

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Проектирование и эксплуатация автомобилей»

(наименование)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Эксплуатация транспортных средств

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Повышение эксплуатационной долговечности рулевой

рейки методом фрикционного плакирования

Студент

В. Л. Хан

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

канд. техн. наук А. В. Зотов

руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2022

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Анализ объекта исследования.....	5
1.1 Устройство рулевого управления.....	5
1.2 Требования к системе рулевого управления	10
1.3 Анализ причин неисправностей рулевых механизмов с усилителем руля	12
1.4 Анализ способов повышения ресурса рулевой рейки.....	15
Глава 2 Плакирование гибким инструментом	19
2.1 Методика плакирования гибким инструментом.....	19
2.2 Определение методики расчёта параметров в зоне контакта.....	25
2.3 Анализ источников по эффективности методики поверхностного пластического деформирования	30
2.4 Математическое моделирование параметров зоны контакта процесса ПГИ	37
Глава 3 Расчётно-аналитическое исследование процесса плакирования рулевой рейки	47
Глава 4 Оптимизация процесса плакирования рулевой рейки.....	55
4.1 Методика выбора оптимальных режимов и параметров обработки гибким инструментом	55
4.2 Технологический маршрут обработки боковой поверхности зуба рулевой рейки	64
Заключение	69
Список используемых источников.....	70

Введение

С начала появления первых транспортных средств до сегодняшнего времени система рулевого управления является одной из самых важных частей автомобиля, поскольку от ее работоспособности зависит не только безопасность жизни и здоровья водителя и пассажиров, но и всех участников дорожного движения.

Прежде всего, на надёжность и работоспособность данной системы автомобильного транспорта влияние, в основном, оказывает трение, а причиной выхода из рабочего состояния является изнашивание, происходящее в узлах системы. Потеря точности взаимного расположения деталей, негерметичность узлов, непредвиденные относительные перемещения и возникающие дефекты, к которым может привести изнашивание, являются теми причинами, которые могут привести к опасной ситуации на дороге. Поэтому появляется необходимость проведения научно-технических работ, направленных на повышение уровня технического обслуживания автомобилей, которые помогут предотвратить, возникающие за время эксплуатации возможные неисправности, приводящие к неработоспособности рулевого управления. Также необходимо проанализировать и применить новые современные методы и способы упрочнения узлов рулевого механизма в соответствии с требованиями к безопасности системы рулевого управления. Для обеспечения вышеперечисленных целей необходимо решить важную задачу, заключающуюся в повышении эффективности методов обработки и упрочнения элементов рулевой системы, что, в свою очередь, приведет к увеличению сроков эксплуатации автомобильного транспорта.

Магистерская диссертация направлена на решение вопросов, посвящённых формированию методики фрикционного плакирования износостойких покрытий на рулевой рейке с целью повышения ее эксплуатационной долговечности.

Целью данной работы является создание методики фрикционного плакирования боковых поверхностей зубьев рулевой рейки, посредством гибкого инструмента.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи.

Проанализирован механизм рулевого управления с его требованиями к безопасности. Определены основные места изнашивания рулевой рейки. Рассмотрены основные способы упрочнения этой детали и сделан вывод, что именно зубчатый сектор рейки наиболее подходит для применения метода фрикционного плакирования.

Анализ условий работы деталей рулевого механизма показал, что большой процент износа наблюдается на боковых поверхностях зубьев рулевой рейки.

Произведено основание применения метода фрикционного нанесения покрытий с одновременной обработкой пластическим деформированием гибким инструментом.

Проведен литературный обзор теории и практики применения фрикционного плакирования гибким инструментом и его расчётно-аналитическое обоснование.

Оптимизирована методика плакирования путём разработки спецприспособлений взамен покупных устройств и оборудования.

Разработан технологический маршрут плакирования рулевой рейки.

Для конкретизации и наглядности исследование проведено на примере рулевой рейки LADA GRANTA.

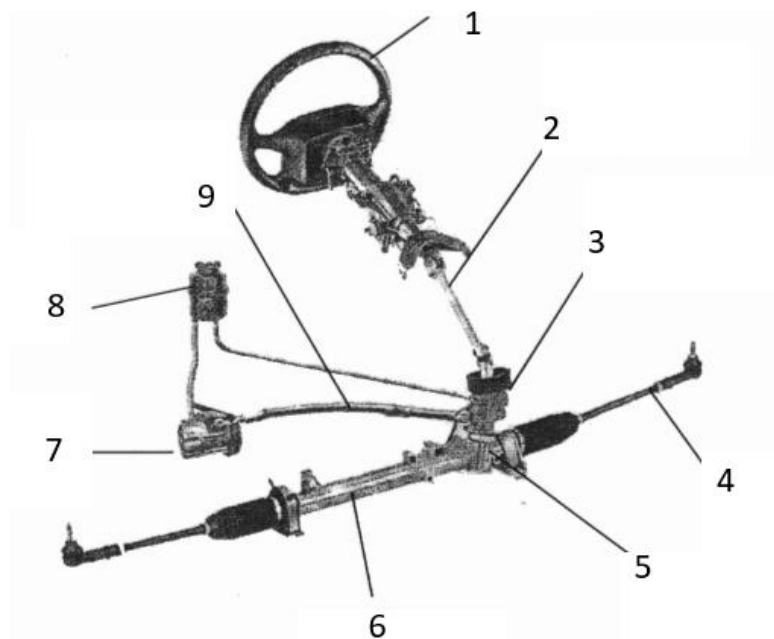
Глава 1 Анализ объекта исследования

1.1 Устройство рулевого управления

Для того чтобы приступить к решению поставленных задач стоит, в первую очередь, проанализировать систему узлов и механизмов рулевого управления, и, в частности, рулевую рейку как один из важнейших элементов данной системы.

В легковых автомобилях используется реечный рулевой механизм, в котором может присутствовать усилитель управления электромеханического, гидравлического или комбинированного типа. В последнее время системы рулевого управления с электроусилителем составляют конкуренцию системам с гидравлическим усилителем, но пока последняя система по-прежнему доминирует на автомобильном рынке из-за более высокой вспомогательной силы при повороте руля, более высокой надёжности и более низкой стоимости.

Благодаря системе рулевого управления водитель, поворачивая рулевое колесо, передаёт определенное усилие на рулевой механизм, который выполняет преобразование данного усилия для осуществления поворота колес автомобиля, вследствие чего водитель и может управлять направлением движения. Если нагрузка на переднюю ось увеличивается, то и усилие необходимое для передачи момента, необходимого для поворота рулевого колеса также увеличивается. Так существуют системы рулевого управления, как с гидравлическим усилителем, так и с электроусилителем поворота, которые широко используются в современных транспортных средствах с целью повышения управляемости автомобилем и снижению требуемого входного усилия на рулевом колесе, что, в свою очередь, предотвращает повышенную утомляемость водителя. Система рулевого управления представлена на рисунке 1.



1 – рулевое колесо; 2 – рулевая колонка; 3 – поворотный золотниковый распределитель; 4 – рулевая тяга; 5 – зубчатая рейка; 6 – гидравлический силовой цилиндр; 7 – насос; 8 – бачок; 9 – шланги.

Рисунок 1 – Устройство рулевого управления

Особенность устройства рулевого управления современных автомобилей состоит в том, что рулевая рейка и электроусилитель или гидроусилитель объединены в единую систему, так называемую, интегральную. В обоих типах систем есть реечный механизм, который передаёт усилие от рулевого вала к поворотным тягам. Электрический усилитель ставится на рулевой вал автомобиля, элементы которого соединены между собой торсионным валом. На нем присутствует датчик, который фиксирует значения крутящего момента. При вращении рулевого колеса водителем осуществляется скручивание данного вала, и именно этот процесс фиксируется при помощи датчика крутящего момента. На базе полученной информации, которая передаётся датчиками момента, скорости и оборота коленчатого вала, блок с электроникой рассчитывает требуемое усилие для компенсации и отправляет сигнал на электрический двигатель. Алгоритм работы и уровень вспомогательной силы зависят от угла поворота и скорости автомобиля.

Электронную архитектуру электроусилителя руля в данном вопросе стоит опустить, так как механическая передача в поставленной цели играет ключевую роль, а любая неисправность электроники такого усилителя ведёт к замене рулевой рейки без возможности восстановления.

Механическая рулевая рейка имеет одновременно и преимущества и недостатки. С одной стороны, конструкция рейки имеет максимально простой вид, с другой стороны, рулевая рейка может изнашиваться до предела, не подавая признаков неисправностей.

Компоненты типичного рулевого управления с гидравлическим усилителем делят на 2 категории – механические и гидравлические. Механические компоненты обычно включают рулевое колесо, рулевую колонку, рулевой механизм, реечную передачу, рулевые тяги к передним колёсам. Насос рулевого управления, бачок, шланги высокого и низкого давления, поворотный золотниковый клапан (распределитель), подводящий штуцер и силовой цилиндр являются, в свою очередь, гидравлическими компонентами.

Функция рулевого механизма заключается в передаче вращательного движения руля поступательному движению элементов рулевого привода. Реечный механизм является одним из самых популярных рулевых механизмов и может быть установлен на широкий спектр транспортных средств. Поэтому данное исследование сосредоточено на гидравлической системе рулевого управления, оснащённой реечной передачей. Среди преимуществ такого механизма стоит отметить простоту конструкции, надёжность, большой КПД и высокую жесткость. Однако, при этом, такой механизм сильно чувствителен к неровностям на дороге, вследствие чего происходит биение в зацеплении реечной передачи, из-за чего он быстро изнашивается. На рисунке 2 представлена схема системы рулевого управления с реечной передачей. Шестерня устанавливается на рулевом валу и находится в постоянном зацеплении с рейкой. По условиям эксплуатации шестерня с рулевой рейкой должны находиться в среде смазки, которая

позволяет значительно увеличить срок службы этих деталей. Но рано или поздно под действием нагрузок приходит момент, когда необходим ремонт реечного механизма.

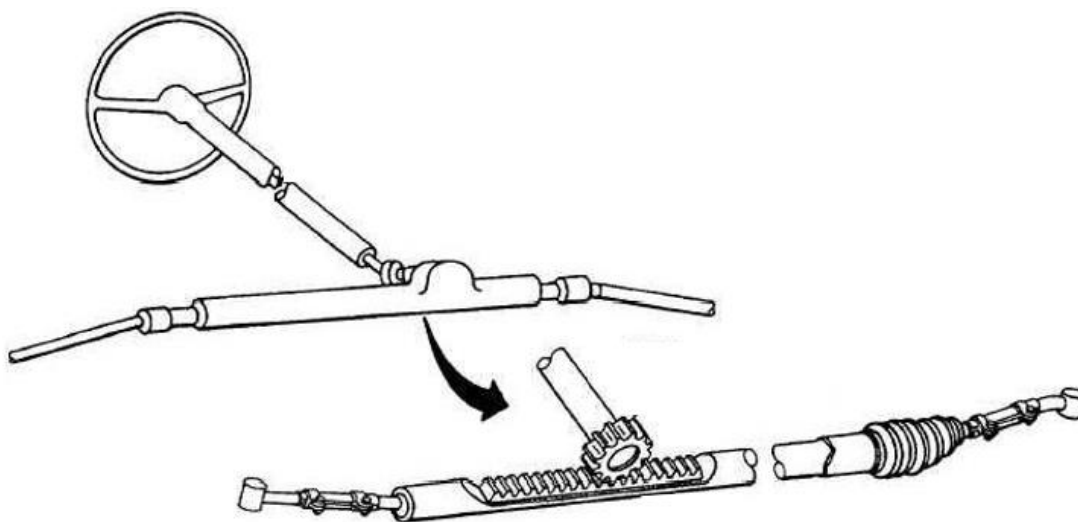


Рисунок 2 – Схема системы реечной передачи

Гидроусилитель руля конструктивно сложный механизм, причём требующий постоянного технического обслуживания. Некоторые узлы этой системы очень чувствительны к изнашиванию, из-за чего нарушение условий эксплуатации может привести к поломке. Следует отметить, что благодаря установке распределителя рулевой механизм обладает хорошей надежностью, то есть имеется возможность продолжать движение даже в случае выхода из строя одного из элементов гидроусилителя руля или при его полной или частичной разгерметизации. Торсион всегда будет передавать вращение от рулевого вала к шестерне, что обеспечит сохранение управляемости автомобиля, но усилие, прикладываемое на руль, возрастёт. А механическая реечная передача «червяк – зубчатая рейка», зубья которой находятся в постоянном контакте, при поломке, может стать причиной ДТП.

Объектом данного исследования является рулевая рейка с гидроусилителем руля как наиболее распространённая система в России.

Дальнейший ряд проектных и технических задач будет сосредоточен на системе с гидроусилителем руля на примере рулевого механизма LADA GRANTA.

На рисунке 3 представлен эскиз рулевой рейки.



Рисунок 3 – Общий вид рулевой рейки

Материал детали определяет физико-механические свойства изделия: выносливость, усталостную прочность, износостойкость и другие характеристики, необходимые для выполнения своего служебного назначения.

Для изготовления рулевой рейки применяется сталь 50 [32]: конструкционная, углеродистая, качественная. Информация о физико-механических свойствах данной стали представлена в таблице 1.

Химический состав стали 50: 0,50 % – 0,80 % марганца; 0,47 % – 0,55 % углерода; 0,17 % – 0,37 % кремния; прочие элементы – не более 0,25 % [11].

Таблица 1 – Физико-механические свойства стали 50

$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	ψ , %	δ_5 , %	КСУ, кДЖ/м ²	НВ
315	570	55	17	39	167-207

Далее необходимо рассмотреть технические требования для обеспечения бесперебойной работы рассматриваемой механической передачи и к системе рулевого управления в целом.

1.2 Требования к системе рулевого управления

Основные требования к системе рулевого управления заключены в техническом регламенте таможенного союза (ТР ТС) 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств (с изменениями на 11 июля 2016 года)». Данный регламент принят решением комиссии таможенного союза от 9 декабря 2011 года и является действующим техническим регламентом о безопасности колесных автотранспортных средств. Он сформирован на базе «Соглашения о единых принципах и правилах техрегулирования» в Беларуси, Казахстане и РФ, базируется на правилах «Европейской экономической комиссии Организации Объединённых Наций» (ЕЭК ООН).

Этот документ определяет перечень требований к эксплуатируемым транспортным средствам вне зависимости от того, где они были произведены или были ли они транспортированы в страну. Ниже перечислены основные пункты данного технического регламента.

В соответствии с пунктом 2.3 «суммарный люфт в рулевом управлении не должен превышать предельных значений, установленных изготовителем транспортного средства, а при отсутствии указанных данных – следующих предельных значений: транспортные средства категории M_1 и созданные на базе их агрегатов транспортные средства категорий M_2 , N_1 и N_2 , а также транспортные средства категорий L_6 и L_7 с автомобильной компоновкой – 10° » [35].

В соответствии с пунктом 2.1 «изменение усилия при повороте рулевого колеса должно быть плавным во всем диапазоне угла его поворота. Неработоспособность усилителя рулевого управления транспортного средства (при его наличии на транспортном средстве) не допускается» [35].

Согласно пункту 5.1.2 «должна быть обеспечена возможность движения по прямому участку дороги без необычной коррекции рулевого управления водителем и без необычной вибрации в системе рулевого

управления при максимальной расчётной скорости транспортного средства» [41].

В соответствии с пунктом 2.5 «применение в рулевом механизме и рулевом приводе деталей со следами остаточной деформации, с трещинами и другими дефектами не допускается» [35].

В соответствии с пунктом 2.6 «подтекание рабочей жидкости в гидросистеме усилителя рулевого управления не допускается» [41].

Правила, связанные с органами управления рулевым механизмом: «если водитель непосредственно воздействует на органы управления рулевым механизмом: органы рулевого управления и все механические части рулевой механизма не должны быть подвержены поломке, если они имеют достаточные размеры, легко доступны для обслуживания и имеют характеристики безопасности, по крайней мере равные предписанным для других основных компонентов (таких, как тормозная система) транспортного средства. Если отказ любой такой детали может привести к потере управления транспортным средством, эта деталь должна быть изготовлена из металла или материала с эквивалентными характеристиками и не должна подвергаться значительным деформациям при нормальной работе системы рулевого управления» [7].

Основные требования к интегральной системе управления с усилителем руля записаны в правилах ЕЭК ООН №79-01. Ниже перечислены основные пункты данного документа.

В соответствии с пунктом 5.1.4 «рулевое управление должно быть спроектировано, сконструировано и установлено таким образом, чтобы оно могло выдерживать нагрузки, возникающие при нормальной эксплуатации транспортного средства или состава транспортных средств» [41].

По пункту 5.7 «конструкции интегрального и полуинтегрального рулевых механизмов должны обеспечивать возможность регулирования механического люфта рулевого механизма» [7].

В соответствии с пунктом 5.9 «поворот рулевого колеса у интегральных и полуинтегральных рулевых механизмов должен происходить плавно, без заеданий, из одного крайнего положения в другое при свободном вале сошки как при включенной, так и выключенной подаче жидкости. При этом углы поворота рулевого колеса и вала сошки должны соответствовать требованиям КД» [7].

В соответствии с пунктом 5.18 «изделие должно быть работоспособным и пригодным к транспортированию и хранению в условиях, соответствующих условиям работы транспортного средства» [7].

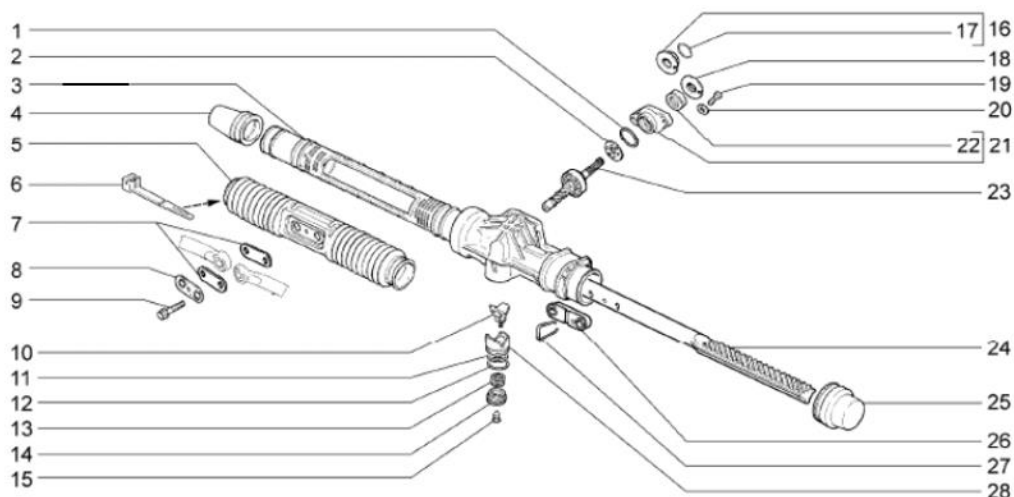
Для того чтобы обеспечить вышеупомянутые требования законодательства РФ, необходимо установить причины возможного несоблюдения этих правил. Анализ и оценку конструкции рулевого управления, так же как и любого другого механизма, следует проводить соответственно тем требованиям, которые к ней предъявляются и из данного анализа подобрать методы и способы решения установленных проблем износа механической передачи.

