
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«Севастопольский государственный университет»

№ 4(32)

2023

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Севастополь 2023

*Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»*

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2023 г. №4 (32)

*Сборник научных трудов. Издание основано в 2016 году. Периодичность - 4 номера в год.
Свидетельство о регистрации средства массовой информации выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Серия № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.*

*Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
и размещается в научной электронной библиотеке (Elibrary.ru)*

*Свидетельство о регистрации в национальном центре ISSN и присвоение международного стандартного номера
серийного издания (International Standard Serial Number) 2618-8201 от 06.07.2018 г.*

*В сборнике научных трудов публикуются статьи по следующим научным специальностям:
2.5.6 Технология машиностроения, 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки, 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы;
2.6.17. Материаловедение (по отраслям)*

Главный редактор:

д.т.н., проф. Братан С.М.

Зам. главного редактора:

к.т.н., доц. – Рошупкин С.И.

Научный редактор:

к.т.н., проф. Харченко А.О.

Отв. секретарь:

д.т.н., проф. Покинтелица Н.И.

Редакционная коллегия

*Абдулгизис У.А. д. т. н., проф. (г. Симферополь), Глезер А. М. д. ф-м. н, проф. (г. Москва),
Бохонский А.И. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Дуюн Т.А. д. т. н., доц. (г. Белгород),
Козлов А.М. д. т. н., проф. (г. Липецк),
Копп В.Я. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Малышева Г.В. д. т. н., проф. (г. Москва),
Носенко В.А. д. т. н., проф. (г. Волжский), Обжерин Ю.Е. д. т. н., проф. (г. Севастополь),
Новоселов Ю.К. д. т. н., проф. (г. Севастополь),
Суслов А.Г. д. т. н., проф. (г. Москва), Федонин О.Н. д. т. н., проф. (г. Брянск),
Ярошенко А.А. д. т. н., проф. (г. Севастополь)*

*Мнение авторов статей, представленных в сборнике научных трудов, может не совпадать с мнением редакции.
Все статьи проходят обязательное рецензирование и проверку сервисом «Антиплагиат».
Издание осуществлено на средства авторов и распространяется бесплатно.*

Дата выхода в свет: 25.12.2023 г.

Тираж: 30 экз.

*Адрес редакции: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 106, <http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>;
Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1362; e-mail: vst_sevsu@mail.ru
Адрес издателей: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября,
д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация; ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул.
Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация.
Адрес типографии: г. Севастополь, ул. Курчатова 7.*

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Храмов А.В., Жирухин К.С., Киселев Е.С. К вопросу о выборе рациональной схемы закрепления плоскостных заготовок на оснастке VERO-S AVIATION.....	4
Кузнецова М.В., Богуцкий В.Б. Расчет вероятности удаления материала в процессе тонкого фрезерования в зоне контакта заготовки с инструментом в программе Maple.....	13
Муховатый А.А. Исследование дозаполусной передачи по значению относительной толщины масляного слоя.....	19
Бекиров Э.Л., Теминдаров И.Э., Абдуллаев Э.Ш., Джемилов С.Д. Теоретические исследования возможности управления параметрами зоны контакта режущей поверхности шлифовального круга с деталью.....	26
Яценко Е.А., Изварин А.И., Чаудхари С., Яценко В.С. Исследование структуры и свойств вспененных геополимерных материалов на основе отходов твердотопливной энергетики.....	35
Джемилов Э. Ш., Ваниев Э. Р., Фатеев К. Э., Шариков А. Р. Способы повышения эффективности пескоструйной обработки деталей.....	41
Шипилова О.Г., Рязанцев А.Ю. Разработка и внедрение инновационной технологии получения искусственной шероховатости камер сгорания жрд комбинированными методами обработки...	48

УДК 536:621.9

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПЛОСКОСТНЫХ ЗАГОТОВОК НА ОСНАСТКЕ VERO-S AVIATION

*А.В.Храмов¹,
К.С.Жирухин¹,
Е.С.Киселев²*

¹ ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ», г. Москва, Россия

² Ульяновский Государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

АННОТАЦИЯ

Определение рациональных схем закрепления нежестких плоскостных алюминиевых заготовок на технологической оснастке – SCHUNKVERO-S Aviation. Установить наиболее технологичную и эффективную схему закрепления, позволяющую максимально компенсировать возникающие поковки и деформации детали в ходе механической обработки плоскостных алюминиевых заготовок на обрабатывающем центре с использованием данной системы. Исследования проводились с применением метода конечных элементов в программной системе анализа – ANSYS. Расчёты выполнялись на примерах реальных деталей авиационной техники. Состоятельность представленной методики расчёта и выбранной схемы закрепления были подтверждены в ходе изготовления детали типа «ЛЮК» на одном из авиационных предприятий РФ. Инжиниринговые услуги по расчёту и изготовлению детали были реализованы компанией ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ». Полученные геометрические параметры детали полностью соответствуют требованиям конструкторской документации. Применение предложенной методики размещения опорных и зажимных модулей на основе расчетов методом конечных элементов при изготовлении детали на 5-ти осевом обрабатывающем центре с использованием технологической оснастки SCHUNKVERO-S Aviation, в совокупности с определенной стратегией механической обработки, позволяет, практически полностью, компенсировать деформации и получить годное изделие с первого предъявления, без выполнения дополнительной операции правки.

Ключевые слова: система нулевого базирования, остаточные напряжения, базирование, метод конечных элементов, плоскостная заготовка.

ON THE QUESTION OF CHOOSING A RATIONAL SCHEME FOR FIXING PLANAR BLANKS ON THE VERO-S AVIATION TOOLING

*A.V. Khramov¹,
K.S. Zhirukhin¹,
E.S. Kiselev²*

¹ HALTEK-DoALL LLC, Moscow, Russia

² Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

ABSTRACT

Calculate possible schemes for fixing non-rigid planar aluminum parts on modern technological equipment - SCHUNK VERO-S Aviation. Establish the most technologically advanced

and efficient clamping scheme that allows maximum compensation of the resulting leashes and deformations of the part during machining on this system. The studies were carried out by the finite element method in the software analysis system - ANSYS. The calculations were carried out for real parts of aviation and automotive equipment. The consistency of the presented calculation method and the selected fastening scheme were confirmed during the manufacture of a part of the "HATCH" type at one of the aviation enterprises of the Russian Federation. Engineering services for the calculation and manufacture of the part were provided by HALTEC-DoALL LLC. The obtained geometric parameters of the part, such as the deviation from the theoretical contour, the thickness of the sheets, the thickness of the vertical ribs and overall dimensions, fully comply with the requirements of the design documentation. The use of finite element analysis in the manufacture of a part on the SCHUNK VERO-S Aviation tooling, in combination with a certain machining strategy, makes it possible to almost completely compensate for deformations and obtain a good part from the first presentation, excluding straightening operations.

Keywords: zero-basing system, residual stresses, basing, finite element method, planar workpiece.

Вступление

В 2019-2022 гг. на авиационных предприятиях России компанией ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ» при изготовлении нежестких плоскостных алюминиевых деталей был впервые в России применён новый вид технологической оснастки – система нулевого базирования с компенсацией SCHUNK VERO-S Aviation (VSA) [1]. Данная система прямого закрепления заготовок за счёт подвижных опор в своём составе позволяет точкам крепления подстраиваться под искривление и деформации заготовки по мере снятия припуска и компенсировать возникающие поводки. Это позволило нивелировать влияние остаточных напряжений, возникающих в материале заготовки, на точностные параметры готовой детали и избежать отклонений теоретического контура, плоскостности, основных габаритных размеров детали, толщины полотен и стенок, а также, за счёт уникальности своей конструкции, сократить подготовительно-заключительное время, увеличить режимы резания и показать универсальность системы под разные типоразмеры изделия. В режиме опытно-промышленных испытаний было изготовлено 5 деталей из алюминиевых сплавов разных марок и размеров. Основные из них: плоскостные детали типа «люк», «шпангоут», «балка» длиной от 0,9 м до 3,7 м. В зависимости от детали разнился материал и вид используемой заготовки: прокат АК4-1чТ, поковка АК6-1чТ, штамповка В93пчТЗ. Несмотря на отличия в габаритных размерах, типов деталей и материала, был применён общий подход не только к технологическому процессу и стратегии изготовления данных деталей, но и к принципу определения схемы базирования и расстановки опорных и крепёжных точек (модулей) системы нулевого базирования VSA. Опытно-промышленные испытания на предприятиях проводились целенаправленно на разных типоразмерах деталей, изготавливаемых из разного типа заготовок, так как конструкция и элементы изготавливаемых видов продукции каждого предприятия также разнообразны и порой уникальны. При этом начальный этап работы с использованием данной системы – определение рациональной схемы закрепления плоскостных заготовок деталей должен оставаться универсальным для каждого авиационного предприятия, быть простым в понимании и применении, позволяющий инженерам-технологам самостоятельно внедрять данную систему нулевого базирования на новые типы деталей. В основе определения рациональной схемы закрепления лежит анализ поведения заготовки детали на предполагаемых точках закрепления с использованием метода конечных элементов, после снятия припуска с заготовки, а также оценка жёсткости системы закрепления на максимальных режимах резания при чистовой и

черновой обработке. Данный анализ может быть проведён в любой конечно-элементной программе – ANSYS, NASTRAN, LS-DYNA и других. В нашем случае использовалась программа ANSYS R19.2. Основные цели расчёта – поиск наиболее рациональной технологичной схемы закрепления, позволяющей компенсировать поводки до 6 мм, оценка жёсткости системы и поиск наиболее экономически целесообразного варианта расстановки точек крепления.

Основная часть

Из курса технологии машиностроения общеизвестно о принципе базирования по плоскости, цилиндрическому и срезанному пальцу. Именно этот принцип использован при закреплении заготовки в системе VERO-S Aviation.

Система включает в себя следующие модули (рис.1):

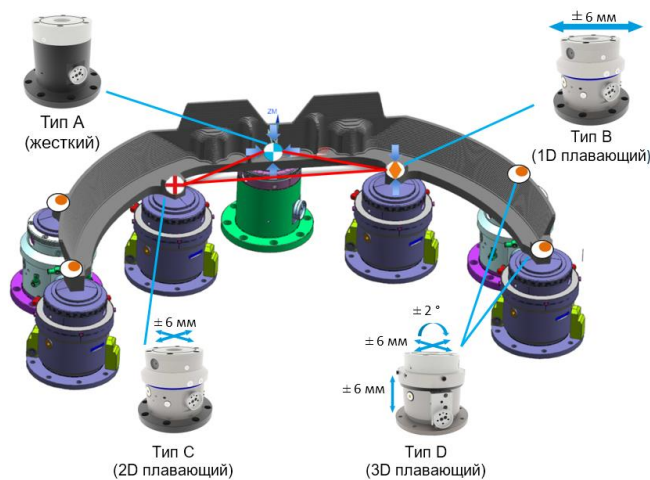


Рисунок 1. Схема расстановки зажимных модулей

- 1) Модуль типа А – фиксированная, нулевая точка. Повторяемость закрепления осуществляется с погрешностью $<0,005$ мм – цилиндрический палец.
- 2) Модуль типа В – модуль, способный перемещаться только вдоль одной оси на ± 6 мм. Выполняет функцию срезанного пальца для защиты от проворота.
- 3) Модуль типа С – модуль, перемещающийся в двух осях X и Y на ± 6 мм. В сочетании с модулями А и В усиливает жёсткость закрепления заготовки.

Вышеперечисленные модули А, В и С имеют одинаковую высоту. Таким образом они образуют силовой треугольник ABC, определяющий позиционирование и нулевую точку заготовки при обработке.

- 4) Модуль типа D – 3D модуль, подвижный во всех осях. Способен компенсировать движения заготовки по осям X, Y, Z на ± 6 мм и по углу наклона вдоль оси Z на ± 2 градуса.

Основные принципы при планировании вариантов размещения модулей:

- Определить центр тяжести заготовки детали с помощью ANSYS или любой другой программы САПР;
- Силовой треугольник, который обеспечивает единство баз, следует располагать как можно ближе к центру тяжести заготовки;

- Размер силового треугольника должен быть как можно меньше, чтобы исключить риск «заневоливания» областей детали, склонных к поводкам;
- Модули типа D следует располагать на поверхностях заготовки детали, наиболее склонных к поводкам и деформациям;
- Определение данных зон на основе предыдущего опыта обработки данной заготовки при традиционном технологическом процессе;
- Дистанция между модулями типа D, выбираемая исходя из размера детали, не должна быть избыточной, чтобы исключить провисания. При этом, расстановка модулей типа D не должна быть слишком частой, что повлечёт увеличение стоимости комплекта закрепления.

Исходные данные необходимые для расчёта:

- Электронная модель детали;
- Электронная модель заготовки и её тип (необходима для проверки на вписываемость детали в фасет заготовки, что дает понимание по распределению припусков);
- Материал заготовки, выбираются исходя из физико-механических свойств материала [2,3]. ANSYS моделирует поведение металла;

Рассмотрим пример методики расчёта детали типа «ЛЮК». Исходные данные:

- 1) Заготовка - алюминиевый прокат ГОСТ АК4 – 824х557х55 мм
- 2) Габаритные размеры заготовки детали 744х477х35 мм

Шаг 1 – определяем центр тяжести (рис. 2):

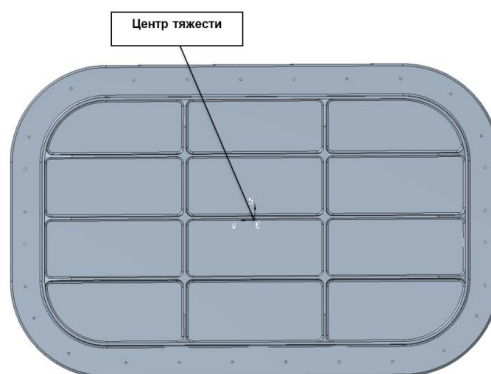


Рисунок 2. Определение центра тяжести

Данная деталь склонна к поводкам в углах, т.е. в ходе обработки её «сворачивает» по диагонали углов.

Шаг 2 – исходя из опыта обработки по традиционной технологии и, зная особенности поводок данной детали, допускаем два варианта расстановки модулей (рис.3).

Произведём оценку схем закрепления, путём изучения поведения конструкции детали в системе ANSYS при различных условиях и выберем наиболее рациональную из них, удовлетворяющую следующим критериям:

- Величина деформации на силовом треугольнике под собственным весом
- Величина деформации при воздействии силы реакции опор
- Наличие зон детали, компенсировать поводки, которых не удастся исключить
- Остаточные напряжения в заготовке [4-7]

- Количество зажимных модулей

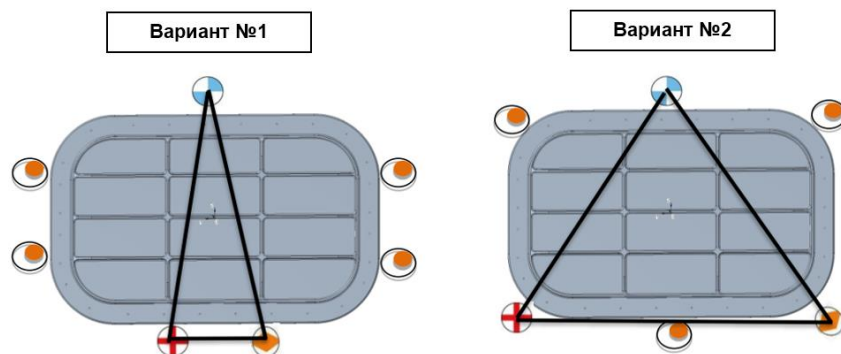


Рисунок 3. Варианты схем закрепления

Шаг 3 – оценка жёсткости позиционирования заготовки детали на силовом треугольнике ABC под собственным весом (рис.4).

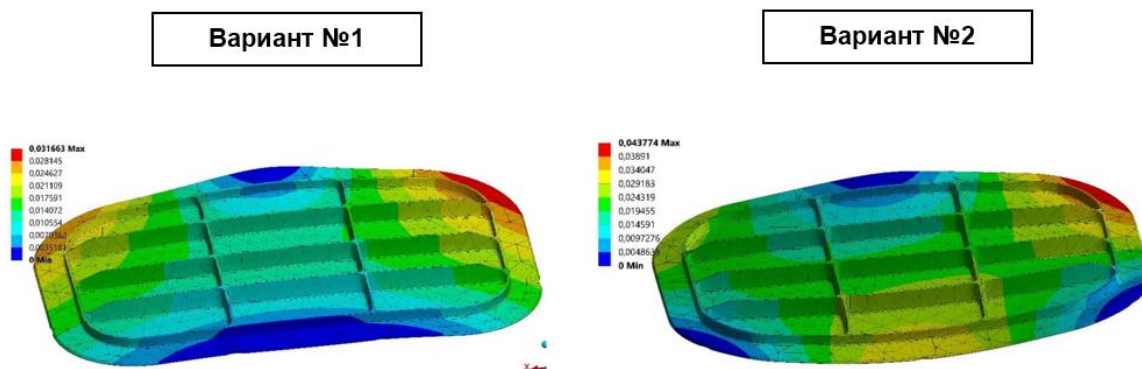


Рисунок 4. Поведение детали под собственным весом

В варианте №2 величина провиса заготовки больше.

Шаг 4 – оценка жёсткости позиционирования детали на силовом треугольнике ABC под собственным весом и при реакции опор модулей D (рис.5).

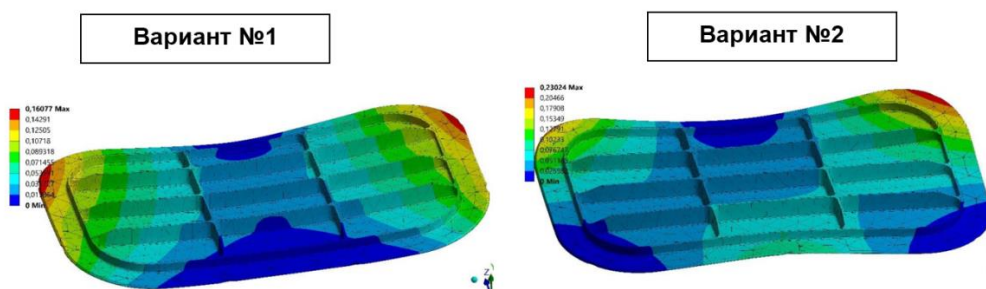


Рисунок 5. Деформация детали под собственным весом и при воздействии сил реакций опор модулей D

Величина деформаций в Варианте №2 больше.

Шаг 5 – оценка деформации детали после симуляции воздействия остаточных напряжений в заготовке (рис.6)[4-7].

