

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
Направление 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
Профиль «Технология автоматизированного машиностроения»

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему «Стабилизация энергосиловых параметров зоны деформационного  
плакирования посредством автоматизации процесса»

Студент(ка)

Н.В. Семенченко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель  
Консультанты

А.В. Бобровский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

В.Г. Виткалов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель магистерской  
программы  
д.т.н., доцент

Н.М. Бобровский

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**Допустить к защите**

И.о. заведующего кафедрой  
к.т.н., доцент

А.В. Бобровский

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Тольятти 2016

# СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Содержание                                                                                                 |    |
| Введение                                                                                                   | 3  |
| 1. Литературно-патентный обзор. Тенденции развития метода деформационного плакирования гибким инструментом | 4  |
| 1.1. Схемы реализации процесса плакирования                                                                | 9  |
| 1.2. Применение дополнительных воздействий                                                                 | 10 |
| 1.3. Варианты конструкции твердотельного ЭМП                                                               | 14 |
| 1.4. Варианты конструкции гибкого инструмента                                                              | 15 |
| 1.5. Варианты конструкции устройства подачи твердотельного ЭМП                                             | 17 |
| 1.6. Тепловые явления процесса ДПГИ                                                                        | 19 |
| 1.7. Состояние поверхностного слоя после ДПГИ                                                              | 24 |
| 2. Математические модели расчета геометрических и силовых параметров процесса ДПГИ                         | 26 |
| 3. Анализ точности моделей расчета параметров процесса плакирования                                        | 29 |
| 4. Методика выбора оптимальных режимов обработки и материала ворса гибкого инструмента                     | 41 |
| 5. Автоматизация процесса плакирования гибким инструментом                                                 | 48 |
| Заключение                                                                                                 | 52 |
| Список использованных источников                                                                           | 57 |
| Приложения                                                                                                 | 58 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

Одной из наиболее значимых тенденций в развитии производства является повышение эксплуатационных показателей изделий, за счет финишной обработки поверхностного слоя их рабочих поверхностей. Для многих деталей машиностроения, работающих в экстремальных условиях: при повышенных скоростях, высоких нагрузках, силовых воздействиях, отсутствия смазки и д.р. необходимо создавать технологические процессы, обеспечивающие все возрастающие требования, предъявляемые к их надежности и долговечности. Наибольший вклад в формирование качественных показателей поверхностного слоя, таких как: геометрические параметры и физико-механическое состояние, вносят финишные операции обработки поверхности. Улучшение технологических процессов, обеспечивающих повышение качества поверхностного слоя деталей машиностроения, позволит значительно повысить эксплуатационные показатели узлов и механизмов.

Перспективными направлениями повышения качества поверхностного слоя изделий машиностроения являются методы: нанесения покрытий различного функционального назначения, формирования оптимальной структуры поверхности, применение инновационных материалов, насыщения определенными химическими элементами, механического воздействия для упрочнения поверхности. При решении подобных задач, основополагающим является не только выбор и разработка конкретных способов технологических воздействий и состава наносимых материалов, но и разработка средств управления данными процессами, для поддержания необходимого уровня качества получаемых изделий.

Повышение долговечности и надежности деталей машин достигается разными методами, основные из которых:

- металлургический (создание новых материалов);
- конструкторский (создание равнопрочных и равнонагруженных конструкций);
- технологический (создание специальных технологических процессов, для обеспечения высокого уровня качества поверхностей);
- эксплуатационный (соблюдение всех требований по техническому обслуживанию и рекомендуемым режимам эксплуатации изделий).

Первые три метода находятся в тесной взаимосвязи, так как металлургическое и конструкторское направления обеспечиваются с помощью технологического, которое напрямую влияет на качество производимых изделий.

Обеспечение необходимого качества поверхностного слоя в разрабатываемых технологических процессах возлагается на операции финишной обработки. При этом существуют разные пути достижения заданного качества: модернизация лезвийной обработки поверхности и внедрение дополнительных специальных упрочняющих операций. В большинстве своем, упрочняющие операции изменяют только микротопографию и напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя, но не обеспечивают точностные параметры изделий.

Операции упрочнения можно разделить на три основных группы по природе поверхностного технологического воздействия: физические, химические и электрохимические, механические методы (рис. 1.1). Первая группа включает такие методы как: наплавка, поверхностная закалка ТВЧ, электроискровое упрочнение и др. Наиболее «популярные» методы: лазерное упрочнение, ионное легирование, вакуумное осаждение, получили более широкое применение. Вторая группа представлена химическими методами обработки, в том числе осаждением металлических и

неметаллических покрытий, для защиты поверхности от внешней среды и обеспечения ее контактных свойств.



Рисунок 1.1 – Классификация поверхностных технологических воздействий

Третья группа состоит из методов, обеспечивающих достижение заданной точности размеров и формы поверхностей. Это как методы лезвийной обработки: фрезерование, точение, строгание, так и методы абразивной обработки: шлифование, суперфиниширование, хонингование. В данную группу входят и разнообразные методы поверхностного пластического деформирования (ППД), которые разделяются по схемам силового воздействия инструмента на поверхность детали в соответствии с ГОСТ 18296-72 (рис. 1.2).



упрочнения и нанесения покрытия путем раскатывания проволоки, метод финишной антифрикционной обработки, метод нанесения покрытия с использованием порошка или жидкости, обеспечивающих не только формирование благоприятного напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя, но и одновременное нанесение покрытия на обрабатываемую поверхность. Среди данных методов заметно выделяется простой, экологичный и высокопроизводительный способ комбинированной обработки, обладающей малой энергозатратностью – деформационное плакирование гибким инструментом (ДПИ).

Особенность данного метода – это применение инструмента с малой жесткостью (механической щетки). Материал покрытия находящийся в твердом состоянии прижимается к периферии рабочих элементов щетки, и при вращении происходит очистка поверхности элемента материала покрытия (ЭМП), что, в свою очередь, приводит к схватыванию покрытия с материалом ворса щетки. Частицы покрытия остаются на рабочей поверхности гибкого инструмента. При его взаимодействии с деталью происходит перенос металла с ворса проволочной щетки на обрабатываемую поверхность детали. При взаимодействии гибкого инструмента с поверхностью детали происходит разрушение и удаление окисных пленок и загрязнений в зоне контакта, что приводит к контакту очищенных от пленок и загрязнений поверхностей инструмента с деталью, что обеспечивает схватывание материала покрытия с поверхностью детали, представляющее собой произвольный процесс, протекающий с выделением энергии. Высокое тепловыделение, из-за трения проволочной щетки о поверхность изделия, способствует интенсификации процесса схватывания. В последствии узел схватывания разрушается. Срез возникает, как правило, в объеме менее прочного металла и его частицы остаются на поверхности более твердого. В процессе обработки, с течением времени, на поверхности более твердого металла образуется покрытие [1].

# **1 ЛИТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНЫЙ ОБЗОР. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТОДА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПЛАКИРОВАНИЯ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ**

Деформационное плакирование – один из универсальных методов модификации поверхностного слоя рабочих поверхностей деталей, позволяющий добиться не только упрочнения поверхности, но и, одновременно, нанести на нее покрытие. В отличие от других методов нанесения служебных покрытий, данный метод не требует предварительной обработки поверхности изделия, так как очистка поверхности осуществляется в процессе плакирования.

В настоящее время происходит внедрение данного метода в разные отрасли промышленности, в частности в производства биметаллической ленты и проволоки, нанесения служебных покрытий на детали, работающие в узлах трения, восстановления изношенных деталей, нанесения защитных и антикоррозионных покрытий. Метод деформационного плакирования с каждым годом претерпевает модернизацию и развитие. На рис. 1.3 представлены основные направления развития метода плакирования.

Представленная классификация показывает, что развитие плакирования происходит в разных направлениях, изменяются конструкции установок для нанесения покрытия, процесс плакирования дополняется физическими воздействиями с целью его интенсификации, совершенствуются составы наносимого материала, выбираются оптимальные скорости обработки, принципиальные схемы реализации процесса, улучшаются конструкции гибкого инструмента (механической щетки) и многое другое.

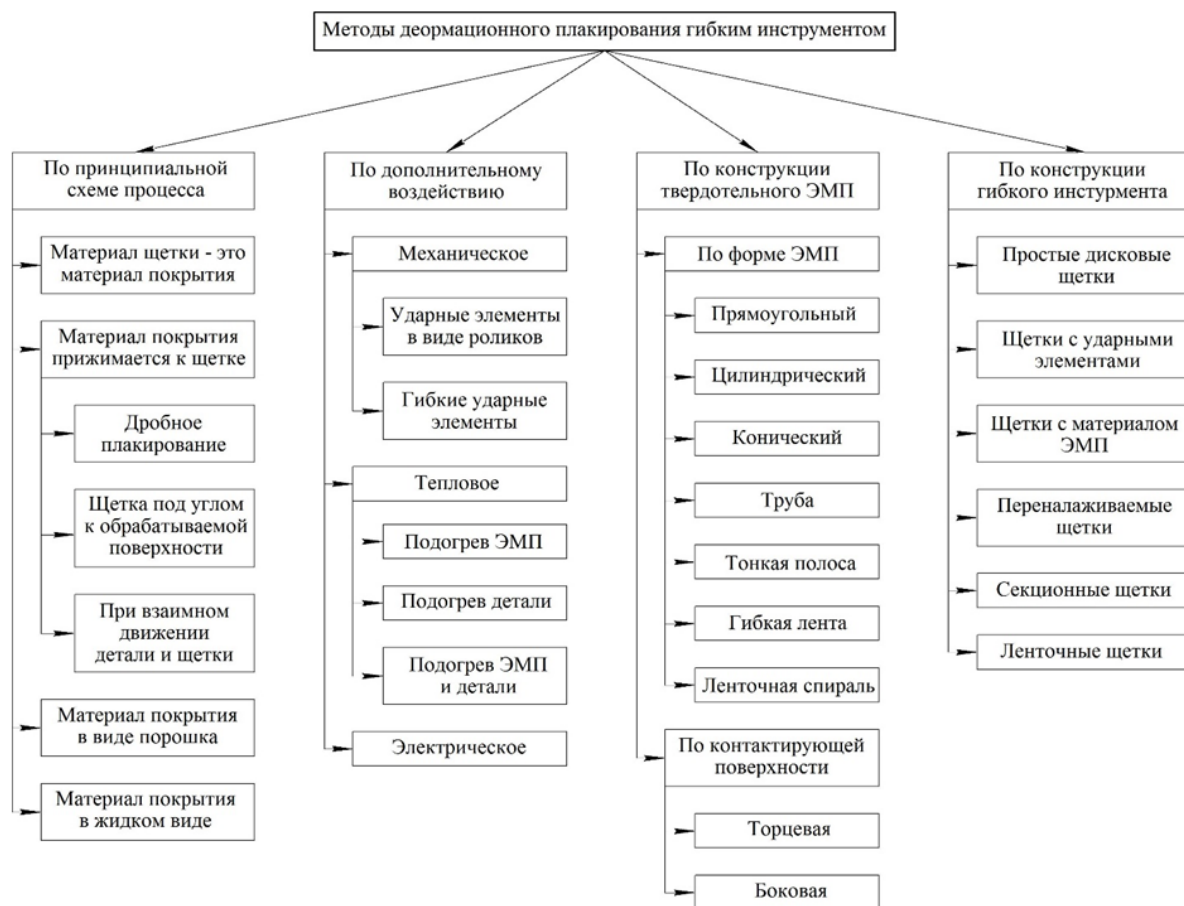


Рисунок 1.3 – Классификация методов ДПГИ

### 1.1. Схемы реализации процесса плакирования

Существуют две принципиально различные схемы реализации процесса деформационного плакирования. Первая (рис. 1.1.1), предложенная в 1960 году изобретателями: Смирновым И.М., Николаевым Н.А., Крыловым С.Д. [2], отличается тем, что в качестве материала наносимого покрытия выступают проволоочные элементы гибкого инструмента. Данную схему рекомендуется применять ее авторами для нанесения серебряного покрытия. Она так же получила свое развитие в работе [3], где рекомендовано ее применение при нанесении никеля, черных и тугоплавких металлов.

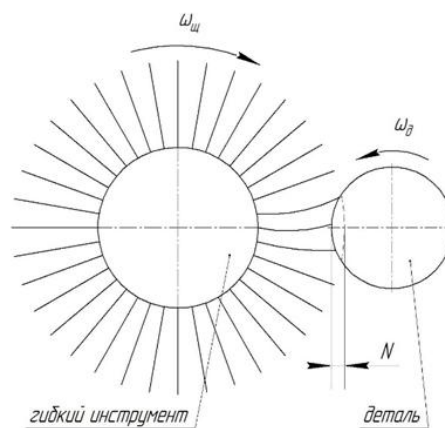


Рисунок 1.1.1 – Схема реализации процесса ДПГИ №1

Вторая же схема (рис. 1.1.2) предложена изобретателем Абиндером А.А. еще в 1937 году [4]. Механическая щетка в данном случае играет роль механического переносчика частиц с элемента материала покрытия на обрабатываемую поверхность детали. Именно данная схема плакирования приобрела большую популярность и получила свое развитие во многих научных работах.

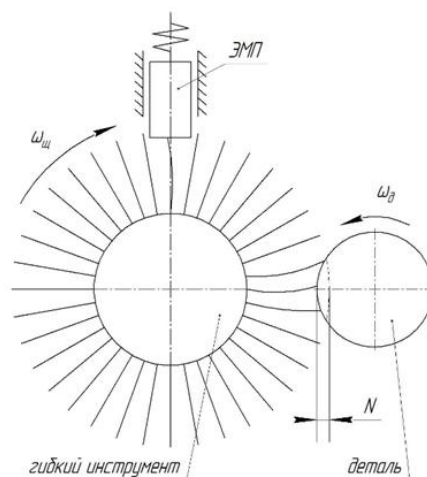


Рисунок 1.1.2 – Схема реализации процесса ДПГИ №2

Данная схема получила свое развитие в работах исследователей из Магнитогорского государственного технического университета, где и была предложена схема дробного плакирования (рис. 1.1.3), разработанная с целью получения покрытий толщиной от 100 до 1000 мкм и более [5]. Отличие

данной схемы состоит в сообщении дополнительного движения обрабатываемой детали в направлении перпендикулярной оси щетки, что позволяет достичь эффекта многократного временного взаимодействия гибких элементов инструмента и обрабатываемой поверхности детали.

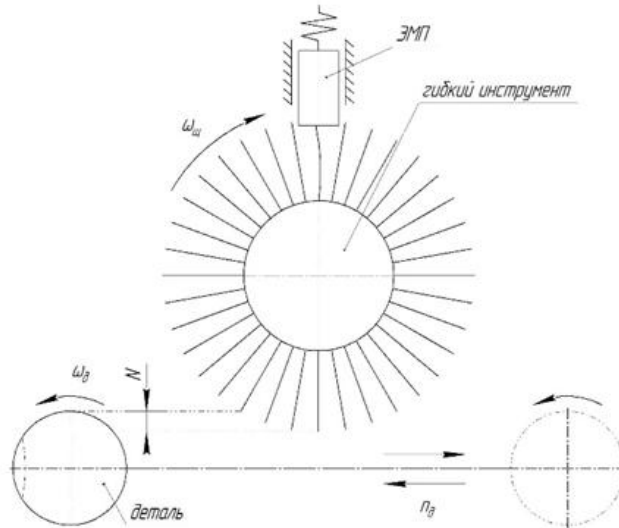


Рисунок 1.1.3 – Схема реализации процесса ДПГИ №3

Так же механическая щетка может устанавливаться под углом к плакируемой поверхности детали (рис. 1.1.4), так при плакировании деталей цилиндрической формы, продольные оси обрабатываемой детали и щетки могут перекрещиваться в пространстве, то есть их проекции могут быть перпендикулярны, либо пересекаться под углом 25-45 градусов [4, 6].