1.3 Анализ причин неисправностей рулевых механизмов с усилителем руля

В процессе эксплуатации автомобиля в рулевом механизме с ГУР могут возникнуть заклинивания, изнашивание узлов, утечка масла, вибрации, приводящие к неисправности автомобиля. Основные признаки неисправности рулевой рейки: шум или другие посторонние звуки во время передвижения транспорта, заметные люфты рулевого колеса даже на небольшие углы при повороте, слишком большое сопротивление при повороте руля, протечка рабочей жидкости. Несвоевременное устранение неисправностей в рулевом механизме или неправильные регулировки лишь ускоряют износ деталей.

Конструкция реечного механизма преобразует вращательное движение червяка в возвратно-поступательное движение зубчатой рейки. Червяк устанавливается на валу рулевого колеса и находится в постоянном зацеплении с рейкой, поддерживаемый ее упором. Рулевая рейка работает в условиях смазочной жидкости. Указанные особенности конструкции рейки и реечного механизма обеспечиваются формой рабочих поверхностей зубчатого сектора.

Рассмотрим основные места неисправностей на примере рейки LADA GRANTA, а для этого рассмотрим рисунок 4.



- 1 – кольцо уплотнительное; 2 – сепаратор в сборе; 3 – картер рулевого механизма в сборе; 4 – колпак защитный правый; 5 – чехол рейки; 6 – хомут; 7 – пластина чехла; 8 – пластина стопорная; 9 – болт тяг рулевой трапеции; 10 – вкладыш упора; 11 – кольцо уплотнительное; 12 – кольцо уплотнительное; 13 – пружина упора; 14 – гайка упора; 15 – заглушка гайки; 16 – пыльник шестерни в сборе; 17 – кольцо фиксирующие пыльника; 18 – пыльник шестерни; 19 – болт; 20 – шайба; 21 – крышка картера; 22 – сальник шестерни; 23 – шестерня в сборе; 24 – рейка рулевого механизма; 25 – колпак защитный левый; 26 – опора тяг рулевой трапеции; 27 – скоба упора тяг; 28 – упор рейки.

Рисунок 4 – Схема рулевого механизма LADA GRANTA

Во-первых это износ резиновых уплотнителей системы ГУР. Это касается непосредственно сальников и уплотнителей в рейке. Это же распространяется и на соединения, которые имеются в прочих частях системы. В результате влияния механических нагрузок, а также от времени,

резиновые элементы утрачивают свои свойства – это приводит к разгерметизации и пропуску рабочей жидкости, ее уровень в системе понижается.

Во-вторых поломка клапанов распределителя. Данная проблема оборачивается неверным распределением жидкости, что негативно влияет на работу системы и усилителя.

В-третьих поломка поршневой системы гидравлического цилиндра. По данной причине не будет создаваться необходимое давление в системе.

И наконец, рассмотрим одну из основных причин неработоспособности системы с ГУР – изнашивание элементов реечного механизма. Рассмотрим те неисправности, что возникают вследствие износа поверхностей деталей распределителя и поверхностей деталей реечного механизма в контакте с рулевой рейкой.

Наиболее высокая нагрузка возникает в месте контакта червяка и рулевой рейки. Так, именно в этом месте в течение эксплуатации может частично или в полной мере разрушиться поверхность зубьев в связи с появлением недопустимых зазоров как в зубчатом зацеплении, так и между упором и рейкой. Как правило, неравномерный износ боковых поверхностей зубьев и становится причиной увеличенного зазора в зацеплении червяка с рейкой, что может также возникнуть и в результате уменьшения антифрикционного материала, расположенного на вкладыше упора рейки. Также с помощью регулировочного винта обеспечивается прижим упора рулевой рейки к непосредственно самой рулевой рейке, что в процессе работы может привести к двухстороннему изнашиванию поверхностей контакта. Для устранения несоответствия крутящего момента, и обеспечения правильного расположения регулировочных и фиксирующих деталей рулевого механизма проводится регулировка общего момента прокрутки ведущего червяка и положения упора рейки с контролем затяжки регулировочной гайки. Однако закручивание гайки не решит проблемы износа зубчатого сектора. Если закрутить гайку с максимальной силой, то это

не только лишь на время устранит постукивание и проскальзывание фрикционной пары, но и усугубит ситуацию в целом. Проблему изнашивания упора рейки можно решить только путем замены вкладыша упора рейки после отработки своего ресурса, так как вкладыш восстановлению не подлежит.

При наличии явных признаков отработки втулки неисправность необходимо устранять методом ее замены из специального ремкомплекта, так как восстановлению втулка тоже не подлежит. Отработка может произойти из-за ржавчины – в результате попадания воды образуется абразив во внутренней полости сопряжения, который и приводит к ее разрушению. При износе сальников есть возможность промежуточного решения, в котором сальники укорачиваются и поджимаются прижимными пружинками. Но так как сальник плотно прижат к валу, то это решение вскоре приведёт к деформации узлов рейки, что в дальнейшем только ухудшит ситуацию. То есть любые уплотнители, сальники и кольца при дефектах подлежат утилизации и замене на новые.

Проанализировав причины и способы устранения неисправностей в узлах реечного механизма, возникает необходимость по решению проблемы износа зубчатой рейки в рулевом управлении. Износ этой детали рулевого механизма, как правило, оборачивается повышением люфта направляющих колес и руля, что категорически запрещено вышеперечисленными требованиями. Далее следует рассмотреть основные мероприятия по упрочнению и восстановлению зубчатой рейки.

1.4 Анализ способов повышения ресурса рулевой рейки

Одним из основных способов восстановления изношенных поверхностей рулевой рейки является метод нанесения слоя антифрикционного металлопокрытия. Рассмотрим несколько вариантов этой обработки, в частности гальваническое хромирование, газотермическое и

плазменное напыление. Отдельно рассмотрим способ повышения долговечности зубчатого сектора методом фрикционного плакирования, который является одним из немногих на рынке услуг по техническому обслуживанию транспортных средств, что ставит вопрос о необходимости его дальнейшего изучения.

Технология покрытия вала хромом [33] осуществляется в несколько фаз. Среди них: шлифовка и полировка поверхности, которая будет покрываться хромом; создание изоляции для мест, не требующих покрытия хрома (зубчатый сектор); создание экранов для рельефа и острых граней; зачистка абразивным материалом; подвешивание на рамки; обеззараживание при помощи электролитов; промывание в жидкости с высокой температурой; анодное декапирование; покрытие хромом; промывка холодной жидкостью; нейтрализация в растворе со щёлочью. Далее осуществляется промывание в теплой воде и снятие вала с рамки, на которую он бы установлен ранее. Последним этапом является механическая обработка изделия, которое уже покрыто хромом. Шлифовка и полировка на первом этапе требуется для того, чтобы восстановить требуемую форму вала. Во время этой фазы устраняется его овальность, а также проводится очищение от ржавчины. Поверхность доводится до нужного уровня чистоты, чтобы перейти к следующему этапу.

Процесс хромирования обладает некоторыми особенностями. В ходе процесса нанесения на рабочие поверхности штока рейки, получаемая толщина защитного слоя хрома намного больше, чем в остальных рассматриваемых методах. Покрываются обычно отдельные участки, а остальная поверхность деталей изолируется при помощи листа целлулоида, что не подразумевает обработку зубчатого сектора рулевой рейки. Восстановление штока рейки хромированием достаточно трудоёмкая и дорогостоящая процедура и в некоторых случаях соизмерима со стоимостью вала с завода-изготовителя.

Принцип действия газотермического напыления [28] основан на нанесении на подготовленную поверхность малых, расплавленных частиц

определенного сплава. Напыляемый материал нужного сплава помещается в высокотемпературную среду, где расплывается на необходимую поверхность при помощи струи сжатого воздуха или газа. Частицы, образованные при распылении материала, двигаются с большой скоростью в заданном направлении. Попав на обрабатываемую поверхность, частицы остывают и формируют слой с необходимыми свойствами.

В процессе плазменного напыления [6] на поверхность обрабатываемого изделия раскалённой плазменной струёй наносится равномерное порошковое покрытие. Оно плотно сцепляется с поверхностью металла за счет высокой скорости подачи. Восстановление формы и внешнего покрытия деталей с помощью плазменного напыления отличается высокой точностью выполнения и отсутствием каких-либо погрешностей, дефектов, наплывов. Нагрев деталей при восстановлении происходит при температуре не более 150 °С, что позволяет избежать деформации и изменения размеров деталей. Такой подход исключает нежелательные структурные изменения.

Толщина наносимого покрытия методами газотермического или плазменного напыления на вал ограничена 2 мм. Минусом этих методов являются высокая стоимость устройств напыления, способных нанести качественное плотное покрытие. Необходимые капиталовложения ставят под сомнение возможность применения предложенных вариантов для ремонтно-восстановительных работ на некрупных предприятиях.

Износ зубьев рулевой рейки устраняется путём вдавливания [30]. Стоит отметить, что дефект такого рода можно найти исключительно в средней части рейки. Он равномерно выравнивается к краям. Вдавливание представляет собой одновременную осадку и раздачу. При этом рейку предварительно нагревают в специальных приспособлениях. Вдавливание осуществляют роликами и клиньями противоположно требуемой деформации профиля зубьев. Далее полученную канавку доводят путём наплавки. Недостатками же этого способа можно назвать двойную

технологическую обработку, последующую шлифовку для сохранения профиля, и то, что получающийся слой покрытия при наплавке имеет довольно высокую толщину. Также в наплавленном металле наблюдается развитие неблагоприятных условий – происходит образование газовых пор, трещин. Вследствие этого поверхностный слой имеет более низкий предел выносливости.

В литературных источниках практически не встречаются другие рекомендации по восстановлению рулевой рейки. Из чего следует, что разработка технологии упрочнения рабочих поверхностей подвижных соединений рулевого механизма в зоне червячной передачи является актуальной задачей для увеличения ресурса рассматриваемого механизма после завершения ремонтно-восстановительных работ.

Технический результат состоит в увеличении межремонтного периода интегральных рулевых механизмов с усилителем руля за счет создания на поверхностях деталей пар трения рулевой рейки износостойких покрытий с заданными служебными свойствами.

Выводы.

Поверхности деталей рулевого механизма в условиях эксплуатации подвержены различным видам износа. Характер и тип износа зависят от условий эксплуатации автомобиля.

Рулевая рейка является одной из основных деталей, проблему износа которой необходимо решить. Из рассмотренных методов повышения износостойкости рулевой рейки известен и запатентован лишь один метод упрочнения зубьев рулевой рейки.

Для нанесения покрытий на зубчатый сектор рулевой рейки был предложен метод фрикционного плакирования гибким инструментом. Необходимы дальнейшие исследования по специфике и особенностям данного метода.

Глава 2 Плакирование гибким инструментом

2.1 Методика плакирования гибким инструментом

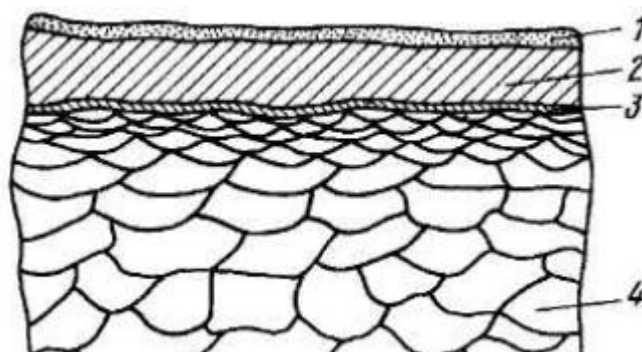
Известным методом, обеспечивающим увеличение долговечности и надёжности узлов и деталей машин, является упрочнение методом поверхностного пластического деформирования (ППД), который обеспечивает высокое качество поверхностного слоя деталей, повышает их эксплуатационный ресурс, усталостную, контактную прочность и износостойкость. Среди самых распространённых методов ППД: дробеструйная и пескоструйная обработка, термопластическое упрочнение, чеканка, галтовка, раскатывание и накатывание шариками и роликами, а также метод фрикционного плакирования гибким инструментом (ПГИ).

Известно, что «повышение срока службы деталей машин, работающих в условиях трения и износа, достигается путем нанесения на их рабочую поверхность защитных покрытий. Существующее многообразие методов поверхностного упрочнения деталей машин и механизмов обусловлено спецификой их работы» [8]. Так как зубчатая рейка подвержена усталостному изнашиванию, то актуален метод поверхностного упрочнения деталей пар трения, который создает на поверхности остаточные напряжения сжатия, что снижает вероятность возникновения трещин.

Обработка плакированием изделий при помощи гибких инструментов состоит в термомеханическом образовании покрытий. Обработка осуществляется проволочной щёткой. Сам механизм плакирования описывают следующим образом: «материал, из которого будет создаваться покрытие, находится в твёрдом состоянии и прижимается к внешней части рабочих элементов щётки. На начальных этапах вращения осуществляется очистка поверхности элемента материала покрытия (ЭМП), что, в свою очередь, приводит к схватыванию покрытия с материалом ворса щетки. Когда осуществляется контакт с обрабатываемой деталью, проводится

перенос металла с ворса щётки на обрабатываемую поверхность. При взаимодействии вращающейся щетки с деталью происходит разрушение и удаление окисных пленок и загрязнений из зоны контакта. Смятие микронеровностей и пластическое течение металла приводит к непосредственному контакту чистых поверхностей детали и инструмента, в результате чего происходит схватывание, представляющее собой самопроизвольный процесс, протекающий с выделением энергии. Интенсивное тепловыделение при трении гибкого инструмента о поверхность изделия способствует облегчению процесса схватывания. В дальнейшем из-за взаимного движения соединившихся поверхностей узел схватывания разрушается. Срез происходит, как правило, в толще менее прочного металла и его частицы остаются на поверхности более твердого. С течением времени на более твердой поверхности образуется покрытие» [1], [13]. Описав методику, можно выделить ее преимущества – она является достаточно производительной, чистой с экологической точки зрения, а процесс ПГИ не нуждается в дополнительной обработке поверхности, как до, так и после проведения операции.

Исследование данной процедуры нанесения покрытия позволило выделить в структуре слоя поверхности три базовых участка. Схематично они показаны на рисунке 5.



1 – покрытие; 2 – деформированный слой; 3 – переходный слой; 4 – основа металла обрабатываемой детали

Рисунок 5 – Структура поверхности после ПГИ

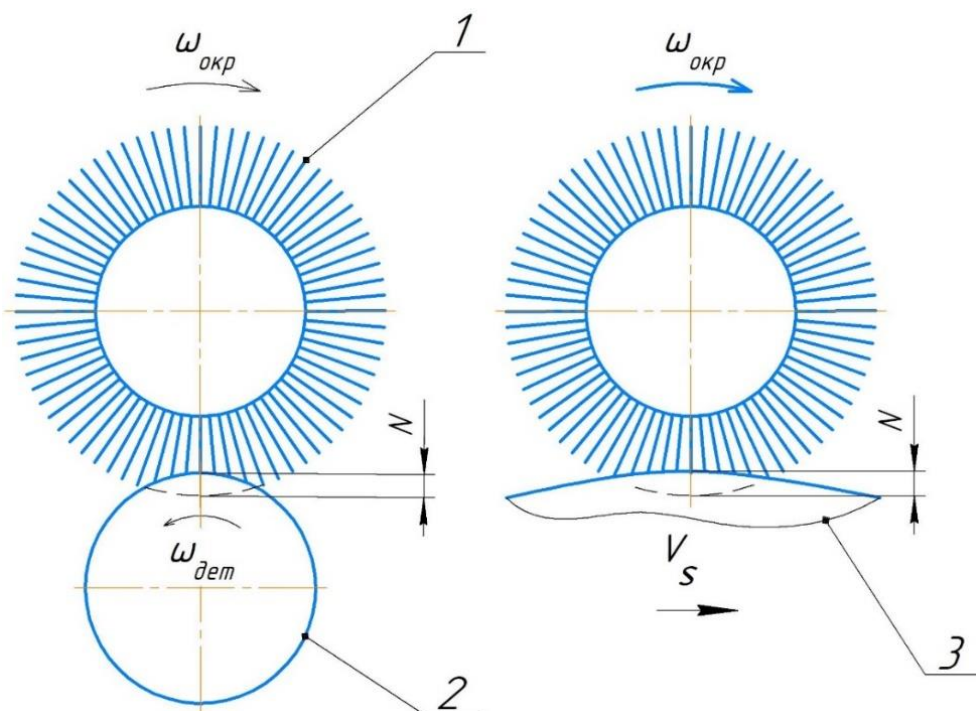
Изучение поверхностного слоя, который был образован во время фрикционного плакирования гибким инструментом, показало, что «начальной зоной является покрытие, которое формируется во время обработки. Вторая зона – переход между материалом покрытия и основой материала изделия. Третьей зоной становится слой, который подвергся деформации. Поскольку при ПГИ происходит пластическое деформирование поверхности обрабатываемой детали, то ее твердость увеличивается. Наибольший интерес представляет переходный слой, который отличается как от материала основы, так и от материала покрытия. Он формируется за счет диффузии материалов, что дает ему новые особенные свойства, такие как высокая твердость, измененный микрорельеф и повышенная износостойкость. Покрытие же играет роль твердой смазки, в особенности в период приработки детали, и почти полностью удаляется, оставаясь только во впадинах микрорельефа, за счет чего снижается трение. При увеличении скорости вращения щетки происходит снятие полученного фрикционного слоя» [3], [12], [27].

На данный момент имеются две принципиальные схемы проведения процесса ПГИ.

Первая схема подразумевает, что ворсинки гибкого инструмента и являются элементами материала покрытия. Схема выполнения операции продемонстрирована на рисунке 6.

При первом проходе гибкого инструмента происходят очистка поверхности основы от загрязнений и окалин, срезание небольших неровностей. Дополнительно открываются ювенильные поверхности для формирования мостиков схватывания материала ворсинок и частиц элементов материала покрытия. Схватыванию способствуют совместная пластическая деформация и повышение температуры в месте обработки поверхности. Далее при вращении щетки появляется проскальзывание ворсинок с частицами материала по поверхности. Осуществляется взаимное проникновение частиц материала покрытия и материала обрабатываемого

изделия. Это приводит к формированию нескольких слоев переходного участка в месте схватывания.



1 – гибкий инструмент; 2– обрабатываемое изделие формы тел вращения; 3 – обрабатываемое изделие плоской поверхности.