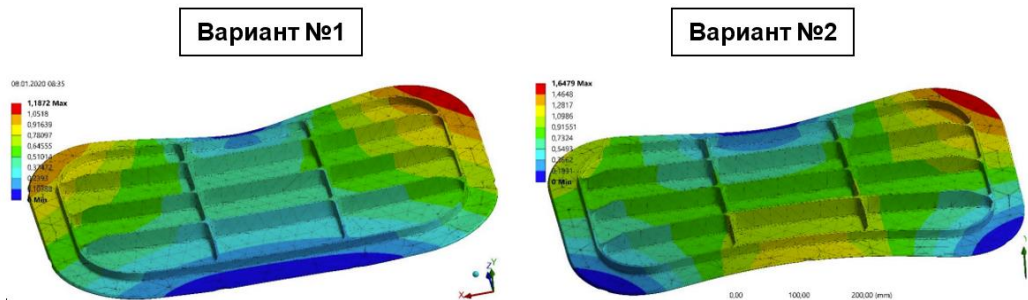


Рисунок 6. Деформация детали после симуляции воздействия внутренних напряжений в заготовке, образующихся после удаления припуска

Величина деформации в Варианте №1 больше.

Шаг 5 – оценка величины остаточных напряжений в детали после симуляции их компенсации в заготовке – подстраивание опор D под изменение кривизны заготовки (рис.7).

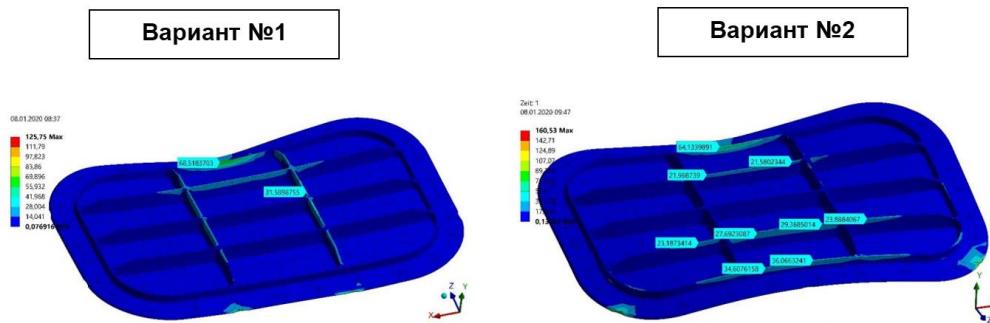


Рисунок 7. Поведение детали под собственным весом и при воздействии сил реакций опор модулей D

Величина остаточных напряжений в Варианте № 2 больше.

Подведём итог в сравнении преимуществ и недостатков того или иного варианта (табл. 1).

Таблица 1. Анализ двух схем расстановки модулей

Критерий оценки	Вариант №1	Вариант №2
Деформация под собственным весом	Референс	На 38% больше
Деформация при реакции опор D	Референс	На 43% больше
Пиковая возможность компенсации напряжений	Референс	На 39% больше
Области без релаксации напряжений	Больше	Меньше
Величина остаточных напряжений	Меньше	Больше
Количество модулей	7	6

Зелёным цветом выделены ячейки, параметры в которых положительно влияют на процесс компенсации внутренних напряжений, делают схему закрепления более технологичной и экономически целесообразной.

Наиболее приемлемой схемой расположения модулей является Вариант №1 (рис.8).

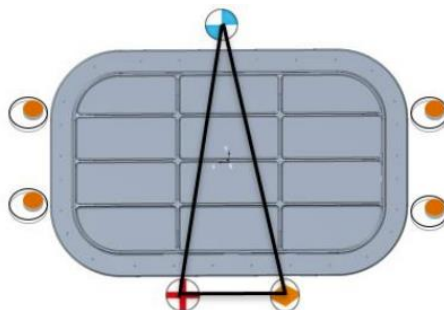


Рисунок 8. Схема расстановки модулей – Вариант №1

Жесткость закрепления заготовки детали в Варианте №1 выше, чем в Варианте №2. Максимальная способность к компенсации напряжений у Варианта №2 больше, а зоны, которые не подверглись компенсации напряжений, в Варианте №2 меньше. Также и остаточные напряжения в Варианте №1 меньше. Из-за меньшей жёсткости и большего опорного треугольника можно ожидать меньшую возможность компенсации напряжений при черновой обработке в Варианте №2. Даже несмотря на то, что Вариант №1 требует на один зажим больше, делаем выбор в его пользу.

Также проведём оценку жёсткости закрепления детали при обработке, в результате воздействия силы резания на черновых и чистовых режимах [8-10]. Для расчёта силы резания при черновой обработке выберем максимальные режимы резания для самого производительного инструмента в технологическом процессе [11-12]:

- Корпусная фреза Ø: 50 мм
- Количество зубьев Z: 4
- Обороты шпинделя n: 24.000 об/мин
- Скорость резания V: 19.200 мм/мин
- Глубина резания A_p : 8 мм
- Ширина резания A_e : 50 мм
- Материал: EN AW 7075

Согласно данным режима, расчётная сила резания составит 1820 Н, округлим данное значение в большую сторону и будем использовать в дальнейшем силу резания равную 2000 Н.

Для оценки устойчивости модулей типа D приложим к точкам их крепления силу резания 2000 Н и оценим устойчивость системы (рис. 9).

Программа оценивает максимальный сдвиг точек крепления E, D, F, G (точки крепления модулей типа D) как равные, не более 0,065 мм. Таким образом, делаем вывод, что система статична.

Таким же образом произведём оценку устойчивости системы и при чистовой обработке, используя величину силы резания 800 Н (рис.10).

Наибольшая сила реакция опоры 570 Н, что много меньше 800 Н. Таким образом, делаем вывод, что система статична.

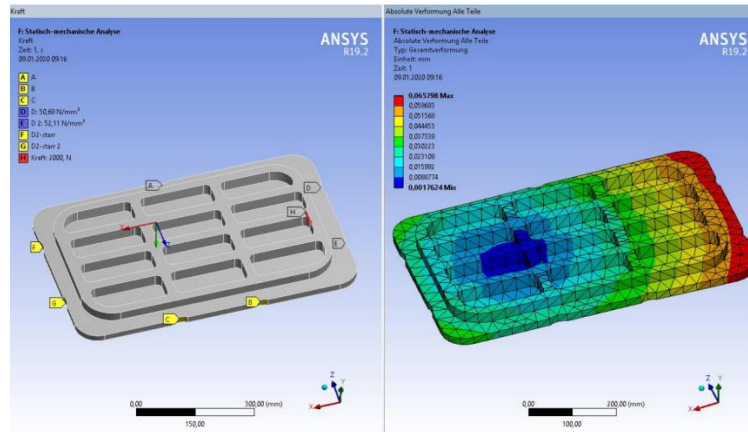


Рисунок 9. Схема нагружения и оценка сдвига модулей типа D

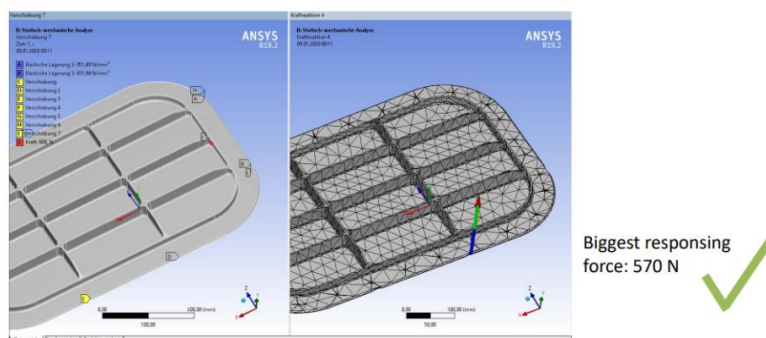


Рисунок 10. Схема нагружения и оценка сдвига модулей типа D

Состоятельность представленной методики расчёта и выбранной рациональной схемы закрепления подтверждены при изготовлении детали типа «ЛЮК» на одном из авиационных предприятий РФ. Инжиниринговые услуги по расчёту и изготовлению детали в данном случае были реализованы компанией ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ». Полученные в результате изготовления геометрические параметры детали, такие как – отклонение от теоретического контура, толщина полотен, толщина вертикальных рёбер и габаритные размеры полностью соответствуют требованиям конструкторской документации. Ниже представлены карты замеров данной детали:

Контроль полотен (рис.11).

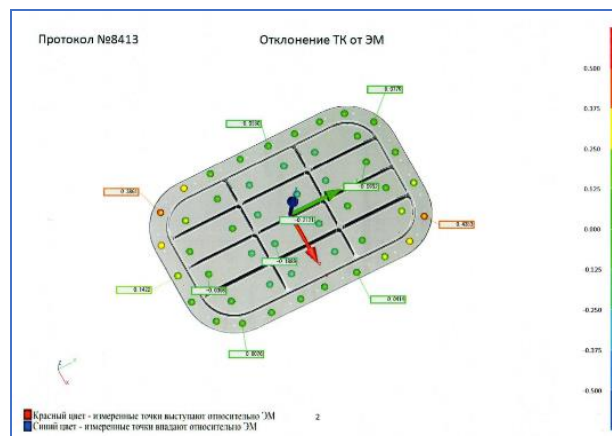


Рисунок 11. Контроль толщины полотен

Допуск на отклонение ТК от ЭМ согласно ТИ-0377-2018: $\pm 0,5$ мм
Максимальные отклонения: 0,43 мм, 0,38 мм – в допуске.

Контроль отклонения теоретического контура от электронной модели (рис. 12).

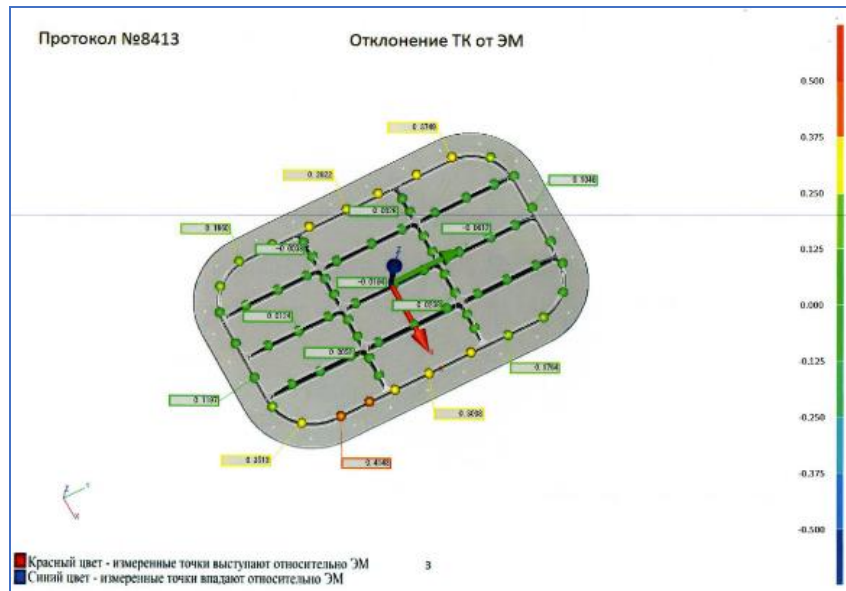


Рисунок 12. Контроль толщины полотен

Допуск на отклонение ТК от ЭМ согласно ТИ-0377-2018 : $\pm 0,5$ мм
Максимальные отклонения: 0,41 мм, 0,37 мм – в допуске

Заключение

Таким образом, данная методика является универсальной при расчёте и оценке технологичности схем закрепление деталей на модули системы VSA, а также выбора наиболее экономически целесообразного варианта. Программа ANSYS методом конечных элементов позволяет выбрать наиболее жёсткий вариант закрепления, приемлемый сценарий компенсации остаточных напряжений и оценить устойчивость системы при воздействии силы резания на режимах ТП. Несмотря на то, что система VSA больше ориентирована на детали из алюминия, данные расчёты будут актуальны и при оценке возможности обработки деталей из титановых и жаропрочных сплавов, особенно при оценке жёсткости закрепления и отсутствия сдвига модулей, т.к. режимы и силы резания на данном материале намного выше, чем при обработке алюминия. Применение расчёта методом конечных элементов при изготовлении детали на технологической оснастке SCHUNK VERO-S Aviation, в совокупности с определенной стратегией механической обработки, позволяет практически полностью компенсировать деформации и получить годную деталь с первого предъявления, исключая операции правки.

По данному принципу производился расчёт схем закрепления 3-х реальных элементов авиационной техники, которые были изготовлены в рамках опытно-промышленной партии. На сегодняшний день ведётся работа по внедрению системы VSA в серийный процесс производства деталей самолётов на одном из авиационных предприятий РФ.

Список литературы

1. Киселев Е.С., Назаров М.В. Особенности технологии изготовления нежестких корпусных деталей: Монография //Под общей редакцией Е.С. Киселева. Москва: РУСАЙНС, 2022. - 218с.
2. Альтман М.Б. Применение алюминиевых сплавов: справ. издание. М: Металлургия, 1985. - 344с.
3. Беляев, А.И. Металловедение алюминия и его сплавов: справ. издание. М.: Металлургия, 1983.-280 с.
4. Вишняков, Я.Д. Пискарев. В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М: Металлургия, 1989. - 254 с.
5. Киселев Е.С., Благовский О.В. Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей. С. Петербург: «Лань», 2020, 160 с.
6. Kim YS, Recognition of machining features for cast then machined parts / Kim YS, Wang E. // Computer-Aided Design, 2002.- №34(1). - pp. 71-87.
7. Khramov A., Semdyankin I., Kiselev E. Application of the Modern Stationary Workholding Systems for Increase Capacity and Quality of Non-Rigid Aircraft Parts/ Matec web of Conferences 346, 03076 (2021) ICMTMTE 2021, <https://doi.org/10.1051/mateccof/202134603076>.
8. Электронный ресурс: <https://haltec.bitrix24.ru/~eluYV>. 08.04.2022
9. Подпоркин, В.Г. Обработка нежестких деталей. М.: Машгиз, 1959, 210 с.
10. Добротворский, С.С., Гасанов М.И., Басова Е.В. Опыт создания современных технологий изготовления нежестких деталей с применением передовых CAD/CAM/CAE систем /Вестник ХТП.2015, №4 (1113), с.37-40.
11. Kang TS, Nnaji BO. Feature representation and classification for automatic process planning systems / Journal of Manufacturing Systems.- 2002.- №12(2).- pp. 133-145.
12. Kailash SB, Zhang YF, Fuh JY. A volume decomposition approach to machining feature extraction of casting and forging components /Computer-Aided Design.- 2001.- №33(8).- pp. 605-617.

УДК 621.914

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ УДАЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ТОНКОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА ЗАГОТОВКИ С ИНСТРУМЕНТОМ В ПРОГРАММЕ MAPLE

*М.В. Кузнецова¹,
В.Б. Богуцкий¹*

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

В результате влияния геометрии фрезерного инструмента на шероховатость возникает нестабильность процесса обработки сложнопрофильных деталей тонким фрезерованием. Для исследования проблемы стабильности процесса тонкого фрезерования сложнопрофильных деталей необходимо выполнить расчет вероятности удаления материала в зоне контакта

заготовки и инструмента, с помощью которого можно исследовать пространственные отклонения обрабатываемой поверхности и об изменениях величины слоя, в котором распределена шероховатость. В данной статье расчет выполнен с помощью программы Maple.

Ключевые слова: торцовое фрезерование, математическое ожидание, вероятность удаления материала, закон нормального распределения, метод интегрирования, стабилизация.

THE CALCULATION OF THE PROBABILITY OF MATERIAL REMOVAL IN THE PROCESS OF JAMMING IN THE AREA OF CONTACT WITH THE TOOL IN THE PROGRAM MAPLE

M.V. Kuznetsova¹,
V.B. Bogutsky¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

As a result of the influence of the geometry of the milling tool on the roughness, there is instability of the processing of complex profile parts by thin milling. To study the stability of the process of fine milling of complex profile parts, it is necessary to calculate the probability of material removal in the contact area of the workpiece and the tool, with which you can explore the spatial deviations of the treated surface and changes in the size of the layer in which the roughness is distributed. In this article, the calculation is performed using the Maple program.

Keywords: mechanical milling, mathematical expectation, probability of material removal, the law of normal distribution, the method of integration, stabilization.

Введение. Одним из актуальных требований при механической обработке заготовок становится повышение стабильности параметров качества, что предусматривает минимизацию отклонений от заданных значений, соответствующих требованиям чертежа изделия. В особенности такая задача актуальна на этапе финишных операций [1-4 и др.].

Для возможной оценки стабильности процесса обработки сложнопрофильных деталей тонким фрезерованием была выполнена декомпозиция фрезерной операции, которая позволила установить взаимосвязи между основными составляющими технологической системы и характеристиками процесса обработки, сформировать структуру модели, определяющей качественные характеристики готового изделия [4-6 и др.].

Для дальнейшего исследования процесса стабилизации параметров качества при тонком фрезеровании необходимо выполнить расчет вероятности удаления материала в зоне контакта заготовки и инструмента для процесса торцового фрезерования. В результате выполнения расчета можно исследовать пространственные отклонения обрабатываемой поверхности и об изменениях величины слоя, в котором распределена шероховатость.

Цель статьи – выполнить расчет вероятности удаления материала для процесса торцового фрезерования с помощью программы Maple.

Изложение основного материала. Торцовое фрезерование (рис.1) является одним из высокопроизводительных методов обработки с помощью режущего инструмента – торцовых фрез.

Для анализа процесса образования поверхности при торцовом фрезеровании рассмотрим в граничной области материал – среда произвольную точку $M(x, y, z)$, рис. 2. Для каждой такой точки можно говорить о двух событиях: о событии, заключающемся в том, что

материал в этой точке будет удален, и о событии противоположном, заключающемся в том, что материал в точке останется не удаленным. Каждое событие случайно и имеет определенную вероятность. Назовем вероятность первого события вероятностью удаления материала, второго – вероятностью не удаления материала, введя соответствующие обозначения $P(M)$ и $P(\bar{M})$. Сумма вероятностей равна единице, а значения вероятностей в общем случае могут зависеть от положения точки в граничной области по всем трем координатам [7- 9].

