FM_M8, FM_M9, FM_M10, FM_M11 и FM_M12 (таблица 5) показывают изменения величины силовых реакций в шарнирах, обозначенных на (рисунке 1) номерами 7,8,9,10,11 и 12 – соответственно.

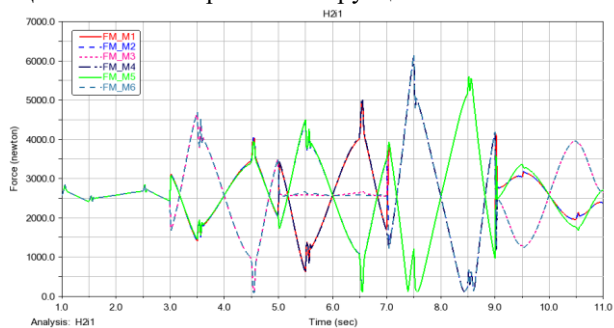
В (таблице 3) приведены максимальные значения сил в соответствующих шарнирах полученные на основе анализа представленных графиков.

Таблица 3– Пиковые значения суммы сил в шарнирах, Н

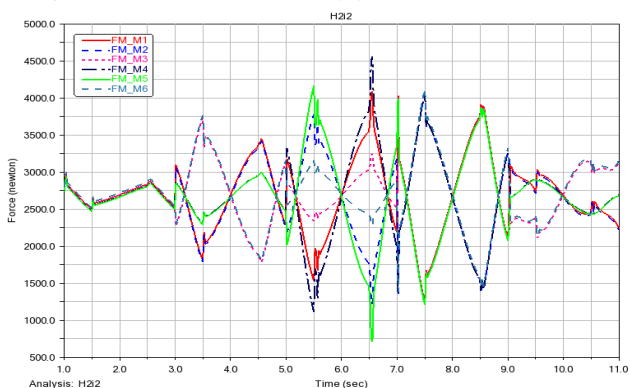
Конструктивное исполнение	Обозначение шарнира					
	Нижнее основание					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
i1	5609	6142	5609	6142	5609	6142
i2	4087	4048	3998	4550	4160	4116
i3	4813	4813	4153	4575	4268	4153
	Верхняя подвижная платформа					
	M7	M8	M9	M10	M11	M12
i1	5297	5826	5297	5826	5297	5826
i2	3799	3743	3693	4261	3875	3779
i3	4418	4418	3770	4185	3884	3770

Таблица 4 – Изменения величин силовых реакций в точках крепления шарниров ЭЦ к основанию при 3х конструкциях РПП

Конструкция исполнения i1



Конструкция исполнения i2



Конструкция исполнения 13

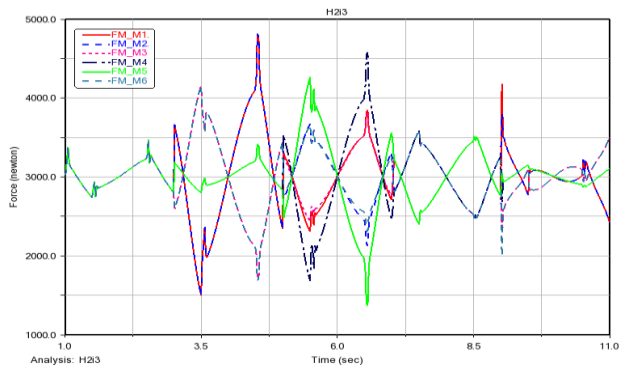
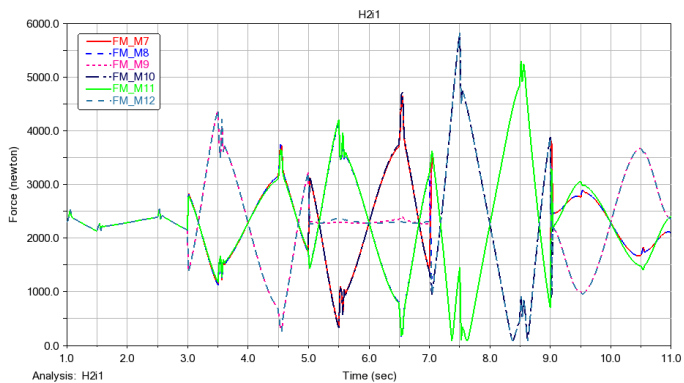
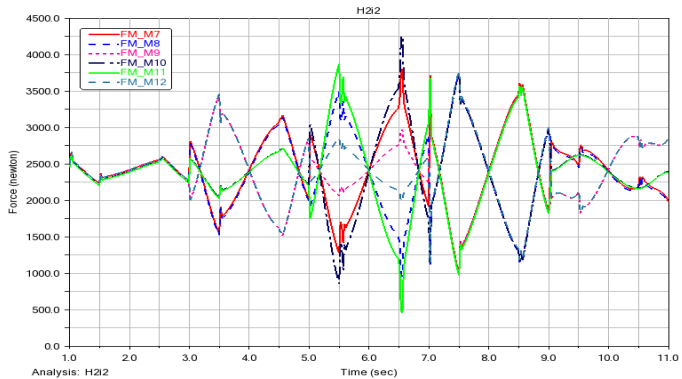