Рисунок 6 – Принципиальные схемы реализации процесса ПГИ №1

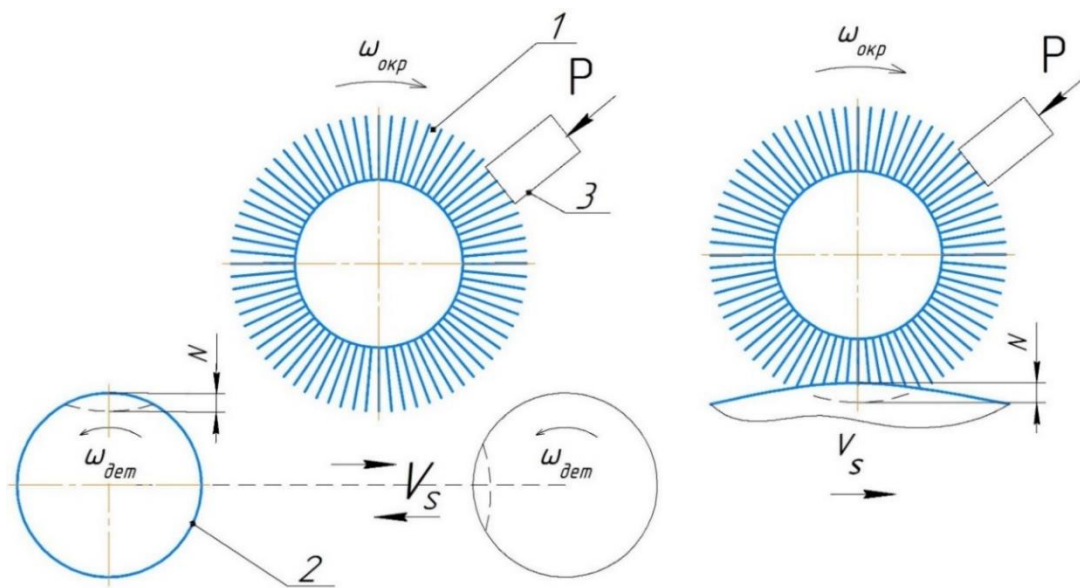
Существенный недостаток схемы – это небольшой ресурс инструмента, что ведет к его последующей утилизации без возможности повторного применения. После продолжительной эксплуатации эффективность метода снижается. Также наблюдается сложность соблюдения технологического режима из-за износа ворсинок щетки.

На второй схеме ворс гибкого инструмента становится механическим переносчиком частиц материала покрытия на основу обрабатываемого изделия. При этом инструмент прижимают к ЭМП в виде твердотельного компонента с некоторым усилием. Схема представлена на рисунке 7.

Гибкий инструмент представляет собой вращающуюся проволочную щетку.

Фрикционное повышение температуры с высоким уровнем

интенсивности помогает разрушить узлы, в которых происходит схватывание. Это осуществляется через толщу разупрочненного слоя поверхности ЭМП. Соответственно частицы покрытия остаются на внешней части щетки. Когда контактирует гибкий инструмент с обрабатываемой поверхностью, тогда материал переносится с ворса на основу. Это осуществляется согласно описанному механизму образования покрытия. Эта схема образования покрытия при помощи фрикционного плакирования используется наиболее часто. Стоит также отметить, что механическая щетка может устанавливаться под углом к плакируемой поверхности детали. Также допускается пересечение их под углом величиной от 25° до 45° . Подача обрабатываемой детали может происходить в обоих направлениях – вдоль и поперёк инструмента. Чаще всего данная схема применяется для плакирования цилиндрических и плоских поверхностей.



1 – гибкий инструмент; 2 – обрабатываемое изделие; 3 – элемент материала покрытия.

Рисунок 7 – Принципиальные схемы реализации процесса ПГИ №2

Схема обработки имеет такие преимущества как простота реализации и экономическая эффективность. Этот способ нанесения покрытий в сочетании с высокими эксплуатационными характеристиками обработанных

поверхностей выбран как фундамент для дальнейшей проработки конструкции установки для обработки рулевой рейки. Тогда на основе этой принципиальной схемы необходимо разработать установку плакирования для зубчатой рейки с ее конструктивными особенностями.

Одной из выявленных проблем стала сложность обработки боковых поверхностей зубьев рулевой рейки. Плакирование существующими методами невозможно из-за постоянного расположения ворсинок вдоль обрабатываемой детали, что неблагоприятно скажется на верхней области зубьев. Для обработки крайних зубьев нет никаких технических преград, а вот провести обработку промежуточных зубьев не представляется возможным. И как уже было отмечено – именно там наблюдается более высокий износ. То есть нужно продумать такую схему обработки, чтобы соблюдался постоянный натяг, одинаковый вылет ворса и при этом ворс был перпендикулярен обрабатываемой поверхности при вхождении с ней в контакт. На рисунке 8 представлена схема обработки зубчатой рейки методом плакирования с учетом выявленных особенностей.

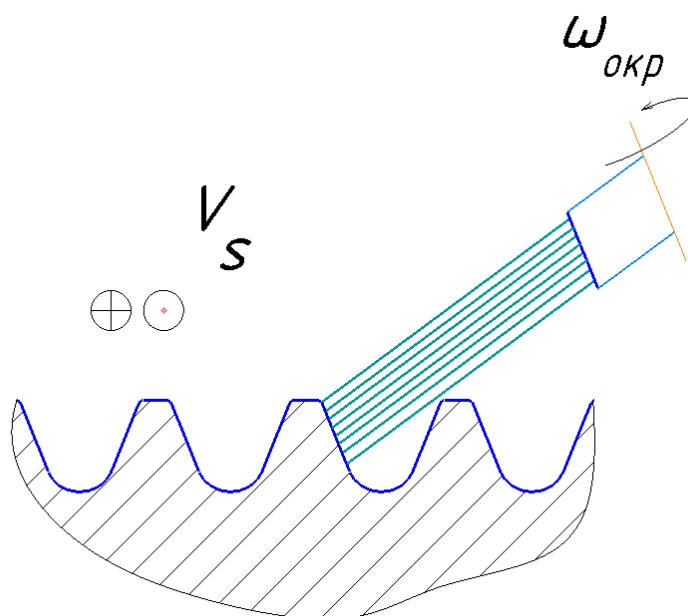


Рисунок 8 – Принципиальная схема установки плакирования зубчатого сектора рулевой рейки

При предложенной схеме обработки зубьев рулевой рейки выполняются следующие условия для ПГИ; обеспечивается сила удара, которая зависит от диаметра инструмента, диаметра ворсинок и длины вылета; сохраняется постоянный натяг N для всех ворсинок, находящихся в контакте в интервале от 1 до 2 мм.

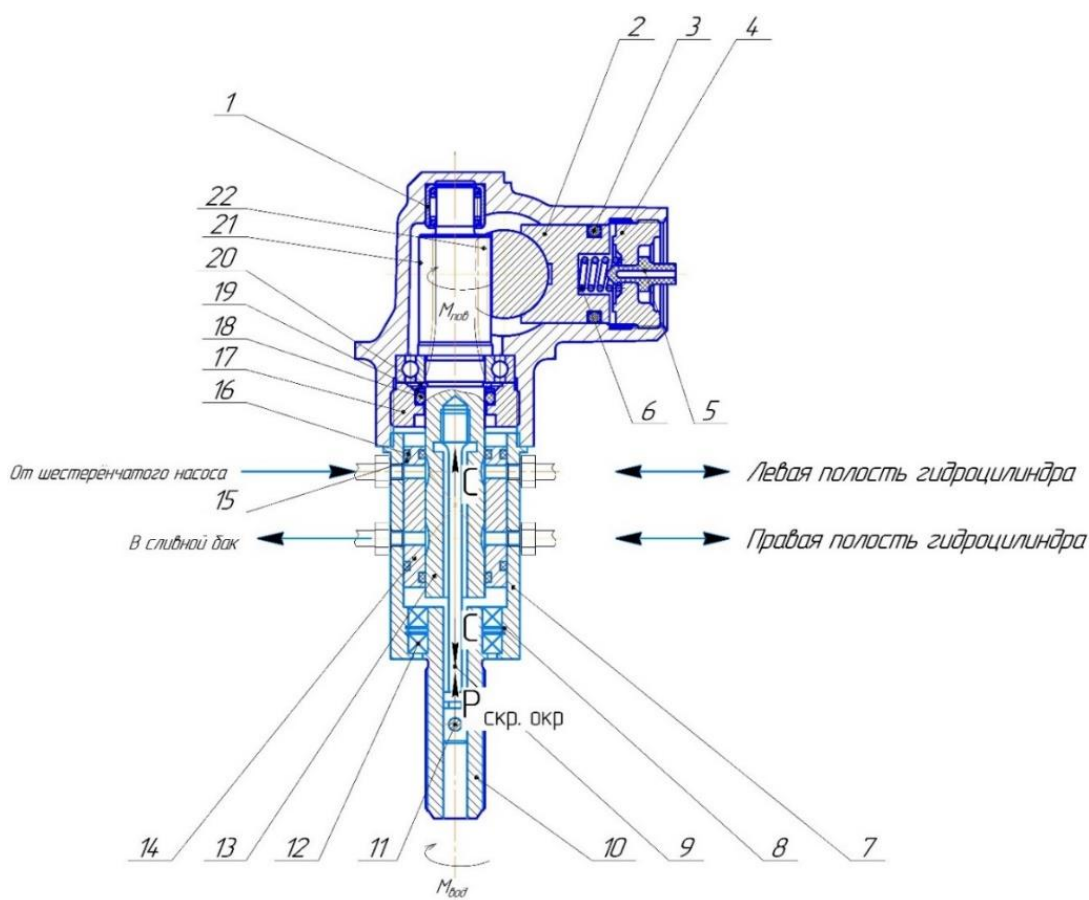
Однако, чтобы получать постоянное высокое качество покрытий, требуется точно реализовать технические параметры процесса по указанной схеме. Тогда правильно подобранные режимы обработки не приведут к быстрому выходу инструмента из строя в результате его усталостного разрушения. Дальнейшее исследование данных проблем требует разработки методики точного расчета параметров процесса ПГИ, которая позволит предложить способы точного соблюдения технологического процесса. Для обеспечения требуемого качества обрабатываемой поверхности необходим выбор оптимальных режимов обработки, что предполагает необходимость определения сил в зоне контакта, исходя из условий работы рулевой рейки.

2.2 Определение методики расчёта параметров в зоне контакта

Поворот колес осуществляется в результате действия крутящего момента $M_{\text{вод}}$, который водитель приложил к рулю с ГУР.

На рисунке 9 представлена схема зоны контакта. Во время осуществляемого поворота червяк 20 поворачивает зубчатый сектор 21. Он поворачивается с золотником 15 и торсионом 9. Тогда в червяке возникает сила $P_{\text{скр.окр}}$, которая стремится сместить его в осевом направлении. От смещения червяка удерживает сила упругости торсиона C . Если усилие $P_{\text{скр.окр}}$ меньше C , то червяк в осевом направлении не смещается и золотник 15 остаётся в нейтральном положении. В полостях гидроцилиндра не появляется должная степень давления. Соответственно, поворот автомобиля осуществляется только благодаря моменту $M_{\text{вод}}$, приложенному через рулевое колесо. В данной ситуации момент сопротивления повороту

червяка $M_{пов}$ с моментом сил трения $M_{тр}$ меньше поворачивающего момента от сил упругости торсиона $M_{торс}$.



1 – подшипник; 2 – упор; 3 – манжета; 4 – винт; 5 – пробка; 6 – пружина 7 – стакан; 8 – стопорное кольцо; 9 – торсион; 10 – вал рулевой колонки; 11 – штифт; 12 – подшипник; 13 – вал распределителя; 14 – распределитель; 15 – золотник; 16 – манжета; 17 – гайка; 18 – манжета; 19 – шайба; 20 – стопор; 21 – червяк; 22 – зубчатая рейка.

Рисунок 9 – Схема зоны контакта на распределителе при передаче усилий на поворот

В случае, если сопротивление повороту является высоким и момент $M_{пов}$ не способен преодолеть сопротивление повороту колес $M_{п}$, червяк ввёртывается в зубчатый сектор. Это приводит к его смещению в направлении оси, когда осуществляется поворот вправо и назад при повороте влево. Тогда поток специальной жидкости от распределителя направляется к рабочему гидроцилиндру в соответствующие полости, где под давлением рейка 22 перемещается вперёд и поворачивает свой зубчатый сектор. От

данного сектора поворачивающий момент передаётся колёсам через рулевые тяги. Силы и перемещения, которые появляются в результате задействования механизма рулевого управления с ГУР, изнашивают реечный механизм.

На рисунке 10 видно, что при повороте рулевого вала на червяк воздействуют силы: $P_{ч-р.ос}$, стремящаяся переместить червяк с определенной скоростью в осевом направлении; $P_{ч-р.рад}$, стремящаяся сместить червяк в направлении от рейки; момент сил $M_{пов}$, передаваемый от рулевого колеса через распределитель. В итоге взаимодействия сил $P_{ч-р.ос}$ и $P_{ч-р.рад}$ и полученной нагрузки через червяк, рулевая рейка совершает возвратно-поступательное движение.

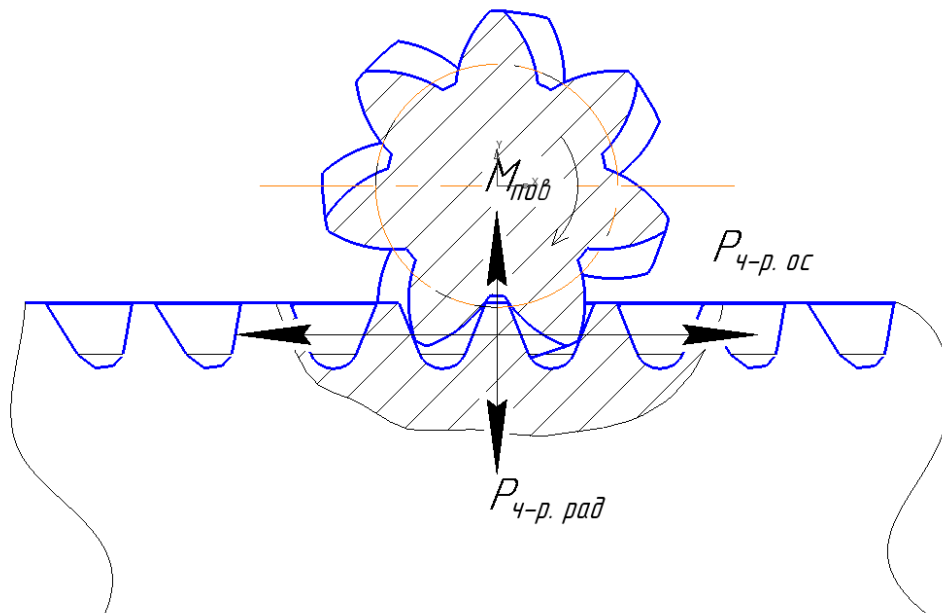


Рисунок 10 – Схема зоны контакта на рулевой рейке при передаче усилий на поворот

В этом узле рулевого механизма со сложным профилем поверхности трения, работающего в условиях трения качения с проскальзыванием, вследствие возникающих в процессе эксплуатации высоких контактных давлений, происходит вытеснение смазки из зоны контакта. Поэтому контакт поверхностей становится таким же, как и при трении без использования смазки. В такой ситуации износ поверхности в результате проскальзывания

является достаточно существенным, что приводит к уменьшению срока эксплуатационной службы рулевого механизма.

Следовательно, под действием сил $P_{\text{ч-р.ос}}$ и $P_{\text{ч-р.рад}}$ и момента $M_{\text{пов}}$ в рулевом механизме с возникновением циклических нагрузок будет происходить износ боковых поверхностей зубьев червяка 21 и рулевой рейки 22 в местах сопряжения. В результате взаимодействия сил $P_{\text{ч-р.ос}}$ и $P_{\text{ч-р.рад}}$ и момента $M_{\text{пов}}$, особенно если сопротивление повороту велико, происходит проскальзывание витков червяка относительно зубьев сектора, что сопровождается износом зубьев рейки 22 по боковой поверхности и витков червяка 21. Зубья рулевой рейки имеют трапецеидальную форму, поэтому в зацеплении есть место трения скольжения, вызывающее сильный износ зубьев под действием циклической контактной нагрузки. Разрушение трущихся тел происходит под влиянием тангенциальных усилий, вызывающих в поверхностных слоях напряжения, превышающие предел текучести или прочности. Работая в условиях жидкостной смазки, когда поверхности трения не всегда разделены слоем смазки даже малой толщины, возникает граничное трение, что тоже провоцирует процесс изнашивания.

Беря во внимание кинематику изнашивания функциональной пары «червяк-рулевая рейка» встает вопрос по применению различных методов защиты поверхностей от их усталостного разрушения. Отсюда основной методикой повышения надежности и долговечности деталей, работающих в условиях трения, является формирование антифрикционного защитного покрытия на поверхности контакта, обеспечивающего защиту поверхностного слоя от изнашивания. Именно поэтому методика фрикционного плакирования гибким инструментом ближе всего подходит для обработки зубьев рулевой рейки.

Базой для математической модели является геометрическое исследование контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью. Учитывая предложенную схему установки, на основе конструктивных особенностей выбранной рейки и распределения нагрузок,

вызывающих износ, встает вопрос об упрочнении именно боковых поверхностей зубьев рулевой рейки.

Исходя из кинематики процесса взаимодействия ворсинки с обрабатываемой поверхностью, представленной на рисунке 11, следует, что боковую поверхность зуба при обработке ПГИ принимаем как плоскую поверхность. В этом случае методика расчета параметров зоны контакта при плакировании боковой поверхности зубьев основана на методике расчета параметров для изделий плоской формы [15].

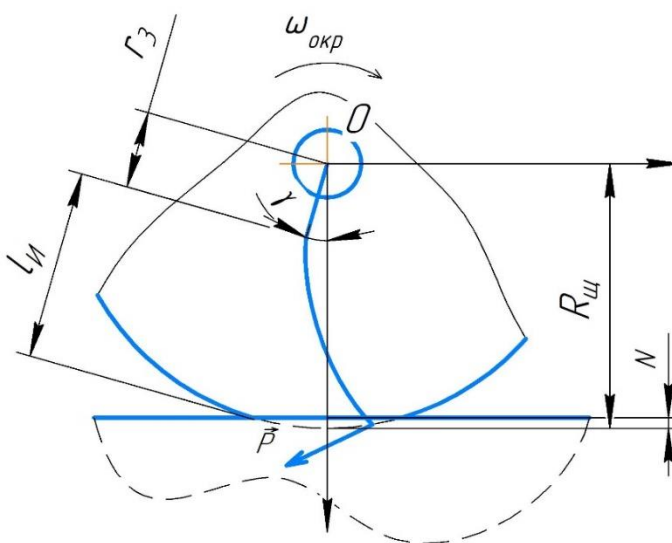


Рисунок 11 – Контакт щётки с плоской поверхностью зуба рулевой рейки

Угол, при котором ворс контактирует с плоской поверхностью, вычисляется при помощи выражения:

$$\gamma = \arccos \frac{R_{щ} - N}{R_{щ}}, \quad (1)$$

где N – натяг ворса к обрабатываемому изделию, мм;

$R_{щ} = l_{из} + r_3$ – радиус щетки, мм;

r_3 – длина неизгибающейся части ворса, мм;

$l_{из}$ – вылет изгибающейся части ворса, мм.