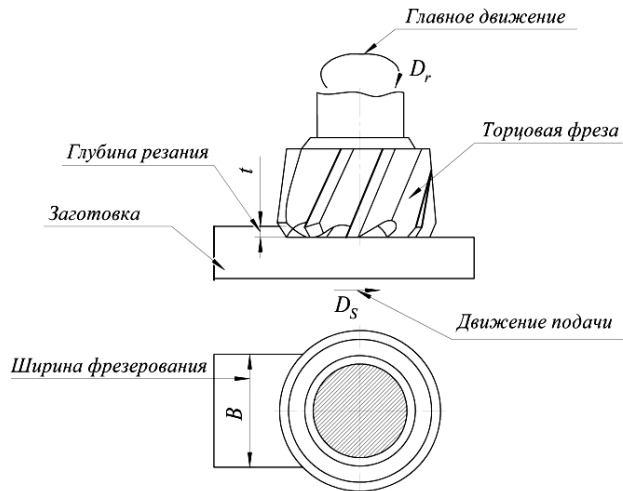


Рисунок 1. Схема торцового фрезерования

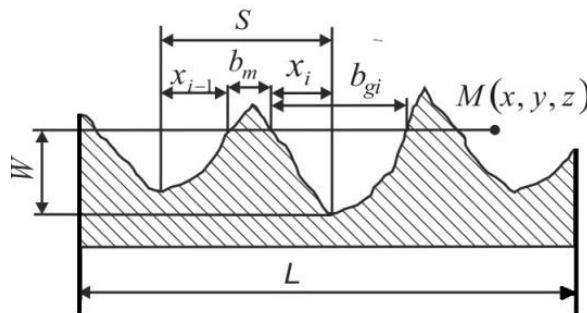


Рисунок 2. Схема к расчету вероятности не удаления материала

Если профиль обработанной поверхности стационарен и относительно начала координат по оси X жестко не закреплен, то вероятность не удаления материала на уровне W , определяется по пределу отношений суммы длин отрезков b_{mi} , заполненных материалом, к длине сечения L , стремящейся к бесконечности,

$$P(\bar{M}) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\sum b_{mi}}{L}. \quad (1)$$

Поскольку сумма выступов, заполненных материалом, при $L \rightarrow \infty$ стремится к $L\lambda M[b_m]$, уравнение (1) может быть записано в виде

$$P(M) = 1 - P(\bar{M}) = 1 - \lambda M[b_m], \quad (2)$$

где λ – математическое ожидание числа выступов на единицу длины сечения; $M[b_m]$ – математическое ожидание ширины выступа шероховатости поверхности на

заданном уровне W .

Для расчета вероятности не удаления необходимо выполнить расчет математического ожидания (ширины выступа шероховатости поверхности) на заданном уровне в программе Maple.

Для начала необходимо ввести входные данные с помощью специальных команд в программе Maple.

Входные данные для расчета вероятности не удаления материала: $S_{z1} = 0.1$ – подача на один зуб фрезы или $S_{z1} = 3\sigma$; $\sigma = 0,0333$ – среднеквадратическое отклонение; $b_u = 1 \cdot \sigma, 1.5 \cdot \sigma \dots 6 \cdot \sigma$ – ширина сечения поверхности резания; $\sqrt{2 \cdot \pi} = 2.51$; Φ – значение нормальной функции распределения, зависит от b_u (табл. 1) [7-8].

Таблица 1. Значения нормальной функции распределения

b_u	$\frac{b_u - S_{z1}}{\sigma}$	$\Phi(\frac{b_u - S_{z1}}{\sigma})$
$0.5 \cdot \sigma$	-2,5	0.0062
$1 \cdot \sigma$	-2	0.0228
$1.5 \cdot \sigma$	-1,5	0.0668
$2 \cdot \sigma$	-1	0.1587
$2.5 \cdot \sigma$	-0,5	0.3085
$3 \cdot \sigma$	0	0.5000
$3.5 \cdot \sigma$	0,5	0.6915
$4 \cdot \sigma$	1	0.8413
$4.5 \cdot \sigma$	1,5	0.9332
$5 \cdot \sigma$	2	0.9772
$5.5 \cdot \sigma$	2,5	0.9938
$6 \cdot \sigma$	3	0.9986
$6.5 \cdot \sigma$	3,5	0.9998

И введем формулу расчета $M[b_m]$ для процесса торцового фрезерования:

$$M[b_m] = S_{z1} + \frac{\sigma}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(b_u - S_{z1})^2}{2 \cdot \sigma^2}} - b_u \cdot [1 - \Phi(\frac{b_u - S_{z1}}{\sigma})].$$

После выполнения расчета полученные данные внесём в таблицы.

> *estart*

> $S_{z1} := 0.1;$

$S_{z1} := 0.1$

> $\sigma := 0.0333;$

$\sigma := 0.0333$

> $b_u := 1 \cdot \sigma;$

$b_u := 0.0333$

```

> combine( (b_u - S_zl) / sigma );
-2.003003003
      estart

> Phi := 0.0228;
Phi := 0.0228

> combine(1 - Phi);
0.9772

> combine((b_u - S_zl)^2);
0.00444889

> sqrt(2 * pi) := 2.51;
sqrt(2 * pi) := 2.51

> > combine( S_zl + sigma / sqrt(2 * Pi) * e^(- (b_u - S_zl)^2 / (2 * sigma^2)) - b_u * (1 - Phi) );
0.0692439646

>
M[b_m] := S_zl + sigma / sqrt(2 * Pi) * e^(- (b_u - S_zl)^2 / (2 * sigma^2)) - b_u * (1 - Phi);
M_b_m := 0.0692439646

```

Далее приведем таблицу 2 значений $M[b_m]$ в зависимости от изменений параметров b_u , полученных при дальнейших расчетах в программе Maple.

Таблица 2. Значения математическое ожидание ширины выступа шероховатости.

b_u	$\Phi\left(\frac{b_u - S_{z1}}{\sigma}\right)$	$M[b_m]$
$0.5 \cdot \sigma$	0.0062	0.0840317759
$1 \cdot \sigma$	0.0228	0.0692439646
$1.5 \cdot \sigma$	0.0668	0.0576744251
$2 \cdot \sigma$	0.1587	0.0519920567
$2.5 \cdot \sigma$	0.3085	0.0541230325
$3 \cdot \sigma$	0.5000	0.0633168724
$3.5 \cdot \sigma$	0.6915	0.0757698916
$4 \cdot \sigma$	0.8413	0.0869321257
$4.5 \cdot \sigma$	0.9332	0.0943165881
$5 \cdot \sigma$	0.9772	0.0980100920
$5.5 \cdot \sigma$	0.9938	0.0994517683
$6 \cdot \sigma$	0.9986	0.0998689954
$6.5 \cdot \sigma$	0.9998	0.0999860378

Рассчитаем вероятность не удаления материала $P(\bar{M})$, исходя из формулы 2:

$$P(\bar{M}) = \lambda \cdot M[b_m],$$

где $\lambda = \frac{1}{S_{z1}} = \frac{1}{0,1} = 10$ – математическое ожидание числа выступов на единицу длины сечения.

Введем необходимые данные в Maple и получим значения вероятности удаления материала (табл. 3):

```
> λ := 10;
λ := 10
λ := 10
> M := Sz1 +  $\frac{\sigma}{\sqrt{2 \cdot \text{Pi}}}$  · e $-\frac{(b_u - S_{z1})^2}{2 \cdot \sigma^2}$  - bu · (1 - Φ);
M := 0.0999860378
> combine(λ · M);
0.9998603780
> combine(1 - (λ · M));
0.0001396220
```

Таблица 3. Значения вероятности удаления материала

b_u	$M[b_m]$	$P(\bar{M})$	$P(M)$
$0.5 \cdot \sigma$	0.0840317759	0.8403177590	0.1596822410
$1 \cdot \sigma$	0.0692439646	0.6924396460	0.3075603540
$1.5 \cdot \sigma$	0.0576744251	0.5767442510	0.4232557490
$2 \cdot \sigma$	0.0519920567	0.5199205670	0.4800794330
$2.5 \cdot \sigma$	0.0541230325	0.5412303250	0.4587696750
$3 \cdot \sigma$	0.0633168724	0.6331687240	0.3668312760
$3.5 \cdot \sigma$	0.0757698916	0.7576989160	0.2423010840
$4 \cdot \sigma$	0.0869321257	0.8693212570	0.1306787430
$4.5 \cdot \sigma$	0.0943165881	0.9431658810	0.0568341190
$5 \cdot \sigma$	0.0980100920	0.9801009200	0.0198990800
$5.5 \cdot \sigma$	0.0994517683	0.9945176830	0.0054823170
$6 \cdot \sigma$	0.0998689954	0.9986899540	0.0013100460
$6.5 \cdot \sigma$	0.0999860378	0.9998603780	0.0001396220

Выполненные расчеты в программе Maple, позволили получить наиболее точные значения вероятности удаления материала в процессе торцового фрезерования. На основе полученных данных построен график зависимости вероятности удаления материала от заданного уровня.

Для более полной оценки стабильности процесса тонкого фрезерования необходимо выполнить данные расчеты с помощью численного интегрирования методом трапеций.

Список литературы

1. Новые производственные технологии: публичный аналитический доклад. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. – 272 с.

2. Братан С.М. Методология стабилизации параметров качества деталей на операциях чистовой и отделочной обработки /С.М. Братан, Ю.К. Новосёлов, С.И. Рощупкин. – Прогрессивные технологии и системы машиностроения, 2016. – № 2(53). С. 23-29.
3. Саблин П.А., Повышение эффективности высокоскоростной механической обработки при фрезеровании. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2008. – 141 с.
4. Анализ качества технологической системы на основе модели описывающей влияние силы резания Шрон Л.Б., Богуцкий В.Б., Гордеева Э.С. //Современные проблемы теории машин. 2021. – № 11. С. 34-36.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. В 10 т. Т. 3. Резание материалов лезвийными инструментами/ Под ред. Ф.В. Новикова, А.В. Якимова. – Одесса: Изд-во ОНПУ, 2003. – 546 с.
6. Novoselov Y. Decomposition of milling operation/ Y. Novoselov, M. Piankovskaya, V. Bogutsky //В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018. 2018. С. 01136.
7. Новоселов Ю.К. Математическая модель корректировки настроек технологической системы на основе применения эволюционной популяции конечных автоматов/ Ю.К. Новоселов, В.Б. Богуцкий, А.Ю. Тараховский //Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2021. № 10. С. 39-43.
8. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке/Ю.К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304с.
9. Пянковская М.В. Формирование требований к выбору режущего инструмента для обработки деталей тонким фрезерованием/ М.В. Пянковская, Ю.К. Новосёлов, В.Б. Богуцкий// В сборнике: Современные технологии: проблемы и перспективы. Сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных. Главный редактор О.В. Мухина. 2019. С. 62-65.

УДК 621.833

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗАПОЛЮСНОЙ ПЕРЕДАЧИ ПО ЗНАЧЕНИЮ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ МАСЛЯНОГО СЛОЯ

А.А. Муховатый¹

¹ *ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», Луганск, Луганская Народная Республика Российская федерация*

АННОТАЦИЯ

Предложен метод синтеза исходного контура зубьев неэвольвентных зубчатых передач по значению относительной толщины масляного слоя, дан пример синтеза данного исходного контура, и проведен сравнительный анализ по критериям работоспособности неэвольвентной и эвольвентной зубчатых передач по всему полю зацепления. К основным критериям работоспособности относятся: критерий потерь мощности в зацеплении, критерий заедания, критерий удельной работы сил трения, критерий износа, критерий контактной прочности.

Ключевые слова: исследование, исходный контур, критерии работоспособности, неэвольвентная зубчатая передача, синтез, анализ, зубья, функция.

INVESTIGATION OF THE DOZALOPLE TRANSMISSION BY THE VALUE OF THE RELATIVE THICKNESS OF THE OIL LAYER

A.A. Mukhovaty¹

¹*«Lugansk Vladimir Dahl State University», Lugansk, LPR, Russian Federation*

ABSTRACT

A method for synthesizing the initial contour of the teeth of non-involute gears by the value of the relative thickness of the oil layer is proposed, an example of the synthesis of this initial contour is given, and a comparative analysis is carried out according to the criteria for the performance of non-involute and involute gears over the en-tire meshing field. The main performance criteria include: the criterion of power loss in engagement, the criterion of sticking, the criterion of the specific work of friction forces, the criterion of wear, the criterion of contact strength.

Keywords: research, initial contour, performance criteria, non-involute gearing, synthesis, analysis, teeth, function.

Зубчатые передачи широко применяются в приводах и трансмиссиях современных транспортных машинах [1-2]. Поэтому актуальными являются исследования, направленные на проектирование зубчатых передач с высокими значениями критериев работоспособности. При прочих равных условиях проектирование зубчатых передач в основном определяется геометрией рабочих поверхностей зубьев, зависящей от геометрических параметров исходного контура, применяемого для профилирования зубьев зацепляющихся колес. Это подтверждает так же актуальность разработки методов синтеза исходного контура зубьев зубчатых передач с высокими критериями работоспособности, определяющими прочность, износостойкость, энергоемкость и задиростойкость передач зацеплением.

Известны исследования по разработке неэвольвентных зубчатых передач с высокими значениями критериев работоспособности [3...9]. Среди таких исследований следует выделить разработки неэвольвентных зубчатых передач на базе исходных контуров синтезируемых по значениям критериев работоспособности этих передач и геометрическим параметрам, характеризующим геометрию исходного контура [3], путем решения дифференциальных уравнений. В связи с этим очень важными являются исследования по созданию и проектированию исходных контуров зубьев передач с высокими критериями работоспособности.

Цель исследования. Разработать метод синтеза геометрических параметров исходного контура зубьев неэвольвентных зубчатых передач по критерию смазки, обладающих высокими значениями критериев работоспособности, определить параметры исходного контура с использованием данного метода, и произвести сравнительный анализ по значениям критериев работоспособности неэвольвентной и эвольвентной зубчатых передач.

Материалы и результаты исследований.

1. Математическая модель синтеза исходного контура.

При синтезе исходных контуров установлено, что значения второй производной функции $f_2(f_1)$, которая описывает профиль исходного контура в пределах поля зацепления, изменяется, как это представлено на рис. 1.

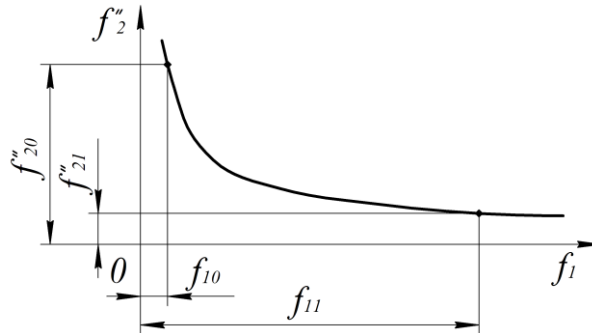


Рисунок 1. Значения f_2'' второй производной функции f_2 ($0 < f_1 \leq 1$).

Изображенный на рис. 1 график приближенно является графиком функции

$$f_2'' = \frac{c^\lambda}{f_1^\lambda}, \quad (1)$$

где λ_1 - показатель степени; c - постоянная величина.

В качестве основы синтеза исходного контура по значениям критериев способности можно принять уравнение (1). Функцию f_2 можно определить, интегрируя (1). В результате интегрирования получаем

$$\begin{aligned} f_2' &= \frac{c^\lambda}{1-\lambda} f_1^{1-\lambda} + c_1, \\ f_2 &= \frac{c^\lambda}{(1-\lambda)(2-\lambda)} f_1^{2-\lambda} + c_1 f_1 + c_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\lambda = 1/\lambda_1$; c_1, c_2 - постоянные интегрирования; f_2' - первая производная функции f_2 по f_1 .

При определении c_2 можно положить $f_2 = 0$ при $f_1 = 0$, т.е. $c_2 = 0$. Для определения λ надо задать значение f_2'' в двух точках профиля исходного контура, например, в точках f_{10} и f_{11} (рис. 2).

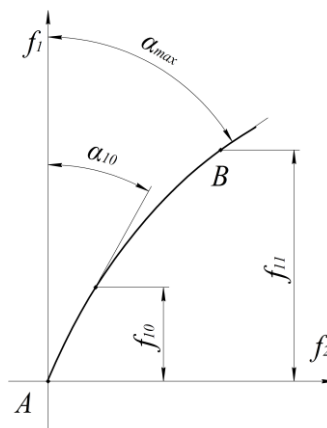


Рисунок 2. Профиль f_2 исходного контура

Эти значения на рис. 1 обозначены f_{20}'' и f_{21}'' . Тогда, используя первое равенство (1), будем иметь

$$\lambda = \frac{\ln f_{20}'' - \ln f_{21}''}{\ln f_{10} - \ln f_{11}}, \quad (3)$$

где $\ln$ - натуральный логарифм.

Значение f_1 при разработке исходного контура можно принять в пределах $f_{10} \leq f_{11} \leq h_a^*$ ($h_a^* = 1$ - высота головки зуба рейки при модуле $m = 1$ мм), а f_{10} можно задавать в пределах $0,01 \leq f_{10} \leq 0,1$. По предварительным данным значение профильного угла исходного контура при $f_1 = f_{10}$ можно принять $7^\circ \leq \alpha_{10} \leq 25^\circ$, а максимальное значение профильного угла при $f_1 = f_{11} - 28^\circ \leq \alpha_{\max} \leq 36^\circ$.

Выбор значений этих углов ограничивается условиями заострения зубьев колес и минимальным значением коэффициента перекрытия (толщина вершины зуба колеса должна иметь значения $S_a \geq (0,2 \dots 0,4)m$, а коэффициент перекрытия - $\varepsilon_\alpha \geq 1,2$).

Значение второй производной f_2'' функции f_2 равно [10]

$$f_2'' = \frac{\zeta'}{(1 - \zeta^2)^{1,5}}, \quad (4)$$

где $\zeta = \sin \alpha$, а ζ' - первая производная ζ по f_1 .

Производная ζ' определяется из дифференциального уравнения и его решения по заданному значению относительной толщины масляного слоя ($\bar{h}_{mc} > 1$):

$$\zeta' = \frac{\zeta(1 - h_o \zeta^{0,74})}{f_1}, \quad (5)$$

$$h_o = [\bar{h}_{mc} (\sin \alpha_o)^{1,15}]^{-0,645}.$$

Значения величин с черточкой сверху при синтезе необходимо задавать. Можно так же задать значения f_{20}'' и f_{21}'' $0 < f_{20}'' \leq 3$, $0,1 \leq f_{21}'' \leq 0,4$ и из (1), (2) и (3) определить параметры исходного контура.

2. Синтез исходного контура.

Определим геометрические параметры исходного контура зубьев дозаполусной незвольвентной зубчатой передачи при следующих исходных данных: $f_{10} = 0,05$, $f_{1\max} = 1$, $\alpha_o = 20^\circ$, $\alpha_{\max} = 32^\circ$. По графику, рис. 3, определяем $\bar{h}_{mc} = 1,78$ при $\alpha_o = 20^\circ$. Применяя результаты работ [11, 12], получим уравнения кривой, которой очерчен исходный контур в промежутке $0,05 \leq f_1 \leq 1$ (размеры в долях модуля) и первых двух производных этой функции по f_1 :

$$\begin{aligned} f_2'' &= 0,0406 f_1^{-1,383}, \\ f_2' &= -0,106 f_1^{-0,383} + 0,6979, \\ f_2 &= -0,172 f_1^{0,617} + 0,6979 f_1. \end{aligned} \quad (6)$$

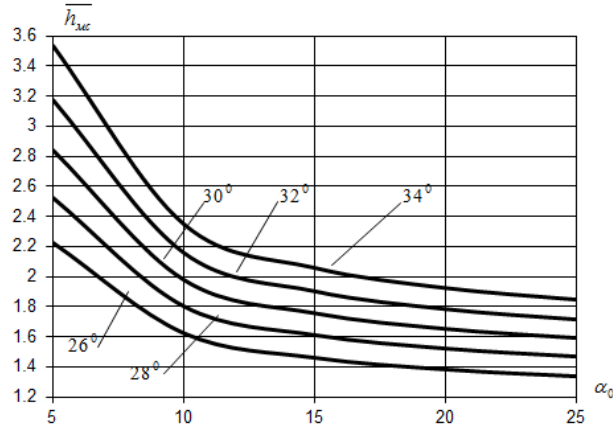


Рисунок 3. Графики зависимости $\bar{h}_{mc}$ от параметров исходного контура при $f_{1max} = 1$; $f_{10} = 0,05$

На рис. 4 изображен профиль исходного контура, а в табл. 1 его геометрические параметры.