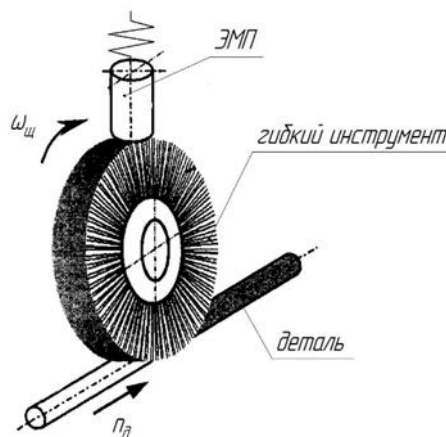


Рисунок 1.1.4 – Схема реализации процесса ДПГИ №4

Чаще всего данная схема применяется для плакирования проволоки или ленты, что снижает разнотолщинность наносимого на нее покрытия. Данный метод получил свое развитие в работе [7], где применена оригинальная траектория движения плакируемой ленты и в работе [8], где добавлено возмущающее воздействие в виде кручения на обрабатываемую проволоку.

Еще одна схема реализации процесса плакирования представлена на рис. 1.1.5, которая чаще всего применяется при обработке плоских и широких деталей. В литературе [9] обрабатываемая поверхность движется поступательно относительно щетки в двух направлениях.

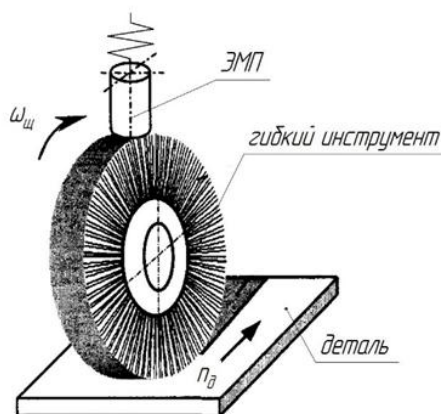


Рисунок 1.1.5 – Схема реализации процесса ДПГИ №5

В процессе развития, метода деформационного плакирования гибким инструментом материал покрытия стали применять не только в виде твердого бруска, прижимаемого к щетке. Изобретателями: Белевский Л.С., Харитонов А.О., Кутлубаев И.М., Серов Н.В. был предложен метод плакирования для нанесения тугоплавких материалов с использованием материала покрытия в виде порошка, подаваемого в непосредственно зону контакта гибкого инструмента с поверхностью детали.

В работах же [10] изобретатели: Берсудский А.Л., Малышев В.П. и др. предлагают использовать материал покрытия в жидком состоянии на основе хлорида меди.

## **1.2. Применение дополнительных воздействий**

Для интенсификации процесса деформационного плакирования в ряде работ авторы предлагают использовать дополнительное механическое, тепловое или электрическое воздействие на процесс.

Авторы изобретения [9] предлагают дополнительно воздействовать на обрабатываемую поверхность, пластически деформировать ее ударными элементами в виде роликов, установленных на гибком инструменте. Что повышает прочностные характеристики обработанной поверхности. В изобретении [10] для механического воздействия на поверхность предусмотрены гибкие ударные элементы, представляющие из себя более жесткие ворсинки (жесткость которых больше жесткости остального ворса в 3-3000 раз), установленные в цилиндрической щетке в шахматном порядке, которые обеспечивают получение на поверхности обрабатываемого изделия рисунка определенного профиля. В работах [4, 7] используются интересные варианты комплектации ворса щеток, рабочие элементы которых состоят из ворсинок разной твердости и чередуются между собой. При этом гибкие элементы из более мягкого материала выполнены в виде трубок и армированы более твердым ворсом.

Другие же исследователи предлагают тепловое воздействие в виде предварительного нагрева плакируемой детали, что ускоряет начало процесса термомеханического переноса частиц материала покрытия на обрабатываемую поверхность. Так же для ускорения процесса переноса авторы работ [6, 11] предлагают нагревать элемент из материала покрытия. Изобретатели в работе [12] нагревали элемент из материала покрытия пропусканием через него электрического тока, через специальный цилиндрический ролик. Применение данных методик позволяет осуществлять нанесение покрытий из твердых малопластичных металлов.

Электрическое же воздействие на процесс, представлено не только в работах [4, 8], где оно использовано для разогрева элемента из материала

покрытия. Оно так же используется для расширения возможностей процесса плакирования путем нанесения более твердых, чем основа, токопроводящих материалов за счет совмещения процессов электрической эрозии и электроискрового легирования, как в работе [12].

### **1.3. Варианты конструкции твердотельного ЭМП**

Одним из направлений развития технологии плакирования гибким инструментом является совершенствование конструкции, формы и размеров элемента материала покрытия. Был предложен целый ряд различных конструкций ЭМП в форме брусков прямоугольного сечения.

Изобретатели предлагали разные конструкции установок и с цилиндрическими стержнями из материала покрытия для получения однородных по всей длине обработки покрытий. Для экономии цветных металлов за счет сплавления с другими металлами и одновременного нанесения сплавов на поверхность авторы [13] снабдили устройство, помимо одного основного ЭМП, дополнительными брусками из различных металлов, причем бруски расположены в порядке возрастания температуры плавления материалов брусков последовательно друг за другом по направлению вращения щетки. Предложены так же устройства для подачи элемента материала покрытия в зону обработки, с помощью которых осуществляется контролируемый прижим ЭМП к торцевой поверхности механической щетки, где ЭМП устанавливается в направляющую трубку, а величина силы прижима контролируется натяжным винтом. Само же устройство устанавливается либо перпендикулярно к оси вращения гибкого инструмента, либо под специально рассчитанным углом к касательной, проведенной в точку касания бруска и щетки.

Авторы изобретения [14], с целью повышения качества покрытия, предлагают конец бруска, контактирующий с ворсом щетки, выполнить в виде конуса и установить его с натягом к щетке с возможностью вращения.

Так же выполняют элементы материала покрытия в виде тонких полос и гибких лент для обработки, чаще всего, длинных металлических полос. Данные методы позволяют повысить равномерность и толщину наносимого покрытия, что положительно сказывается на качестве обработанных изделий.

С целью расширения технологических возможностей метода деформационного плакирования, за счет устранения эффекта перемешивания поверхностного слоя материала покрытия в зоне контакта с ворсом проволочного инструмента, ЭМП выполнен в виде полого цилиндра (трубы) [12]. Данный способ получил свое развитие в работе [15], где предложено использовать элемент из материала покрытия в виде набора концентрично расположенных цилиндров, изготовленных из различных материалов и расположенных в определенной последовательности начиная с наружного.

Для нанесения покрытий из малопластичных твердых материалов авторами работы [15] предложено изготавливать ЭМП в виде ленточной спирали, один конец которой установлен с возможностью контакта с механической щеткой, а ось спирали параллельна оси гибкого инструмента. Сама же спираль устанавливается в специальную теплоизолирующую оправку с направляющими.

Кроме применения более новых форм ЭМП в процессе развития были предложены и разные способы контакта элемента с периферией гибкого инструмента. Контакт торцевой поверхностью можно считать «классическим», так как он предлагается к использованию начиная с самых ранних работ и используется чаще всего. Кроме него для экономии материала покрытия и снижения энергозатрат в процессе съема материала покрытия металлической щеткой и повышения стойкости гибкого инструмента, материал покрытия прижимается к щетке боковой поверхностью, а сам он имеет возможность осевого вращения в процессе обработки.

В процессе развития данного направления авторами [16] было предложено специальное устройство для подачи ЭМП в зону покрытия,

выполненного в виде ролика и установленного на оси с возможностью вращения; снабженное механизмом прижима его посредством пружины к периферии щетки. Данное устройство отличается тем что снабжено механизмом регулирования силы прижатия и тормозной колодкой, что дает возможность более гибкой настройки.

#### **1.4. Варианты конструкции гибкого инструмента**

В наши дни известно довольно много различных видов гибких инструментов, таких как: дисковые, валковые, кольцевые, торцевые, концевые, плоские, пучковые, секционные, ленточные щетки и даже иглофрезы. Однако не все виды данных инструментов могут быть применены для деформационного плакирования, потому что при плакировании необходимо обеспечить не только определенное напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя, но также и определенную тепловое воздействие.

Чаще всего при нанесении покрытий методом плакирования используются простые и универсальные дисковые щетки, изготовленные из проволоки различных марок стали:

- легированной пружинной (ГОСТ 14963-78),
- низкоуглеродистой (ГОСТ 3282-74),
- углеродистой инструментальной У7А, У8А (ГОСТ 938-75),
- пряди стальных канатов (ГОСТ 7372-79),
- металлокорд (ГОСТ 14311-85).

Для повышения качеств обработки и расширения возможностей ДПГИ в конструкцию щеток вносятся различные дополнения. В работе [16] авторами, для достижения дополнительной пластической деформации, ворс щетки предлагается комбинировать с ударными элементами в форме роликов, которые в процессе обработки ударяются об обрабатываемую поверхность детали, вызывая ее дополнительное упрочнение. В качестве

дополнительных ударных элементов может выступать так же ворс самой щетки, авторами предложен метод комбинирования ворса проволочного инструмента из проволоки различной жесткости, для обеспечения дополнительного ударного воздействия на обрабатываемую поверхность.

С целью решения проблемы с размещением ЭМП при обработке внутренних поверхностей деталей авторами [9] предложено выполнять металлическую щетку с брусками из материала покрытия и узлами их прижатия, располагающимися между ворсом щетки, причем данные узлы закреплены со стороны основания, а элементы материала покрытия обращены наружу ворса. Что позволяет обрабатывать внутренние поверхности.

Для обработки сложных наружных и внутренних поверхностей предложено использование секционных щеток. Применяя блоки из отдельных секций появляется возможность обработки эвольвентных поверхностей зубчатых колес, шлицевых поверхностей и других сложных по конфигурации, в том числе и внутренних поверхностей. Для интенсификации процесса упрочнения при плакировании гибким инструментом дисковые щетки также изготавливают секционными, секции у данного вида щеток расположены по окружности, и зачастую, секции чередуются: по жесткости ворса, либо с пустыми секциями без ворса. Что увеличивает энергию удара ворсинок о поверхность обрабатываемого изделия.

Для повышения производительности процесса плакирования и снижения экономических затрат на проволочные щетки были разработаны конструкции гибкого инструмента [10], обеспечивающие его переналадку по мере износа (или полного выхода из строя) ворса щетки. Конструкция механической щетки отличается тем, что каждая секция в цилиндрической оправе закреплена затяжным винтом с возможностью перемещения в радиальном направлении, что позволяет подстраивать длину ворса под необходимый размер.

### 1.5. Варианты конструкции устройства подачи твердотельного ЭМП

Известно устройство для нанесения покрытия на поверхность, содержащее металлическую щетку, элемент из материала покрытия и механизм прижима элемента к щетке, при этом элемент покрытия выполнен в виде ленты, прижимаемой к щетке теплоизолированным роликом и перемещаемой в продольном направлении приемно-подающими барабанами, оснащенными реверсивными приводами (рис. 1.5.1).

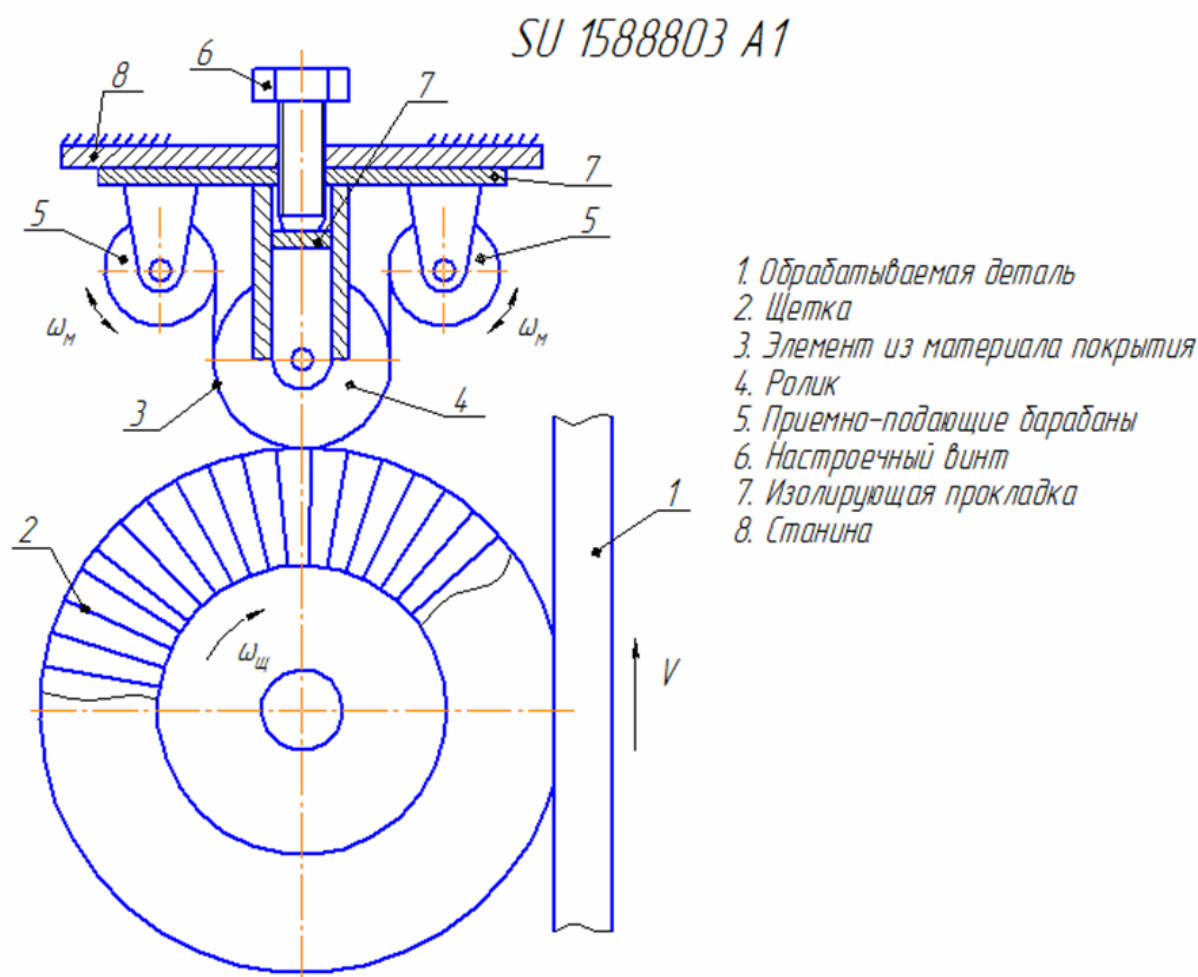


Рисунок 1.5.1 – Иллюстрация к патенту SU 1588803 A1

Недостатками известного устройства являются высокие затраты энергии, необходимой не только на привод щетки, но и на привод ленты и ее нагрев; сложность конструкции; небольшой ресурс ленты (толстая лента с большим ресурсом не обеспечит работоспособность устройства, т. к. не будет

подвергаться требуемому изгибу и потребует большой мощности привода ленты; тонкая же лента будет быстро истираться щеткой).

Известно устройство для нанесения покрытия на поверхность, содержащее металлическую щетку, контактирующей с ней элемент из материала покрытия, выполненный в виде установленного на оси цилиндрического тела вращения (ролика) с механизмом прижима его посредством пружины к периферии щетки (рис. 1.5.2).