Таким образом, определив методику и обосновав причины износа обрабатываемой поверхности, делаем вывод, что обработка зубьев рулевой рейки под углом представляет собой в проекции обработку плоской поверхности.

2.3 Анализ источников по эффективности методики поверхностного пластического деформирования

Для того чтобы убедиться в эффективности предложенного метода необходимо указать ряд условий, при которых считается, что обработка дала положительный результат. Для определения направления исследования в сторону метода ПГИ был проведён сравнительный анализ имеющихся методов ППД по существующим открытым источникам, а конкретно по качеству обработанной поверхности.

Надежность и ресурс деталей в значительной мере определяются состоянием поверхностного слоя. Частое использование методов ППД связано с их техническими преимуществами. В частности, это касается простоты воплощения, экологической чистоты, высокой производительности, широкого использования, стойкости и стабильности. Обладая множеством преимуществ, данная методика не лишена негативных моментов – они значительно ограничивают технический потенциал. Сюда относится востребованность в предварительной обработке детали, если у нее низкий уровень исходной шероховатости. Также не исключено появление во время ППД как перенаклепа, так и шелушения обрабатываемой поверхности [18], [27], [29].

Обработка методами ППД состоит в силовом контактном воздействии деформирующего инструмента на поверхность заготовки в условиях ее относительного перемещения. Удары в малом или большом количестве, наносимые по изделию по заданной программе или хаотично, оставляют на ней большое число локальных пластических отпечатков, которые в

результате покрывают всю поверхность. Масштабы очага данной обработки связаны с материалом изделия, параметрами инструмента обработки, его размерами и силой удара. Когда используются статические методы ППД, такие, как накатка при помощи ролика или шарика, очаг деформации постоянно смещается.

Наряду со статистическими методами обработки в сфере машиностроения применяют технологии ППД, которые реализуются благодаря динамическому (ударному) воздействию. К их числу относят также и метод ПГИ. Исследование ряда источников, приведенных в литературе, направлено главным образом на выявление общих закономерностей ППД при большом разнообразии методов реализации этого вида обработки. Для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя при использовании динамических методов рассмотрим характерные параметры поверхностного слоя, которые обусловлены режимами обработки ППД.

При осуществлении плакирования при помощи гибкого инструмента, образование наклепанного слоя получается за счет большого количества дискретных и случайно повторяющихся во времени ударов ворса по обрабатываемой поверхности с образованием на ней отпечатков. Они могут случайным образом повторяться по всей площади обработки.

В ходе изучения данного процесса при ППД созданы различные системы математических расчётов, на основании которых можно составить предварительный прогноз ожидаемых характеристик упрочнения, таких как степень деформации и глубина упрочнённого слоя. Эти параметры упрочнения зависят от технологических режимов обработки и физико-механических свойств обрабатываемого изделия.

В процессе обработки в поверхностный слой детали внедряется элемент, будь то наконечники ворса щетки или дробь в виде шариков, и в зоне контакта в области соприкосновения формируется остаточная вмятина, по площади соприкосновения которой, остаётся пластически

деформированное пространство глубиной h_s , отличающееся по свойствам от основного материала изделия.

Одной из первых зависимостей для расчёта глубины упрочнения является формула, полученная Хейфецом С.Г.:

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T}}, \quad (2)$$

где P – сосредоточенная сила деформирования, приложенная в центре площади контакта, Н;

σ_T – предел текучести материала детали при растяжении или сжатии, Па [36].

Для материалов, не имеющих на диаграмме растяжения выраженной площадки текучести, в качестве σ_T принимают условный предел текучести $\sigma_{0,2}$.

Множество исследователей пытались улучшить, видоизменить и дополнить данную зависимость. Автор [21] при проведении экспериментальных исследований доказал, что расчётные данные, полученные при использовании данной зависимости выше экспериментальных на 20 %.

Так, Дрозд М. С. сформулировал обобщающую зависимость, «исходя из формирования модели взаимодействия внедряемого сферического индентора. В рамках предложенной модели детально описывается воздействие размеров площади взаимодействия сферы с поверхностью на глубину слоя упрочнения:

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \sigma_T} - 0,5 \left(\frac{d_B}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

где d_B – диаметр контактной площадки индентора с деталью» [12].

Исследователь Тамаркин М. А. предложил «уточнённую зависимость, в рамках которой принимается во внимание то, что площадь контакта сферического индентора с плоскостью практически всегда выступает эллипсовидной:

$$h_s = 2 \cdot V_{ок} \cdot r_{отп} \cdot \sin \gamma \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{3 \cdot k_s \cdot c \cdot \sigma_T}}, \quad (4)$$

где $V_{ок}$ – скорость обработки, м/с;

k_s – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости детали;

$\rho_{ш}$ – плотность материала индентора, кг/м³;

$r_{отп}$ – радиус индентора, м;

c – коэффициент несущей способности контактной поверхности» [34].

В соответствии с исследованиями Кудрявцева И. В. «степень деформации ε выражается в отношении диаметра лунки d , которая формируется в результате воздействия индентора, к диаметру вдавливаемой сферы D » [20]:

$$\varepsilon = \frac{d}{D}. \quad (5)$$

«Основываясь на данных научных источников и практических исследований, которые содержатся в работе, диаметр, который остается после удара индентора, то есть деформированное полупространство лунки (очаг деформации) d » [20], определяется по формуле:

$$d = \sqrt[4]{\frac{D \cdot P}{0,1 \cdot HD}}, \quad (6)$$

где HD – динамическая твердость материала» [12].

Для практического использования ранее рассмотренных зависимостей, на основании которых можно установить показатель глубины упрочненного слоя h_s , необходимо знать показатель контактной нагрузки P , а также предел текучести материала σ_T , из которого изготовлено изделие. Формула (3) уже содержит в себе разложенные технологические и геометрические условия, в том числе силу удара, но это все равно не поможет в рациональном контроле технологических параметров.

Эти зависимости получили экспериментальную проверку. Основополагающие исследования в этой области были проведены И. В. Кудрявцевым, М. С. Дроздом, В. П. Пшибыльским, Б. П. Рыковским, В. М. Смелянским, Е. Г. Коноваловым, Д. Д. Папшевым и другими учеными.

Учитывая результаты работы [12], «при описании деформационного упрочнения, по мере увеличения степени распределения деформации происходит непрерывный прирост предела текучести материала детали за счет наклепа, поэтому нужно стремиться к максимальной степени равномерности деформации поверхностного слоя» [12].

Таким образом, чтобы осуществить процесс обработки при помощи применения динамического метода ПГИ, в роли основных показателей были установлены следующие характеристики – степень, глубина и равномерность упрочняемого слоя.

Ссылаясь на экспериментальные исследования, можно отметить результаты авторов [3], которые проводили упрочнение методом ПГИ штоков гидроцилиндров, изготовленных из стали 45. Полученная толщина покрытия составила от 20 до 25 мкм. И что самое главное можно выявить из данного исследования, это то, что проводилось упрочнение зубчатых венцов волновых передач, что конструктивно близко к рассматриваемым рулевым рейкам. Зубья венцов также, как и у выбранной рулевой рейки имеют трапецеидальную форму. Лучший результат при упрочнении венцов показало медесодержащее покрытие, толщина которого составила около

1 мм. При покрытии венца медьсодержащим покрытием срок службы увеличился вдвое и составил 30 часов. При нанесении медьсодержащего покрытия на штоки и плунжеры гидравлических цилиндров результаты показали значительные улучшения эксплуатационных характеристик. Ресурс увеличился в 3 раза, а на зубья колес волновых передач торцевого исполнения – в 6 раз суммарно. Было установлено, что методом ударно-фрикционной обработки гибким инструментом возможно получение твердого, наноструктурированного поверхностного слоя. Как и было описано в методике плакирования процесс упрочнения поверхности идет с одновременным нанесением функциональных покрытий при помощи гибкого инструмента.

В исследовании [4] упрочнялись цилиндрические поверхности из стали 45 различными покрытиями при следующих технологических параметрах: длина ворса l_H составила 75 мм, диаметр ворса d_B – 0,20 мм, скорость вращения $V_{ок}$ – 35 м/с, число проходов n составило от 6 до 9. Толщина сформированного покрытия на образцах из стали 45 составила от 30 до 150 мкм. Также были проведены исследования по закономерности формирования глубины покрытий из разных материалов на пластины из стали 45, а именно меди, алюминия, латуни и олова, представленные в таблице 2. За технологические параметры были выбраны натяг N от 1 до 3 мм и время обработки от 1 до 3 минут.

Таблица 2 – Результаты эксперимента

Номер опыта	Материал покрытия								Технологические параметры	
	Медь		Алюминий		Латунь		Олово			
	H , мкм	σ_B , МПа	H , мкм	σ_B , МПа	H , мкм	σ_B , МПа	H , мкм	σ_B , МПа	N , мм	Время, мин
1	75	6,53	150	9,56	120	6,32	170	6,4	3	3
2	100	7,17	100	4,78	150	7,43	120	7,2	3	3
3	150	8,46	120	5,99	100	6,94	140	8,4	1	1
4	87	6,1	87	4,68	170	8,8	100	7,4	1	1

Обозначение: H – толщина сформированного покрытия; σ_B – адгезионная прочность покрытия

Проанализировав результаты эксперимента, можно сказать, что влияние режимов обработки не так однозначно – если увеличение натяга при длительности обработки, равной 1 мин, приводит к росту толщины и адгезионной прочности покрытия, то при дальнейшем увеличении длительности обработки увеличение натяга дает обратный эффект.

Довольно интересная работа [23] проводилась по сравнению критериев работоспособности медных покрытий, полученных гальваническим способом и методом фрикционного плакирования. Также отметим технологические параметры плакирования: натяг N составлял от 1,2 до 4 мм, длина ворса l_{II} была равна 60 мм диаметр ворса d_B – 0,20 мм, скорость вращения $V_{ок}$ составляла 20 – 35 м/с, число проходов n варьировалось от 5 до 12. Показатель толщины на сформированном покрытии на стальных образцах стали 08кп составил от 6 до 8 мкм. За показатели работоспособности авторы в качестве основных характеристик выделили количество циклов поперечного изгиба до возникновения отслаивания медного покрытия и поломки образца. И также провели исследования образцов по сопротивлению трению сферического индентора по упрочнённой поверхности. Упрочнённые образцы методом ПГИ обеспечивают удовлетворительную работоспособность лишь при нагрузках, не превышающих 8 МПа. Вместе с тем плакированные покрытия более устойчивы к нагрузкам, возникающим при циклическом знакопеременном изгибе. При этом, в отличие от гальванического покрытия, они не отслаиваются, даже если изделие было сломано.

Основоположник метода обработки вращающимися механическими щетками Кургузов Ю. И. в 2009 году выпустил статью [22], где рассматривались вопросы упрочнения газотурбинных лопаток двигателей. Технологические параметры обработки составляли: вылет ворса l_{II} – 75 мм диаметр ворса d_B – 0,3 мм, скорость вращения $V_{ок}$ – 19 об/мин. Было установлено, что сглаживающая обработка, приводящая к снижению шероховатости обработанной поверхности, возможна при условии, что

глубина отпечатка не превышает радиус отпечатка. Анализ результатов показал повышение микротвёрдости поверхностного слоя на 17 % – 22%. Однако прирост микротвёрдости наблюдался при обработке при высоких скоростях щетки. Толщина упроченного слоя составила от 20 до 25 мкм.

Толщина наносимого покрытия заметно отличается в каждой работе, но на основании изученной информации можно утверждать, что применение предложенного метода позволяет формировать покрытие разной толщины, от 3 до 25 мкм и даже до 150 мкм при определенных условиях. В проанализированных источниках утверждается, что основное воздействие процесса реализации ПГИ заключается в формировании достаточно тонких антифрикционных покрытий и равновесной шероховатости.

Таким образом, на показатель стабильности равномерного нанесения защитного покрытия в различной степени влияют технологические (частота оборотов щетки, скорость передвижения обрабатываемой детали, натяг, время обработки) и конструктивные (длина и диаметр щетки, радиус отдельной ворсинки) факторы.

Проанализировав реальные эксперименты и теоретическую основу, можно предположить, что внедрение плакирования для повышения износостойкости пар трения позволит существенно увеличить долговечность зубчатых реек.

2.4 Математическое моделирование параметров зоны контакта процесса ПГИ

Метод фрикционного плакирования гибким инструментом выступает в качестве комбинированного метода обработки. В ходе первичной стадии реализуется процесс пластического поверхностного деформирования обрабатываемой поверхности под влиянием ударов проволоочных компонентов инструмента. После этого наносится покрытие. Известно, «чтобы установить толщину слоя упрочнения, следует знать не только силу

удара и показатель формирующейся в результате этого воздействия упругопластической деформации. Также следует понимать, какое точно количество ударов необходимо для определенной площади за единицу времени. Это связано с тем, что под формированием слоя упрочнения следует понимать процесс равномерного распределения его по глубине под обрабатываемой поверхностью. Для этого необходимо знать поверхностную плотность распределения отпечатков от ударов ворса» [16]. В настоящий момент существует модель, разработанная Зотовым А. В., которая позволяет оценить степень распределения отпечатков по поверхности обрабатываемой детали, образующийся в ходе удара ворса гибкого инструмента, принимая во внимание физико-механические свойства материала. Так, «ворс гибкого инструмента на ее периферийной поверхности расположен неравномерно и, при обработке, отпечатки на обрабатываемом изделии появляются в случайном порядке. На основании этого можно применить теорию вероятности. При этом тот факт, что какие-либо очевидные закономерности процесса распределения ворса по периферийной поверхности инструмента отсутствуют, целесообразно применять вероятностный подход в ходе моделирования распределения отпечатков. При этом распределение отпечатков будет осуществляться в соответствии с законом Пуассона» [17].

Закон Пуассона моделирует случайную величину, представляющую собой число событий, произошедших за фиксированное время, при условии, что данные события происходят с некоторой фиксированной средней интенсивностью и независимо друг от друга. Так, вероятность появления той или иной ворсинки в любой области обрабатываемой поверхности не зависит от количества ворсинок, попавших в любые области, не пересекающиеся с данной. Одновременно с этим крайне незначительной является потенциальная вероятность того, что в определённую область попадёт две и более ворсинки, в особенности с учётом того, что попадание одной ворсинки является более вероятным.

В процессе осуществления моделирования следует различать «участок

ударного воздействия при входе ворса в контакт и участок скольжения сжато-изогнутого ворса по поверхности обрабатываемого изделия до выхода его из контакта. Необходимо, чтобы плотность ворса гибкого инструмента была η_ϕ меньше или равна 0,2. Фактический показатель заполнения рабочей поверхности высчитывается по формуле:

$$\eta_\phi = \frac{n_B \cdot d_B^2}{8 \cdot B \cdot R_{щ}}, \quad (7)$$

где n_B – общее количество проволочек на периферийной поверхности щетки;

d_B – диаметр, мм;

$R_{щ}$ – радиус щетки, мм;

B – ширина щетки, мм» [17].

Для того чтобы правильно оценить возможность применения методики плакирования зубьев рулевой рейки, необходимо промоделировать сам процесс в 3D-пространстве и провести оценку.

Кинематика процесса обработки проволочным инструментом зубьев рулевой рейки, изображена на рисунках 12, 13 и 14.

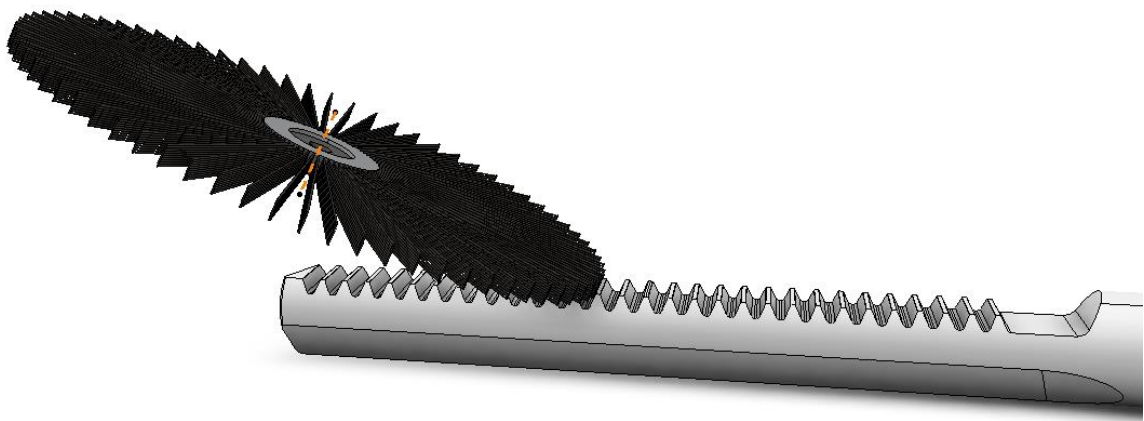


Рисунок 12 – Обработка гибким инструментом в изометрии

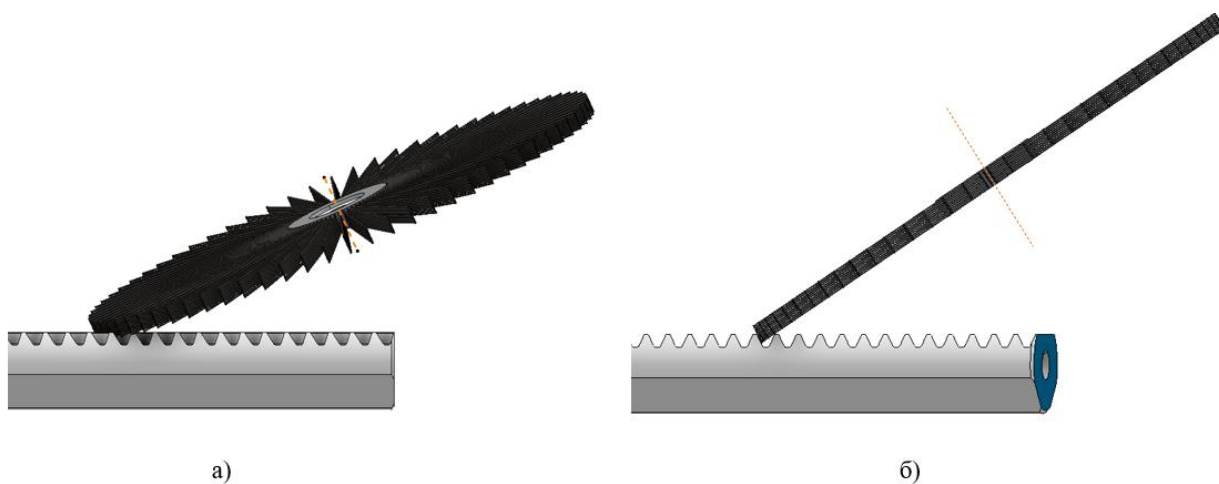


Рисунок 13 – Обработка рулевой рейки гибким инструментом: а – вид сбоку; б – вид нормалью к периферии инструмента