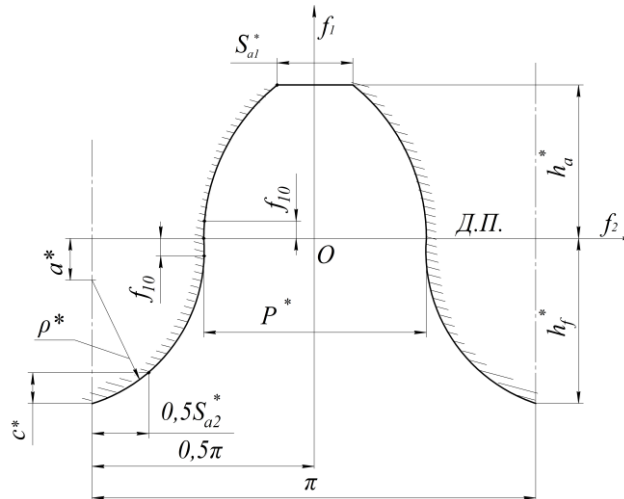


Рисунок 4. Исходный контур (ДП – делительная прямая, $m = 1$ мм).

Таблица 1. Параметры исходного контура (в долях модуля)

f_{10}	α_{10}	h_a^*	h_f^*	ρ^*
0,05	20°	1,0	1,1498	0,3186
c^*	S_{a1}^*	S_{a2}^*	P^*	a^*
0,1498	0,4955	0,545	1,5708	0,8312

Примечания:

1. Боковой зазор в зацеплении зубчатых колес $0,045m$;
2. Коэффициент перекрытия при зацеплении реек $\varepsilon_\infty = 1,32$.
3. Сравнительный анализ значений критериев работоспособности.
Рассмотрим зубчатую передачу:
 - число зубьев шестерни $z_1 = 20$ и колеса $z_2 = 80$;

- радиус начального цилиндра шестерни $R_1 = 10$ мм и колеса $R_2 = 40$ мм;
- исходный контур неэвольвентных зубьев с параметрами табл. 1;
- исходный контур эвольвентных зубьев с профильным углом $\alpha_o = 20^0$;
- приведенный модуль упругости $E_{пр} = 2,1 \cdot 10^5$ Н/мм²;
- твердость зубьев $HB = 2500$ Н/мм²;
- шероховатость рабочих поверхностей зубьев $R_a = 3,2 \cdot 10^{-4}$ мм.

Используя результаты работы [10] для определения критериев работоспособности неэвольвентной (табл. 1) и эвольвентной зубчатых передач, получим данные, представленные на графиках (рис. 5).

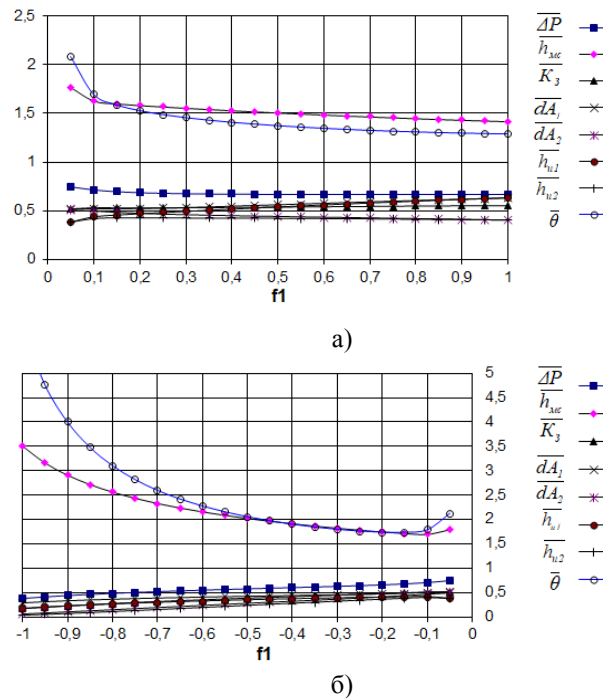


Рисунок 5. Значения критериев работоспособности в поле зацепления:
а) при $-1 \leq f_1 \leq -0,05$; б) при $0,05 \leq f_1 \leq 1$

Из анализа данных графиков (рис. 5) следует, что в пределах поля зацепления неэвольвентная передача имеет следующие значения критериев работоспособности в сравнении с эвольвентной передачей:

- потери мощности в зацеплении $\overline{\Delta P}$ в 1,35...2,7 раза меньше;
- критерий заедания $\overline{K}_з$ в 2...6,25 раз меньше;
- удельные работы сил трения $\overline{dA}_1, \overline{dA}_2$ в 2...3 раза меньше
- критерий износа $\overline{h}_{u1}, \overline{h}_{u2}$ в 1,6...2,7 раза меньше;
- критерий контактной прочности $\overline{\theta}$ в 1,28...4,76 раза больше;
- толщина масляного слоя между зубьями $\overline{h}_{mc}$ в 1,41...3,1 раза больше.

Таким образом, синтезированная зубчатая передача имеет значения критериев работоспособности значительно выше значений критериев эвольвентной передачи практически по всему полю зацепления.

Выводы.

- Разработан метод синтеза исходного контура неэвольвентных зубьев цилиндрических зубчатых передач по критерию толщины масляного слоя.
- Определены геометрические параметры и разработана конструкция исходного контура.
- Произведен сравнительный анализ критериев нагрузочной способности неэвольвентной и эвольвентной зубчатых передач.
- Применение полученных результатов связано с оптимизацией геометрических параметров исходного контура и экспериментальными исследованиями.

Список литературы

1. Автомобили: Конструкция, конструирование и расчет. Трансмиссия: Учеб, пособие для спец. «Автомобили и тракторы» /А. И. Гришкевич, В. А. Вавуло, А. В. Карпов и др.]; Под ред. А. И. Гришкевича.— Мн.: Выш. шк., 1985.— 240 с.
2. Петров А. П. Современные конструкции автоматических коробок передач : учебное пособие / А.П. Петров – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2015. – 80 с.
3. Шишов В.П., Носко П.Л., Филь П.В. Теоретические основы синтеза передач зацеплением: Моногр. — Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2006. — 408 с.
4. Шабанов И.Р. О зубчатой передаче с конхоидальной линией зацепления Надежность и качество зубчатых передач / И.Р. Шабанов - НИИ ИНФОРМТЯЖМАШ. 18-67-106, 1967. — С. 1-8.
5. Аникин Ю.В. Синусоидальное зацепление / Ю.В. Аникин — Воронеж: изд-во ВГУ, 1975. — 56 с.
6. Башански М. Возможность использования неэвольвентного зацепления в коробках передач сельскохозяйственных машин / М. Башански, П. Токоли, Ф. Ваня, И. Кожух // Вісник НТУ «ХПІ» — Харків: НТУ «ХПІ». — 2011. — №29. — С. 21-30.
7. Шишов В.П. Высоконагруженные зубчатые передачи / В.П. Шишов, П.Л. Носко, А.А. Муховатый // Вісник НТУ «ХПІ». — Харків: НТУ «ХПІ». — 2011. — №28. — С. 180-186.
8. Протасов Р.В. Исследование коэффициента перекрытия эволютных передач / Р.В. Протасов, А.В. Устиненко // Вісник НТУ «ХПІ». — Харків: НТУ «ХПІ». — 2011. — №29. — С. 154-165.
9. Шишов В.П. Синтез зубчатых передач с пониженной энергоемкостью / В.П. Шишов, В.В. Бурко, О.А. Ревякина, А.А. Муховатый // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. — 2012. — №13(184). — Ч. 1. — С. 117-123.
10. Муховатый А.А. Дифференциальные уравнения для синтеза исходных контуров зубьев неэвольвентных зубчатых передач /А.А. Муховатый// Вісник нац. у-ту ім. В. Даля. — № 6 (177). - 2012. — С. 240-246.
11. Муховатый А.А. Дозаполусные зубчатые передачи с высокой контактной прочностью зубьев для оборудования механической обработки / А.А. Муховатый // Ресурсосберегающие технологии в металлургии и машиностроении: Сб. науч. тр. №2 (35) 2021. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, - 2021. – 128 с.— С. 73-83.
12. Рябичев В.Д. Усовершенствование оборудования механической обработки за счет синтеза исходных контуров внеполюсных зубчатых передач [Текст] / В.Д. Рябичев, А.А.

Муховатый // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. № 2 (2021). – Брянск: РИСО БГУ, - 2021, – С. 160–165

УДК 621.923.1

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРАМИ ЗОНЫ КОНТАКТА РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА С ДЕТАЛЬЮ**

**Э.Л. Бекиров¹,
И.Э. Теминдаров¹,
Э.Ш. Абдуллаев¹,
С.Д. Джемилов¹**

¹*Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, Симферополь, Россия*

АННОТАЦИЯ

В статье представлены способы повышения эффективности процесса плоского торцевого шлифования за счет управления параметрами зоны контакта режущей поверхности круга с деталью. Для определения площади контакта режущей поверхности круга с деталью использовали компьютерное 3D моделирование, которое показало, что с увеличением глубины обработки производительность процесса будет увеличиваться.

Ключевые слова: плоское торцевое шлифование, режущая поверхность шлифовального круга, площадь контакта режущей поверхности круга с деталью.

**THEORETICAL STUDIES OF THE CONTROL PARAMETERS OF THE CONTACT ZONE
THE GRINDING WHEEL CUTTING SURFACE WITH THE WORKPIECE**

**E.L. Bekirov¹,
I.E. Temindarov¹,
E.Sh. Abdullayev¹,
S.D. Dzhemilov¹**

¹ *Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Russia*

ABSTRACT

The article presents ways to improve the efficiency of the process of flat face grinding by controlling the parameters of the contact zone of the cutting surface of the wheel with the part. To determine the area of contact between the cutting surface of the wheel and the part, 3D computer modeling was used, which showed that with an increase in the depth of processing, the productivity of the process will increase.

Keywords: flat face grinding, the cutting surface of the grinding wheel, the area of contact between the cutting surface of the wheel and the workpiece.

Введение. Известно, что значительное количество изделий в машиностроении и других отраслях производства требует технологических операций плоской шлифовки. Около 20% деталей машиностроения имеют плоские поверхности и значительное их количество подлежит окончательной обработке на плоскошлифовальных станках. При этом по-прежнему важную роль продолжает играть многоместная обработка, позволяющая существенно повысить показатели производительности и точности обработки изделий. Традиционно в условиях производства преимущественно используется плоская шлифовка периферийными кругами. Линейный характер контакта в зоне резки обуславливает высокие удельные нагрузки на абразивные зерна и тем самым способствует интенсификации процесса их самозатачивания при значительных величинах удельного расхода абразивно-алмазных материалов. Схема плоского шлифования торцевыми алмазно-абразивными кругами занимает особое место и может быть реализована на станках с вертикальным и горизонтальным шпинделем с использованием как прямоугольных, так и вращающихся столов. Например, значительное количество торцевых кругов используется и на заточных станках, широко применяемых в промышленности. Плоское торцевое шлифование имеет лучшие показатели в плане шероховатости обрабатываемой поверхности, а также ее макрогеометрии. Это особенно касается плоской торцевой шлифовки, которая характеризуется наибольшими значениями дуги контакта с поверхностью детали, а следовательно, и площади обработки. Это вызывает образование на шлифованных поверхностях прижогов, микротрещин, а в поверхностном слое детали – структурных превращений и значительных остаточных напряжений растяжения, которые, как правило, неблагоприятны. Для многих деталей наличие шлифовальных дефектов может быть причиной их усталых разрушений.

Оптимизация плоского торцевого шлифования должна идти путем усовершенствования факторов, влияющих на снижение его теплонапряженности. На сегодняшний день существует много факторов, с помощью которых можно управлять тепловой напряженностью процесса шлифования. Это прежде всего управление площадью контакта круга с деталью за счет предварительного наклона оси вращения шпинделя, улучшение условий охлаждения зоны обработки технологической жидкостью (ТЖ), создание механических колебаний в зоне обработки, правка режущей поверхности круга (РПК) правящими карандашами на основе синтетического поликристаллического алмаза (СПА) и прочее. Но в отношении рассматриваемого процесса эти вопросы исследованы недостаточно, что в значительной степени сдерживает его использования. Поэтому задача повышения эффективности процесса плоского торцевого шлифования за счет управления параметрами зоны контакта круга с деталью (т.е. путем усовершенствования факторов, влияющих на снижение его теплонапряженности) представляет собой актуальную научную и практическую задачу.

Цель статьи – усовершенствование процесса плоского торцевого шлифования за счет управления параметрами зоны контакта режущей поверхности круга с деталью.

Основная часть. Уже достаточно публикаций, подтверждающих эффективность плоского торцевого шлифования относительно обработки хрупких материалов (например, изделий из керамики, сверхтвердых поликристаллов и т.п.) по сравнению с процессами, основанными на использовании периферийных кругов. Среди основных преимуществ такого процесса относительно станков с вертикальным расположением шпинделя [1], выделим те из них, которые особенно важны относительно решаемых задач: уменьшение процента брака из-за скалывания и растрескивания (особенно при обработке хрупких материалов) за счет равномерного распределения давления в зоне контакта РПК с заготовкой [7], [12]; возможность многоместной параллельной обработки заготовок и упрощения процесса их закрепления (например, путем использования сепараторов [3]); экологический аспект и т.п. Что касается последнего случая, то подразумевается то, что при использовании станков с вертикальным

шпинделем с применением специальных ванн есть возможность не только значительного снижения интенсивности разбрызгивания ТЖ, но и упрощения реализации мер по защите работающего персонала [3]. Отметим, что понятие «технологическая жидкость» используется нами из тех соображений, что по сравнению с понятием «смазочно-охлаждающая технологическая среда» он имеет более широкое значение, поскольку в качестве ТЖ может использоваться, например, электролит, дополнительно выполняющий функцию проводника электрического тока. Основные схемы плоского торцевого шлифования приведены на рисунках 1 и 2 [9], [11].

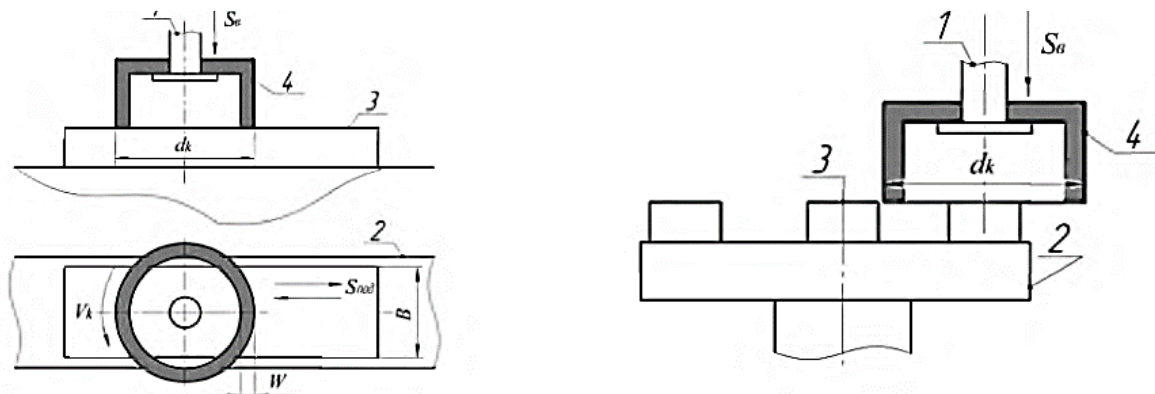


Рисунок 1. Основные схемы плоского торцевого шлифования: 1 – шпиндель; 2 – стол станка; 3 – заготовка; 4 – шлифовальный круг

Плоскошлифовальные станки могут работать по принципу продольно-строгальных (рисунок 1а) или карусельных (рисунки 1, б и 2, а) станков. В последнем случае в работе могут участвовать один (рисунок 2, а) или несколько шлифовальных кругов (рисунок 2, б). Главное движение совершает шлифовальный круг, вращающийся со скоростью V . Существуют устройства для реализации планетарной схемы обработки [12], [13], (рисунок 2, в.), а также в некоторых случаях находят использование двухсторонних станков (рисунок 2, г), на которых можно одновременно обрабатывать поверхности детали сразу с обеих сторон [2], [9]. Например, известная фирма США выпускает шлифовальные станки, которые с высокой эффективностью реализуют такую схему плоского торцевого шлифования [4] (рисунок 3). Этот вид обработки особенно эффективен, например, при шлифовании тонкостенных деталей [8], поскольку позволяет реализовать принцип уравнивания сил при обработке.

Процесс плоской торцевой шлифовки с прямоугольным или вращательным столами может быть реализован по нескольким схемам. Если диаметр круга превышает ширину детали, то наиболее эффективной схемой следует считать схему обработки «на проход». Эта схема особенно эффективна для шлифования плоских поверхностей в условиях массового и крупносерийного типов производств. В этом случае используются две разновидности подач – продольная и вертикальная (на глубину обработки).

Поскольку ось вращения шпинделя плоскошлифовального станка имеет предварительный наклон на угол α , то проекции шлифованного круга на основную и профильную плоскости представляют собой эллипсы, т.е. кривые второго порядка [15], [18]. Поэтому для получения аналитических зависимостей параметров зоны контакта РПК с деталью были использованы методы аналитической геометрии, которые широко применяются специалистами в области различных наук. Параллельно с этим была проведена серия компьютерных экспериментов в среде КОМПАС [12], [5]. Это позволило, во-первых, осуществить визуализацию данных, во-вторых, подтвердить достоверность результатов

аналитических расчетов [6], [10], [12], [17] а, в-третьих, получить как аналитические, так и ступенчатые зависимости для расчета параметров зоны контакта РПК с деталью, что упрощает работу технолога при разработке операций плоской торцевой шлифовки. В обоих случаях был применен чисто геометрический подход. Он заключался в следующем:

- Считалось, что глубина резания не влияет на формирование профиля детали, с одной стороны, и не учитывалось возможное влияние явлений, связанных с проявлением действия физического фактора (например, упругое восстановление и т.д.), с другой [14], [16], [19].

- Диаметр круга не меняется по мере его износа. Это требование можно реализовать на практике при условии, когда в качестве шлифовального круга используется, например, чашка цилиндрическая.