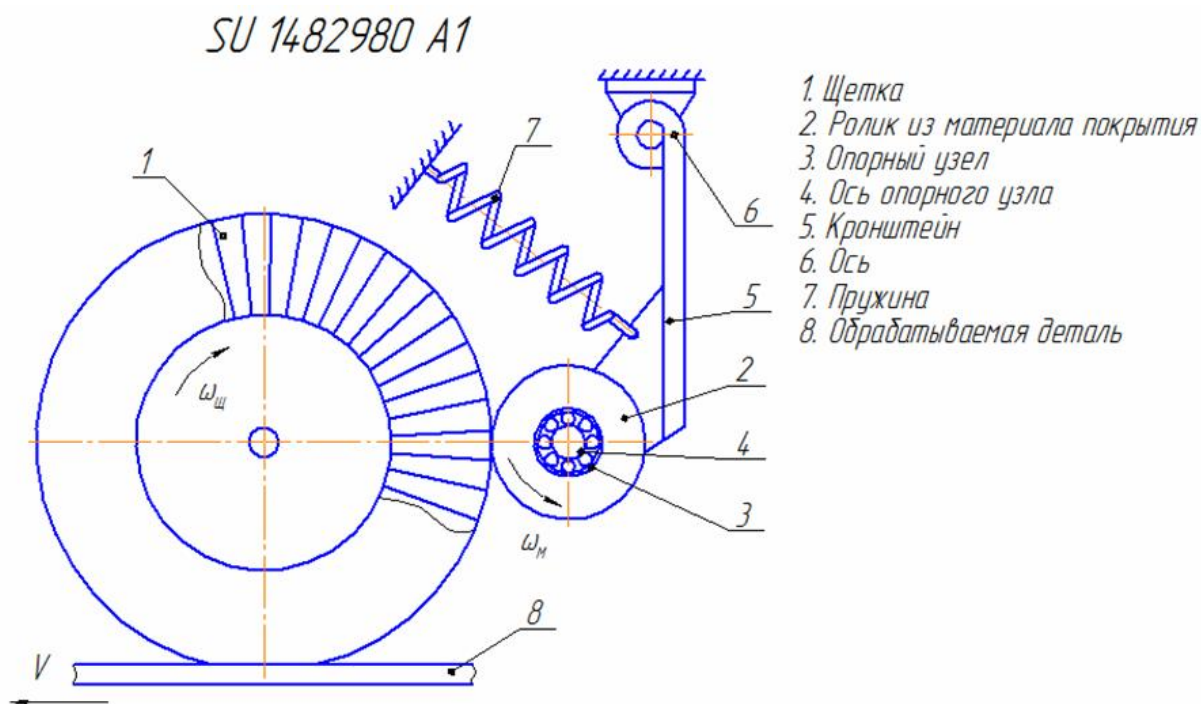


Рисунок 1.5.2 – Иллюстрация к патенту SU 1482980 A1

Недостатками этого известного устройства являются небольшой нагрев материала покрытия вследствие равенства линейных скоростей движения периферийных точек щетки и ролика, что приводит к незначительной производительности, небольшой прочности сцепления покрытия с материалом детали, невозможности нанесения покрытий из материалов с высокими температурами плавления. Кроме этого, в известном устройстве не обеспечивается возможность регулирования силы прижатия ролика к щетке, что, в свою очередь, не обеспечивает изменение и выбор оптимальных

значений этой силы, необходимых при нанесении покрытий из различных материалов.

Известно устройство для нанесения покрытия на поверхность, содержащее щетку с металлическим ворсом и контактирующий с ней элемент из материала покрытия, выполненный в виде установленного на оси с возможностью вращения ролика. Механизм прижима снабжен регулятором силы прижатия, тормозной колодкой и установленной между ним и пружиной. Ролик, колодка и пружина установлены в гильзе с выполненными в ней пазами, направленными к оси щетки (рис 1.5.3).

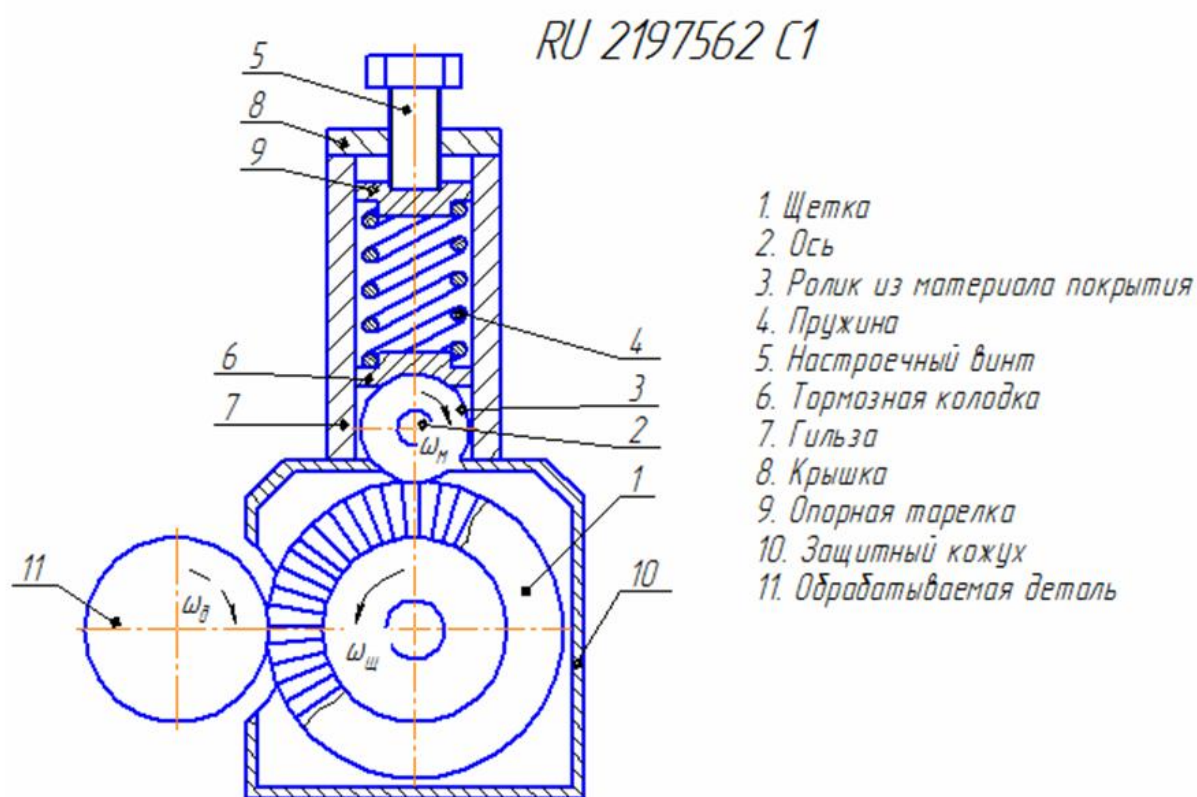


Рисунок 1.5.3 – Иллюстрация к патенту RU 2197562 C1

Недостатками известного устройства являются невозможность определения величины силы прижатия элемента из материала покрытия, которое было задано, и ее изменения во время износа элемента. Что делает невозможным ее своевременную корректировку и пагубно сказывается на процессе переноса материала покрытия на щетку.

Известно устройство, содержащее металлическую щетку с приводом вращения и прижатый к ней под углом брусок из материала покрытия. Известное устройство обеспечивает возможность получения за один проход толстого, до 40 мкм, покрытия (рис 1.5.4).

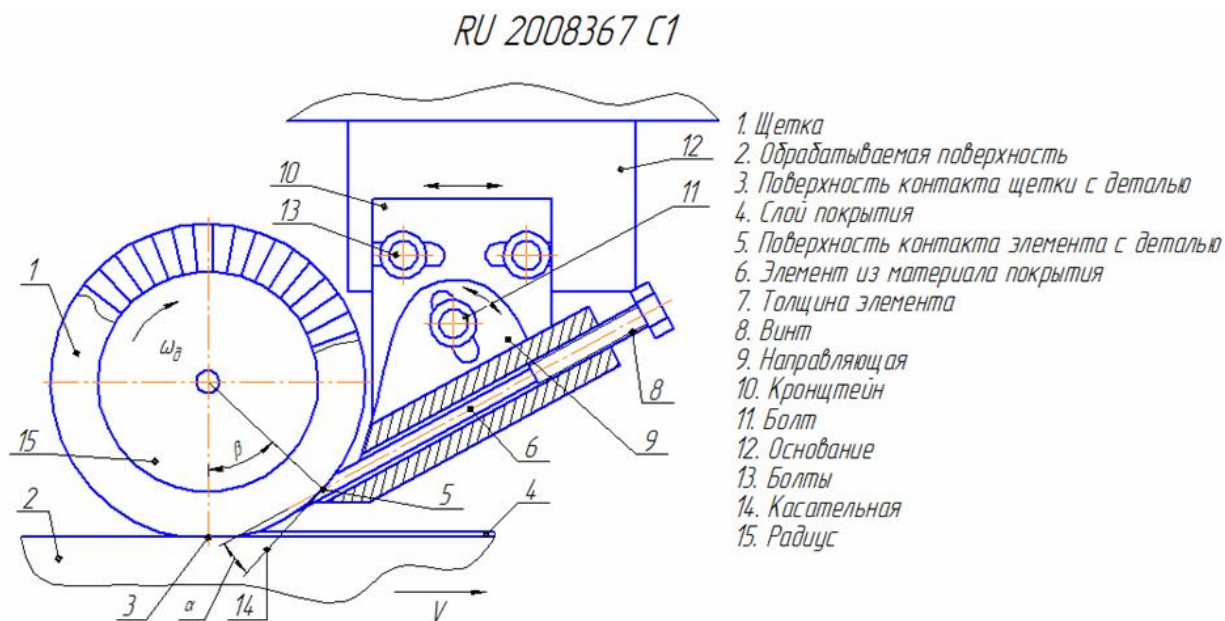


Рисунок 1.5.4 – Иллюстрация к патенту RU 2008367 C1

Однако недостатком данного устройства является то, что оно не позволяет получить равномерное, одинаковой толщины, сплошное покрытие на деталях, имеющих большую площадь покрываемой поверхности, например валки прокатных станов, направляющие станков, металлические листы и др., поскольку отсутствует контроль за расходом материала бруска в процессе нанесения покрытия и возможность осуществления регулируемой подачи бруска из материала покрытия в зону контакта со щеткой в соответствии с количеством унесенного материала.

В результате интенсивного износа бруска, обусловленного отрывом и переносом частичек материала ворсом щетки в зону покрываемой поверхности, объем переносимого материала, зависящий от длины дуги контакта и глубины внедрения ворса щетки в материал покрытия, при неизменной величине сближения бруска с ворсом щетки, в разные

промежутки времени не одинаков. Это является основной причиной формирования не равномерного по толщине и не сплошного покрытия. В известном устройстве имеется винт для подачи бруска в зону контакта со щеткой, с помощью которого можно компенсировать износ бруска. Однако отсутствие контроля за расходом материала покрытия в процессе его нанесения на поверхность детали не позволяет произвести своевременную подачу бруска в зону контакта со щеткой для компенсации его износа.

Еще одним известным устройством является устройство для нанесения покрытия на поверхность, содержащее металлическую щетку с приводом вращения и прижатый к щетке под углом  $5-10^\circ$  к касательной в точке касания брусок из материала покрытия. Брусок установлен на подвеске, жестко связанной с двумя плоскопараллельными пластинами, и соединен с толкателем, который связан с мотор-редуктором. Пластины подвески оснащены силоизмерительными датчиками, связанными с устройством управления подачей бруска. Это устройство состоит из аналого-цифрового преобразователя, цифрового задатчика уровня сигнала величины деформации плоскопараллельных пластин, цифрового компаратора и шагового электропривода (рис 1.5.5).

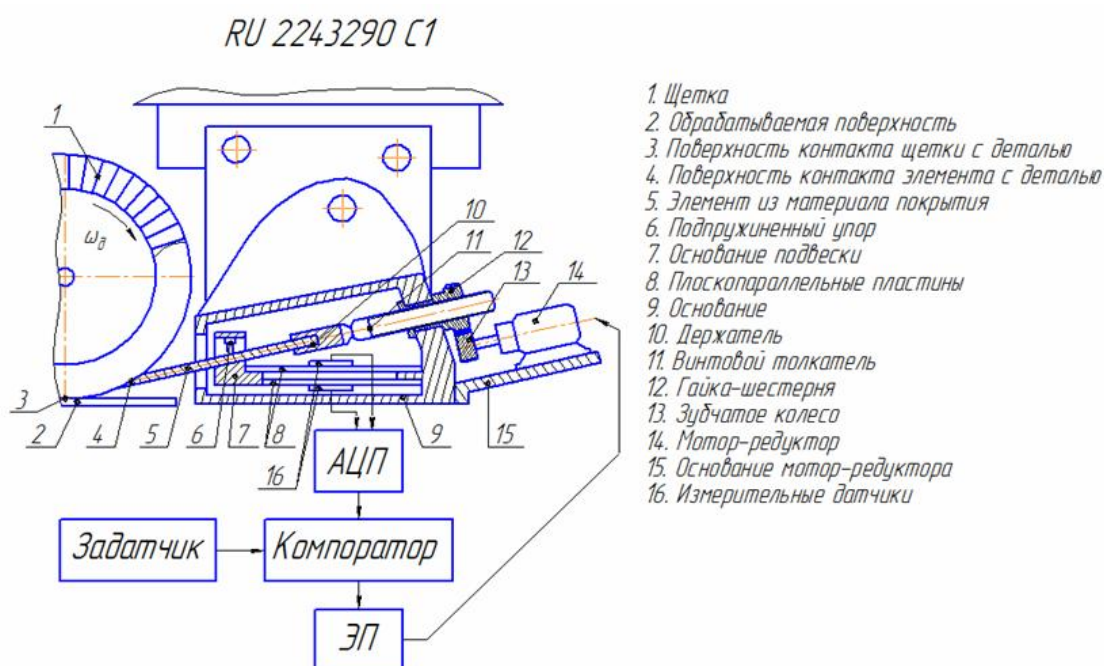


Рисунок 1.5.5 – Иллюстрация к патенту RU 2243290 C1

Недостатками этого устройства являются чрезмерная сложность из-за большого числа составляющих конструкции элементов, связанных между собой, что предъявляет высокие требования к точности монтажа всех составляющих устройство элементов и, как следствие, к серьезному подорожанию изготовления и установки данного устройства.

### **1.6. Тепловые явления процесса ДПГИ**

Для процессов обработки щетками будь то деформационное плакирование или очистно-упрочняющая обработка характерно возникновение высоких температур в зоне контакта гибкого инструмента с поверхностью детали и элементом из материала покрытия. В разной литературе представлены различные значения температур, возникающих во время такой обработки:  $300^{\circ}$  и более,  $200^{\circ}\dots 300^{\circ}$ ,  $175^{\circ}$ ,  $60^{\circ}\dots 450^{\circ}$ ,  $180^{\circ}\dots 520^{\circ}$ ,  $320^{\circ}\dots 520^{\circ}$ , в районе  $1000^{\circ}$ . При таких высоких температурах возможны явления структурных и фазовых превращений, возникновение в поверхностном слое остаточных напряжений растяжения, интенсивное окалинообразование и многие другие. В связи с этим при выборе режимов ДПГИ авторами [15-17] рекомендуется учитывать тепловые явления возникающие в зоне плакирования. В этих работах авторы рассматривают температуры, возникающие на контактных поверхностях обрабатываемой детали и элемента материала покрытия. В работе [1] предложено считать нижней границей температур, возникающих в контакте с деталью, температуру, соответствующую началу термически активированного адгезионного взаимодействия. При температурах меньше данной хорошее сцепление наносимого покрытия с поверхностью детали возможно только при высоких пластических деформациях, недостижимых в процессе деформационного плакирования. Экспериментально в работе [1] определена нижняя температура протекания процесса на уровне  $(0,3\dots 0,4)T_{пл}$  для однородных покрытий и  $(0,35\dots 0,5)T_{пл}$  для разнородных, где  $T_{пл}$  –

температура плавления менее тугоплавкого материала. Верхней же тепловой границей процесса плакирования гибким инструментом является температура начала активного окалинообразования. Так как при превышении данной температуры в структуре наносимого покрытия повышается концентрация окислов металла, что, в свою очередь, резко снижает прочность сцепления покрытия с материалом основы, ухудшая сплошность его нанесения. На основе экспериментальных исследований, автором [1], установлен коридор оптимальных температур для поверхности ЭМП в диапазоне  $(0,55...0,7)T_{пл}$ . При превышении данного диапазона происходит излишнее распыление наносимого материала покрытия, что ведет к росту себестоимости обработки. При температуре ниже данного диапазона не происходит активного схватывания частиц материала покрытия с торцами ворса проволочного инструмента, что ведет к ухудшению качества обработки.