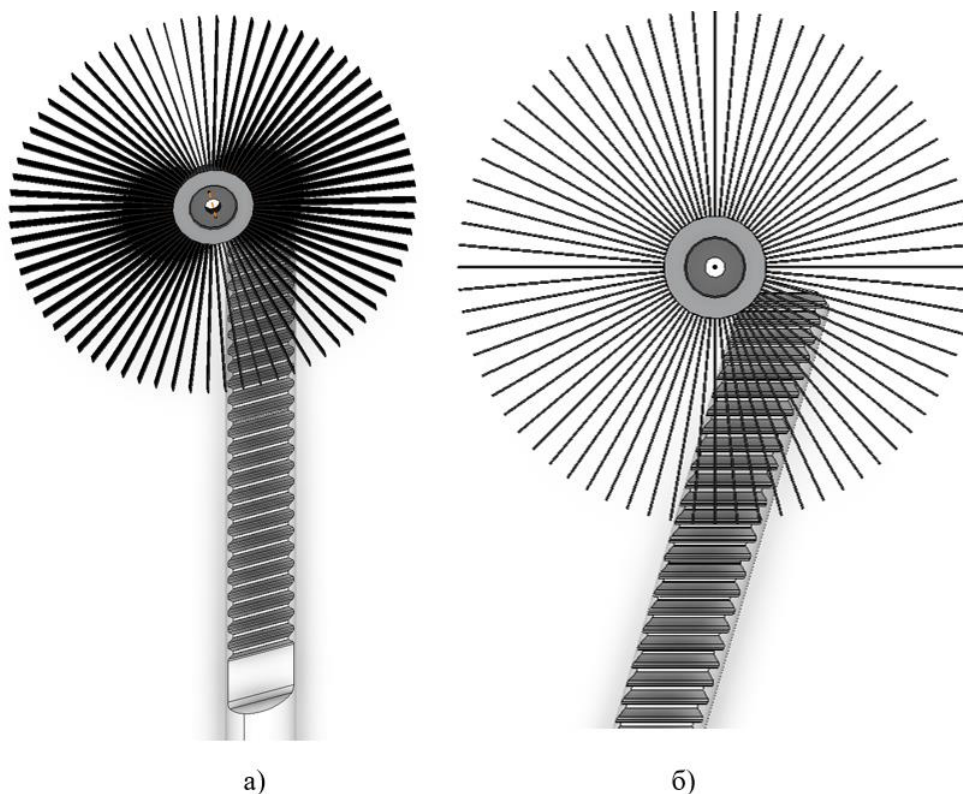


Рисунок 14 – Обработка рулевой рейки гибким инструментом: а – вид сверху; б – вид нормалью к инструменту

Тогда, «поверхностная плотность распределения отпечатков, которые сформировались от воздействия ворса на поверхности детали, является прямо пропорциональным показателю окружной скорости вращения

инструмента $V_{ок}$, коэффициента η_{ϕ} , а также обратно пропорциональным квадрату диаметра ворса d_B и скорости перемещения V_S обрабатываемой поверхности относительно гибкого инструмента» [16]:

$$\lambda_s = \frac{4 \cdot V_{ок} \cdot \eta_{\phi}}{\pi \cdot d_B^2 \cdot V_S} \quad (8)$$

Чтобы оценить уровень качества обработки щетками, следует определить закономерность распределения отпечатков на обрабатываемой поверхности. Проводить оценку данного фактора следует на основании степени покрытия поверхности и показателя ее площади, которая покрыта отпечатками однократно, двукратно и т.д. $P(a)$ и покрытой отпечатками площади определенное количество раз $P(a)^*$:

$$P(a) = 1 - \sum_{k=0}^{n^*-1} \frac{a_{отп}^k}{k!} e^{-a_{отп}} ; \quad (9)$$

$$P(a)^* = \frac{a_{отп}^n}{n^*!} e^{-a_{отп}} ,$$

где $\alpha_{отп} = \pi \cdot (r_{отп})^2 \cdot \lambda_s$ – среднеевероятное (математическое ожидание) число ударов ворсинки в площадь, равную площади собственного отпечатка радиусом $r_{отп}$;
 n^*, k^* – кратность покрытия.

Было доказано, что «в ходе нанесения удара провололочкой формируется отпечаток эллипсоидной формы. Однако при этом наибольшая ширина аналогична наибольшей глубине. Соответственно, с необходимой для математических расчетов точностью, представляется возможным упростить проекцию отпечатка на поверхность обработки до окружности радиуса $r_{отп}$, который составляет половину максимальной ширины отпечатка» [12], [14].

Чтобы упростить процесс, будем считать, что «показатель радиуса

отпечатка от удара ворсинки равен размеру половины ширины проекции остаточного отпечатка на обрабатываемой поверхности:

$$b = 2 \cdot k_{\phi} \sqrt{\frac{d_B^2}{4} - \left(\frac{d_B}{2} - \frac{h_{\text{отп}}}{\sin \gamma}\right)^2}, \quad (10)$$

где $k_{\phi} = 0,5 - 0,8$ – коэффициент формы ударного элемента ворсинки в плоскости, проходящей вдоль ее оси по нормали к плоскости вращения инструмента;

$h_{\text{отп}}$ – глубина остаточного отпечатка, мкм;

γ – угол входа, под которым ворсинка контактирует с деталью, град» [16], [17].

Для расчёта глубины остаточного отпечатка воспользуемся «известной формулой:

$$h_{\text{отп}} = K \cdot P_y^{n_k} \cdot \sin \gamma, \quad (11)$$

где K – коэффициент, зависящий от свойств материалов ворсинки и детали;

P_y – сила удара воздействия ворсинки при контакте с деталью, Н;

$n_k = 0,67$ – коэффициент, зависящий от формы ударного элемента в плоскости вращения инструмента» [16].

Также необходимо учесть, что представляет собой распределение зон пластической деформации. Для того чтобы установить показатель глубины упрочненного слоя, необходимо знать силу удара. Воспользуемся формулой Кудрявцева [38], которая является модификацией формулы (2) и принимает следующий вид, с учетом поправочного коэффициента и угла атаки:

$$h_s = \frac{1}{1 + 0,07 \cdot R_{np}} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot \sin \gamma}{2 \cdot \sigma_T}}, \quad (12)$$

где σ_T – условный предел текучести, Па;

R_{np} – поправочный коэффициент.

Считается, что «если поверхность обрабатываемой детали полностью покрыта следами от воздействия деформирующих тел, то глубина пластически деформированного слоя практически равна максимальной глубине очага деформации от единичного отпечатка» [27].

Определим степень равномерности глубины наклепанного слоя как «отношение глубины пластической деформации в зоне перекрытия деформированных объемов h_μ к максимальной глубине наклепа h_s , взятой в плоскости, нормальной к обрабатываемой поверхности и проходящей через центры соседних отпечатков и глубины зоны перекрытия, исходя из того, что форма деформированной зоны представляет собой шаровой сегмент» [30]. Случайный характер распределения, возрастающего со временем числа отпечатков проволочки, предопределяет их появление как на необработанной поверхности, так и на обработанной и характеризуется появившимся отпечатками с частичным или полным их перекрытием друг друга:

$$\psi_s = \frac{h_\mu}{h_s}; \quad h_\mu = \sqrt{h_s^2 - \frac{r_m^2}{4}}, \quad (13)$$

где $r_m = r_s / (2 \cdot a_{отп})^{1/2}$ – наиболее вероятное расстояние между центрами двух ближайших отпечатков [25].

Зона перекрытия деформированных объемов слоя наклепа схематически продемонстрирована на рисунке 15.

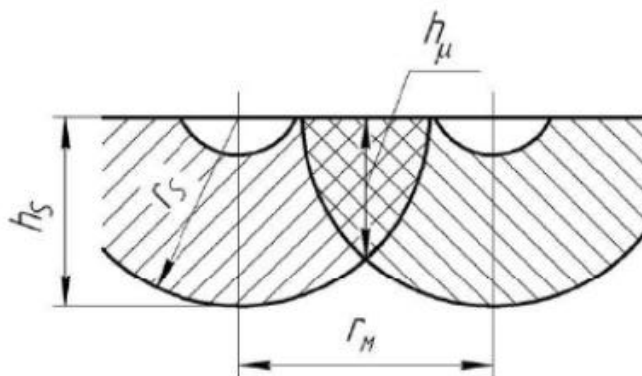


Рисунок 15 – Зона перекрытия деформированных объемов упрочнённого слоя

Исходя из этого, можно получить показатель степени равномерности слоя, который будет выражен формулой, зависящей от уровня плотности поверхностного распределения отпечатков λ_s и глубины формирования наклепа h_s :

$$\psi_s = \sqrt{1 - \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot h_s^2 \cdot \lambda_s}} \quad (14)$$

Удар гибкого элемента, наносимый по поверхности изделия, следует рассматривать как неупругий. Он определяется активной стадией вращения ворсинки щетки, в конце которой движение проволоочки полностью останавливается. Это означает, что «кинетическая энергия ударной массы трансформируется в потенциальную энергию ее деформации. В таком случае сила удара гибкого элемента, возникающая на конце проволоочки в момент соприкосновения с обрабатываемой поверхностью направлена перпендикулярно к ее оси и определяется по формуле:

$$P_{yi} = g^2 \cdot \frac{V_{ок}}{R_{щ} \cdot l_{и}^2} \cdot \sqrt{m \cdot [R_{щ}^3 - (R_{щ} - l_{и})^3]} \cdot E \cdot J, \quad (15)$$

где g – коэффициент, учитывающий динамику вращения проволоочного инструмента;

$V_{ок}$ – окружная скорость инструмента, м/с;

$R_{щ}$ – радиус гибкого инструмента, м;

l_{II} – длина изгибающейся части проволоочки, м;

m – масса проволоочки, кг;

E – модуль упругости, Па;

J – осевой момент инерции площади поперечного сечения, м⁴» [21].

Однако представленные зависимости характерны исключительно при одном проходе инструмента. Но в ходе обработки изделия при помощи проволоочной щетки проход инструмента может происходить множество раз, что было продемонстрировано в источниках, упомянутых выше. Чтобы принять во внимание количество проходов, применяется формула Бернулли:

$$P_{k,n} = \frac{n!}{k! \cdot (n - k)!} \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k}, \quad (16)$$

где n – количество проходов инструмента (количество независимых испытаний);

k – количество раз повторения такой же степени покрытия, как в первом проходе при нескольких проходах (при наступлении события в n испытаниях);

p – вероятность степени покрытия хотя бы n^* раз в первом проходе.

Выводы.

Проанализирован метод фрикционного плакирования, его основные принципы, заключающиеся в одновременном упрочнении поверхностного слоя изделия и нанесении защитного покрытия. На базе обзора основных схем обработки изделий была разработана схема установки для обработки рулевой рейки с ее конструктивной особенностью, такой как трапецевидная форма зубьев. Сделан вывод, что косозубое расположение зубьев не позволит применить типичные методы обработки плакированием. Схема обработки

зубьев рулевой рейки предполагает обработку под углом, но при этом взаимодействие ворсинок с боковой поверхностью зубьев осуществляется как с плоской поверхностью.

Обоснование плакирования именно боковой поверхности зубьев рулевой рейки сделано на основе анализа условий работы и распределения сил, под действием которых происходит износ зубьев. Анализ кинематики процесса обработки и геометрических параметров взаимодействий ворсинок щетки с обрабатываемой поверхностью позволил определить методику обработки и математический аппарат.

На основе литературного обзора можно уверенно утверждать об эффективности методики, что было продемонстрировано ранее на примере рассмотренных экспериментальных исследований. Рассмотрены основные особенности динамического поверхностного упрочнения, в которых прослеживается общая закономерность в определении параметров поверхностного слоя. В качестве основных критериев эффективности методики выбраны следующие технологические параметры: глубина упрочнённого слоя; степень равномерности распределения зон пластической деформации.

Определена методика оценки механизма деформационных процессов при обработке рулевой рейки проволочным инструментом, зависящая от технологических режимов обработки и конструктивных характеристик инструмента.

Глава 3 Расчётно-аналитическое исследование процесса плакирования рулевой рейки

Математическое моделирование определения характеристик данного процесса плакирования, выступает крайне трудоёмкой и непростой задачей. Однако благодаря массовому распространению и широкому применению разнообразного специализированного программного обеспечения есть возможность определить характеристики обработки довольно быстро и без особых трудностей. В первую очередь такая необходимость возникает для определения параметров поверхностного слоя. Здесь сначала рассчитывается плотность распределения отпечатков. Далее следует расчёт глубины упрочнённого слоя, который зависит от силы удара ворса. Потом степень равномерности глубины поверхностного слоя зуба рейки, зависящая от показателя плотности распределения отпечатков, исходя из ударов, которые наносят ворсинки. Финальным этапом выступает процесс оценки распределения зон пластической деформации (см. подраздел 2.4).

Чтобы гарантировать вычисление основных характеристик по результатам проведения оценки качества покрытия отпечатками поверхности обрабатываемых зубьев, следует детальнее рассмотреть отдельные аспекты с количественными показателями поправочных коэффициентов, зависящие от материала рулевой рейки и применяемого инструмента. Так, «после завершения приработки, в плоскости, которая проходит вдоль оси проволочки по нормали к плоскости вращения инструмента, прослеживается дуга, которая выступает в качестве проекции полусферы в форме отпечатка от удара. В данных обстоятельствах показатель точности равняется $k_{\phi} = 0,5$. Коэффициент K при ударе с твёрдой сталью низкоуглеродистой проволочки равен $1,59 \cdot 10^{-6} \text{ м/Н}^n$, для пружинных проволочек $K = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м/Н}^n$ » [21]. При вычислении глубины упрочняемого слоя (12) поправочный коэффициент R_{np} принимаем равным 1,07, для учета разности вычисленных аналитических и полученных экспериментальных данных (см.

подраздел 2.4).

Для того чтобы облегчить и ускорить методику расчета основных параметров была разработана математическая модель в среде MS Excel, MathCAD и КОМПАС-график.

Следовательно, на текущей стадии расчета определяются показатели степени покрытия поверхностей зубьев рулевой рейки, исходя из динамики процесса ее обработки инструментом проволочного типа.

Основываясь на первоначальных данных, можно вычислить согласно формулам (8–11) показатели степени покрытия поверхности детали. Одновременно с этим графики зависимости позволят наглядно проанализировать получившиеся результаты расчета степени покрытия поверхности зуба рейки, основываясь на средневероятном количестве совершенных ударов, отображённые на рисунках 16 и 17.

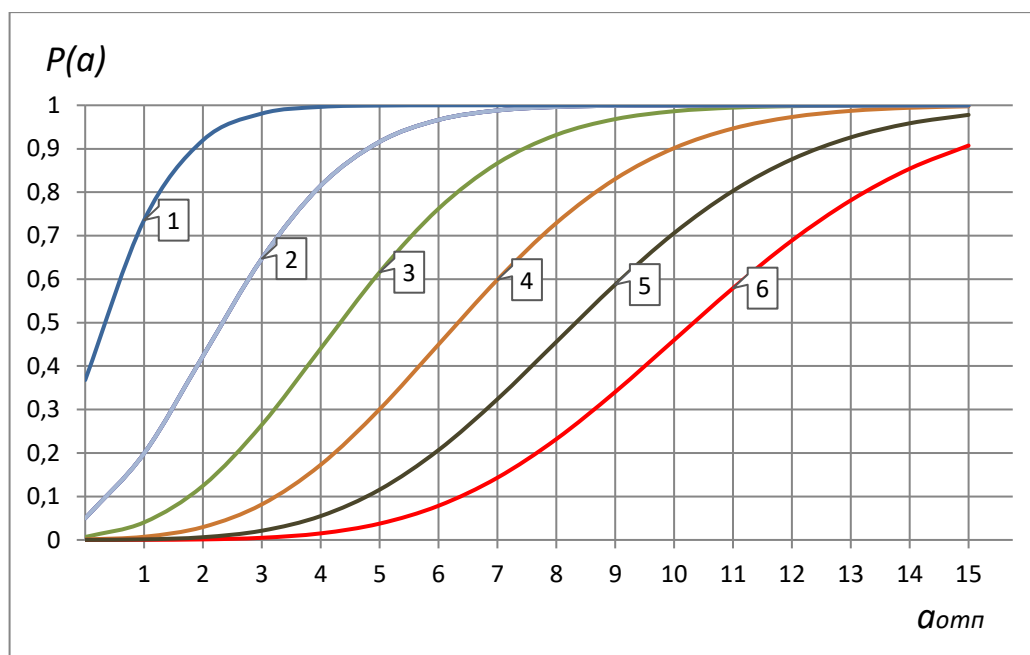


Рисунок 16 – Зависимость степеней покрытия $P(a)$ от средневероятного числа ударов ворсинки в площадь, равную площади собственного отпечатка: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – степень покрытия соответственно 1, 2, 3, 4, 5, 6 раз

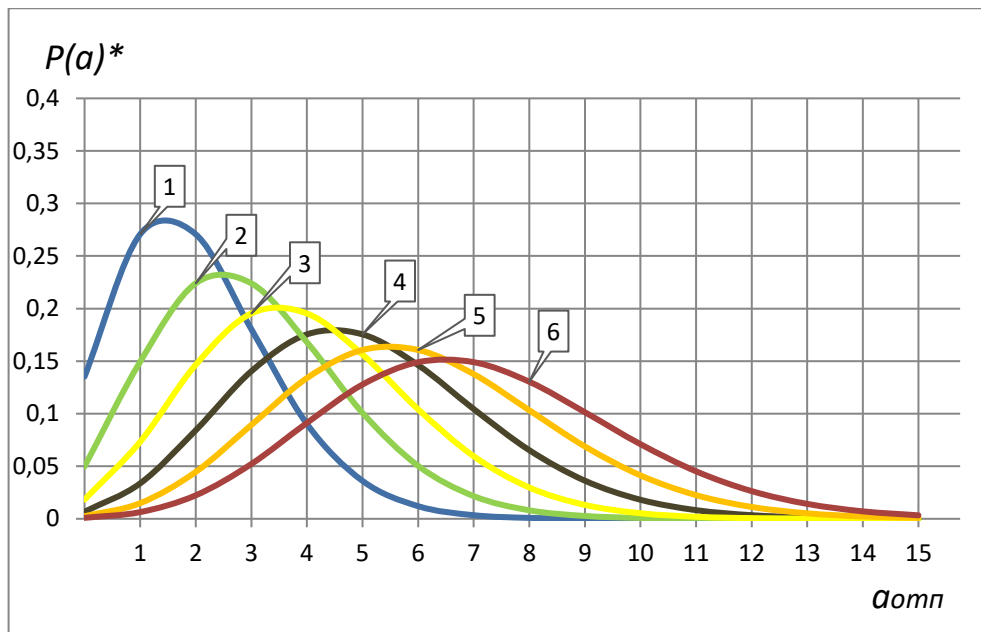


Рисунок 17– Зависимость степеней покрытия $P(a)^*$ от среднеговероятного числа ударов ворсинки в площадь, равную площади собственного отпечатка: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – степень покрытия соответственно 1, 2, 3, 4, 5, 6 раз

После проведения расчетов получаем следующие данные: при контактной силе P равной 0,3 Н, поверхностная плотность распределения λ_s равна $101,8 \text{ мм}^{-2}$ ($V_S = 150 \text{ мм/с}$; $\eta_\phi = 0,1$; $d_B = 0,2 \text{ мм}$), радиус отпечатка $r_{омп}$ примерно равен 12 мкм и среднеговероятное число ударов $a_{омп}$ равно 4,6. Окружная скорость вращения щетки $V_{ок}$ должна быть в интервале от 35 до 45 м/с. В процессе плакирования скорость вращения гибкого инструмента не должна меняться. Глубина упрочненного слоя при угле атаки γ равном 15° будет равна 11 мкм.