- РПК практически не имеет площадки износа (что на практике обеспечивается регулярной правкой круга, например, алмазным карандашом).

- Жесткость технологической системы высока, что реально имеет место при обработке на станках с вертикальным шпинделем.

- Применялись абразивные круги со сплошной рабочей поверхностью. Это позволяло реализовать крайний случай, когда площадь контакта РПК с деталью является максимальной.

- При расчетах параметров (в том числе и площади контакта РПК с деталью) подразумеваются их номинальные значения.

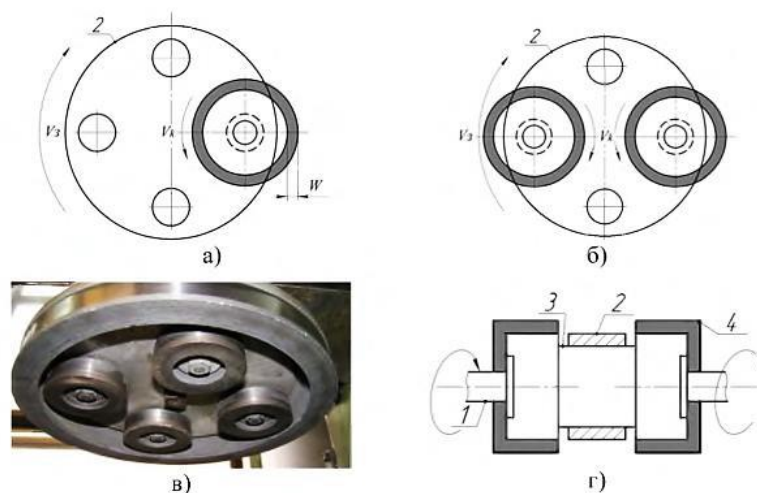


Рисунок 2. Разновидности схем плоской торцевой шлифовки: 1 – шпиндель; 2 – приспособление; 3 – заготовка; 4 – шлифовальный круг

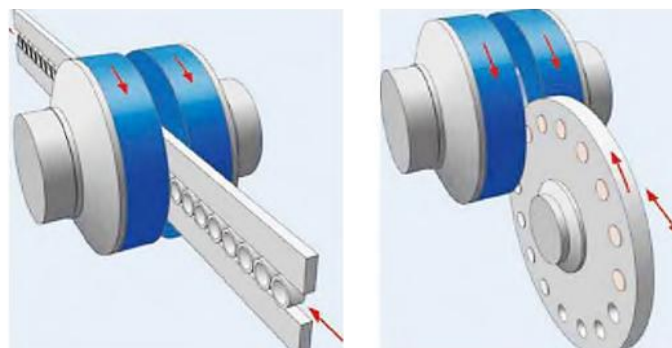


Рисунок 3. Схемы использования процесса плоского торцевого шлифования сдвоенными шлифовальными кругами

Принято во внимание, что длина дуги контакта РПК с деталью зависит главным образом от радиуса круга и ширины шлифуемой поверхности. Скорость продольной подачи, ввиду ее небольшой величины по сравнению с окружной скоростью круга, влияет на длину дуги контакта незначительно. На наш взгляд по своей сути геометрическое компьютерное моделирование можно считать экспериментом на грани теоретического исследования и наоборот. Его можно спланировать таким образом, чтобы получить возможность путем математической обработки результатов эксперимента методом наименьших квадратов вывести эмпирические зависимости. Установлено, что для этого хорошо подходят ступенчатые зависимости, которые достаточно наглядно свидетельствуют не только о характере, но и о степени влияния условий обработки на исследуемый параметр. В некоторых случаях это более выгодно отличает их от аналитических зависимостей, особенно сложных. В нашем случае ступенчатые зависимости, связанные с определением параметров зоны контакта РПК с деталью, имеют право на существование наравне с аналитическими, т.к. они очень удобны для технологов.

На рисунке 3 представлен фрагмент, касающийся определения параметров зоны контакта РПК с деталью для конкретных условий.

Особенностью является то, что эллипс, являющийся проекцией окружности диаметром $d_k = 150$ мм, которая наклонена под углом α (рисунок 3а, б), на горизонтальную плоскость (вид В) мало чем отличается от окружности чего нельзя сказать о профильной проекции (рисунок 3в). Его большая полуось равна радиусу круга ($2a = d_k$), а разница между меньшей и большей полуосями незначительна. В нашем случае $b = a \cdot \cos \alpha = 149,98$ мм, то есть разница не превышает 0,5%. Для указанных условий рисунка 3 в контакте с деталью принимает участие только часть (~33%) ширины РПК ($W' = 6,55$ мм, рисунок 3а).

Ширину B' и длину L дуги контакта РПК с деталью удобно определять по горизонтальной проекции (вид В, рисунок 4, б). В нашем случае они равны 61,30 мм и 63,16 мм соответственно. Вогнутость A и высоту остаточных гребенек H (при многопроходной обработке) определяли на профильной проекции (вид Б, рисунок 4, в). Например, текущее значение вогнутости равно глубине обработки, а суммарное, когда РПК будет полностью в контакте с деталью (по всей ширине $B = 250$ мм), $A = 0,15$ мм.

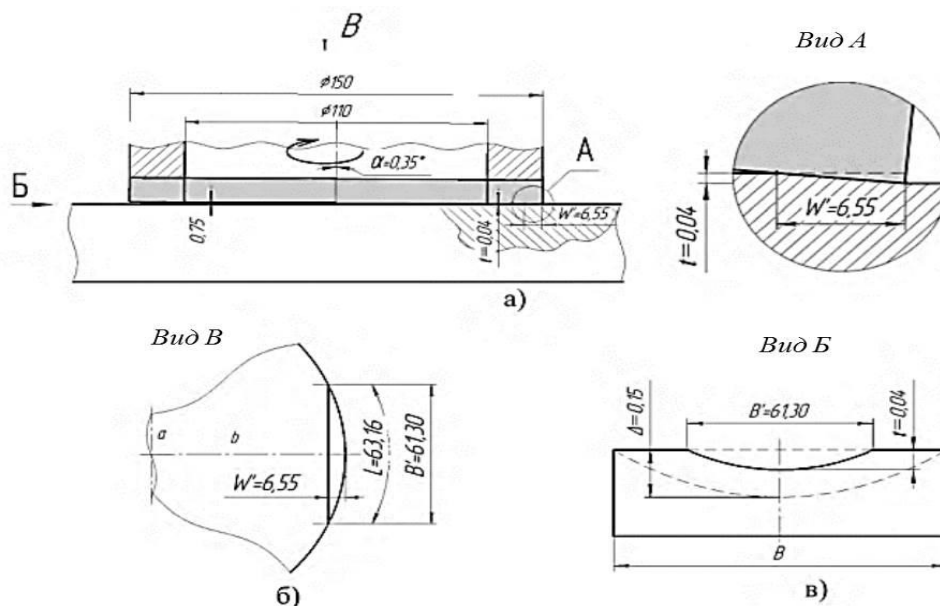


Рисунок 4. Пример и результаты моделирования

Для определения площади контакта РПК с деталью использовали компьютерное 3D моделирование (рисунки 4 – 7).

Основной задачей было получение опытной модели и с ее помощью определить искомые параметры. Построение модели начинается с основы – первого формообразующего элемента. В нашем случае это часть поверхности условно обрабатываемой детали. Для получения таких данных как площадь контакта круга с деталью, длина дуги контакта и прочее создаем эффект обработки поверхности заданной детали. Для этого в средней плоскости нашей заранее созданной детали строим эскиз (рисунок 5, а), имитирующий сечение той части шлифовального круга, выполняющей шлифовку в данный момент в данном месте. Посредством операции «Вырезать вращением» удаляем ту часть поверхности детали, которую обработал круг (рисунок 5, б). С помощью инструментальной панели «Измерение» можно выполнить различные измерения, в том числе и площадь (рисунок 6).

На рисунке 7 представлен фрагмент 3D-модели зоны контакта РПК с деталью и результат измерения ее площади.

Общими условиями эксперимента было следующее: $d_k = d_{кр.зов} = 400$ мм; $t = 0,05$ мм; $\alpha = 1^\circ$. Было принято предположение, что внутренний диаметр круга является таким и выполняется условие: $W' < W$. Здесь параметр W представляет собой ширину РПК ($W = (d_k - d_{min})/2$), а $d_{кр.вн} = d_{min}$.

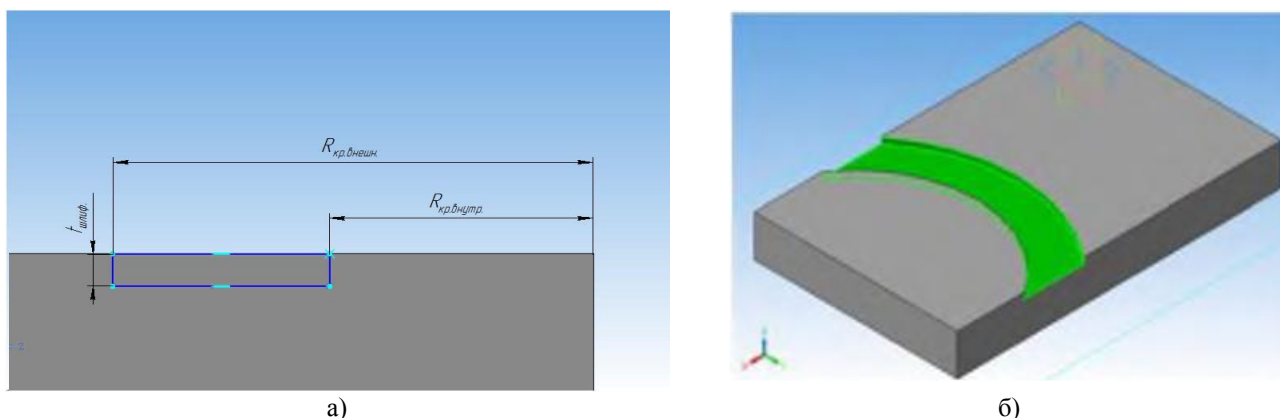


Рисунок 5. Эскиз круга (а) и фрагмент обработанной поверхности (б)

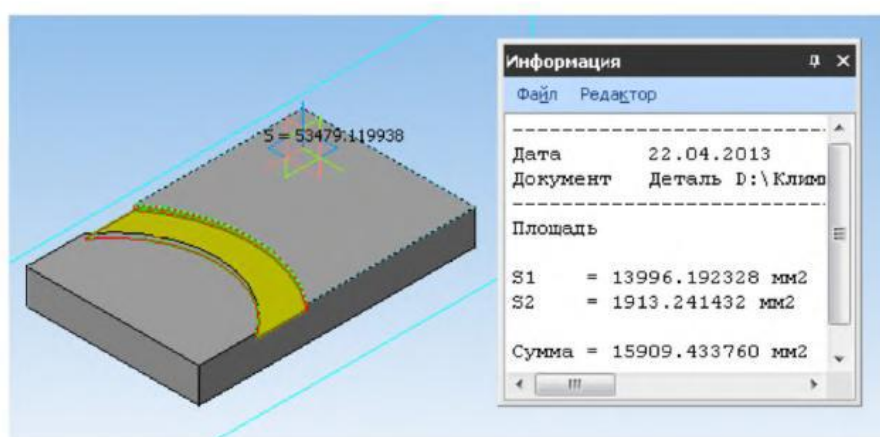


Рисунок 6. До определения площади контакта РПК с деталью

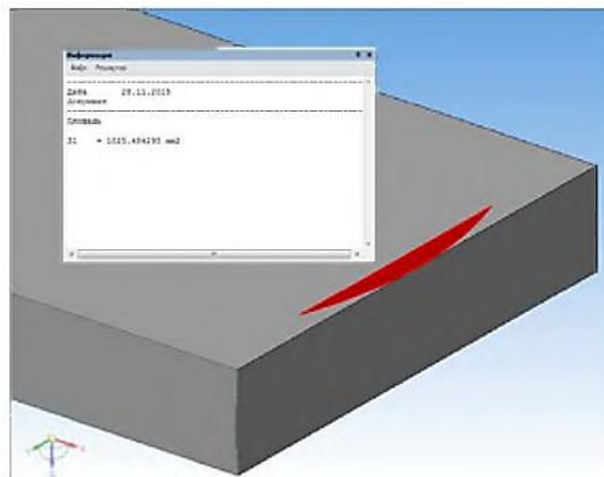


Рисунок 7. Фрагмент измерения площади при $i = 0,01$ мм

Компьютерное 3D-моделирование показало, что, например, картина изменения площади контакта РПК с деталью по мере увеличения глубины шлифования имеет вид, представленный на рисунке 8. Т.е. с увеличением глубины обработки производительность процесса будет увеличиваться за счет существенного роста площади контакта РПК с деталью. Это свидетельствует о том, что обработку при $t = \text{const}$ можно считать дополнительной возможностью управления величиной площади контакта. Графики, приведенные на рисунке 10, наглядно иллюстрируют разницу в значениях площади контакта РПК с деталью при шлифовании по первому (рисунок 8) и второму (рисунок 9) подходам.

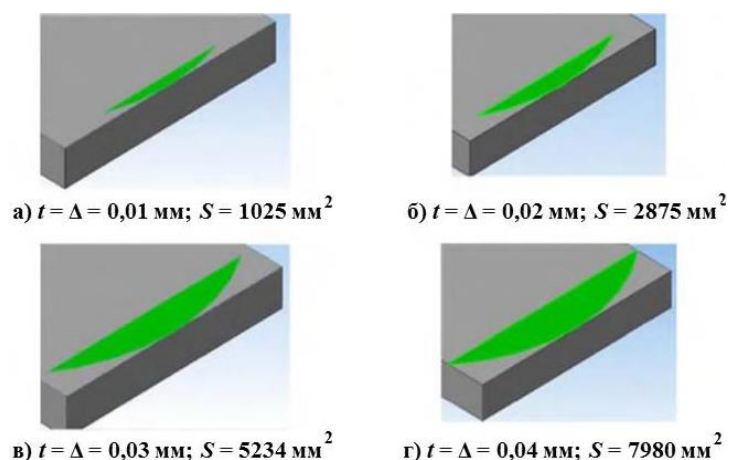


Рисунок 8. 3D-модели, отражающие влияние глубины шлифования «на проход» на площадь контакта РПК с деталью ($B = 250$ мм; $d_k = 400$ мм; $\alpha = 0,05^\circ$)

В первом случае изменяются оба параметра, непосредственно влияющие на площадь контакта РПК с деталью (т.е. длина W' и длина дуги контакта L), а во втором $W' = \text{const}$, а изменение значения площади происходит за счет увеличения длины дуги контакта L . В результате этого площадь контакта во втором случае уменьшается в несколько раз. Это дополнительный резерв для управления тепловой напряженностью процесса плоского торцевого шлифования.

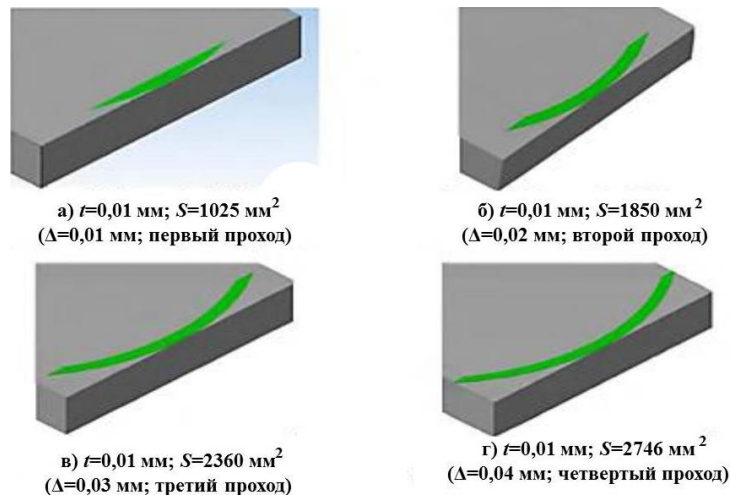


Рисунок 9. 3D-модели, отражающие изменение площади контакта РПК с деталью при $t = \text{const}$ ($B = 250 \text{ мм}$; $d_k = 400 \text{ мм}$; $\alpha = 0,05^\circ$)

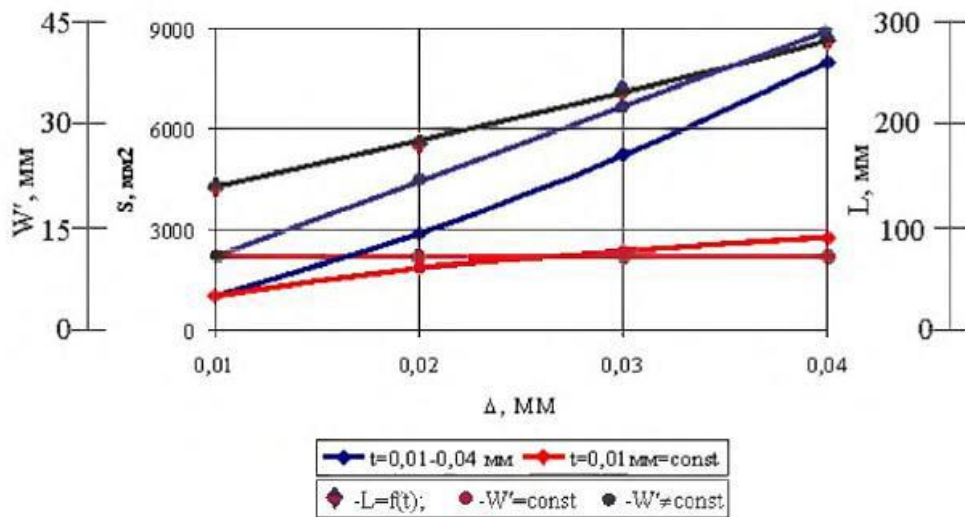


Рисунок 10. Иллюстрация возможности уменьшения площади контакта РПК с деталью при шлифовании «на проход» ($B = 250 \text{ мм}$; $d_k = 400 \text{ мм}$; $\alpha = 0,05^\circ$)

Закключение. Анализ зависимостей, отражающих влияние условий обработки на площадь, показывает, что предыдущий наклон оси шпинделя на угол α позволяет в достаточно широких пределах управлять значением площади S . Наиболее резкое изменение площади имеет место в зоне малых значений углов предыдущего наклона оси шпинделя ($\alpha < 0,25^\circ$) вследствие соответствующего изменения ширины и длины зоны контакта РПК с деталью. С одной стороны, как уже отмечалось, при значительной площади в зоне контакта РПК с деталью могут развиваться высокие температуры. Но с другой — благодаря тому, что такие значения угла α характерны, как правило, для чистовой шлифовки (которая, как известно, реализуется с малыми глубинами обработки), это в целом не приводит к резкому росту тепловой напряженности процесса обработки, что является положительным фактором.