Таблица 5 – Реакции в точках крепления шарниров ЭЦ к подвижной платформе при 3х конструкциях РПП

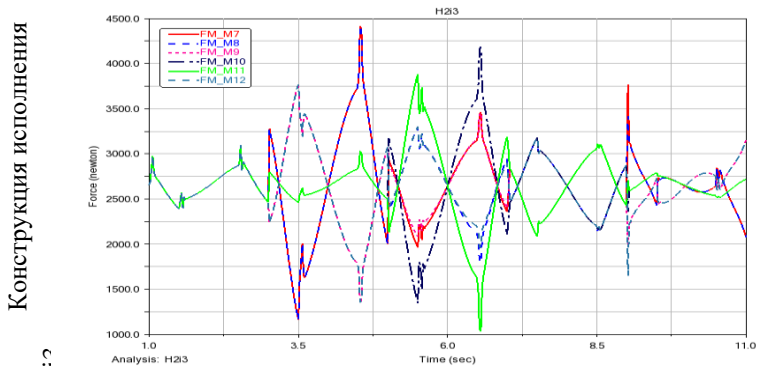
Конструкция исполнения i1



Конструкция исполнения



с



На основе параметризованной имитационной модели (MSC Adams) проведены исследования на предмет оптимального расположения точек крепления шарнирных соединений в верхней подвижной платформе. При этом критерием оптимизации выбрана минимизация силовых параметров в реакциях соответствующих опор. При исследовании отрабатывались все принятые траектории.

В результате исследований определено что наиболее оптимальным и рекомендованным к дальнейшему проектированию можно считать вариант, когда опоры располагаются регулярно по окружности с округленными значениями шагов между смежными теоретическими точками шарниров равными 450 и 1284 мм. Данные параметры обеспечивает вариант 2 конструкции (конструктивное исполнение i2). Этот вариант конструкции обеспечивает наименьшие значения силовых реакций во всех шарнирах и верхних и нижних (табл. 6). Округления величин шагов до целых значений практически не влияет на силовые характеристики в опорах для рекомендованного варианта конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка манипуляционных механизмов параллельно-перекрестной структуры / В. А. Глазунов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. Вып. 2. М. : Наука, 2008. С. 100–110.
2. Чуев К. В., Дуюн Т. А., Чуева Ю. А. Имитационное моделирование динамических характеристик промышленного робота с использованием программного комплекса MSC Adams / // Всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского : Сборник докладов, Москва,

14 февраля 2020 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2020. – С. 19-23.

3. Хуртасенко А. В., Чуев К. В., Волошкин А. А, Чередников И. И., Гаврилов Д. В. Оптимизация конструктивных параметров роботизированных платформ подвижности для обучения операторов машин на тренажере и реализации требуемых траекторий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 4. – С. 101-115. 4. Хуртасенко А.В., Шрубченко И.В., Тимофеев С.П. Методика определения формы наружной поверхности качения опор технологических// Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 3. С.85–89.

4. Optimization of Cutting Conditions for the Processing of Bandages of Rotary Cement Kilns at a Special Stand / I. V. Shrubchenko, A. V. Hurtasenko, M. N. Voronkova, L. V. Murygina // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Vol. 31. – No 9. – P. 1593-1600. – DOI 10.5829/idosi.wasj.2014.31.09.14481. – EDN SIVNWH.