Анализируя графики видно, что степень покрытия имеет следующую зависимость – 99 % площади будет покрыто отпечатками хотя бы 1 раз, 86 % – минимум 2 раза, 55 % – хотя бы 3 раза, 25 % – хотя бы 4 раза. Но при этом – 5 % площади покрыто только 1 раз, 13 % – только 2 раза, 17 % – только 3 раза, 18 % – только 4 раза.

Согласно графику отображённых зависимостей для того, чтобы площадь поверхности зуба рейки была полностью покрыта, следует повысить показатель математического ожидания $a_{омп}$. Меняя параметры, можно

получить такие данные: λ_s равна 244 мм^{-2} , ($V_S = 45 \text{ мм/с}$; $\eta_\phi = 0,15$; $d_B = 0,25 \text{ мм}$). В случае, если скорость вращения инструмента не изменяется, то радиус отпечатка составляет r_{omn} около 12 мкм . Исходя из этого, можно вычислить средневероятное количество ударов на площадь зуба, которое составит $12,4$.

Определяем глубину упрочненного слоя по формуле (12), а для этого необходимо учесть динамическое воздействие проволоки при постоянном пределе текучести.

Тогда, с учётом формулы (12) толщина области деформации в ходе натяжения инструмента по отношению к обрабатываемой детали N составит 2 мм , с применением ворса с диаметром d_B равным $0,25 \text{ мм}$ и силой удара P в $0,5 \text{ Н}$ и при угле вхождения ворсинок в контакт $\gamma = 12^\circ$ составит 40 мкм .

Теперь по формуле (14) получим степень равномерности глубины наклёпанного слоя ψ_S равную $0,99$ при трехкратном покрытии площади.

Таким образом, завершая аналитическое исследование делаем вывод, что варьируя геометрические характеристики проволочного инструмента и технологические режимы обработки, представляется возможным вычислить необходимый показатель степени покрытия, уровень равномерности и глубины слоя наклёпа для поверхностного слоя любого зуба рейки, основываясь на ограничивающих факторах обработки. При этом любой расчёт параметров обработки единичного зуба применим ко всему зубчатому сектору рулевой рейки. После завершения обработки степень покрытия боковой поверхности зуба рейки должна стать равномерной, а также полностью покрытой следами от воздействия ворса – отпечатками.

Чтобы продемонстрировать взаимное влияние характеристик гибкого инструмента и параметров процесса обработки рулевой рейки при помощи проволочного инструмента, следует рассмотреть графики зависимостей.

Согласно формуле (15) глубина упрочненного слоя зависит от силы удара и угла вхождения изгибающейся части ворсинки при неизменном параметре предела текучести.

Зависимость глубины наклепанного слоя от силы удара P и угла атаки γ приведена на рисунках 18 и 19 соответственно.

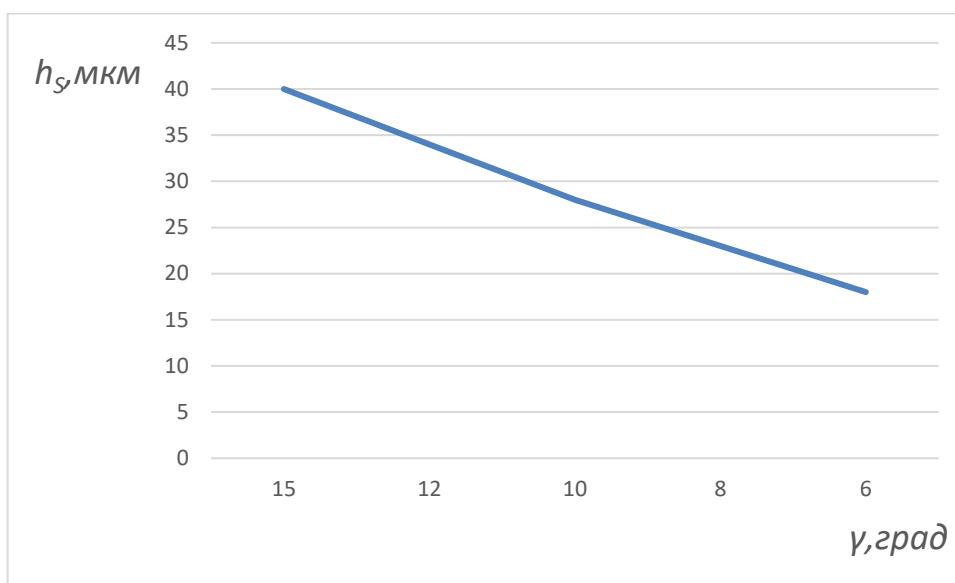


Рисунок 18 – График зависимости глубины упрочненного слоя от угла атаки

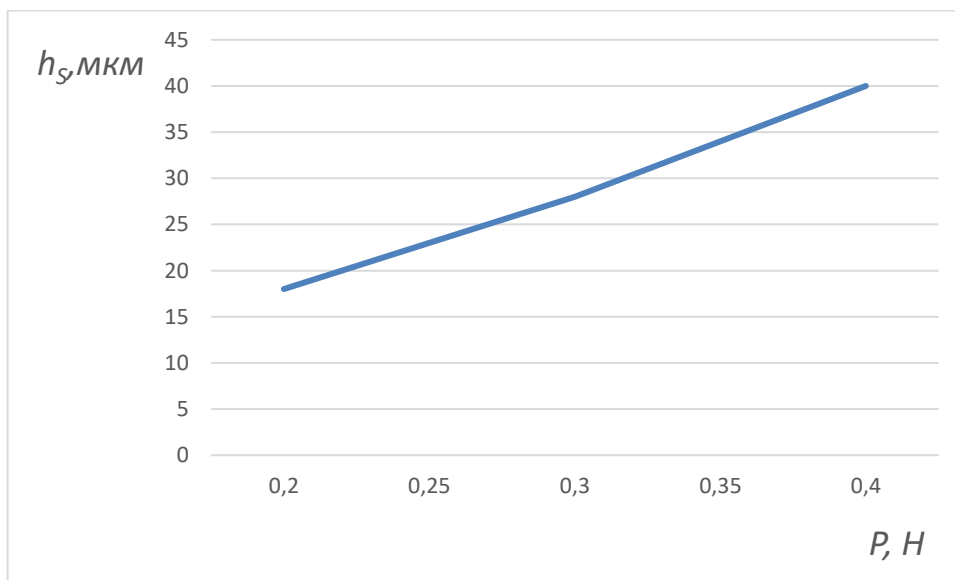


Рисунок 19 – График зависимости глубины упрочненного слоя от силы удара

Рисунки 20 и 21 показывают зависимость глубины упрочненного слоя от радиуса и глубины отпечатка, образованного при ударе ворса при входе в контакт, так как эти параметры также зависят от силы удара. Как видно по

графику, глубина упрочняемого слоя возрастает с увеличением радиуса и глубины отпечатка.

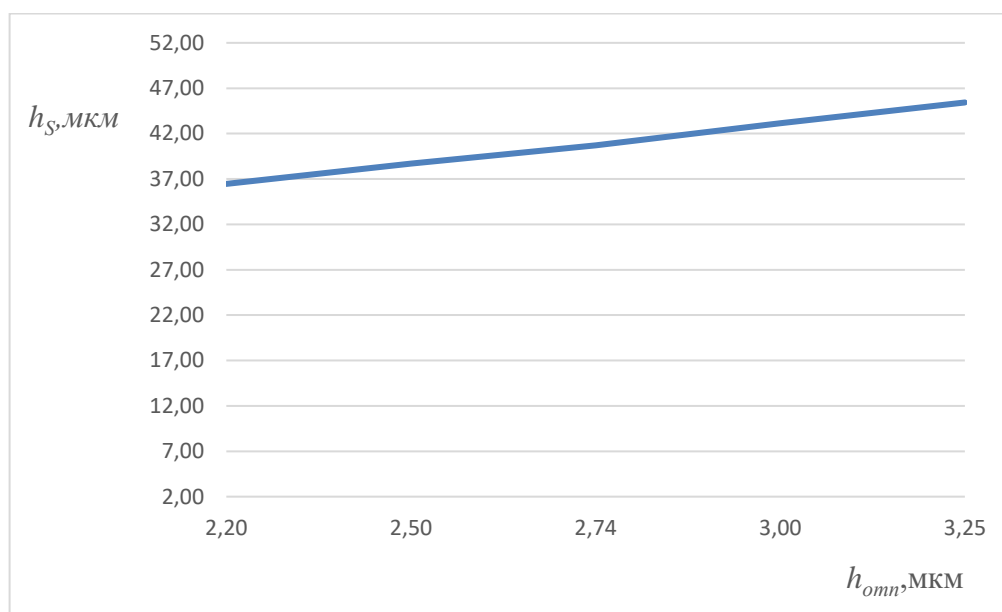


Рисунок 20 – График зависимости глубины упрочненного слоя от глубины отпечатка при ударе ворса

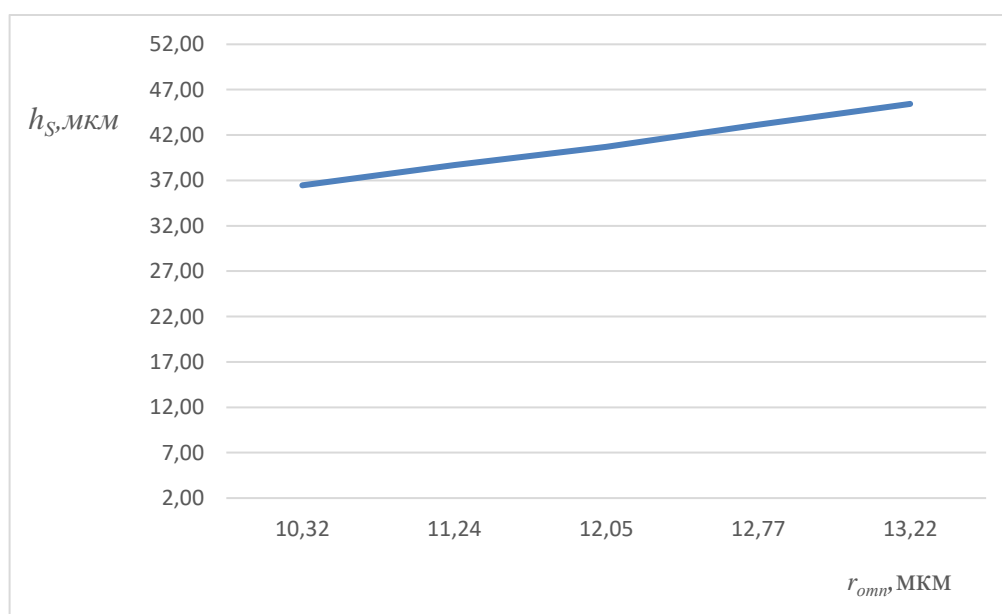


Рисунок 21 – График зависимости глубины упрочненного слоя от радиуса отпечатка при ударе ворса

Таким образом делаем вывод, что ключевую роль в обеспечении

приемлемого уровня глубины упрочненного слоя при обработке гибким инструментом играет именно сила удара. Путем изменения одной только силы обработки можно уверенно управлять всем процессом и на практике оказывать влияние на все технико-экономические показатели процесса. Далее анализируя вышеперечисленные формулы видим, что показатель силы воздействия ворсинок щетки можно вычислить, если варьировать параметры длины и диаметра ворса, натяга и скорости вращения щетки. Это было также экспериментально продемонстрировано в подразделе 2.3. На рисунках 22 и 23 представлены графики зависимости силы удара от перечисленных параметров, при прочих равных.

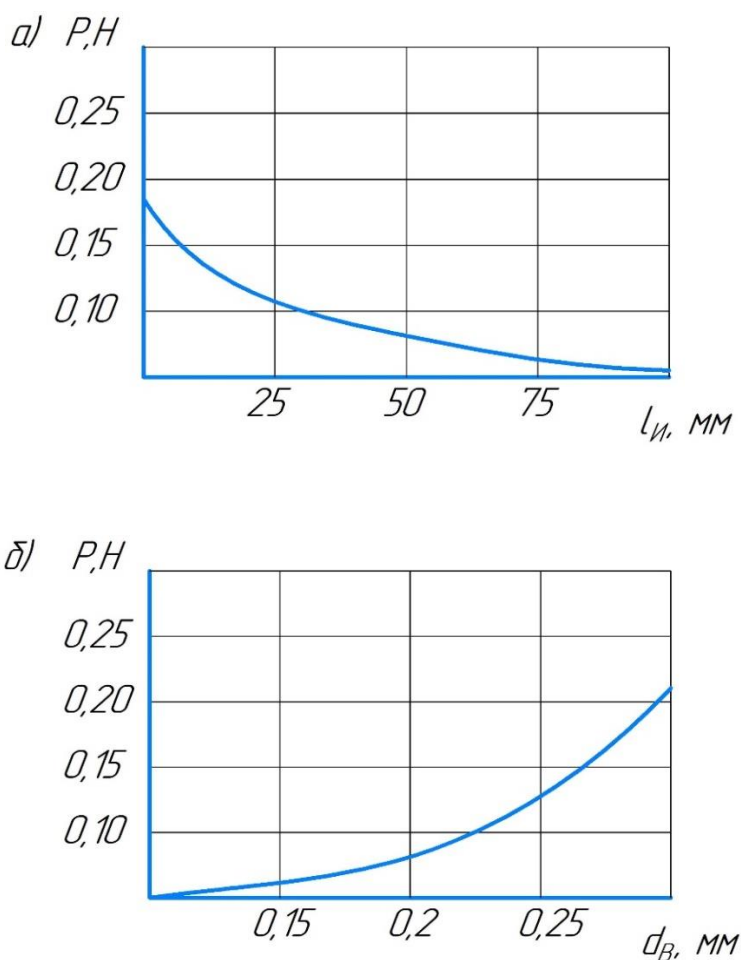


Рисунок 22 – Графики зависимости силы удара от характеристик гибкого инструмента: а – зависимость от длины ворса; б – зависимость от диаметра ворса.

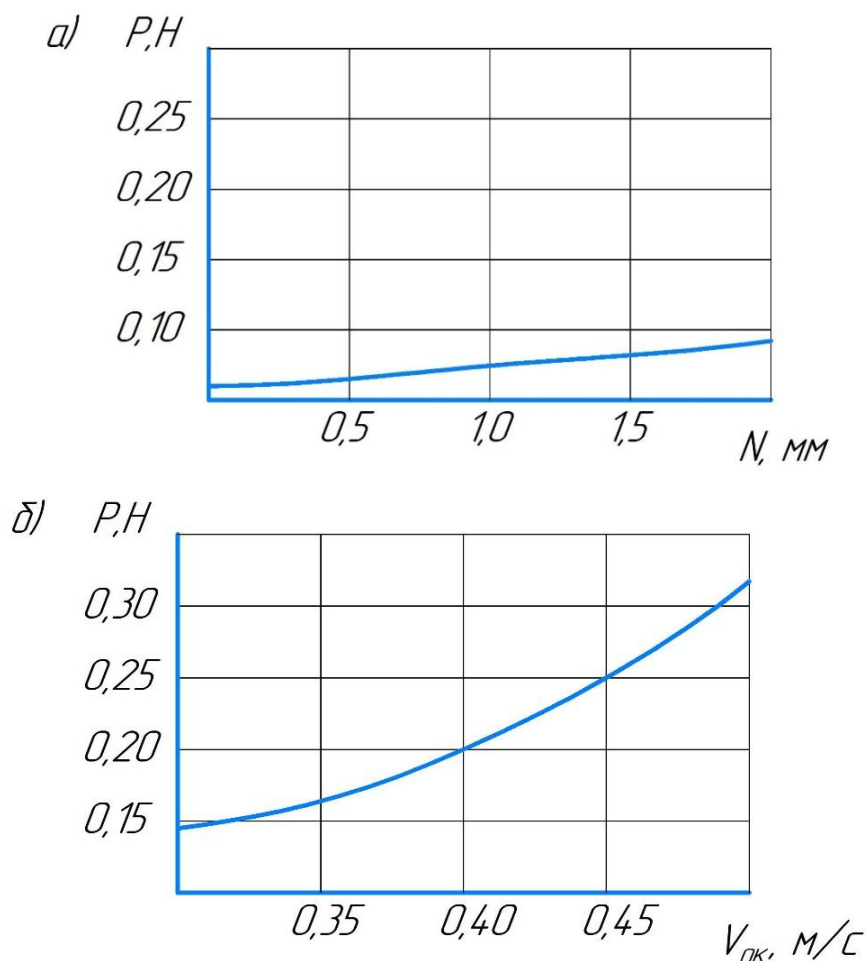


Рисунок 23 – Графики зависимости силы от технологических параметров обработки: а – зависимость от натяга инструмента; б – зависимость от скорости вращения инструмента.

Выводы.

Проведены аналитические расчёты степени распределения зон пластической деформации, глубины упрочнённого слоя и степени равномерности упрочнения.