Список литературы

1. Горбацевич, А. Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения [Текст] : [учеб. пособие для машиностроит. спец.] / А. Ф. Горбацевич, В. А. Шкред. - Мн.: Выш. Школа, 1983. – 256 с.
2. Горошкин, А. К. Приспособления для металлорежущих станков [Текст] : А. К. Горошкин. – М: Машиностроение, 1979. – 302 с.
3. Чумаков, Г. С. Методические указания к выполнению контрольной работы по курсу "Проектирование контрольно-измерительных приспособлений" для студентов специальностей 12.01 "Технология машиностроения" [Текст] : / Г. С. Чумаков.– Харьков, ХПИ, 1990. – 56 с.
4. Ансеров, М. А. Приспособления для металлорежущих станков. Расчеты и конструкции [Текст] : М. А. Ансеров. – М: Машиностроение, 1964. – 428 с.
5. Грабченко, А. И. Интегрированные процессы обработки материалов резанием Учебник [для высших учебных заведений] / [А. И. Грабченко, В. А. Залого, Ю. Н. Внуков и др.]; под общ. ред. А. И. Грабченко и В. А. Залого. - Сумы: Университетская книга, 2017. - 451 с.
6. Кацев, П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П. Г. Кацев. - М.: Машиностроение, 1974. - 231 с.
7. Киндрук, М. КОМПАС-3Б У10 на 100 % / М. Киндрук. - Питер: Санкт-Петербург, 2009. ISBN 978-5-388-00375-1. - 559 с.
8. Киселев, Е. С. Научные основы и технология применения смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке: сборник учебно-исследовательских лабораторных работ / Е. С. Киселев, В. Н. Ковальногов. - Ульяновск: УлГТУ, 2008. - С. 50 - 55.
9. Козакова, Н. В. Определение рациональных характеристик алмазных кругов путем 3D моделирования процессов их изготовления и шлифования сверхтвердых материалов: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Козакова Наталья Витальевна. - Харьков, 2004. - 210 с.
10. Корчак, С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак - М.: Машиностроение, 1974. - 280 с.
11. Краснощек, Ю. С. Работоспособность кругов при алмазно-искровом шлифовании твердых сплавов / Ю. С. Краснощек, М. Д. Узунян // Резание и инструмент. - Харьков: ХПИ, 1980. - Вып. 23. - С. 3 - 10.
12. Криворучко, Д. В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залого. Под общей редакцией В. А. Залого - Сумы: Университетская книга, 2012. - 450 с.
13. Кумабэ, Д. Вибрационное резание. Пер. с яп. С. Л. Масленникова / Под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с.
14. Лоскутов, В. В. Шлифовальные станки / В. В. Лоскутов. - М.: Машиностроение, 1976. - 191 с.
15. Bratan S. Application of Combined Taps for Increasing the Shaping Accuracy of the Internal Threads in Aluminium Alloys / S. Bratan, P. Novikov, S. Roshchupkin // Procedia Engineering. - 2016. - № 150. - P. 802-808.
16. Bratan S. Synthesis of lunberger stochastic observer for estimation of the grinding operation state / S. Bratan, S. Roshchupkin // MATEC Web of Conferences. - 2018. - № 224(1-2):01133. - P. 8.
17. Kharchenko A. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding / A. Kharchenko, A. Chasovitina, S. Bratan // Materials Today: Proceedings. - 2021. - № 38. - P. 2088-2091.

18. Stadnik T. Effect of Process Modes on Tangential Component of Cutting Force during Belt Rotary Grinding of Aluminium Alloy Blanks D 16 / T. Stadnik, D. Sidorov, I. Temindarov, P. Novikov // *Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. – 2021. – P. 466-472.

УДК 666.9-127

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВСПЕНЕННЫХ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

***Е.А. Яценко¹,
А.И. Изварин¹,
С. Чаудхари¹,
В.С. Яценко¹***

¹ *ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», Новочеркасск, Российская федерация*

АННОТАЦИЯ

Большое количество накопления золошлаковых отходов обуславливает необходимость их переработки. Геополимерные материалы получают путем реакции щелочной активации. Произведены расчеты состава сырьевой смеси для получения вспененных геополимерных материалов. Проведен синтез образцов с разным содержанием гидроксида калия. Установлено, что гидроксид калия способствует синтезу в продуктах гидратации низкоосновных фаз гидросиликатного и щелочного алюмосиликатного состава. Определены физико-механические свойства, макро- и микроструктура полученных геополимерных материалов. Сделаны выводы об оптимальном количестве гидроксида натрия в составе сырьевой смеси для получения вспененных геополимерных материалов с минимальной плотностью.

Ключевые слова: вспененные геополимерные материалы, золошлаковые отходы, щелочная активация, пористая структура.

STUDY OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF FOAMED GEOPOLYMER MATERIALS BASED ON SOLID FUEL ENERGY WASTE

***E.A. Yatsenko¹,
A.I. Izvarin¹,
S. Chaudhary¹,
V.S. Yatsenko¹***

¹ *FSBEI HE «Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)», Novocherkassk, Russian Federation*

ABSTRACT

A large amount of accumulation of ash and slag waste necessitates their processing. Geopolymer materials are obtained by alkaline activation reaction. Calculations of the composition of the raw mixture for the production of foamed geopolymer materials have been carried out. The

synthesis of samples with different content of potassium hydroxide was carried out. It has been established that potassium hydroxide promotes the synthesis of low-basic phases of hydrosilicate and alkaline aluminosilicate composition in hydration products. The physical and mechanical properties, macro- and microstructure of the obtained geopolymer materials are determined. Conclusions are drawn about the optimal amount of sodium hydroxide in the composition of the raw mixture for obtaining foamed geopolymer materials with a minimum density.

Keywords: foamed geopolymer materials, ash and slag waste, alkaline activation, porous structure.

Вспененные геополимерные материалы представляют собой неорганические пористые материалы, которые могут быть получены путем щелочной активации отходов твердотопливной энергетики (золы-уноса, шлака, золошлаковой смеси) [1–4]. Золошлаковые отходы образуются при сжигании угля в топках электростанций и складываются на специальных полигонах [5]. Во всем мире каждый год на таких полигонах накапливается до 750 млн т золошлаковых отходов [6]. Они оказывают вредное воздействие на окружающую среду, при их накоплении происходит загрязнение подземных вод и территорий, которые являются непригодными для использования в сельском хозяйстве [7–9].

В качестве активаторов золошлаковых отходов используют смесь гидроксида натрия или калия и жидкого стекла [10].

Присутствие жидкого стекла увеличивает скорость реакции геополимеризации и является ключевым для инициирования олигомеров, что, следовательно, облегчает поликонденсацию [11–13]. Гидроксид калия (KOH) является более предпочтительным, по сравнению с гидроксидом натрия (NaOH), так как катион калия является более активным при полимеризации и прочностные характеристики получаемых геополимерных материалов выше [14,15].

Присутствие алюминия в щелочном растворе образует вспененный геополимер с низкой плотностью, учитывая, что вязкость смеси допускает образование пор. Алюминий влияет на внутреннюю и внешнюю структуру, на скорость и степень геополимеризации, поскольку алюминий является одним из реакционноспособных соединений, образующих полимерный неорганический каркас [16].

В случае вспенивания на основе алюминия вместо изменения содержания алюминия или изменения температуры более эффективно контролировать содержание щелочных активаторов, сохраняя при этом минимальное содержание алюминия. Гидроксид калия действует как катализатор окислительно-восстановительной реакции алюминия, а силикат натрия ее ингибирует [17]. Кроме того, в целях теплоизоляции рекомендуется использовать в геополимерной структуре минимальное количество металлических компонентов, так как их присутствие увеличивает теплоотдачу [18].

Поэтому целью данной работы является исследование структуры и свойств вспененных геополимерных материалов, полученных с различным содержанием гидроксида калия.

В качестве сырьевых компонентов для синтеза вспененных геополимерных материалов использовали: золошлаковые отходы (ЗШО) Новочеркасской ГРЭС, жидкое стекло, гидроксид калия, порошок алюминия и вода. В табл. 1 приведен химический состав золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС.

Синтез вспененных геополимерных материалов проводили по следующим образом: раствор КОН смешивали с навеской жидкого стекла. После этого в полученный раствор добавляли золошлаковый отход и перемешивали в течении 1 мин для активации ЗШО. На заключительной стадии в смесь добавляли порообразователь – порошок алюминия и

перемешивали в течении 30 с. Полученные составы вливали формы и отправляли на отверждение. Отверждение происходило в сушильном шкафу в течение 12 часов при 80 °С. Компонентный состав сырьевой смеси приведен в табл.2.

Таблица 1. Химический состав золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС

Оксид	Содержание, мас. %
Na ₂ O	0,92
MgO	2,08
Al ₂ O ₃	18,78
SiO ₂	51,23
K ₂ O	3,04
CaO	3,10
TiO ₂	0,78
MnO	0,13
Fe ₂ O ₃	10,27
P ₂ O ₅	0,13
SO ₃	0,31
ППП	9,23

Таблица 2. Компонентный состав сырьевой смеси, мас. %

Компонент	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4
ЗШО	76	75	74	73
Жидкое стекло	21	21	21	21
Гидроксид калия	1	2	3	4
Порошок алюминия	2	2	2	2
Вода, сверх 100	2	4	6	8

Плотность образцов ρ , кг/м³, определяли по формуле 1:

$$\rho = \frac{m}{V} \cdot 1000, \quad (1)$$

где – m масса образца, г; V – объем образца, см³.

Прочность на сжатие образцов определялась на гидравлическом прессе марки ТП-1-350.

На рис. 1 показана микроструктура синтезированных геополимерных материалов.

Как видно из рис. 1, при увеличении содержания гидроксида калия размер пор увеличивается. Следовательно, чем больше щелочи в составе реакционной смеси, тем активнее происходит вспенивание геополимерного материала. С увеличением концентрации КОН в геополимерном материале растворимость аморфного диоксида кремния и оксида алюминия в

ЗШО увеличивается. В реакции синтеза геополимера участвует большее количество растворенных ионов Si и Al, что приводит к большому количеству продуктов синтеза.

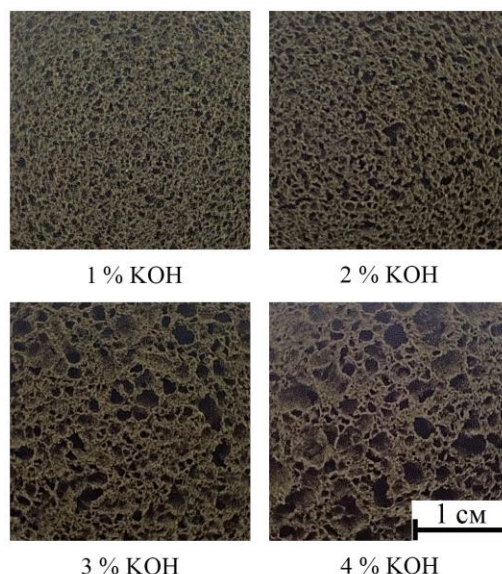
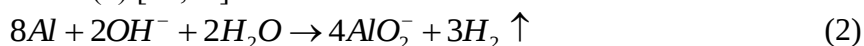


Рисунок 1. Макроструктура синтезированных геополимерных материалов

Процесс порообразования при получении пористых геополимерных материалов при использовании в качестве порообразователя алюминиевого порошка заключается во взаимодействии щелочной составляющей с алюминиевым порошком. Алюминиевый порошок участвует в окислительно-восстановительной реакции в щелочном растворе с выделением водорода, в соответствии с уравнением (2) [19,20]:



На рис. 2 показана микроструктура синтезированных геополимерных материалов.

Как видно из рис. 2, образцы обладают закрытыми сферическими порами, разделенными тонкими перегородками из стекловидного вещества. Размер пор у образцов, полученного с 1 % КОН, составляет до 300 мкм, с 2 % КОН до 500 мкм, с 3 % КОН до 700 мкм, с 4 % КОН до 1000 мкм.

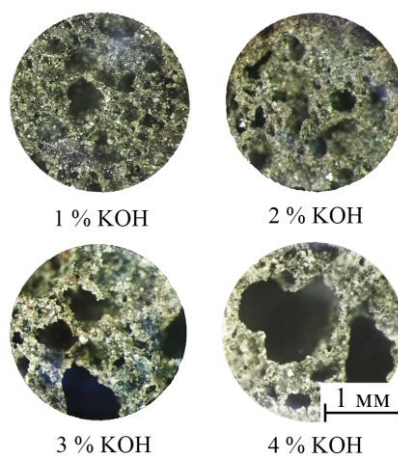


Рисунок 2. Микроструктура синтезированных геополимерных материалов

Исследования по выбору оптимального количества гидроксида калия для синтеза вспененных геополимеров показали, что наилучшими технико-эксплуатационными свойствами обладают образец, полученный с 3 % КОН (рис.3). У образца плотность на сжатие и прочность составляет 475 кг/м^3 и $0,91 \text{ МПа}$.

Таким образом, была показана возможность получения геополимерных материалов из отходов твердотопливной энергетики. Определена макро- и микроструктура синтезированных геополимерных материалов. Установлено, влияние содержания гидроксида калия в сырьевой смеси на свойства полученных геополимерных материалов, оптимальное содержание составляет 3 %.

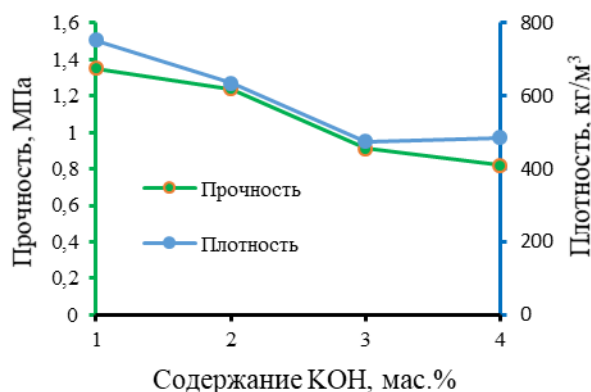


Рисунок 3. Зависимость прочности и плотности синтезированных геополимерных материалов от концентрации гидроксида калия

Работа выполнена в рамках реализации проекта по соглашению о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации «Углеродно-нейтральные технологии рециклинга крупнотоннажных отходов топливной энергетики с получением функциональных геополимерных материалов» от «29» июня 2022 г., № 075-15-2022-1111.

Список литературы

1. Longos Jr A. Optimization of the mix formulation of geopolymer using nickel-laterite mine waste and coal fly ash / Jr.A. Longos, A.A. Tigue, I.J. Dollente et al // Minerals. – 2020. – vol. 10. – P.1144.
2. Ferdous M.W. A detailed procedure of mix design for fly ash based geopolymer concrete / M.W. Ferdous, O. Kayali, A. Khennane et al // Proceedings of the fourth Asia-Pacific conference on FRP in structures. – 2013. – P. 11–13.
3. Łach M. Determination of the influence of hydraulic additives on the foaming process and stability of the pro-duced geopolymer foams / M. Łach, K. Pławecka, A. Bąk et al // Materials. – 2021. – vol. 14. – P. 5090.
4. Яценко Е.А. Конструкционные геополимерные материалы на основе отходов угольной энергетики / Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, Л.А. Яценко, А.И. Изварин // XII Международное Курнаковское совещание по физико-химическому анализу (Санкт-Петербург, 27–29 сентября 2022 г.). – Санкт-Петербург, 2022. – С. 90-92.

5. Ryabov Y.V. Methods for beneficiation of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants and ways for their commercial use (a review) / Y.V. Ryabov, L.M. Delitsyn, N.N. Ezhova, S.V. Sudareva // *Thermal Engineering*. – 2019. – vol. 66. – P.149–168.
6. Asokan P. Characteristics variation of coal combustion residues in an Indian ash pond / P. Asokan, M. Saxena, A. Aparna, S.R. Asoletar // *Waste Management & Research*. – 2004. – vol. 22. – P.265–275.
7. Khamidov A. Research of ash-slag mixtures for the production of building materials / A. Khamidov, I. Akhmedov, S. Kholmirezayev et al // *Science and innovation*. – 2022. – vol. 1. – P. 1020–1026.
8. Menshov P.V. Ash and slag waste as a secondary raw material / P.V. Menshov, Y.V. Khlupin, O.I. Nalesnik, A.V. Makarovskikh // *Procedia Chemistry*. – 2014. – vol. 10. – P. 184–191.
9. Tiwari M.K. Suitability of leaching test methods for fly ash and slag: A review / M.K. Tiwari, S. Bajpai, U.K. De-wangan, R.K. Tamrakar // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. – 2015. – vol. 8. – P. 523–537.
10. Cho Y.K. Effect of Na₂O content, SiO₂/Na₂O molar ratio, and curing conditions on the compressive strength of FA-based geopolymer / Y.K. Cho, S.W. Yoo, S.H. Jung et al // *Construction and Building Materials*. – 2017. – vol. 145. – P. 253–260.
11. Rattanasak U. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer / U. Rattanasak, P. Chidaprasirt // *Minerals Engineering*. – 2009. – vol. 22. – P. 1073–1078.
12. Heah C.Y. Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers / C.Y. Heah, H. Kamarudin, A.M.M. Al Bakri et al // *Construction and Building Materials*. – 2012. – vol. 35. – P. 912–922.
13. Panias D. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers / D. Panias, I.P. Giannopoulou, T. Perraki // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2007. – vol. 301. – P. 246–254.
14. Liew Y.M. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review / Y.M. Liew, C.Y. Heah, H. Kamarudin et al // *Progress in Materials Science*. – 2016. – vol. 83. – P. 595–629.
15. Gharzouni A. Effect of the reactivity of alkaline solution and metakaolin on geopolymer formation / A. Gharzouni, E. Joussein, B. Samet et al // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2015. – vol. 410. – P. 127–134.
16. Ducman V. Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of al powder or H₂O₂ as foaming agents / V. Ducman, L. Korat // *Materials characterization*. – 2016. – vol. 113. – P. 207–213.
17. Hajimohammadi A. regulating the chemical foaming reaction to control the porosity of geopolymer foams / A. Hajimohammadi, T. Ngo, P. Mendis, J. Sanjayan // *Materials & Design*. – 2017. – vol. 120. – P. 255–265.
18. Rao P.R. Recent developments in thermally insulating materials based on geopolymers – a Review article / P.R. Rao, M. Momayez, K.A. Runge, K. Muralidharan // *Mining, Metallurgy & Exploration*. – 2020. – vol. 37. – P. 995–1014.
19. Яценко Е.А. Исследование возможности синтеза стеклокристаллических геополимерных материалов / Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.В. Рябова, Л.А. Яценко // *Стекло: наука и практика (GlasSP2021)*. – 2021. – С. 25–27.
20. Walbrück, K. Natural fiber-stabilized geopolymer foams—A review / K. Walbrück, F. Maeting, S. Witzleben, D. Stephan // *Materials*. – 2020. – vol. 13(14). – P. 3198.