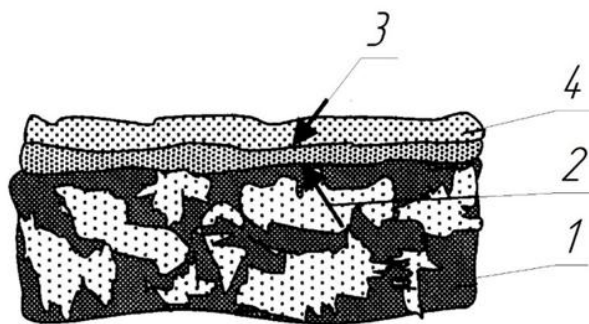
Автором работы [1] решена задача расчета температурных полей, возникающих в поверхностном слое обрабатываемой цилиндрической детали. В ней нагрев изделия осуществляется тепловым потоком, возникающим при трении ворса гибкого инструмента об обрабатываемую поверхность и тепловым потоком, выделяемым горячими частицами материала покрытия. Автор отмечает, что поддержание необходимой температуры можно производить подачей охлаждающей жидкости в зону, которая следует за участком нагрева; остальная поверхность охлаждается только воздухом. Автор так же рассматривает задачу оценки теплового состояния ЭМП, который выполнен в виде сплошного или полого цилиндра. Один торец элемента нагревается тепловым потоком от вращающейся щетки, а остальная поверхность охлаждается воздухом. В рассмотренных задачах наличие покрытия описывается введением фиктивного коэффициента теплоотдачи, что вполне корректно при нанесении тонких покрытий. При нанесении покрытий значительной толщины автором [5] предложена похожая на предыдущую математическая модель, учитывающая

распределение температур в нанесенном слое, так как оно может значительно отличаться от теплового состояния обрабатываемой поверхности изделия (основы).

Исследователем в работе [3] рассмотрено распределение температур в проволочном инструменте. Разработана математическая модель и проведены исследования распределения температуры по длине ворса. Было выяснено, что ворс гибкого инструмента прогревается на незначительную длину, но при больших диаметрах ворса проволочной щетки, высоких скоростях обработки и больших натягах температура ворса может достигать температуры до  $980^{\circ}$ , что серьезно влияет на процесс плакирования и на стойкость гибкого инструмента.

### 1.7. Состояние поверхностного слоя после ДПГИ

Исследованию поверхностного слоя, сформированного при деформационном плакировании гибким инструментом посвящены работы [1, 5, 16]. При освещении данного вопроса все авторы выделяют в структуре поверхностного слоя три основные зоны [1, 5, 16] (рис. 2.7.1).



- 1 – основа,
- 2 – деформированный слой,
- 3 – переходный слой,
- 4 – покрытие

Рисунок 1.7.1 – Структура поверхности после ДПГИ

Первая зона – сформированное в процессе покрытие, вторая зона – переходная и третья зона – это деформированный слой основы (обрабатываемой детали). Поскольку при ДПГИ происходит пластическое деформирование поверхности обрабатываемой детали, то ее твердость увеличивается. Каждый сформированный слой важен по своему, так деформированный слой основы имеет благоприятные напряжения сжатия и высокую твердость, в то время как слой из материала покрытия достаточно мягок. Наибольший интерес представляет переходный слой, который обладает совершенно отличными от материала основы и покрытия свойствами. Он образуется благодаря взаимной диффузии материала покрытия с материалом основы и приобретает совершенно новые свойства, такие как высокая твердость, измененный микрорельеф и повышенная износостойкость. В работах [9, 17] авторы связывают возросшие показатели износостойкости с измененными микрогеометрическими характеристиками поверхности детали. Но в работе [1] отмечено, что показатели микрогеометрии нанесенного покрытия не сказываются на износостойкости, а определяющим фактором является микрорельеф переходного слоя, который зависит от режимов обработки. 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 исследовании шероховатости и ее оценке после ДПГИ используются средние и комплексные характеристики, которые получают либо экспериментальным [1, 18], либо расчетным путем [1]. Так же в работе [1] полученные характеристики описаны с помощью комплексного параметра, что дает общее представление о качестве поверхности. Авторы же работ [1, 5] указывают на непоказательность и недопустимость использования комплексных и средних параметров, по причине того, что данные параметры являются профильными, в то время как эксплуатационные свойства зависят больше от топографических характеристик, определяемых усреднением параметров по площади. Они предлагают использовать для

описания микрогеометрии вероятностные функции, такие как: плотности вероятности, автокорреляционная и спектральная. Что позволяет получить более объективную и достоверную информацию о микротопографии поверхности после ДПГИ.

Толщина наносимого покрытия заметно разнится в каждой работе, но по проанализированным данным видно, что данный способ позволяет наносить довольно широкий диапазон толщин покрытий, начиная от 2-5 мкм и заканчивая покрытиями в районе 1000 мкм. Так же способ позволяет наносить различные покрытия по типу структуры: объемно-аморфные, нанокристаллические, субмикрозернистые, ультрамелкозернистые и мелкозернистые. Авторы рассмотренных работ делают вывод, что основной эффект процесса ДПГИ заключается в создании равновесной шероховатости. А при нанесении тонких антифрикционных покрытий, они предотвращают интенсивный износ во время приработки деталей пар трения, но сами истираются в начальный период времени.

По проанализированной литературе можно сделать вывод о необходимости точного поддержания технологических параметров процесса в довольно узком диапазоне значений, для получения стабильно высокого качества наносимых покрытий. А также правильный выбор режимов обработки, которые не будут приводить к быстрому выходу гибкого инструмента из строя при его усталостном разрушении. Технологические параметры процесса изменяются под воздействием различных возмущающих факторов, таких как естественный износ ворса щетки (истирание), тепловые деформации и случайные возмущающие факторы. Дальнейшее исследование данных проблем требует разработки методики точного расчета параметров процесса, которая позволит предложить методы, способствующие снижению отклонений режимов в процессе обработки от заданных.

## 2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДПГИ

Различные подходы к разработке моделей расчета параметров процесса деформационного плакирования гибким инструментом в различных работах определяется их авторами в зависимости от исходных предположений о характере взаимодействия гибких элементов проволоочного инструмента с обрабатываемой поверхностью изделия и допущениями, которые заложены ими в расчетную схему (рис. 2.1).

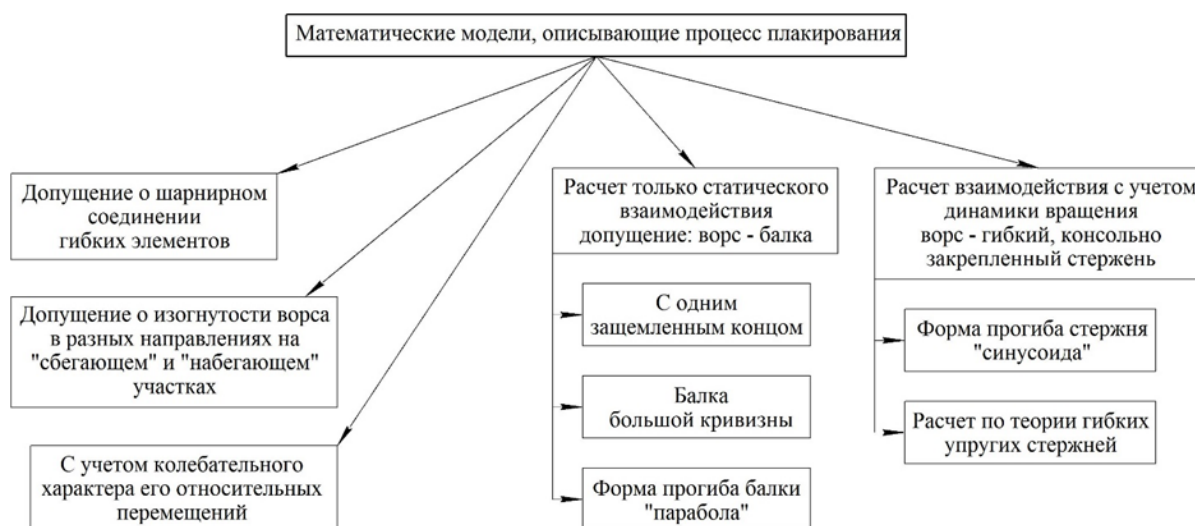


Рисунок 2.1 – Классификация математических моделей расчета основных параметров процесса ДПГИ

Так, например, авторы методики [19] Проскуряков Ю.Г., Ершов В.С. сделали допущение, что ворс механической щетки закреплен шарнирно, в то время как для процесса плакирования используется гибкий инструмент с жесткой заделкой проволоочных элементов. Что делает невозможным использование данной методики для расчета параметров процесса плакирования.

Автор работы [20] Ершов В.С. предполагает, при расчете геометрических параметров процесса, что ворс щетки на «набегающем» и «сбегающем» участках зоны контакта изогнут в противоположные стороны, как было бы при статическом прижатии гибких элементов к обрабатываемой поверхности. Данная модель так же не подходит для определения параметров процесса плакирования, так как в реальности ворс гибкого инструмента изгибается во время вращения щетки только в одну, противоположную вращению, сторону.

Исследователи в работах [18] рассматривают ворс механической щетки как упругую балку при статическом взаимодействии с поверхностью. Авторы представляют ворс, как балку с одним жестко защемленным концом, к которой приложена статическая нагрузка. В работе [17] гибкий элемент (ворс щетки) рассматривается как параболически изогнутая балка, имеющая жесткое закрепление на одном конце. В данном случае математическая модель основана на решении уравнения изогнутой оси металлического ворса в виде параболы. Похожий подход использовался и в работе [20], в которой изогнутые гибкие элементы, находящиеся в контакте с обрабатываемой поверхностью, рассматриваются в виде балок с большими прогибами. В рассмотренных моделях процесса обработки щетками никак не учтен ударный характер взаимодействия гибких элементов проволочного инструмента с обрабатываемой поверхностью детали. Также не учтено увеличение силы взаимодействия ворса щетки с поверхностью детали за счет кинетической энергии вращения инструмента, хотя давления, возникаемые в зоне обработки, будут значительно больше при динамическом воздействии, чем при статическом.

В работах [1, 17] Кургузовым Ю.И. была разработана методика, учитывающая больше аспектов процесса деформационного плакирования, чем в рассмотренных ранее работах. В них форма изгибающейся части металлического ворса определена синусоидой, что было получено на основе экспериментальных данных; в ней учтен так же характер ударной обработки.

Эта методика успешно развита в работе [1] Анцуповым В.П., в которой предложены математические модели, описывающие процесс плакирования для вогнутых цилиндрических и плоских поверхностей. Методики [1, 18] определения геометрических и силовых параметров гораздо точнее своих предшественников, но они и дальше продолжали свое развитие. В работе [5] автором рассмотрено взаимодействие гибкого ворса с поверхностью детали и ЭМП не как сухое трение твердых тел, в связи с чем, было получено более полное описание процесса взаимодействия инструмента с деталью.

Однако, автором [21] Зотовым А.В. представлена еще более точная математическая модель, основанная на теории гибких упругих стержней. Данная модель позволяет рассчитать с высокой точностью не только силы взаимодействия, вращающие моменты и величину прогибов ворса, но также и напряжения, возникающие в ворсе.

Одной из последних работ является [22], где автором Леванцевичем М.А. разработана, отличающаяся от остальных, математическая модель, описывающая процесс плакирования с точки зрения сплошности получаемого при обработке покрытия. Данная модель описывает колебательный характер относительных перемещений металлического ворса проволочного инструмента с момента его входа в зону контакта с обрабатываемой деталью и на протяжении всего времени контактирования. Максимченко Н.Н. проверена созданная им методика расчета параметров процесса плакирования для получения необходимой сплошности наносимого покрытия.

Для определения параметров процесса деформационного плакирования будем использовать наиболее точную методику, разработанную Зотовым А.В.

При моделировании будем 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  $\eta_\phi \leq 0,2$ . Фактический коэффициент заполнения рабочей поверхности определяется по формуле:

$$\eta_\phi = \frac{n_\phi d_\phi^2}{8BR_{\text{щ}}}, \quad (2.1)$$

где  $n_\phi$  - общее количество проволок на периферийной поверхности щетки;  $d_\phi$  - диаметр, мм;  $R_{\text{щ}} = l_{\text{И}} + r_3$  - радиус щетки, мм;  $B$  - ширина щетки, мм;  $l_{\text{И}}$  - длина изгибающейся части, мм;  $r_3$  - радиус фиктивной заделки, мм.

Удар гибкого элемента по поверхности обрабатываемого изделия считаем абсолютно неупругим, который характеризуется активным этапом, в конце которого скорость проволоочки становится равной нулю, т.е. считаем, что кинетическая энергия ударяющей массы переходит в потенциальную энергию ее деформации. Тогда сила удара гибкого элемента, возникающая на конце проволоочки в момент соприкосновения с обрабатываемой поверхностью направлена согласно [21] перпендикулярно к ее оси и определяется по формуле:

$$P_{\text{yi}} = g^2 \cdot \frac{V_{\text{ок}}}{R_{\text{щ}} \cdot l_{\text{И}}^2} \cdot \sqrt{m \cdot \left[ R_{\text{щ}}^3 - R_{\text{щ}}^2 - l_{\text{И}}^3 \right] \cdot E \cdot J}, \quad (2.2)$$

где  $g$  - коэффициент, учитывающий динамику вращения проволочного инструмента;  $V_{\text{ок}}$  - окружная скорость, м/с;  $m$  - масса, кг;  $E$  - модуль упругости, Па;  $J$  - осевой момент инерции, мм<sup>4</sup>.

Скольжение сжато-изогнутого ворса по поверхности обрабатываемого изделия оказывает существенное влияние при разработке оптимальных режимов плакирования.

Для обеспечения требуемого качества обрабатываемой поверхности необходим выбор оптимальных режимов обработки что, предполагает необходимость определения сил в зоне контакта (рис. 2.2).