Было продемонстрировано, что глубина пластически деформированного упрочненного слоя и зона деформации могут быть определены аналитическими формулами, подтверждёнными экспериментальными исследованиями. При получении полного равномерного покрытия поверхности обрабатываемого зуба отпечатками от воздействия проволочного инструмента можно говорить о достаточной равномерности упрочненного слоя по глубине.

Глава 4 Оптимизация процесса плакирования рулевой рейки

4.1 Методика выбора оптимальных режимов и параметров обработки гибким инструментом

Для того чтобы определить целесообразные и максимально эффективные технологические режимы плакирования рулевой рейки, был сформирован специальный алгоритм. Его схематическая структура продемонстрирована на рисунке 24.

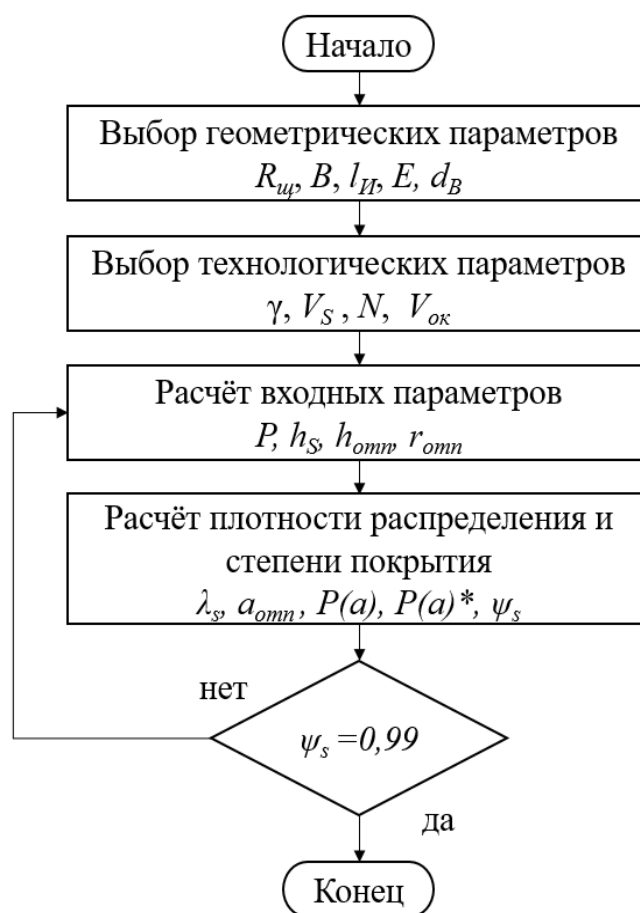


Рисунок 24 – Структурная схема алгоритма расчета параметров обработки рулевой рейки

В первую очередь, на основе сделанных расчетно-аналитических вычислениях, реализуется подбор конструктивных параметров инструмента

проволочного типа. После этого следует этап выбора возможных значений технологических параметров для процесса плакирования.

Финальным этапом выступает проведение вычисления и оценки деформационных параметров плакирования. Одновременно с этим проводится оценка характеристик надежности и долговечности плакирующего гибкого инструмента. В случае, если были выявлены неудовлетворительные показатели, следует внести необходимые поправки в исходные данные и произвести повторный расчет параметров процесса.

Можно утверждать, что алгоритм, который был сформирован на основании рассмотренного выше расчетно-аналитического исследования, позволяет максимально оперативно подобрать необходимые технологические режимы процесса ПГИ для создания поверхностного слоя обрабатываемой рулевой рейки с требуемыми показателями эксплуатационных характеристик.

Отметим, что использование неэффективного режима обработки напрямую воздействует на ресурс применяемого гибкого инструмента, а также на формирование требуемых параметров и уровня качества поверхностного слоя. Существует определенная опасность того, что используемый инструмент быстро выйдет из строя. Помимо этого, работа может осуществляться в чрезмерно мощном режиме, что приведет к излишнему расходу производственных ресурсов. В случае усталостного характера разрушения ворса, цена инструмента может достигать от 25 % до 50 % стоимости обработки одного изделия [2].

Вычисление показателя максимального напряжения, которое формируется в гибких компонентах в ходе процесса деформационной обработки, следует реализовать согласно «теории гибких упругих стержней по следующей формуле:

$$\sigma_{\max i} = \frac{\omega_i}{\beta_i} \cdot P_{\max i} \cdot l_{\text{и}} \frac{d_B}{2J}, \quad (17)$$

где ω_i – коэффициент момента подобия;

β_i – силовой коэффициент подобия;

P_{maxi} – максимальная контактная сила, Н;

l_{II} – длина изгибающейся части, мм;

d_B – диаметр ворса, мм;

J – момент осевой инерции, мм⁴.» [16].

Согласно исследованиям и научным работам при нанесении покрытия при помощи гибкого инструмента наиболее часто применяются универсальные и простые щетки дискового типа, которые произведены из проволоки разных видов стали, включая: низкоуглеродистую (ГОСТ 3282-74), легированную пружинную (ГОСТ 14963-78), углеродистую инструментальную У7А, У8А (ГОСТ 938-75), металлокорд (ГОСТ 14311-85), а также пряди канатов из стали по ГОСТ 7372-79 [8], [14], [27].

Чтобы правильно выбрать материал ворса, следует принимать во внимание показатель максимального напряжения, который формируется в ворсе, и при этом рационально подобрать саму щетку в соотношении «цена – качество – эксплуатационные свойства». Помимо этого, можно попробовать внести необходимые изменения в процесс обработки для того, чтобы ворсинки щетки преждевременно не изнашивались. Оценка усталостной прочности ворса вычисляется, согласно следующему условию:

$$\sigma_{max} \leq [\sigma_B], \quad (18)$$

где $[\sigma_B]$ – предел выносливости ворса щетки.

Исходя из данных диаметра проволоки и силы удара ворса, а также других параметров процесса обработки целесообразно использовать гибкий инструмент, изготовленный из проволоки стальной пружинной соответствующего класса 1, 2, 2А или 3 [29]. Если будет использоваться инструмент, прочность которого не соответствует полученному показателю,

то он будет подвержен высокому усталостному износу. Проволоку из подобного материала применять нерационально в связи с низким ресурсом из-за чрезмерного износа, что негативно скажется на экономическом показателе плакирования.

Обработка ПГИ реализуется на основании характеристик материала рулевой рейки и покрытия, которые должны соответствовать заданным эксплуатационным требованиям. При постоянных внешних условиях трения механические и структурные характеристики покрытия играют решающую роль в повышении износостойкости. Соответственно, гарантией получения необходимых показателей долговечности и надёжности сопряжения рулевой рейки, выступает материал покрытия, а также его устойчивость к износу при трении. Свойства материала покрытия определяют его физико-механические характеристики совместно с технологическими параметрами его получения. Чтобы создать на поверхности детали покрытие, ЭМП может применяться в формате брусков. Чтобы нанести покрытие из разных материалов, с гибким инструментом одновременно контактирует несколько фрикционных материалов. При этом в ходе плакирования применяются составные и однородные материалы покрытия.

Выбор формируемых параметров материала поверхностного слоя деталей определяется технической и экономической целесообразностью, основными требованиями к узлу трения, техническими и конструктивными ограничениями, совместимостью со смазочным материалом, возможностью поддержания стабильного значения коэффициента трения в подвижном сопряжении [10]. Толщина защитного слоя и равномерность его распределения на обрабатываемом изделии являются решающими факторами, влияющими на выбор покрытий.

В качестве материала основы покрытия наибольшее распространение для работы в масле получила медь. При нанесении медных покрытий значение коэффициента трения в контакте щетки с деталью составляет от 0,6 до 0,74 [18]. При высокой температуре на поверхности трения, материалы на

основе меди (бронзы), имеющие относительно низкую температуру плавления, проявляют склонность к схватыванию с обрабатываемым изделием приводящую к вырыванию частичек материала. Именно по этой причине использование медных, а также других аналогичных сплавов, разрешается только в узлах, в которых на поверхностях трения температурный режим составляет не выше 300 °С [24]. В частности, для обработки механизма рейки рекомендуется использовать медно-цинковый сплав (латунь) Л63. Это двухкомпонентный по химическому составу сплав, состоящий из меди на 65 %, цинка на 37,5 % и примесей до 0,5 %. Покрытия из латуни обладают достаточно хорошими механическими и эксплуатационными свойствами, повышенными антикоррозионными свойствами по сравнению с чистой медью, но имеют меньшую тепло- и электропроводность [24].

Таким образом, в фрикционных парах трения, работающих в условиях жидкостной смазки минеральными (или синтетическими) маслами, рекомендовано преимущественно применять материалы на основе медных сплавов.

Среди главных функций дополнительного технического оборудования и оснастки является процесс закрепления и фиксации обрабатываемых изделий в комфортном для взаимодействия с ними положении, а также возможность перемещения детали в ходе нанесения покрытия. Для этих целей можно применять универсальную или специализированную оснастку. Перемещение и фиксация деталей может осуществляться с помощью манипуляторов, призм, вращателей, тисков, зажимов, кантователей и роликовых стенов.

Для того чтобы правильно подобрать оборудование необходимо, в первую очередь, отталкиваться от технического оснащения предприятия. Рассматривать основные схемы установки и как именно подвести ЭМП стоит только отталкиваясь от имеющихся в наличии металлической щётки и оборудования. При наличии угловой шлифовальной машины есть

возможность использовать металлические щетки, где ворсинки состоят из материала покрытия [3]. Но при такой обработке нет возможности соблюдения точных параметров обработки. Основные методы плакирования [39]–[40] направлены прежде всего на обработку плоских или цилиндрических поверхностей, без возможности обработки под углом, а устройства плакирования представляют собой специально спроектированные станки с двигателем, редуктором и вращающимся шпинделем, на который устанавливается гибкий инструмент. Но в связи с тем, что плакирование плоской поверхности зуба рулевой рейки осуществляется под определённым углом, то нет возможности использовать данные устройства. Поэтому для решения этой задачи спроектирована специальная оснастка. Для унификации методики плакирования на производстве рекомендуется использовать широко используемое оборудование, такое как вертикально-фрезерный, радиально-сверлильный или универсально-шлифовальный станок с возможностью угловой обработки, пример которого изображён на рисунке 25.

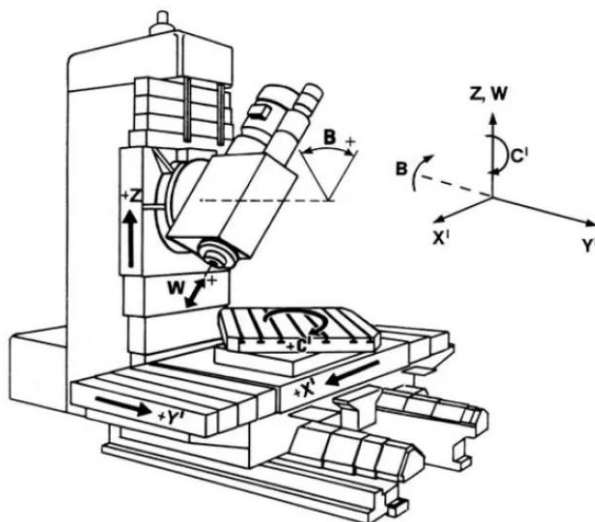


Рисунок 25 – Фрезерный станок с возможностью угловой обработки

Необходимый угол обработки рулевой рейки показан на рисунке 26.

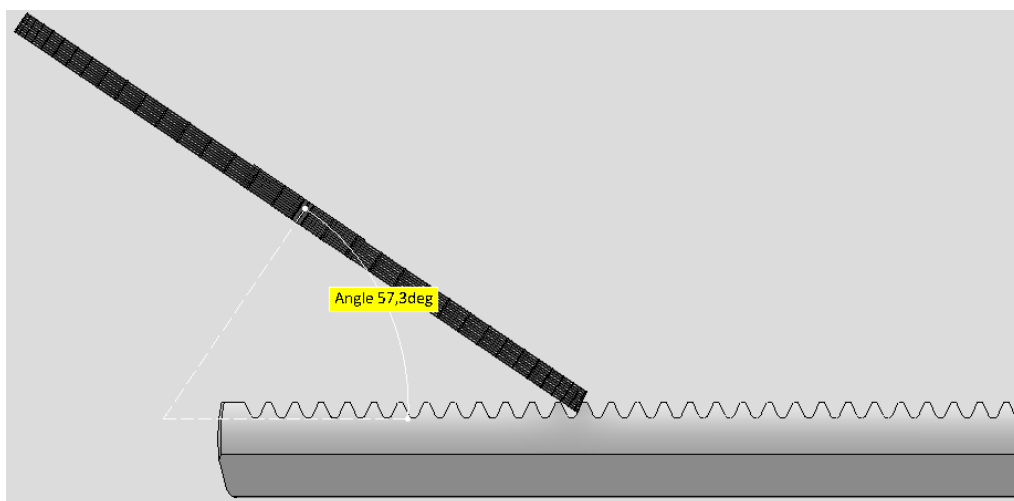
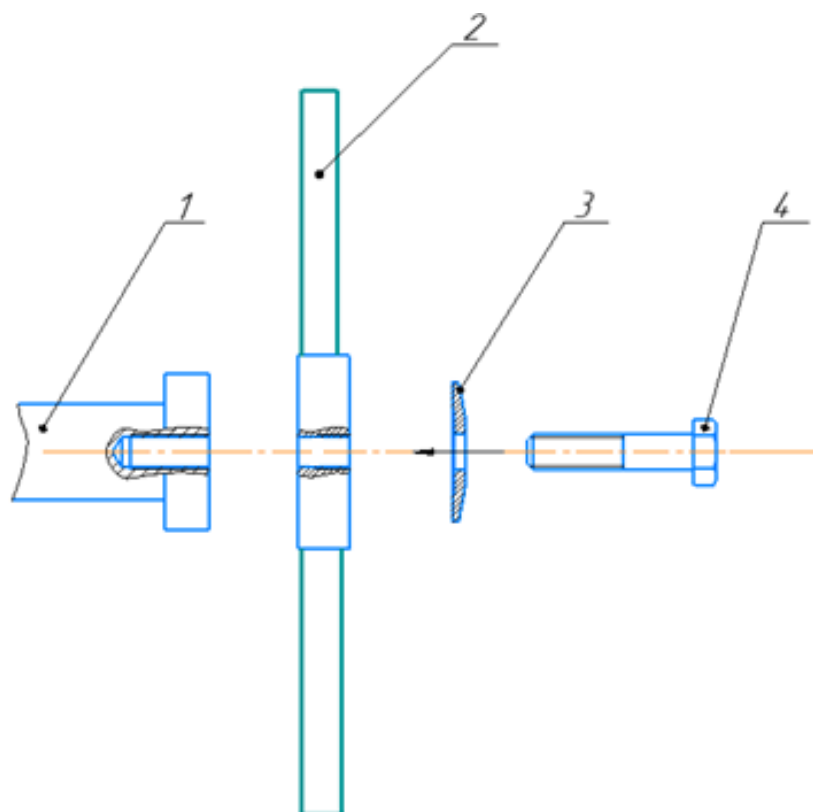


Рисунок 26 – Угол обработки зубьев на примере рулевой рейки LADA GRANTA

При обработке рулевая рейка устанавливается на столе так, чтобы боковая поверхность зубьев была перпендикулярна к гибкому инструменту, а ось шпинделя была соответственно расположена перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Рейка крепится в жёсткой оснастке. Требуемый угол обработки косозубого расположения зубьев обеспечивается либо поворотом стола, либо поворотом фиксирующей оснастки. Перемещение рейки относительно инструмента осуществляется по станине при технической возможности шпинделя станка. Когда в наличии есть гибкий инструмент из материала покрытия, проблема с подводом ЭМП будет решена за счёт получения покрытия из ворсинок щетки, однако, как уже отмечалось у таких щёток есть ряд недостатков. Поэтому при такой обработке встаёт вопрос об использовании сменных металлических щеток. Это обеспечит следование перспективным тенденциям по стандартизации и унификации методики процессов обработки в современном машиностроении.

Для осуществления процесса разработана специальная оснастка, эскиз которой представлен на рисунке 27.



1 – спецприспособление; 2 – гибкий инструмент; 3 – шайба; 4 – крепежный элемент.

Рисунок 27 – Эскиз оснастки для сменной щетки

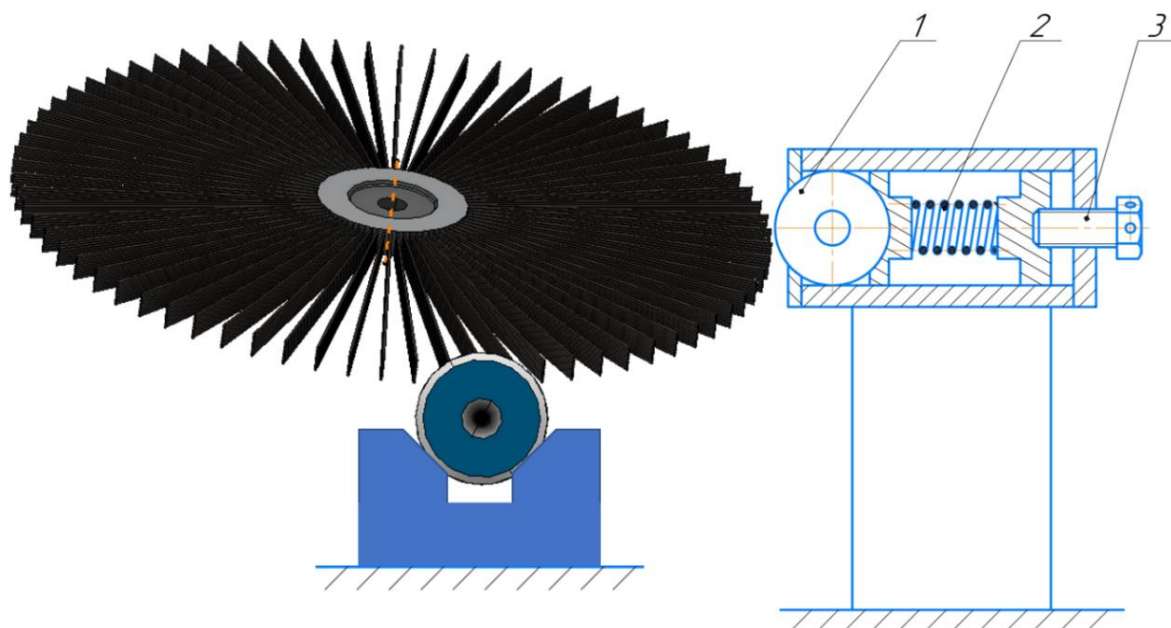
Здесь металлическая щётка 2 крепится винтовым соединением. Крепёжный элемент 4 может выполняться двумя способами: соединением «шпилька–гайка» или затяжным болтом. С целью увеличения зоны контакта соединения, предотвращения смещения элементов и надёжной фиксации вводится дополнительная шайба 3, подбираемая индивидуально под металлическую щетку определенного диаметра. Оснастка 1 закрепляется в цанговый патрон и устанавливается в шпиндель станка.