УДК 621.921.23

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕСКОСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Э. Ш. Джемилов¹,
Э. Р. Ваниев¹,
К. Э. Фатеев¹,
А. Р. Шариков¹

¹Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, Симферополь, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье представлены исследования эжекторно-очистной установки с целью выявления возможных путей по повышению эффективности обработки деталей. В качестве эжектора используется пескоструйное сопло, от эффективности которого зависит эффективность всей пескоструйной установки. В рабочем сопле смешиваются два потока: абразивного материала и воздуха. Течение абразивной смеси, проходящей через сопло, исследовалось численно и экспериментально.

Ключевые слова: пескоструйная обработка, программный комплекс FlowVision, эжекторно-очистная установка.

WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF SANDBLASTING PARTS

E. Sh. Dzhemilov¹,
E. R. Vaniev¹,
K. E. Fateev¹,
A. R. Sharikov¹

¹Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Russia

ABSTRACT

The article presents studies of the ejector-cleaning plant in order to identify possible ways to improve the efficiency of processing parts. A sandblasting nozzle is used as an ejector, the effectiveness of which determines the efficiency of the entire sandblasting installation. Two streams are mixed in the working nozzle: abrasive material and air. The flow of the abrasive mixture passing through the nozzle was studied numerically and experimentally.

Keywords: sandblasting, FlowVision software package, ejector cleaning plant.

Введение

Пескоструйная обработка металла используется для очистки поверхностей металлоконструкций с помощью самого дешевого абразивного материала – песка. Причем в процессе абразивной обработки с поверхности металла смывают не только ржавчину, окалину и следы лакокрасочных покрытий, но и жировую пленку.

Повышение качества рабочего процесса возможно за счет высокой интенсивности турбулентности, наличия рециркуляционных зон, радиального перераспределения полной энтальпии и других свойств закрученного потока. Поскольку экспериментальным путем трудно получить визуализацию течения абразивной смеси, пользуемся для этого соответствующими программными комплексами.

Пескоструйная чистка используется для очистки поверхностей различных материалов. Причем тенденция применения пескоструйных аппаратов и пескоструйных камер за последние годы увеличивается. Этому способствует появление новых видов абразивов, усовершенствование самых пескоструйных установок, устранение применения химических покрытий перед нанесением которых обрабатываемую поверхность нужно очень качественно очистить.

Сегодня пескоструйная обработка используется для очистки поверхностей металла, не повреждая структуры поверхности. Появление новых материалов влечет за собой и расширение возможностей пескоструйных работ.

При пескоструйной обработке используется кварцевый песок мелкой фракции (0,5-0,1). В зависимости от давления и качества абразива пескоструйная обработка придает поверхности разную степень шероховатости:

1. Пескоструйная обработка с эффектом, напоминающим очистку металлической щеткой.
2. Обычная очистка поверхности без эффекта зеркального блеска.
3. Очистка стальной поверхности почти до блеска.
4. Очистка металлической поверхности до полного блеска.

Требования к подготовке стальной поверхности включают два важных параметра: профиль поверхности и степень очистки. В результате исследований, производимых производителями лакокрасочных материалов, обнаружено, что для гарантированной адгезии и абсолютной защиты субстрата перед нанесением покрытия требуется обеспечить соответствующий профиль. Насечка обеспечивает плотное однородное сцепление между поверхностью и покрытием. При пескоструйной очистке ненужные материалы удаляются, очищаемая поверхность укрепляется, неуклюжие частицы абразива придают шероховатость поверхности и создают профиль или насечку. Процесс пескоструйной обработки металлических поверхностей выполняет двойную функцию: он очищает поверхность и придает ей шероховатость. Очищенная и шероховатая поверхность является безупречным основанием для сцепления с защитным покрытием. Таким образом, предварительная обработка поверхности с помощью пескоструйного оборудования является экономичным методом, обеспечивающим необходимое основание грунтовки для нанесения покрытия. Долговечность и эффективность покрытия по стальным поверхностям в значительной степени зависит от подготовки поверхности для нанесения защитного покрытия. Пескоструйная обработка поверхности продлевает срок службы наносимых покрытий до 6 раз, что позволяет значительно сэкономить на капитальном и текущем ремонте металлоконструкций.

Для рациональной работы пескоструйного аппарата необходимо выполнить ряд исследований, направленных на выбор комплектующих частей, а именно:

1. Компрессор достаточной мощности (3-10 м³/мин).
2. Пневмосеть (чем больше, тем лучше).
3. Пескоструйный аппарат.
4. Сопла (керамические, цилиндрические, переменного сечения).
5. Установка дистанционного управления.
6. Система влагоотделителей.

7. Материал для пескоструйки (речной или кварцевый песок, металлический абразив, шарики).

8. Защитный шлем и дополнительное защитное оборудование.

9. Сушильная установка для отработанного абразива.

При выборе пескоструйного оборудования нужно учесть возможность его транспортировки.

Несмотря на накопленные экспериментальные данные, остаются вопросы, требующие проведения серии дополнительных исследований, заключающиеся в определении резервов по повышению эффективности рабочего сопла эжекторно-очистной установки.

Основная часть. Проводились серии численных и экспериментальных исследований течения песчано-воздушного потока эжекторно-очистной установки. Численные исследования проводились с использованием программного комплекса FlowVision (комплексное многоцелевое решение для моделирования трехмерных течений жидкости и газа). Эксперименты проводились на стенде по исследованию рабочего сопла для очистной установки (пескоструйной).

Выполнено численное исследование проточной части цилиндрического сопла с диаметром d и длиной l с использованием программного комплекса FlowVision. На рисунке 1 представлена расчетная сетка, ниже расчетная модель (рисунк 2 и 3). Модель течения – полностью сжимаемая жидкость с активацией двухфазной среды (опцией частицы). Абразивные частицы имеют диаметры, колеблющиеся в диапазоне $0,0001 - 0,001$ м. Число расчетных ячеек порядка $N = 20000$. Перепад давления $p_2/p_1 = 1,98$, что соответствует выходу очистной установки на рабочий режим.

Обычное цилиндрическое сопло исследовалось для установки особенностей протекания двухфазной среды с целью поиска резервов по повышению его эффективности.

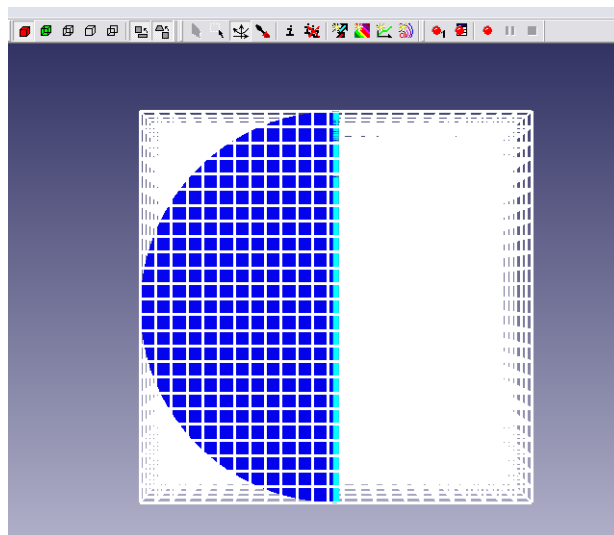


Рисунок 1. Расчетная сетка

Главным параметром сопла является величина его внутреннего диаметра d . Выполнена серия численных расчетов для установления значимости влияния параметра d на величину действительного и теоретического расхода.

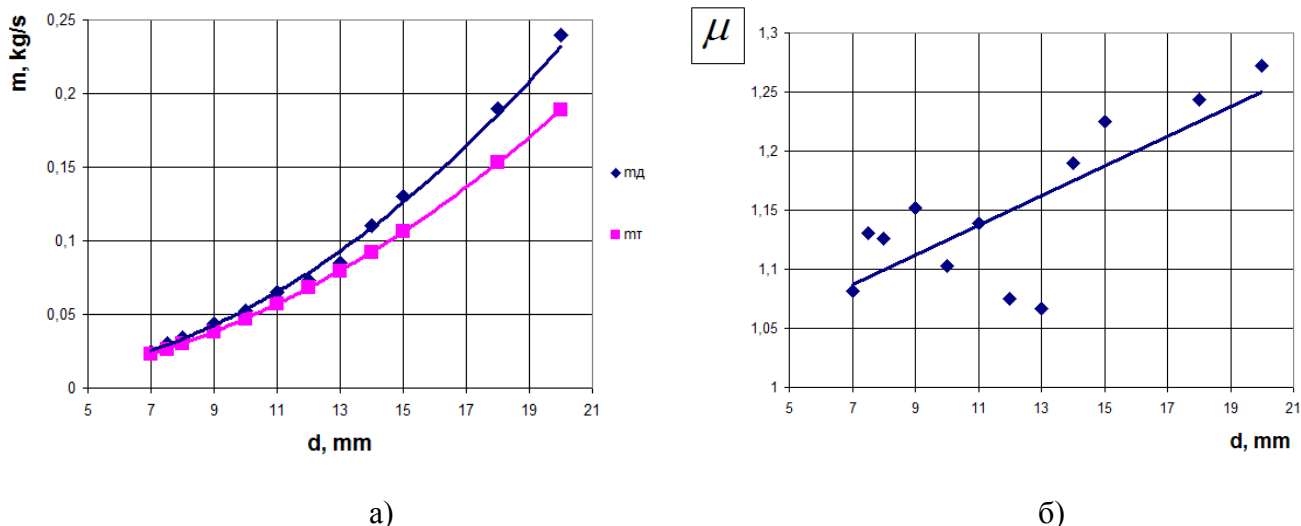


Рисунок 2. Характеристики сопла: а) массовый расход смеси; б) коэффициент расхода

Из полученных зависимостей (рисунок 2 и 3) очевидна тенденция к увеличению значения коэффициента расхода воздушно-абразивной смеси сопла и его расходной скорости с увеличением его внутреннего диаметра при установившихся значениях входных и выходных параметров p_1 , p_2 .

Следует заметить, что при увеличении проходного сечения сопла в два раза, величина расхода через него увеличивается в 4.5 раза.

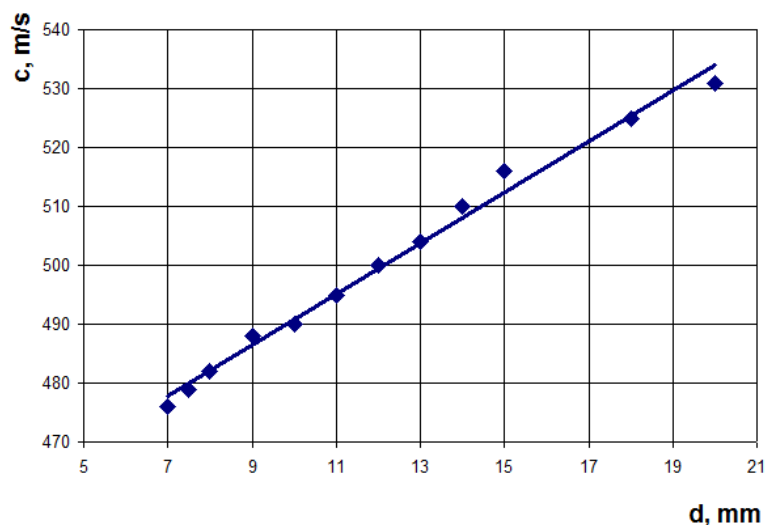


Рисунок 3. Воздействие диаметра сопла (d) на значение расходной скорости (c)

Ниже на рисунке 4 и 5 приведены некоторые визуализации течения.

Обращает на себя внимание различие в структуре течения рабочего потока в соплах с разными значениями внутреннего диаметра $d = 7$ мм и $d = 20$ мм. При $d = 7$ мм есть четкая неравномерность параметров потока на выходе из сопла, чего нет на рисунке 3.5 в силу увеличения проходного сечения d . Визуализации течения показывают резкое повышение параметров течения в исходном сечении сопла. Данное явление не имеет места при истечении однофазной среды.

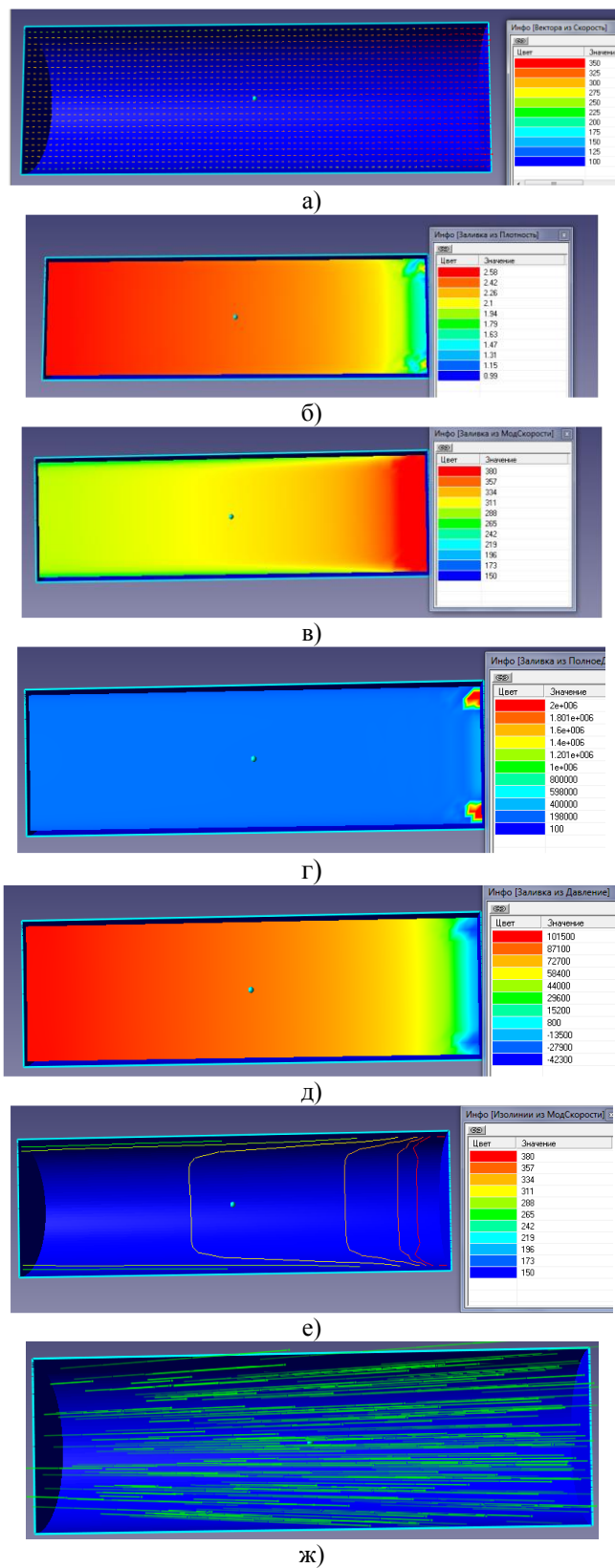


Рисунок 4. Визуализации течения ($d = 7$ мм, $l = 22$ мм, $p_1/p_2 = 1,99$): а) вектора по скорости; б) плотность потока; в) модуль скорости; г) полное давление; д) статическое давление; е) изолинии из модуля скорости; ж) вспышка скорости

Перед выходным сечением сопла (рисунок 4, б – д) видим запыриание части течения, которое выражается в форме двух локализованных ячеек повышения рабочих параметров течения, исчезающих с увеличением параметра d.

С учетом особенностей течения воздушно-абразивной смеси в соплах разных геометрических форм была проведена серия дополнительных исследований цилиндрического сопла с целью определения более рациональной конструкции сопла.

Существенное уменьшение длины сопла (до 4 мм) привело к повышению скорости более чем вдвое, что привело к увеличению значений массового расхода смеси и коэффициента расхода сопла. Это привело к повышению эффективности работы эжекторно-очистной установки, а именно время обработки квадратного метра металла уменьшилось в 4,5 раза и составляет 2 минуты.

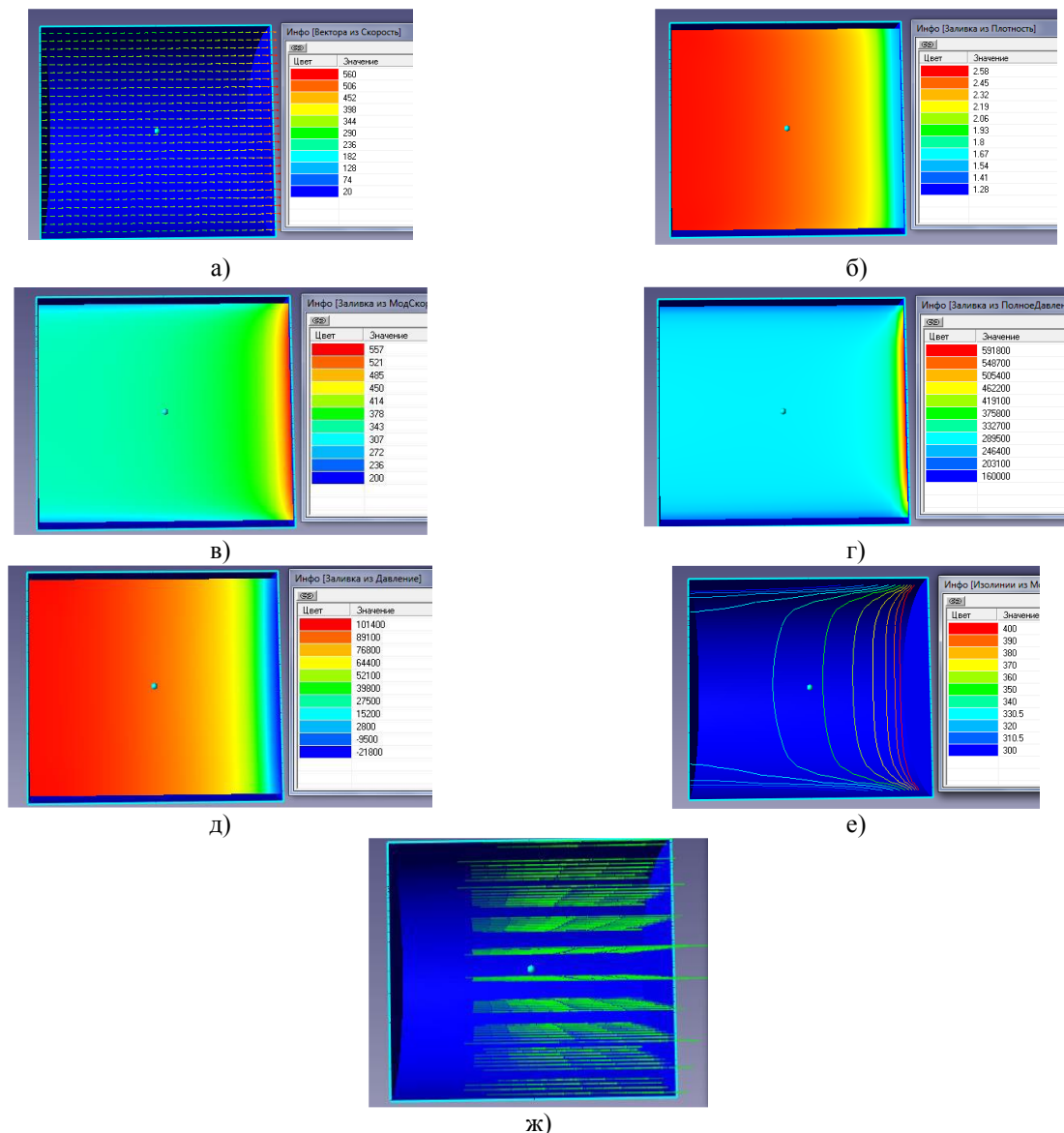


Рисунок 5. Визуализации течения ($d = 20$ мм, $l = 22$ мм, $p_1/p_2 = 1,99$): а) вектора по скорости; б) плотность потока; в) модуль скорости; г) полное давление; д) статическое давление; е) изолинии из модуля скорости; ж) вспышка скорости

На рисунке 6 приведены некоторые визуализации, полученные в результате численного расчета, из которых видно существование обратного потока от выходного сечения сопла к входному, что негативно влияет на его эффективность. Из-за небольшой длины сопла ($l = 4$ мм) коэффициент его расхода $\mu = 1,57$. Экспериментально подтверждена эффективность данной конструкции, время обработки деталей существенно сократилось.