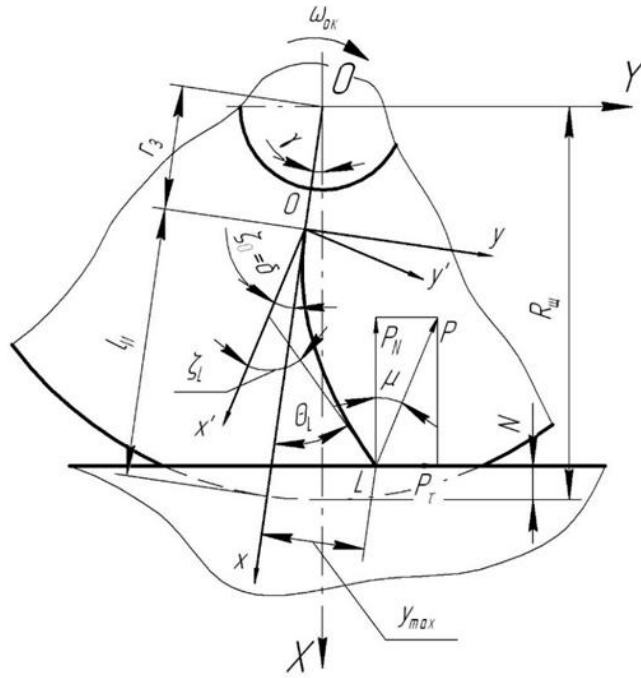


Рисунок 2.2 – Контакт с плоской поверхностью

В точке  $L$  нету изгибающего момента, то значение кривизны в этой точке будет равно нулю:

$$\chi_L = \frac{M_L}{EJ} + \chi_0 = 0, \quad (2.3)$$

где  $\chi_L$  - кривизна;  $\chi_0$  - начальная кривизна;  $M_L$  - изгибающий момент, Н·м.

Значит точка  $L$  будет точка перегиба. Тогда, для нашего случая, мы получим зависимости:

$$\omega_L = 0,$$

$$2k \cos \psi_L = 0 \Rightarrow \psi_L = 90^\circ, \quad (2.4)$$

$$\beta = F(\psi_L) - F(\psi_0),$$

где  $\omega_L$  - моментный коэффициент подобия;  $k = \sin(\zeta/2)/\sin \psi$  - модуль эллиптического интеграла;  $\zeta = \vartheta + \delta$  - угловой коэффициент подобия;  $\delta$  - угол наклона оси, град;  $\psi_L$  - амплитуда эллиптического интеграла;  $\beta$  - силовой

коэффициент подобия;  $F(\psi_0)$  - эллиптический интеграл Лежандра первого рода;  $F(\psi_L)$  - полный эллиптический интеграл Лежандра первого рода.

Коэффициент трения  $f$  на всей зоне контакта примем постоянным, тогда и угол трения  $\mu = \arctg(f)$  будет постоянен, что говорит о постоянстве направления вектора силы  $P$ .

Угловой коэффициент подобия для точки  $o$  (рис. 2.2):

$$\zeta_{oi} = \mu \pm |\gamma_i|, \quad (2.5)$$

где  $\gamma_i$  - угол, определяющий положение элемента, град.

Угол входа определим из выражения:

$$\gamma_{ex} = \arccos \frac{R_{III} - N}{R_{III}}, \quad (2.6)$$

где  $N$  - натяг ворса, мм.

Условие, для нашей схемы нагружения:

$$\sin \frac{\zeta_0}{2} \leq k \leq 1, \quad \frac{\zeta_0}{2} \leq \alpha \leq 90^\circ. \quad (2.7)$$

Модулярный угол эллиптического интеграла на входе:

$$\alpha_{ex} = \frac{\mu + \gamma_{ex}}{2}. \quad (2.8)$$

Координаты точки  $L$  в подвижной системе координат  $хоу$  (рис. 2.1):

$$\begin{aligned} x_{Li} &= \left[ \left( \frac{2}{\beta} \mathbf{E}(\psi_{Li}) - E(\psi_{0i}) - 1 \right) \cos(\zeta_{0i}) + \frac{2}{\beta} k_i \cos(\psi_{0i}) \sin \mathbf{\zeta}_{0i} \right] \cdot l_{II} \\ y_{Li} &= \left[ \frac{2}{\beta} k_i \cos(\psi_{0i}) \cos \mathbf{\zeta}_{0i} - \left( \frac{2}{\beta} \mathbf{E}(\psi_{Li}) - E(\psi_{0i}) - 1 \right) \sin \mathbf{\zeta}_{0i} \right] \cdot l_{II}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

где  $E(\psi_0)$  - эллиптический интеграл Лежандра второго рода;  $E(\psi_L)$  - полный эллиптический интеграл Лежандра второго рода.

Наибольшее значение координаты  $y_{Li}$  (2.9) является максимальным прогибом ворса  $y_{max}$  (рис. 2.2).

Для того чтобы связать подвижную  $xOy$  и неподвижную  $XOY$  системы координат составим уравнения координат точки  $L$  в неподвижной системе координат и уравнение поверхности (рис. 2.2):

$$X_L = R_{III} - N,$$

$$X_L = x_{Li} \cos \varphi_i - y_{Li} \sin \varphi_i,$$

$$Y_{Li} = y_{Li} \cos \varphi_i + x_{Li} \sin \varphi_i.$$
(2.10)

Методика расчета параметров зоны контакта при плакирования цилиндрических поверхностей основана на методике расчета параметров для изделий плоской формы.

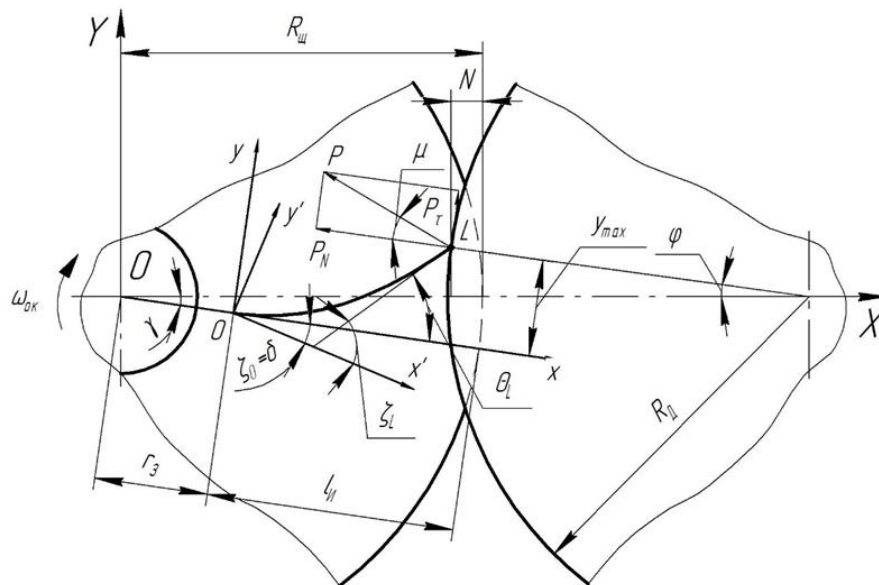


Рисунок 2.3 – Контакт с цилиндрической поверхностью

Исключение составляют следующие зависимости:

- Угловой коэффициент подобия в точке  $o$  (рис. 2.3):

$$\zeta_{oi} = \mu \pm |\gamma_i| \pm |\varphi_i|,$$
(2.11)

где  $\gamma_i$  - угол, определяющий положение гибкого элемента в зоне контакта, град;  $\varphi_i$  - угол, определяющий положение гибкого элемента в зоне контакта на окружности детали, град.

- Угол входа:

$$\gamma_{ex} = \arccos \frac{R_{щ}^2 + (R_{щ} + R_{д} - N)^2 - R_{д}^2}{2 \cdot R_{щ} \cdot (R_{щ} + R_{д} - N)}, \quad (2.12)$$

где  $N$  - натяг, мм;  $R_{щ}$  - радиус щетки, мм;  $R_{д}$  - радиус детали, мм.

- Координаты для точки  $L$  в подвижной системе  $хоу$  (рис. 2.3):

$$\begin{aligned} x_{Li} &= \left[ \left( \frac{2}{\beta} E(\psi_{Li}) - E(\psi_{oi}) - 1 \right) \cos(\zeta_{oi}) + \frac{2}{\beta} k_i \cos(\psi_{oi}) \sin \zeta_{oi} \right] \cdot l_{II} \\ y_{Li} &= \left[ \frac{2}{\beta} k_i \cos(\psi_{oi}) \cos \zeta_{oi} - \left( \frac{2}{\beta} E(\psi_{Li}) - E(\psi_{oi}) - 1 \right) \sin \zeta_{oi} \right] \cdot l_{II}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

где  $E(\psi_o)$  - эллиптический интеграл Лежандра второго рода;  $E(\psi_L)$  - полный эллиптический интеграл Лежандра второго рода.

- Уравнения связи подвижной  $хоу$  и неподвижной  $ХОУ$  систем координат:

$$\begin{aligned} (R_{щ} + R_{д} - N - X_{Li})^2 + Y_{Li}^2 &= R_{д}^2, \\ X_{Li} &= R_{щ} + R_{д} - N - \sqrt{R_{д}^2 - (r_3 + x_{Li}) \sin \zeta_i + y_{Li} \cos \zeta_i}, \\ Y_{Li} &= \pm \sqrt{N - R_{щ} + A} \cdot \sqrt{N - R_{щ} - 2R_{д} + A} \cdot i. \end{aligned} \quad (2.14)$$

где  $A = (r_3 + x_{Li}) \cos \zeta_i - y_{Li} \sin \zeta_i$ .

Теперь, имея в наличии, все нижеприведенные зависимости, мы можем определить распределение контактной силы  $P_i$ , изгибающего момента  $M_i$ , напряжений изгиба  $\sigma_i$  проволоочки, используя силовой  $\beta$  и моментный  $\omega_L$  коэффициенты подобия (2.14):

$$P_{Li} = \beta_i^2 \frac{EJ}{l_{II}^2} g^4, \quad (2.15)$$

где  $g$  - коэффициент динамики вращения инструмента.

Изгибающий момент  $M_i$ , действующий на конец  $i$ -го гибкого элемента, определим как:

$$M_i = \frac{\omega_i}{\beta_i} \cdot P_{Li} \cdot l_{II}, \quad (2.17)$$

Максимальные напряжения, производим по формуле:

$$\sigma_{\max i} = \frac{\omega_i}{\beta_i} \cdot P_{\max i} \cdot l_{II} \cdot \frac{d_e}{2J}, \quad (2.18)$$

где  $P_{\max i}$  – максимальная сила на участке скольжения, Н.

Зная моменты  $i$ -тых элементов (2.17), найдем суммарный вращающий момент в зоне контакта:

$$M = \sum_{i=1}^k M_i \cdot \frac{B}{d_B} \cdot 1000, \quad (2.19)$$

Мощность двигателя инструмента, расходуемая в процессе плакирования с учетом (2.14) определим соотношением:

$$N_{\partial\partial} = N_{\partial} + N_{\text{эмп}}, \quad (2.20)$$

где  $N_{\partial} = M \cdot V_{\text{ок}} / R_{\text{иц}}$  – мощность двигателя, в зоне плакирования, Вт;  
 $N_{\text{эмп}}$  – мощность двигателя, в зоне контакта с ЭМП, Вт.

Мощность сил трения скольжения, расходуемая на нагрев:

$$N_{\text{тр}} = \bar{P} \cdot \bar{V}, \quad (2.21)$$

где  $\bar{P}$  – среднеарифметическое значение сил, Н;  $\bar{V}$  – среднеарифметическое значение скоростей, м/с.

Для пояснения методики вычисления параметров модели (при обработке плоских деталей) разработан алгоритм, схема которого представлена на рис. 2.4.