Благодаря данной оснастке можно не только повлиять на экономическую составляющую вопроса плакирования, но и обеспечить возможность использовать методику на самом распространённом оборудовании.

Отметим, что в случае с ворсинками-покрытиями проблем с методикой не возникнет, но из-за этого могут возникнуть сложности соблюдения технологических параметров обработки из-за интенсивного износа ворсинок,

что повлечёт за собой плохое качество обработки. Следует проработать конструкцию спецприспособления, которая решит проблему подачи ЭМП по предложенной методике обработке под углом.

Проблема подачи ЭМП к периферии рабочего инструмента была решена разработкой специальной оснастки, представленная на рисунке 28.



1 – ЭМП; 2 – пружина; 3 – регулировочный болт.

Рисунок 28 – Эскиз оснастки подвода ЭМП

Спецоснастка спроектирована на основе патента RU 2197562 C1. Само устройство по патенту невозможно использовать, так как оно ориентировано на обработку цилиндрических изделий. Конструкция спецоснастки не представляет собой устройство плакирования с требуемым источником питания и редуктором, а имеет вид подводящего к инструменту приспособления. Здесь ЭМП, в виде бруска 1, прижат с усилием пружиной 2, работающей на растяжение и зафиксирован под действием сил трения. Прижим обеспечивается регулировочным болтом 3.

Таким образом, рассмотрев все подготовительные операции ПГИ и описав особенности подбора технического оснащения можно приступить к

составлению технологического процесса обработки рулевой рейки методом фрикционного плакирования.

4.2 Технологический маршрут обработки боковой поверхности зуба рулевой рейки

Технологические процессы проектируются согласно нормам принятых стандартов ЕСТД и ЕСКД. При этом следует учитывать различные дополнительные материалы, комментарии и ограничения, которые прилагаются к руководящей технической документации, содержащейся в стандартах предприятий. При проектировании технологического процесса ПГИ интегральных рулевых механизмов нужно учесть следующие особенности:

- наличие информации о возможных неисправностях и предполагаемой программе по восстановлению этих деталей. Стоит учитывать различные дефекты деталей в рулевом интегральном механизме, а также их воздействие на показатели работоспособности рейки;
- в ходе разработки технологического процесса следует принимать во внимание потенциал ремонтных организаций, а также их уровень материального и технического оснащения;
- в зависимости от производителя рулевой рейки конструкция рулевого механизма может отличаться, что повлечёт за собой некоторые незначительные изменения в технологическом процессе;
- в зависимости от типа и модели станка обработка может иметь некоторую специфику, такую как реализация продольной подачи инструмента относительно рулевой рейки, что может осуществляться либо перемещением стола, либо перемещением шпинделя.

Маршрут технологического процесса плакирования гибким инструментом зубчатого сектора рулевых реек от момента разбора до проверки работоспособности представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Технологический маршрут плакирования рулевой рейки

Номер операции	Наименование операции	Описание операции
005	Слесарная	Разобрать интегральный рулевой механизм согласно инструкциям производителя.
010	Моечная	Промыть детали рулевого механизма ГУР в моечной ванне с очистительным раствором. Промыть рулевую рейку в моечной ванне с очистительным раствором или химическим способом в соответствии с ГОСТ 9.047.
015	Оценочно-дефектовочная	Оценить техническое состояние рулевой рейки, согласно требованиям. Если наблюдаются сколы, изломы, явный износ на зубчатом секторе, дальнейшие мероприятия по восстановлению не рекомендованы – рейка подлежит утилизации. При удовлетворительном состоянии рулевой рейки применить метод ПГИ.
020	Подготовительная	Подготовить гибкий инструмент к обработке. Подготовить элемент покрытия к обработке. Подготовить оборудование и оснастку к обработке. Подготовку выполнять согласно рекомендациям, изложенным в подразделе 4.1.
025	Плакирование гибким инструментом	Установить рулевую рейку по предложенной схеме. Нанести на рабочие поверхности зубчатого сектора покрытие по технологическим рекомендациям, описанным в главе 3.
030	Контрольная	Проверить качество поверхностного слоя.
035	Слесарная	Собрать рулевой механизм ГУР.
040	Контрольная	Проверить работоспособность рулевого механизма на стенде. Проверить люфт рулевого колеса.

Процесс формирования покрытий осуществляется следующим образом. Гибкий инструмент в виде цилиндрической щётки устанавливается на оправку и закрепляется крепёжным элементом. Далее оправка устанавливается в цанговый патрон, который устанавливается в шпиндель

станка. Рулевая рейка закрепляется в зажимном механизме и фиксируется на станине станка. Гибкий инструмент подводится к боковой поверхности зубьев с выдерживанием нормали к обрабатываемой поверхности. Требуемый угол в 33° достигается путём настройки поворотного суппорта шпинделя станка в координатах ZX. Проволочный инструмент вращается с определенной угловой скоростью и подводится к продольно перемещающемуся с определенной скоростью фиксирующему устройству с закреплённой на ней рулевой рейкой с требуемым натягом в пределах от 1 до 2 мм. ЭМП Л63 в виде бруска крепится в специально разработанной оснастке, прижим которого обеспечивается регулировочным элементом. Далее к периферии инструмента подводится спецприспособление с закреплённым на нем ЭМП. За определённое время обработки при вращении щетки пятно контакта инструмента с боковой поверхностью зуба рулевой рейки достигает нужной температуры, необходимой для прочного сцепления наносимого покрытия со сталью 50 (материал обрабатываемой рейки), и за это же время, ЭМП под действием трения достигает необходимой температуры для обеспечения возможности его переноса к обрабатываемой поверхности зуба. В результате происходит обработка ППД ворсинками боковой поверхности зуба, и при помощи тех же ворсинок наносится латунное покрытие.

Благодаря унификации методики подбираемое оборудование может выбираться в широком спектре. Сама обработка зависит от типа и модели станка. Стоит отметить, что обработка плакированием возможна сразу после изготовления рулевой рейки на заводе производителя с небольшими изменениями в технологическом процессе.

Список минимально необходимой оснастки для процесса ПГИ указан в таблице 4, согласно технологическому процессу и требованиям пожарной безопасности и охраны труда. Большинство из перечисленных позиций широко используются на автотранспортных предприятиях. Данный список поможет определить необходимое оборудование и оснащение.

Таблица 4 – Ведомость технологической оснастки

Наименование	Тип и модель	Количество
Стенд для проверки и регулировки углов установки колёс	КДС	1
Линейка для проверки схождения колёс автомобилей	ПСК-ЛГ	1
Установка для проверки гидросистем рулевого управления	К-465М	1
Манометр	МТА-2	1
Динамометр-люфтомер	К-524	1
Мойка ручная	AM1000 PM	1
Вертикально-фрезерный станок	FV401	1
Цанговый патрон	SOVIS ER15	1
Комплект торцевых ключей	1.46.05.89	1
Металлическая цилиндрическая щётка	Lessman	1
Набор отвёрток	13С-550	1
Приспособление для сменных щеток в сборе	Новое	1
Приспособление подвода ЭМП	Новое	1
Пассатижи	–	1
Брусok элемента покрытия	Л63	1
Комплект гаечных ключей	И-153	1
Микротвердомер	ПМТ-3	1
Верстак	В-1	1
Настенный шкаф для приборов	–	1
Огнетушитель	ОХЛ-10	1
Ящик с песком	–	1
Ларь для отходов	0.1–0.3-000-01	1

Вывод.

Проведя аналитический расчёт технологических параметров, встал вопрос о подготовке проведения методики ПГИ рулевой рейки. Для этого были рассмотрены вопросы по выбору оптимальных режимов обработки, материала ворса гибкого инструмента, элемента материала покрытия и необходимого оборудования.

Был создан алгоритм, который на основании рассмотренного выше расчетно-аналитического исследования, позволяет максимально оперативно

подобрать необходимые технологические режимы процесса ПГИ для формирования поверхностного слоя с требуемыми характеристиками.

Проведен анализ материала ворса. Принят во внимание показатель максимального напряжения, которое формируется в ворсе и на основе этих данных выбираем материал ворса соответствующего класса.

Рассмотрен вопрос выбора элемента материала покрытия. Был сделан вывод, что во фрикционных парах, работающих в условиях жидкостной смазки минеральными или синтетическими маслами, рекомендовано применять материалы на основе медных сплавов.

В связи с тем, что обработка рулевой рейки происходит под углом, была предложена унифицированная методика плакирования, которая обеспечит применение этого метода на широком спектре оборудования. Для этого была разработана спецоснастка для применения сменных щеток и для подвода ЭМП к гибкому инструменту.

После рассмотрения подготовительных вопросов был разработан технологический маршрут обработки рулевой рейки методом фрикционного плакирования гибким инструментом.

Представлен необходимый перечень оснастки для проведения плакирования рулевой рейки.

Заключение

В качестве приоритетного направления исследования был выбран вопрос повышения долговечности рулевой рейки в зоне зацепления червяка распределителя и зубчатого сектора рулевой рейки. Для этого в работе был предложен метод поверхностной обработки, а именно фрикционное плакирование гибким инструментом зубчатого сектора рулевой рейки.

Проведен литературный обзор с целью выяснения причин неисправностей рулевой рейки и методов их устранения. Так как мероприятия по восстановлению зубьев рулевой рейки ограничиваются одним методом, то данное исследование является актуальным.

Анализ кинематики обработки гибким инструментом зубьев рулевой рейки показал, что подобная обработка возможна. При этом процесс плакирования происходит под углом – обрабатывается плоская поверхность трапецеидальных зубьев.

На основе математической модели и аналитического расчета геометрических и технологических параметров процесса обработки был разработан технологический маршрут плакирования боковой поверхности зуба рулевой рейки.

Разработана методика по унификации процесса плакирования рулевой рейки, которая позволит провести технологический процесс на широком спектре оборудования. Это было обеспечено благодаря разработке двух специальных приспособлений, которые позволят решить вопросы эффективности использования сменных гибких инструментов и подвода элементов материала покрытия к рабочей периферийной поверхности щетки.

Маршрут подробно описан и рассмотрен на примере рулевой рейки LADA GRANTA.

Поставленные задачи магистерской диссертации для достижения цели по повышению эксплуатационной долговечности рулевой рейки методом фрикционного плакирования выполнены.

Список используемых источников

1. Анцупов В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. Магнитогорск : МГТУ им. Носова, 1999. 241 с.
2. Белевский Л. С., Белевская И. В., Ефимова Ю. Ю. Модификация поверхности и восстановление деталей фрикционной комбинированной обработкой // Ремонт, восстановление, модернизация. 2014. № 4. С. 24–27.
3. Белевский Л. С., Дема Р. Р., Леванцевич М. А. Упрочнение поверхности и нанесение функциональных покрытий вращающимися проволочными // Механическое оборудование металлургических заводов. 2019. № 1(12). С. 53–63.
4. Белый А. Н., Белявин К. Е., Леванцевич М. А. Исследование влияния отжига на адгезионную прочность покрытий, сформированных деформационным плакированием гибким // Инновации в машиностроении: Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. 2015. С. 429–433.
5. Беляков В. В., Вахидов У. Ш., Куляшов А. П. Оценка конструкций механизмов управления транспортными средствами // Машиностроение и компьютерные технологии. 2010. № 11. С. 20–29. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-konstruktsiy-mehanizmov-upravleniya-transportnymi-sredstvami> (дата обращения: 27.05.2022).
6. Галяутдинов Р. Т., Кашапов Н. Ф., Тагиров Р. Ф. Исследование функциональных покрытий, полученных различными методами // Научная сессия КГТУ. Казань: Ид-во Казан. гос. технол. ун-та. 2009. С. 280–289.
7. ГОСТ Р 52453–2005. Автомобильные транспортные средства. Механизмы рулевые с гидравлическим усилителем и рулевые гидроусилители. Взамен ГОСТ 8074–71; Введ. с 2006.01.07. М. : Стандартиформ, 2006. 77 с.

8. ГОСТ 18296–72. Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. Введ. с 1972.12.25. М. : Издательство стандартов, 1972. 13 с.

9. ГОСТ 9389–75. Проволока стальная углеродистая пружинная. Технические условия. Введ. с 1977.01.01. М. : Издательство стандартов, 2003. 14 с.

10. ГОСТ 9.303–84. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору. Введ. с 1984.03.15. М. : Стандартинформ, 2008. 46 с.

11. Драгунов Ю. Г., Зубченко А. С., Каширский Ю. В. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. М. : Машиностроение, 2014. 1216 с.

12. Дрозд М. С., Матлин М. М., Сидякин Ю. И. Инженерные расчёты упругопластической контактной деформацией. М. : Машиностроение, 1986. 224 с.

13. Завалищин А. Н., Смирнов О. М., Тулупов С. А. Модификация поверхности металлических изделий с использованием покрытий. М. : Орбита-М, 2012. 335 с.

14. Зотов А. В., Драчев О. И., Семенченко Н. В. Анализ напряженного деформированного состояния проволоочных элементов гибкого инструмента // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. Волгоград : ВолгГТУ, 2013. № 20. С. 21–23.

15. Зотов А. В. Методика расчета геометрических и силовых параметров зоны контакта при плакировании изделий гибким инструментом // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 3. С. 85–88.

16. Зотов А. В., Рево Д. Д. Моделирование степени покрытия поверхности стальных изделий отпечатками при обработке проволоочным инструментом // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: сборник научных статей II Всероссийской научной конференции с международным участием. В 2

частях, Тольятти, 22–24 апреля 2019 г. Тольятти : Издатель Качалин Александр Васильевич, 2019. С. 176–180.

17. Зотов А. В., Драчев О. И., Расторгуев Д. А., Святкин А. В., Климов В. С., Мерсон Е. Д. Оценка деформационных процессов при обработке проволочным инструментом // *Металлообработка*. 2014. № 6. С. 34–40.

18. Исследование коэффициента трения при плакировании деталей гибким инструментом: сб. науч. тр. / Процессы и оборудование металлургического производства; под ред. Н. В Оншина, Р. Н. Савельева. Магнитогорск: МГТУ, 2001. 73 с.

19. Кудрявцев И. В., Петушков Г. Е. Влияние кривизны поверхностей на глубину пластической деформации при упрочнении деталей поверхностным наклепом // *Вестник машиностроения*. 1966. № 7. С. 41–43.

20. Кудрявцев И. В., Минков Е. И., Дворникова Е. Э. Повышение прочности и долговечности крупных деталей машин поверхностным наклепом. М. : НИИинформтяжмаш, 1970. 144 с.

21. Кургузов Ю. И., Папшев Д. Д. Технологическое обеспечение качества поверхности при упрочнении механическими щётками // *Вестник машиностроения*. 1986. № 4. С. 54–58.

22. Кургузов Ю. И., Кургузов М. Ю. Упрочнение кромок лопаток рабочих колёс газотурбинных двигателей // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2010. № 2(27). С. 120–127.

23. Леванцевич М. А., Шелег В. К., Пилипчук Е. В. Сравнительная оценка критериев работоспособности гальванических и деформационно-плакированных медных покрытий // *Актуальные вопросы машиноведения*. 2016. № 5. С. 390–393.

24. Лобанов М. Л. Защитные покрытия. Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2014. 200 с.

25. Мосейко В. В. Обеспечение рациональных технологических режимов дробеобработки на основе закономерностей ударной контактной деформации: автореф. дис...канд. техн. наук: 05.03.01. Волгоград, 2007. 222 с.
26. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М. : Машиностроение, 1987. 328 с.
27. Отений Я. Н. Технологическое обеспечение качества деталей машин поверхностным пластическим деформированием: монография. Волгоград : ВолгГТУ, 2005. 224 с.
28. Павлов А. Ю. Основы газотермического напыления защитных покрытий: учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2020. 300 с.
29. Папшев Д. Д. Технологические основы повышения надежности и долговечности деталей машин поверхностным упрочнением: учеб. пособ. Самара : СГТУ, 1993. 74 с.
30. Пат. № 2476300 Российская Федерация, МПК В23Р 6/00 (2006.01), В23Н 5/00 (2006.01), С23С 4/04 (2006.01) Способ восстановления деталей пар трения интегральных рулевых механизмов с гидроусилителем руля: № 2010132326/02: заявл. 02.08.2010: опубл. 27.02.2013 / Бурумкулов Ф. Х., Сенин П. В., Величко С. А., Давыдкин А. М., Ионов П. А.; заявитель Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. 10 с.
31. Петросов В. В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструментов. М. : Машиностроение, 1977. 168 с.
32. Сабанов Ю. В., Батищева З. В., Кашина О. Е., Никитина Г. А., Овчинникова Н. В., Ступина Н. А., Яковлев А. В. Автомобили LADA GRANTA 2190. Каталог деталей и сборочных единиц. Тольятти, 2011. 226 с.
33. Семенова Е. Е. Технология восстановления и упрочнения поверхностей золотников гидроусилителей рулевого управления гальваногазофазным хромированием: дис...канд. техн. наук 05.20.03. Пенза, 2003. 151 с.

34. Тамаркин М. А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис....д-ра техн. наук. 05.02.08. Ростов на Дону, 1995. 310 с.

35. Технический регламент о безопасности колесных транспортных средств. [Электронный ресурс]. Решение Комиссии Таможенного союза от 9.12.2011 №877. URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/texnreg/deptexreg/tr/Documents/TR%20TS%20KolesnTrS.pdf> (дата обращения: 30.05.2022).

36. Хейфец С. Г. Аналитическое определение глубины напряженного слоя при обработке роликами стальных деталей. Труды ЦНИИТМАШ, кн. 49. М. : Машгиз, 1952. С. 7–17.

37. Lida K. Dent and affected layer produced by shot peening // The second international conference on shot peening. Paris, 1984. P. 283–292.

38. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // Journal of Materials Reserved. 2004. Vol.19, № 1. P. 3–20.

39. Pat. 6025014 United States Patent, IPC B05D 1/28. Method and device for depositing a layer of material on a surface / Robert J. Stango.; assignee Marquette University. № 09/131848; appl. Aug. 7. 1998; publ. Feb. 15. 2000.

40. Pat. 03158477 Japan, IPC C23C 24/04, C23C 26/00. Continuous mechanical plating method / Horioka Katsuhiko, Tatenou Noboru, Kamiya Tsuyoshi.; assignee Nippon Yakin Kogyo Co Ltd. № 1989000296230; appl. Nov. 16. 1989; publ. July. 08. 1991.

41. Regulation No. 79 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to steering equipment. URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1947/oj> (date of the application: 01.06.2022).