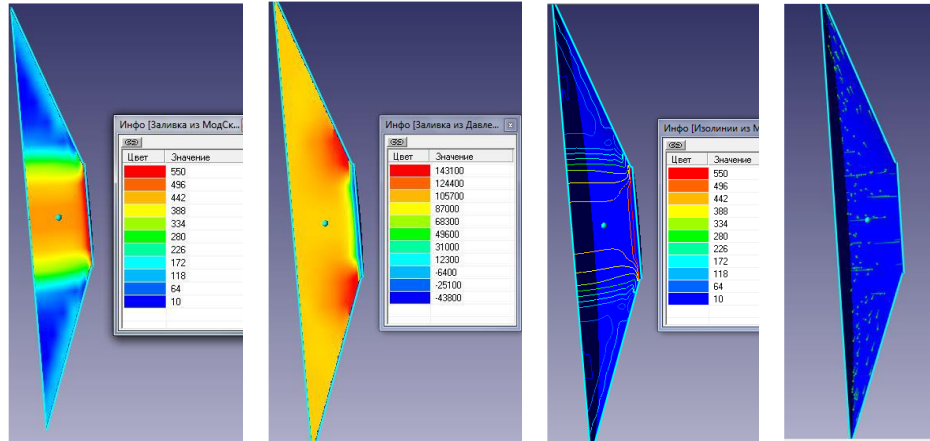


Рисунок 6. Визуализации течения конического сопла

Из анализа существующих видов сопел абразивоструйных машин, производимых отечественными и зарубежными производителями [3] следует, что основная тенденция по усовершенствованию сопел – это использование новых, сверхтвердых и износостойких материалов, таких как карбид бора, карбид вольфрама, карбид кремния. Данные материалы позволяют несколько повысить эксплуатационные характеристики сопла, что, соответственно, продолжает долговечность его работы. Но упомянутые новые материалы очень ценны, а значит и само сопло тоже.

Необходимы новые подходы к повышению эффективности работы сопел абразивоструйных машин, который заключается в усовершенствовании их конструкции и дальнейшая разработка новой относительно недорогой, однако эффективной технологии их получения и эксплуатации [1]. Новая технология изготовления и эксплуатации сопел должна обеспечить достижение высокой долговечности их работы и при этом она не должна зависеть от твердости или износостойкости материала, из которого они изготовлены [2]. Суть принципа – сопло должно быть проницаемым, чтобы могло пропускать через себя в радиальном направлении воздух, создающий воздушную подушку на внутренней рабочей поверхности сопла (рисунок 7).

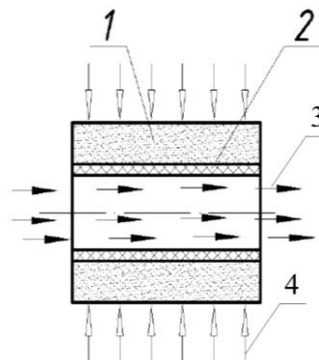


Рисунок 7. Схема образования воздушной подушки на внутренней поверхности части сопла: 1 – цилиндрическая пористая проницаемая вставка сопла; 2 – воздушная подушка; 3 – поток воздуха с абразивом; 4 – дополнительный поток воздуха.

Эта воздушная подушка будет оттеснять основной поток воздуха с абразивом от внутренней рабочей поверхности сопла для уменьшения контакта с абразивом. Это приведет к изменению условий износа и обеспечит существенное снижение износа рабочей поверхности сопла. В результате это повысит срок его эффективной эксплуатации и обеспечит его относительно низкую себестоимость.

Заключение. При увеличении проходного сечения сопла в два раза, величина расхода через него увеличивается в 4.5 раза.

Установлено различие в структуре течения рабочего потока в соплах с разными значениями внутреннего диаметра $d = 7$ мм и $d = 20$ мм. При $d = 7$ мм есть четкая неравномерность параметров течения на выходе из сопла, чего не происходит при увеличении параметра d .

Установлено, что уменьшение длины сопла (до 4 мм) привело к повышению скорости более чем вдвое. Это создало условия для повышения эффективности работы эжекторно-очистной установки, а именно время обработки квадратного метра металла уменьшилось в 4,5 раза и составляет 2 минуты.

Список литературы

1. Сычук В. А. Практика изготовления и испытания износостойкого сопла пескоструйной машины, полученного методом сухого радиально-изостатическое прессование / В. А. Сычук, О. В. Заболотный // «Научные заметки», Межвузовский сборник. Выпуск 31 (июнь, 2011) – Луцк: ЛНТУ, 2011. – С. 350-353.
2. Сычук В. А. Разработка и исследование новых конструкций ячеистых сопел для абразивоструйных машин / О. В. Заболотный, В. А. Сычук // «Современные технологии в машиностроении и транспорте», Научный журнал. Выпуск 2 – Луцк: ЛНТУ, 2014. – С. 43-53.
3. А. с. 1087319 СССР, МКИЗ В 24 С 5/04. Сопло для абразивной обработки внутренней поверхности деталей/М.В. Трубников; заявитель и патентообладатель Предприятие П/Я А-7204. – № 3502193/25-08; заявл. 22.10.82; опубл. 23.04.84, Бюл. №15.

УДК 621.9.047

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ КАМЕР СГОРАНИЯ ЖРД КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ

*О.Г. Шипилова¹,
А.Ю. Рязанцев^{1,2}*

¹ АО КБХА, Воронеж, Российская федерация

² Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская федерация

АННОТАЦИЯ

В работе выполнен анализ существующих методов получения искусственной шероховатости в ракетном двигателестроении. Обработка высокоскоростными комбинированными методами дает возможность обеспечить необходимые технологические требования к детали, не нарушает химический состав обрабатываемых материалов, что позволяет увеличить коррозионную стойкость материалов, улучшить механические свойства и

увеличить ресурс работы. Полученные результаты позволяют использовать высокоскоростную комбинированную размерную обработку для изготовления изделий авиации, космонавтики и других отраслей промышленности из различных материалов, любой геометрической формы.

Ключевые слова: искусственная шероховатость, инновационная технология, коррозионная стойкость, химический состав.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR OBTAINING ARTIFICIAL ROUGHNESS OF COMBUSTION CHAMBERS BY COMBINED PROCESSING METHODS

**O.G. Shipilova¹,
A.Yu. Ryazantsev^{1,2}**

¹ *JSC Design Bureau of Chemical Automation, Voronezh, Russian Federation*

² *Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation*

ABSTRACT

Analysis of existing artificial roughness methods in rocket engine building. Processing by high-speed methods makes it possible to provide the necessary technological requirements for the part. There isn't violation of the chemical composition of the processed materials, which allows improving the mechanical properties and increasing the service life. The method can be used for the manufacture of products in the field of mechanical engineering from various materials and any shape.

Keywords: artificial roughness, innovative technology, corrosion resistance, chemical composition.

Широкая номенклатура и сложность производимых изделий являются основными характеристиками производства аэрокосмической отрасли. Ужесточаются требования к изготовлению деталей и сборочных единиц. На первый план выходят показатели: гибкость, оперативная переналаживаемость производства для получения экспериментальных изделий ракетно-космической техники. Учитывая эти показатели и возможность быстрого перехода на обработку изделий различных конструкций и типоразмеров, следует рассмотреть высокотехнологичные способы комбинированной размерной обработки. Это такие методы, в которых процесс преобразования или удаления обрабатываемого материала происходит в результате одновременного протекания двух и более воздействий, осуществляемых каждым по своему механизму. Например, сочетания следующих воздействий: электрохимического и механического; электроэрозионного и электрохимического; ультразвукового и механического и т.д. Производительность такого метода обработки, как правило, значительно выше суммы производительностей каждого метода, взятого отдельно [1]. Путем технологического воздействия в поверхностном слое создаются такие механические свойства и остаточные напряжения, которые в наибольшей степени соответствуют условиям длительной и надежной эксплуатации. Качество поверхности деталей машин преимущественно зависит от метода и режимов проведения отделочной обработки. Необходимо использование специальных методов обработки для укрепления поверхностного слоя.

Актуальность методов обусловлена тем, что поверхностные слои деталей машин наиболее ответственны. Многие эксплуатационные свойства машин, такие как износостойкость, контактная жесткость, усталость, коррозионная стойкость, электро- и теплосопротивление контактов, герметичность соединений и другие в большой мере определяются контактным взаимодействием деталей, в основе которого лежат свойства поверхностных слоев.

Чаще всего именно в них появляются очаги усталостного разрушения. Качество поверхностного слоя деталей машин, приборов и аппаратов определяет надежность и долговечность изделий в эксплуатации. Формирование же качества поверхностного слоя в основном осуществляется на заключительных операциях технологического процесса получения деталей [2].

Комплексное действие силовых и тепловых факторов в процессе обработки приводит к изменению физико-механических свойств поверхностного слоя деталей машин. Силовые факторы оказывают большее воздействие при обработке лезвийными инструментами. Результатом силового действия при пластической деформации является разрушение структуры, повороты и смещения кристаллов, наклеп поверхностного слоя, характеризуемый повышением микротвердости и снижением вязкости. В поверхностном слое возникают остаточные напряжения, которые в зависимости от режима обработки могут быть положительными или отрицательными [3].

Поверхностный слой детали машины, обработанный режущим инструментом, сильно отличается по структуре и физическим свойствам от сердцевины детали. Давление резца вызывает пластическую деформацию вязких металлов (стали, меди и др.) не только в снимаемой стружке, но и в поверхностном слое. Иногда резец разрушает структуру поверхностного слоя на кафедре «Физико-химические процессы и технологии» Тульского государственного университета проводились исследования по следующим видам обработки материалов: электрохимическая обработка микро- и макрообъектов; электрохимическое полирование; электроэрозионная обработка узких длинномерных пазов; микроэлектроэрозионная обработка; высокоскоростное электролитическое осаждение металлов и сплавов; микродуговое оксидирование; ионно-плазменное напыление; ионная имплантация азота и др. В результате для производства изделий пищевого и химического машиностроения с повышенными требованиями к качеству поверхностей, были разработаны и экспериментально апробированы способы электрохимической обработки деталей сепараторов на малых межэлектродных зазорах и с определенной кинематикой движения электродов. Реализована электроэрозионная обработка длинномерных пазов в трубах переменного сечения при изготовлении элементов аппаратуры для нефтяной отрасли. Представленные методы требуют большой технологической подготовки производства, энергетических затрат. В некоторых экспериментах, обрабатываемый материал обладал невысокими прочностными параметрами по отношению к исходному материалу. Вследствие чего, можно сделать вывод, что применение вышеуказанных методов в ракетно-космической отрасли для получения искусственной шероховатости в теплонагруженных деталях ракетных двигателей экономически не целесообразно и технологически не допустимо.

Известны способы, в которых для регулируемых шероховатых поверхностей используют электротермическое воздействие движущихся катодных пятен в вакуумном дуговом разряде [4]. Размеры шероховатости регулируются током и временем воздействия разряда, давлением в вакуумной камере и рядом других параметров. Недостатками способа является возможное нарушение качества поверхностного слоя (например, боковых поверхностей пазов в теплонагруженных деталях) при импульсе большой энергии, ограничение площади теплопередачи, низкая производительность.

Еще один метод получения искусственной шероховатости – это обработка детали электродом - инструментом на электроэрозионном оборудовании [5]. Обработка выполняется в два этапа: на первом этапе, грубом режиме, электроимпульсным методом на рабочей части электрода инструмента наносят неровности в виде соприкасающихся углублений, после чего на чистовом режиме электроискровой обработкой электродом - инструментом формируют шероховатость на обрабатываемом участке. Недостатками способа являются относительно

большой износ электрода -инструмента (к примеру, величина износа латунных электродов составляет 25-30 %, объема металла, снятого с детали), что значительно удорожает этот вид обработки и затрудняет получение необходимой точности, требует большого расхода энергоресурсов, производительность сравнительно низкая.

Анализ методов показал, что в современной науке и технике существует потребность в создании шероховатых поверхностей металлических изделий. Одним из наиболее эффективных направлений совершенствования технологий получения шероховатости является комбинирование различных методов воздействия на обрабатываемую поверхность.

В рамках назначенной стипендии Президента РФ в 2020-2022 годах специалистами АО КБХА совместно с ВГТУ проводились работы, в результате которых для получения искусственной шероховатости разработан и внедряется в серийное производство высокопроизводительный способ обработки, позволяющий получать детали без снижения качества поверхностного слоя изделия.

Способ комбинированной размерной обработки включает в себя обработку детали лазерным способом с использованием импульсного волоконного лазера на прецизионном лазерном комплексе на первом этапе, после чего на чистовом режиме электрохимической обработкой получают окончательно сформированную искусственную шероховатость на поверхности обрабатываемой детали [6].

Примером осуществления этого способа может служить формирование в трактах охлаждения оболочки камеры сгорания, из листа сплава БрХ08 ТУ 48-21-588-87, ракетного двигателя, выполнение локального участка в донной части канала, для дополнительного охлаждения, рисунки 1,2.

Для этих целей комбинированные методы лазерной и электрохимической обработки ранее не использовались. Применялись менее производительные, механические, электроэрозионные и электрохимические обработки весьма трудоемкие и требующие существенных затрат на технологическую подготовку производства перед началом выполнения работ [7].

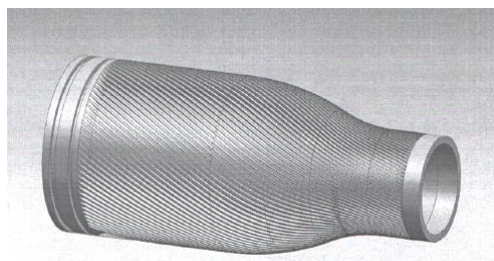


Рисунок 1. Общий вид каналов охлаждения после обработки

При образовании поверхностного слоя подверженного температурным воздействиям, его удаление происходит электрохимической обработкой, на специальных технологических режимах.

Измерение профиля участков, показало соответствие требованиям технической документации. Таким образом, производительность возросла примерно в 5 раз, по отношению к механической, электроэрозионной и эрозионно-химической обработке.

Новизна данной работы состоит в том, что в ней впервые предложены прогрессивные способы комбинированной обработки получения регулируемой шероховатости на поверхностях. Предложены рабочие режимы обработки поверхностей деталей ракетных двигателей с целью получения шероховатости в соответствии с требованиями нормативной документации.

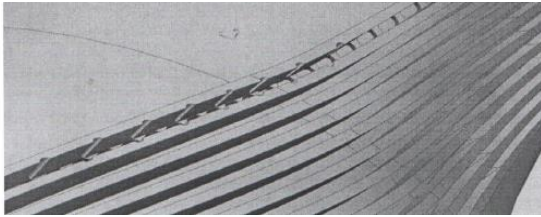


Рисунок 2. Общий вид сектора оболочки с искусственной шероховатостью

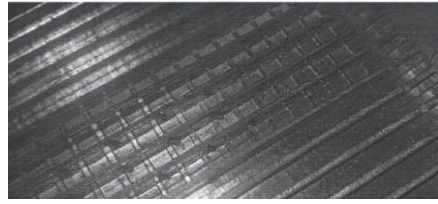


Рисунок 3. Элемент искусственной шероховатости, полученный комбинированным методом обработки

Результаты работы в настоящее время внедряются в серийное производство на машиностроительных предприятиях, оформлены патенты N2618594, 2749414, что расширяет область использования способа.

Обработка высокоскоростными комбинированными методами дает возможность обеспечить необходимые технологические требования к детали, не нарушает химический состав обрабатываемых материалов, что позволяет увеличить коррозионную стойкость материалов, улучшить механические свойства и увеличить ресурс работы. Полученные результаты позволяют использовать высокоскоростную комбинированную размерную обработку для изготовления изделий авиации, космонавтики и других отраслей промышленности из различных материалов, любой геометрической формы.

Список литературы

1. Рязанцев, А. Ю. Использование комбинированных методов обработки для получения искусственной шероховатости на поверхностях деталей / А. Ю. Рязанцев, С. С. Юхневич // Вестник современных технологий. – 2018. – № 2(10). – С. 39-44.
2. Рязанцев, А. Ю. Инновационные методы получения искусственной шероховатости на поверхностях теплонагруженных деталей камер сгорания жидкостных ракетных двигателей / А. Ю. Рязанцев, С. С. Юхневич, А. А. Широкожухова // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2020. – № 4(100). – С. 4.
3. Рязанцев, А. Ю. Высокоэффективные технологии получения искусственной шероховатости / А. Ю. Рязанцев, А. И. Болдырев, И. В. Евченко // Современные технологии производства в машиностроении : Сборник научных трудов / Редколлегия: В.Г. Грицюк [и др.]. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2022. – С. 74-78.
4. Ryazantsev, A. Y. Innovative methods for obtaining artificial roughness on the surfaces of heat-loaded parts of the liquid rocket engines combustion chamber / A. Y. Ryazantsev, S. S. Yukhnevich, A. A. Shirokozukhova // AIP Conference Proceedings : 44, Moscow, 28–31 января 2020 года. – Moscow, 2021.
5. В.П. Смоленцев. Теория электрических и физико-химических методов обработки. Ч I: Обработка материалов с применением инструмента: учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.И.Болдырев, Е.В. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев. – Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. 248 с.
6. Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С., Поротиков В.А. Способ получения искусственной шероховатости детали комбинированным методом обработки // Патент России № 2618594. 2017. Бюл. № 2016110651.
7. Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С., Короткова Н.Н., Гусева М.А. Способ получения искусственной шероховатости на поверхности детали механическим методом обработки // Патент России № 2749414. 2021. Бюл. № 2020136276.