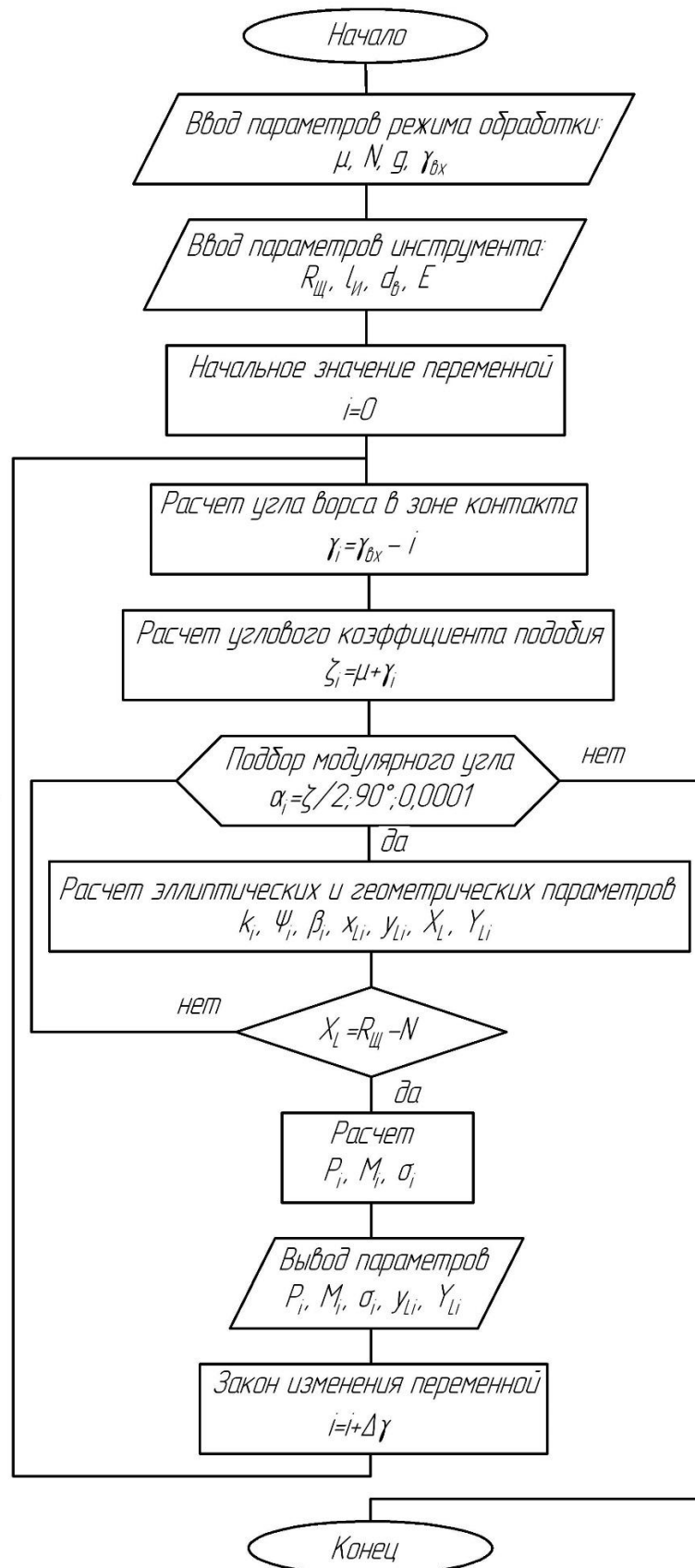


Рисунок 2.4 – Структурная схема при обработке плоских изделий

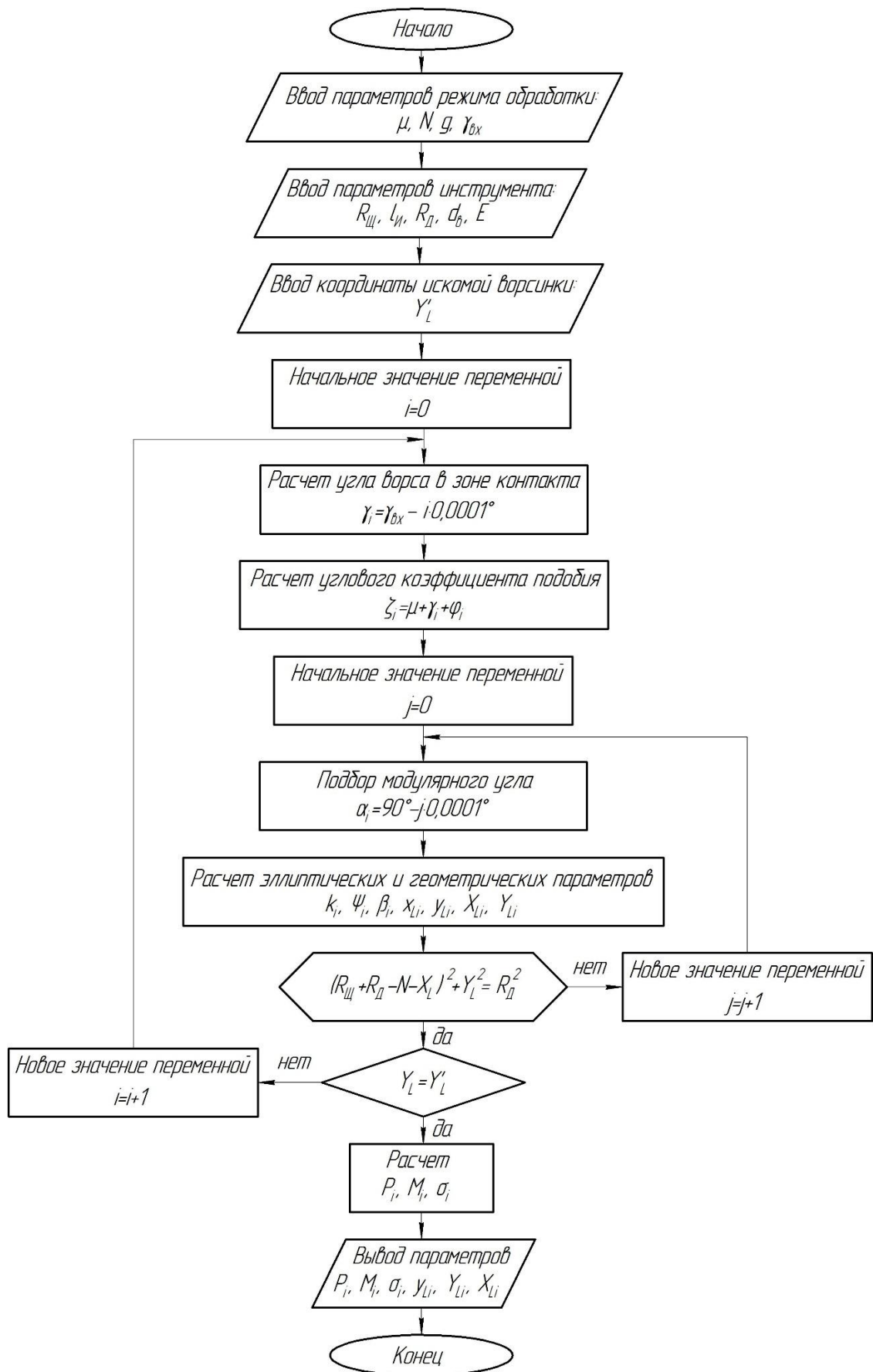


Рисунок 2.5 – Структурная схема при обработке цилиндрических изделий

Для пояснения методики вычисления параметров модели (при обработке цилиндрических деталей) был создан алгоритм, структурная схема которого представлена на рис. 2.5.

В соответствии с данным алгоритмом осуществляется ввод необходимых параметров режима обработки, характеристик гибкого инструмента и координаты искомой ворсинки  $Y'_L$ . Затем, для первого из значений угла  $\gamma_i$ , определяющего положение гибкого элемента в зоне контакта, с помощью цикла производится подбор угла  $\alpha_i$  (начальное значение угла в цикле  $90^\circ$ , подбор производится уменьшением заданного угла с шагом  $0,0001^\circ$  до выполнения условия  $(R_{щ} + R_d - N - X_{Li})^2 + Y_{Li}^2 = R_d^2$ ). Проверяется выполнение условия равенства заданной координаты искомой ворсинки  $Y'_L$  и рассчитанной координаты  $Y_L$ . После чего  $\gamma_i$  уменьшается на величину шага  $0,0001^\circ$  и цикл повторяется вновь. Так продолжается до выполнения условия  $Y'_L = Y_L$ . При совпадении  $Y'_L$  и  $Y_L$  прекращается перебор значений  $\gamma_i$  и производится расчет требуемых параметров: контактной силы на участке скольжения  $P_{Li}$ , изгибающего момента  $M_i$ , напряжений изгиба  $\sigma_i$ , максимального прогиба ворса щетки  $y_{max}$  и т. д. Производится вывод результатов расчета.

После разработки алгоритмов расчета ключевых характеристик процесса возникает необходимость экспериментальной проверки полученных данных.

### 3 АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПЛАКИРОВАНИЯ

Для проверки достоверности выбранных моделей проводим анализ в программе реализующей расчет с помощью метода конечных элементов. Моделирование проведено для диапазона параметров:  $N=1,5$  мм,  $d=0,2$  мм,  $R=100$  мм,  $l=20-100$  мм.

Рассчитываем силу, возникающую в контакте гибкого инструмента с поверхностью детали, прогибы ворса, напряжения, возникающие в ворсе, используя разработанную математическую модель. Данные представлены в приложении.

Создаем 3D модель ворсинки в CAD системе.

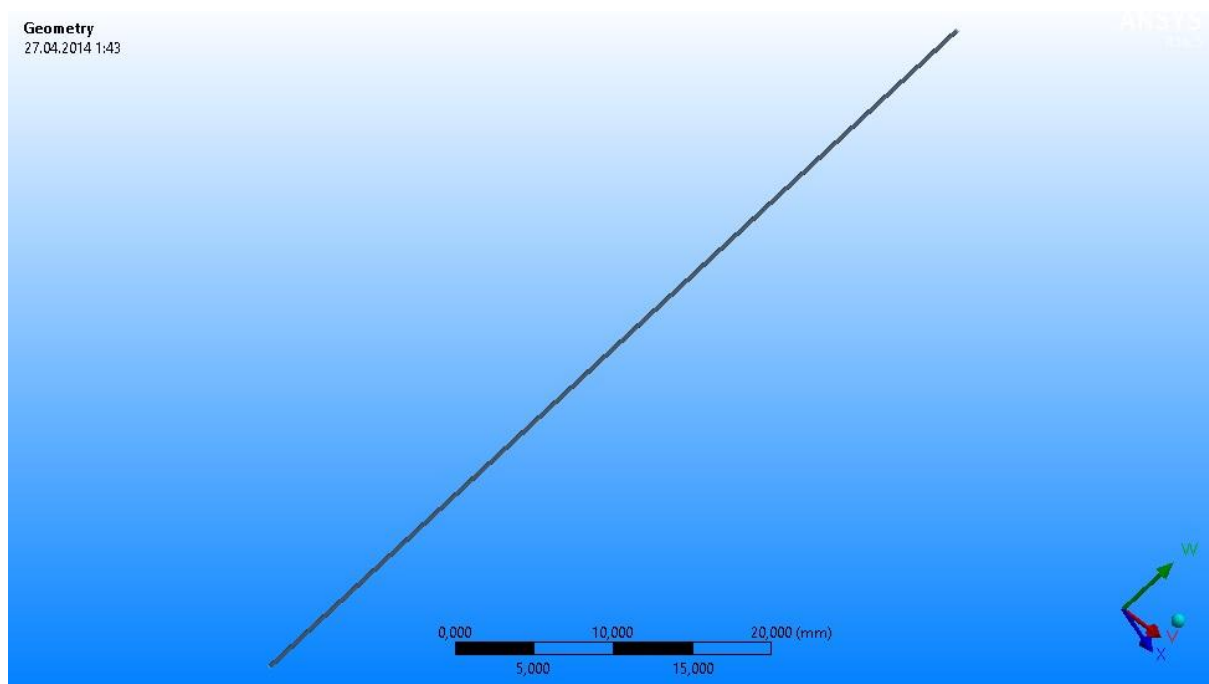


Рисунок 3.1 – 3D модель ворсинки

Импортируем 3D модель в САЕ пакет и задаем параметры сетки.

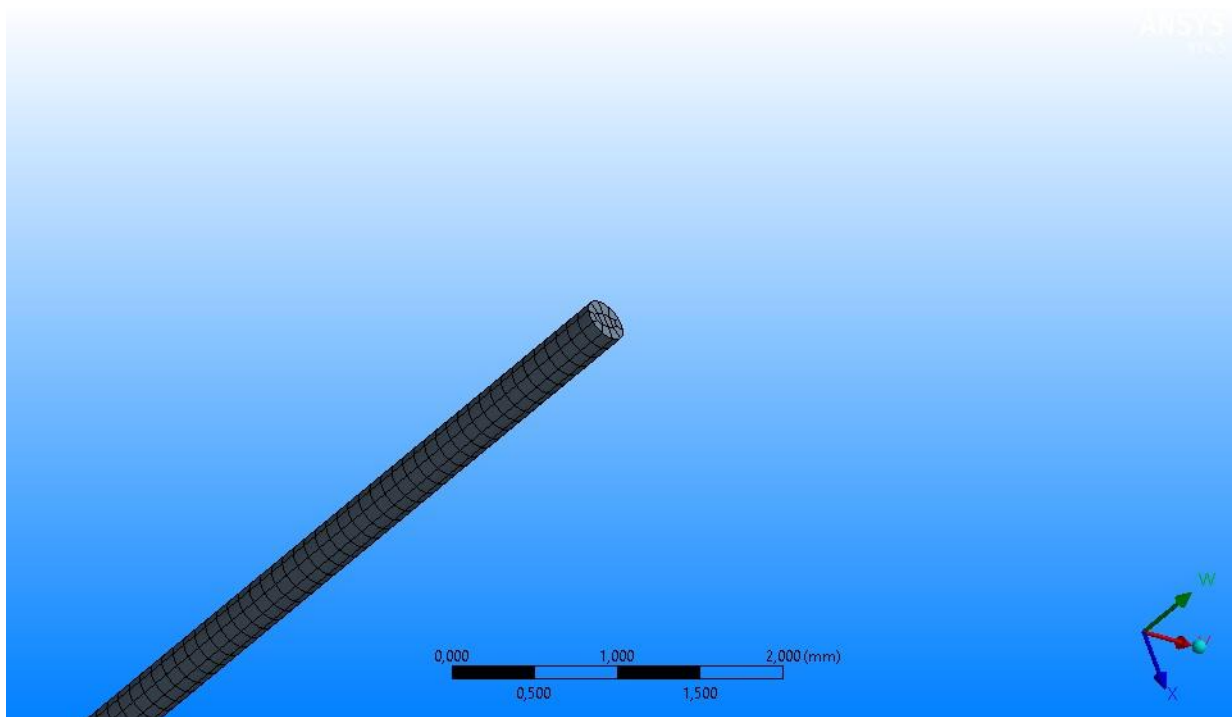


Рисунок 3.2 – Создание сетки

Задаем внешние ограничения и прикладываем рассчитанную ранее силу.

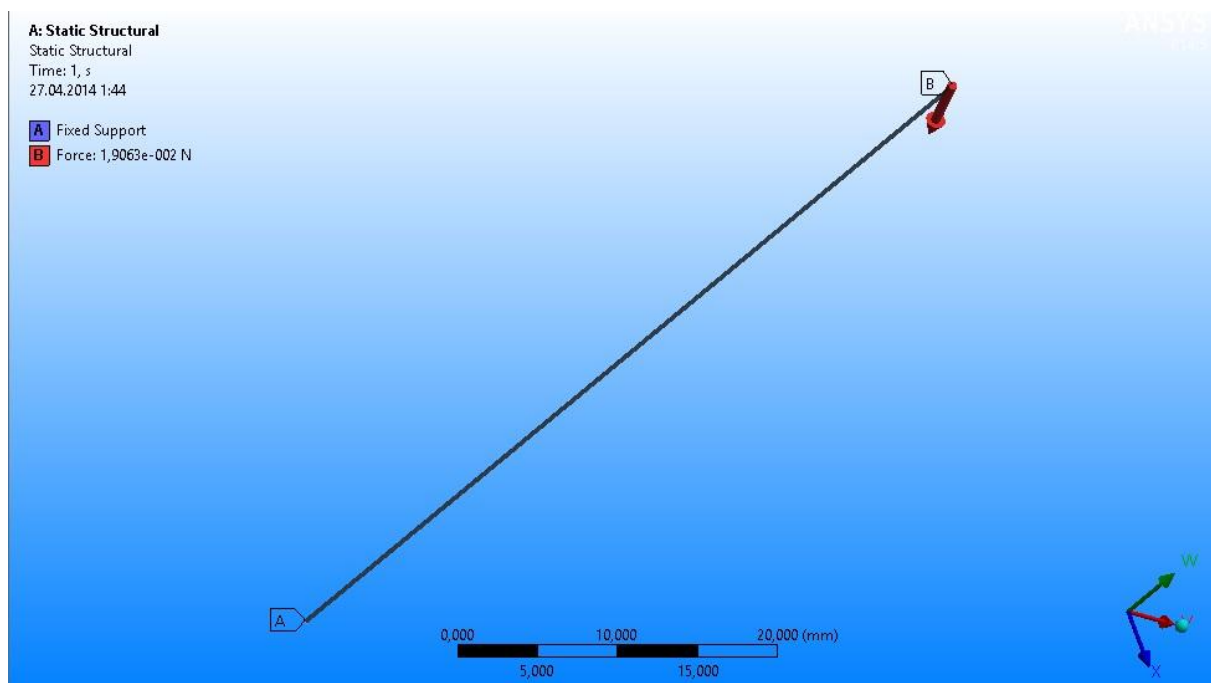


Рисунок 3.3 – Параметры моделирования

Проводим моделирование и получаем результаты напряжений, возникающих в ворсе и прогибов ворса.

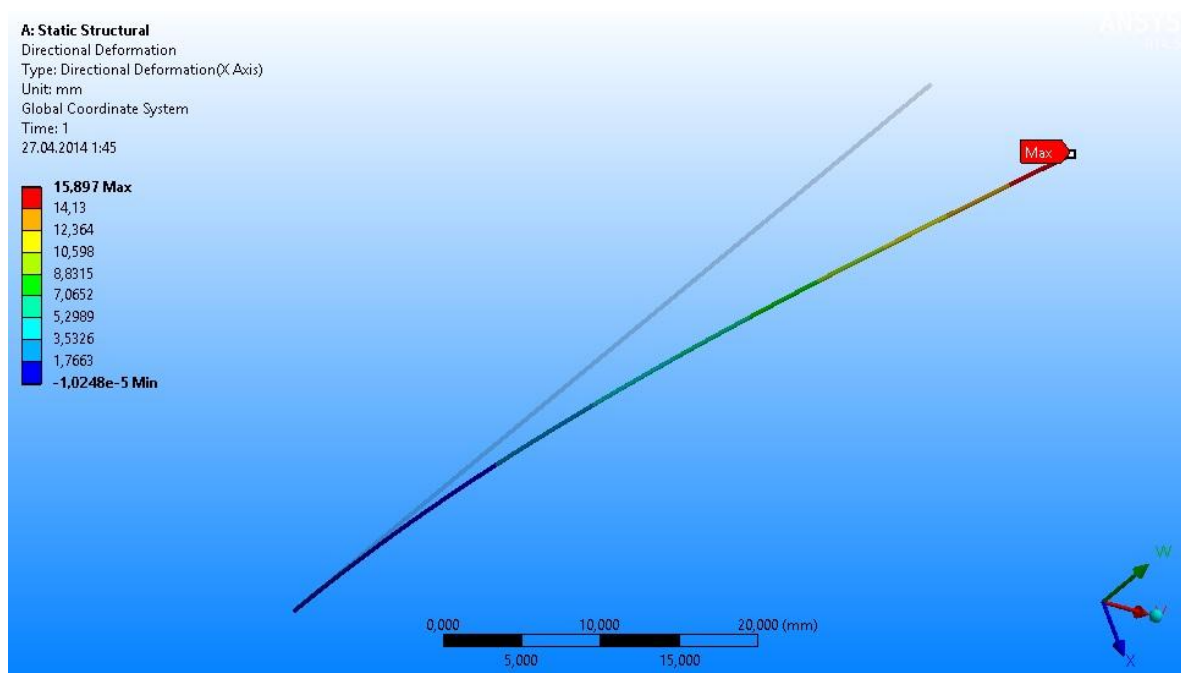


Рисунок 3.4 – Прогибы ворса

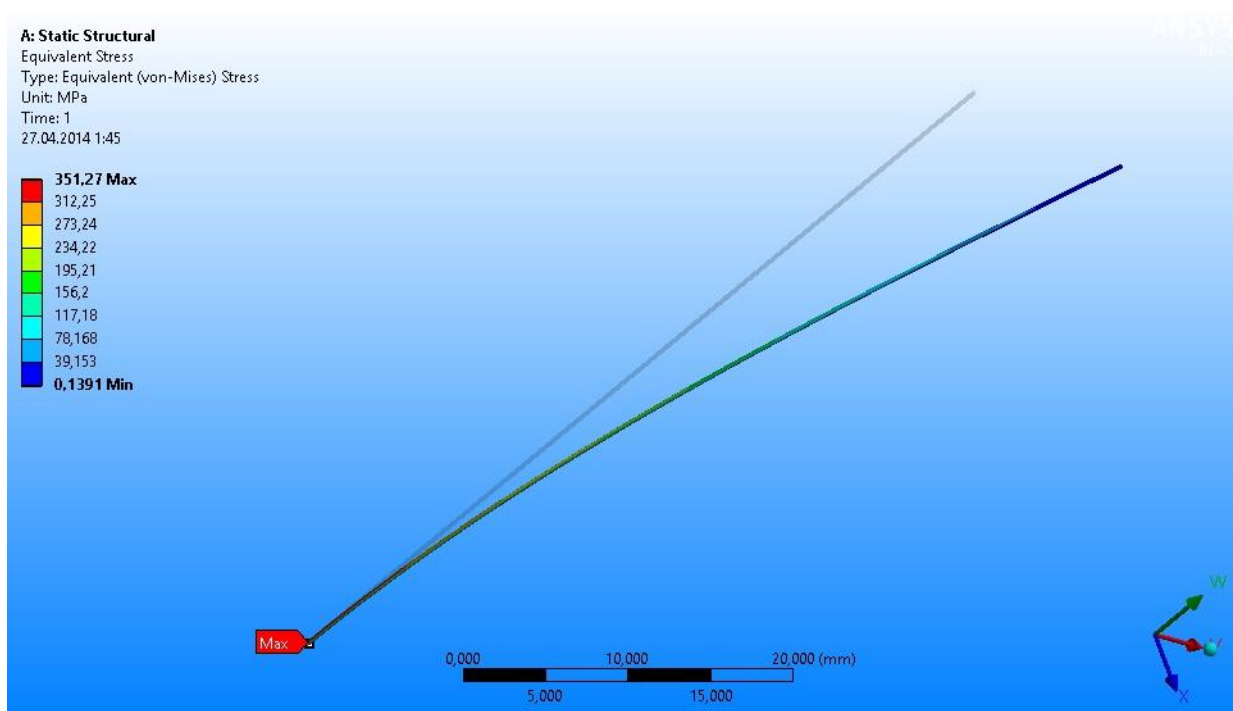


Рисунок 3.5 – Напряжения, возникающие в ворсе

Проводим моделирование для всех рассчитанных значений и получаем результаты прогибов, возникающих в ворсе напряжений и вычисляем процент ошибки расчетов.

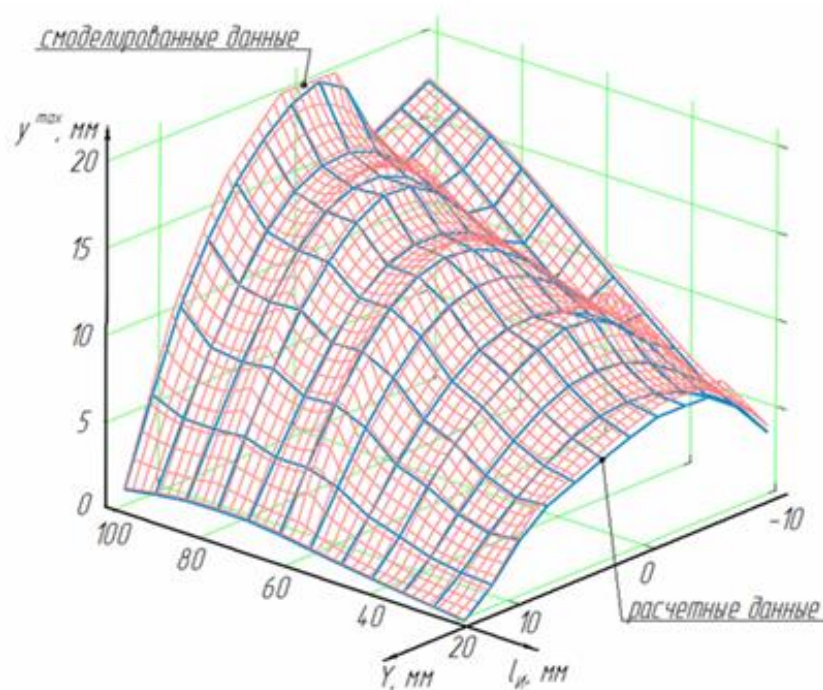


Рисунок 3.6 – Максимальные прогибы ворса

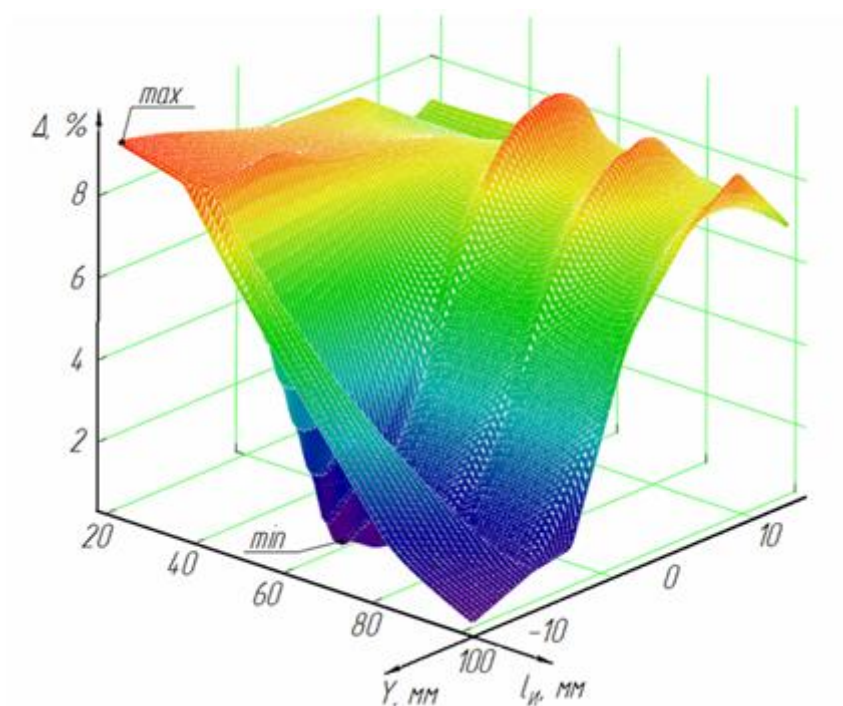


Рисунок 3.7 – Ошибка определения максимальных прогибов ворса

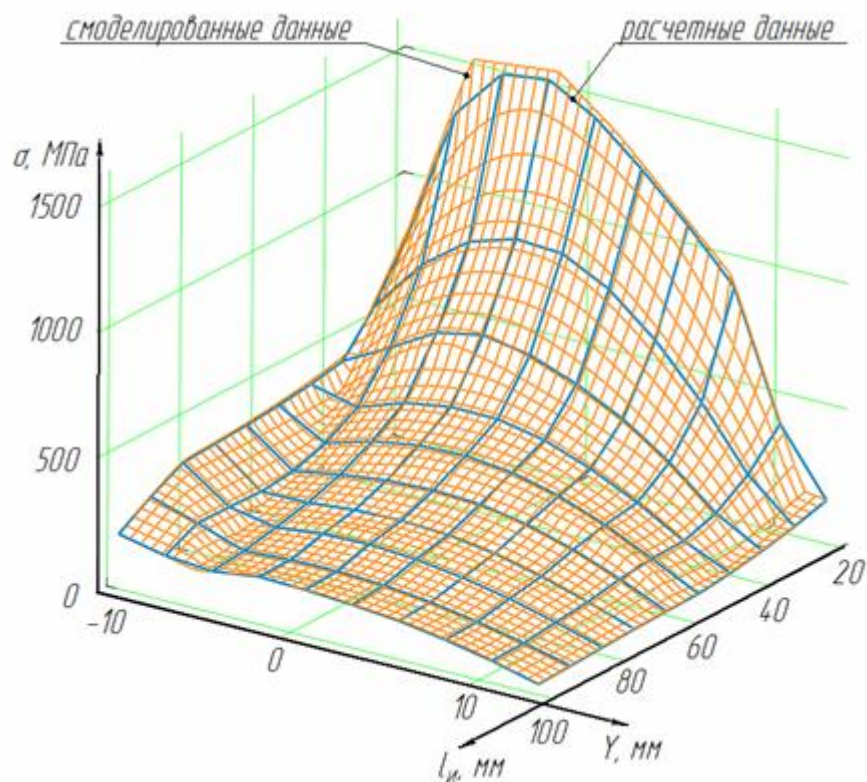


Рисунок 3.8 – Максимальные напряжения, возникающие в ворсе при обработке плоской поверхности

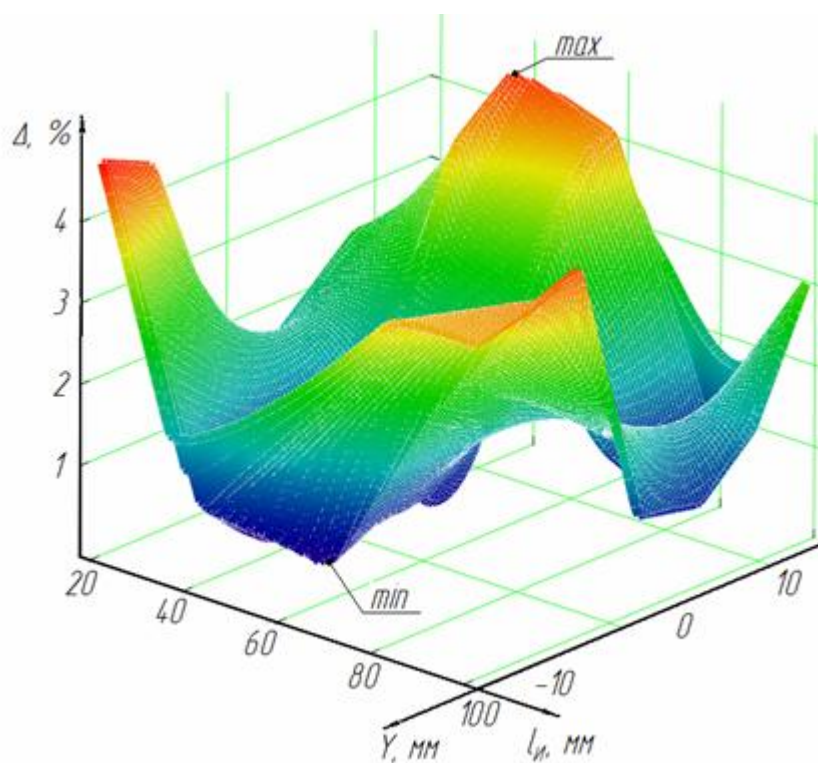


Рисунок 3.9 – Ошибка определения максимальных напряжений, возникающих в ворсе при обработке плоской поверхности

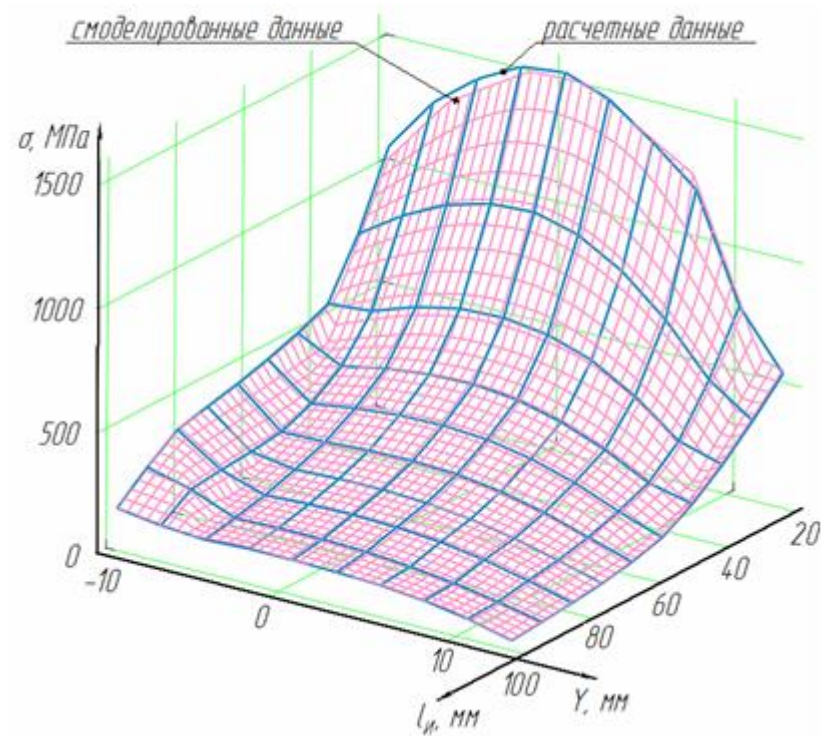


Рисунок 3.10 – Максимальные напряжения, возникающие в ворсе при обработке цилиндрической поверхности

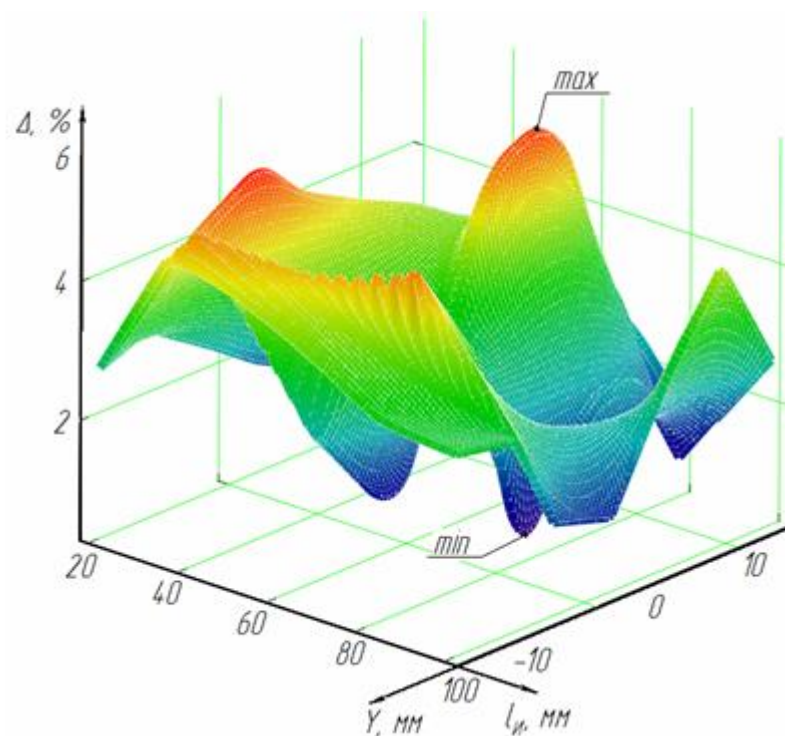


Рисунок 3.11 – Ошибка определения максимальных напряжений, возникающих в ворсе при обработке цилиндрической поверхности

Результаты проверки максимальных прогибов показывают средний процент ошибки в расчетах в районе 5-6%, а максимальных напряжений, возникающих в ворсе в районе 2-4%, что говорит о высокой степени корреляции расчетных и экспериментальных данных и об адекватности разработанной модели.

Вывод о том, какую модель расчета используем, потому что она точнее. Для проверки адекватности полученной модели необходимо ее экспериментальное подтверждение.

## 4 МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ И МАТЕРИАЛА ВОРСА ГИБКОГО ИНСТРУМЕНТА

Применение нерациональных режимов обработки влияет и на ресурс гибкого инструмента и на достижение параметров качества поверхностного слоя (величина остаточных напряжений, степень использования запаса пластичности, толщина наклепанного слоя и т. д.). В первом случае есть опасность преждевременного износа инструмента, во втором – использование повышенных мощностей для достижения требуемых параметров качества поверхностного слоя обрабатываемых изделий.

При усталостном характере разрушения ворса единичная доля стоимости щеток в затратах на обработку может составлять 25...50 %, что делает обработку щетками экономически нецелесообразным [21].

При плакировании используются как однородные материалы покрытия, так и составные. Рассмотрим такой материал покрытия, как оловянная бронза БрОЦС5-5-5, обладающий коррозионной стойкостью, достаточной твердостью, высокими антифрикционными свойствами, малыми значениями коэффициентов трения и хорошей притираемостью в паре, например, со сталью.

Для расчета максимальных напряжений воспользуемся формулой, на основе модели расчета:

$$\sigma_{\max i} = \frac{\omega_i}{\beta_i} \cdot P_{\max i} \cdot l_H \cdot \frac{d_\epsilon}{2J} \quad (4.2)$$

где  $\omega_i$  – моментный коэффициент подобия;  $\beta_i$  – силовой коэффициент подобия;  $P_{\max i}$  – максимальная контактная сила, Н;  $l_H$  – длина изгибающейся части, мм;  $d_\epsilon$  – диаметр, мм;  $J$  – осевой момент инерции, мм<sup>4</sup>.

Для оценки усталостной прочности используем условие:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_r}{k_0 \cdot \alpha_{\kappa.д.} \cdot \alpha_m} = \frac{\sigma_r}{K_r}, \quad (4.3)$$

где  $\sigma_{\max}$  – наибольшее напряжение, МПа;  $\sigma_r$  – предел выносливости, МПа;  $k_0$  – коэффициент запаса;  $\alpha_{\kappa.д.}$  – коэффициент концентрации;  $\alpha_m$  – масштабный коэффициент.

На рис. 4.1 представлена зависимость максимальных напряжений и пределов выносливости, от натяга  $N$  гибкого инструмента к обрабатываемой поверхности ( $\sigma_{\max 1}$ ,  $[\sigma_r]_1$ ), радиуса фиктивной заделки  $r_3$  ( $\sigma_{\max 2}$ ,  $[\sigma_r]_2$ ) и длины изгибающейся части  $l_H$  ( $\sigma_{\max 3}$ ,  $[\sigma_r]_3$ ).

Результаты представлены для условий деформационного плакирования плоских поверхностей (элемент материала покрытия – БрОЦС5-5-5) гибким инструментом с диаметром ворса  $d_e = 0,2$  мм при прочих параметрах:  $r_3 = 100$  мм;  $l_H = 50$  мм;  $N = 1,5$  мм.

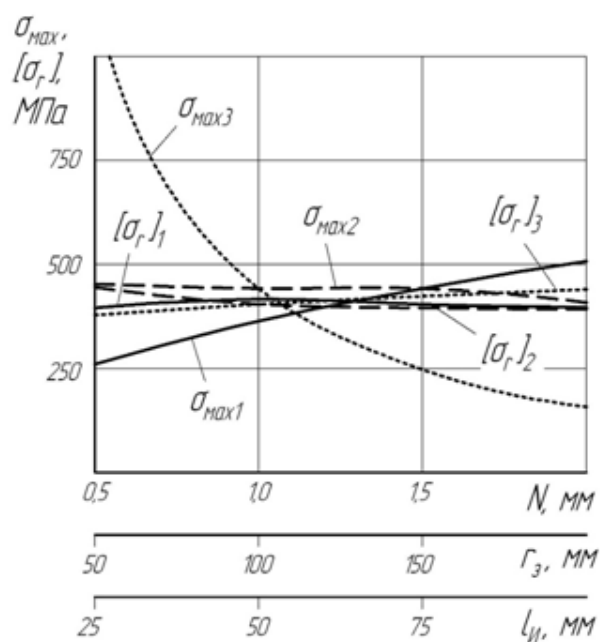


Рисунок 4.1 – Зависимость максимальных напряжений и предела выносливости от параметров инструмента и режимов обработки

Анализ графиков (рис. 4.4) показывает, что при рассматриваемых параметрах гибкого инструмента на данных режимах плакирования

происходит, согласно условию (4.3), усталостное разрушение ворса, и чем дальше график зависимости изгибных напряжений отдалется от предела выносливости, тем быстрее инструмент выйдет из строя.

После анализа полученных данных, была построена номограмма (рис. 4.2), позволяющая на начальном этапе выбора режимов плакирования определить максимальные напряжения, возникающие в ворсе щетки, и рационально подобрать материал ворса гибкого инструмента, или скорректировать режимы обработки, для предотвращения преждевременного износа щетки.

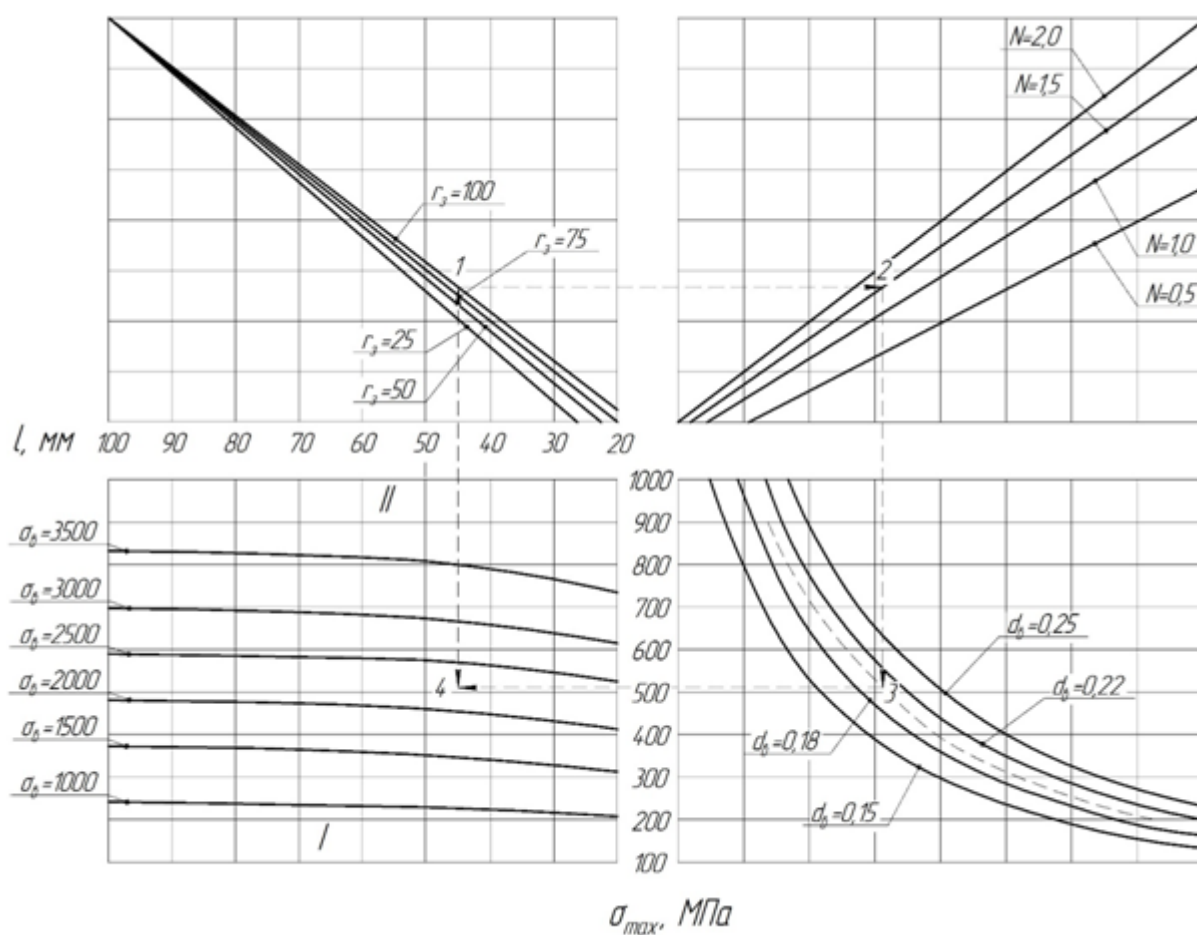


Рисунок 4.2 – Номограмма определения максимальных напряжений и характера износа ворса гибкого инструмента

Предложенная номограмма позволяет оценить максимальные напряжения, возникающие в ворсе проволочного инструмента, при обработке

с заданными условиями и определить его характер износа, где  $I$  – зона естественного износа инструмента,  $II$  – зона усталостного износа.

Пример: по данной номограмме, для  $l_{II} = 45$  мм, выбирая в квадранте 1 –  $r_3 = 100$  мм, во 2 квадранте  $N = 1,5$  мм, в 3 квадранте  $d_g = 0,2$  мм, получаем максимальные напряжения возникающие в ворсе щетки –  $\sigma_{max} = 510$  МПа. В 4 квадранте получаем отметку, позволяющую нам сделать вывод, что естественный износ будет у инструмента, изготовленного из материала с пределом прочности  $\sigma_s \geq 2250$  МПа. Инструмент, с пределом прочности ниже данного значения, будет подвергаться усталостному износу и быстро выйдет из строя.

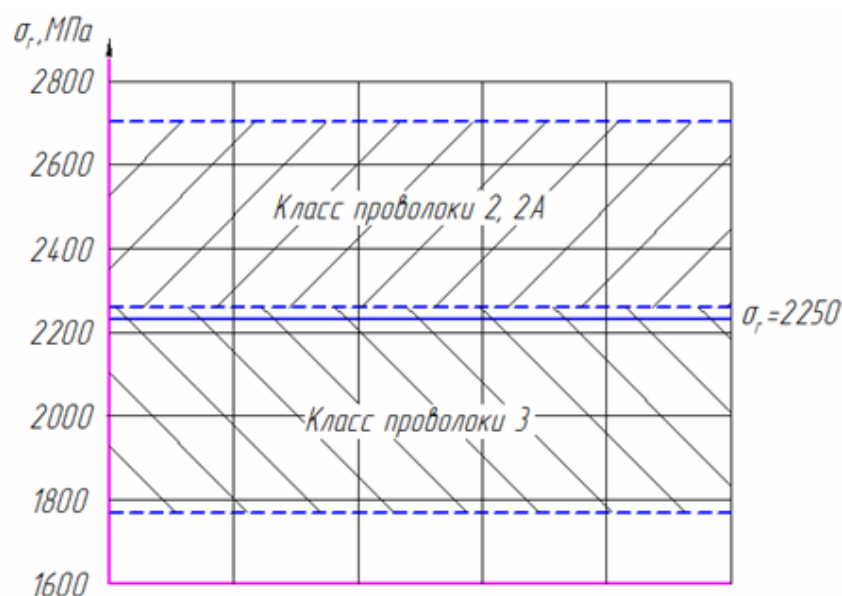


Рисунок 4.3 – Напряжения, возникающие в ворсе щетки и классы пружинной проволоки

То есть, при заданных параметрах обработки щетками целесообразно использовать гибкий инструмент изготовленный, например, из проволоки стальной пружинной 2, 2А классов ( $\sigma_s = 2260$ – $2700$  МПа). Инструмент же из пружинной проволоки 3 класса ( $\sigma_s = 1770$ – $2260$  МПа) использовать нецелесообразно (рис. 4.3), из-за опасности его быстрого выхода из строя, что отрицательно скажется на экономическом эффекте.

## 5 АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЛАКИРОВАНИЯ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

После решения проблемы усталостного разрушения ворса можно приступить к решению проблемы поддержания технологических параметров на заданном уровне в процессе обработки. Этого можно добиться автоматизацией процесса обработки (разработки системы управления).

Использование в качестве выходной координаты процесса деформационного плакирования силы, возникающей при контакте гибкого элемента с обрабатываемым изделием наиболее предпочтительно для построения адаптивных систем управления, т.к. контактная сила в достаточной мере характеризует процесс плакирования плоских поверхностей деталей. Однако измерение силы в зоне контакта при плакировании является достаточно сложной задачей и осуществляется большей частью в экспериментально-исследовательских целях на станочном оборудовании, специально приспособленном для таких испытаний [23].

В этой связи для разработчиков САУ представляет интерес использование энергетических параметров обработки, которые, как и силы, возникающие в зоне контакта проволочного инструмента с поверхностью обрабатываемого изделия, дают комплексную информацию о процессе плакирования, характеризую и материал детали, и параметры гибкого инструмента, и производительность обработки.

Для моделирования энергосиловых параметров на участке скольжения сжато-изогнутого ворса по плоской поверхности детали воспользуемся приведенными ранее формулами математической модели.

Контактная сила определяется в каждой точке площади зоны контакта:

$$P_i = \beta_i^2 \frac{EJ}{l_{II}^2} g^4, \quad (5.1)$$

где  $\beta_i$  - силовой коэффициент подобия;  $E$  - модуль упругости, Па;  $J$  - осевой момент инерции площади поперечного сечения, мм<sup>4</sup>;  $l_{II}$  - длина изгибающейся части проволочки, мм;  $g$  - коэффициент, учитывающий динамику вращения проволочного инструмента.

Суммарный вращающий момент в зоне контакта, определяется как сумма моментов  $i$ -тых элементов:

$$M = \sum_{i=1}^k \left( \frac{\omega_i}{\beta_i} \cdot P_i \cdot l_{II} \right) \cdot \frac{B}{d_B}, \quad (5.2)$$

где  $\omega_i$  - моментный коэффициент подобия;  $B$  - ширина гибкого инструмента, мм;  $d_B$  - диаметр ворса, мм.

Мощность двигателя инструмента, расходуемая в процессе плакирования:

$$N_{дв} = N_{пл} + N_{эмп}, \quad (5.3)$$

где  $N_{пл} = M \cdot V_{ок} / R_{ш}$  - мощность двигателя, расходуемая в зоне плакирования, Вт;  $N_{эмп}$  - мощность двигателя, расходуемая в зоне контакта с элементом материала покрытия, Вт.

Во время плакирования изделий величина контактной силы изменяется вследствие различных внешних факторов, что приводит к изменению условий обработки и негативно сказывается на качестве нанесенного покрытия. Поддержание силы на строго определенном уровне в процессе обработки требует больших вычислительных мощностей, вследствие сложности алгоритма ее расчета. Применение микропроцессорной техники и появление мощных однокристальных микро-ЭВМ значительно расширило вычислительные возможности систем управления и открыло хорошие перспективы для использования энергетических параметров в адаптивных циклах [24].

Здесь заслуживает внимания способ управления деформационным плакированием гибким инструментом, который позволяет в числе других

возмущающих факторов, имеющих функциональную составляющую, компенсировать частично и температурные погрешности от нагрева детали в процессе обработки. Его реализация в представлена на рис. 5.1.

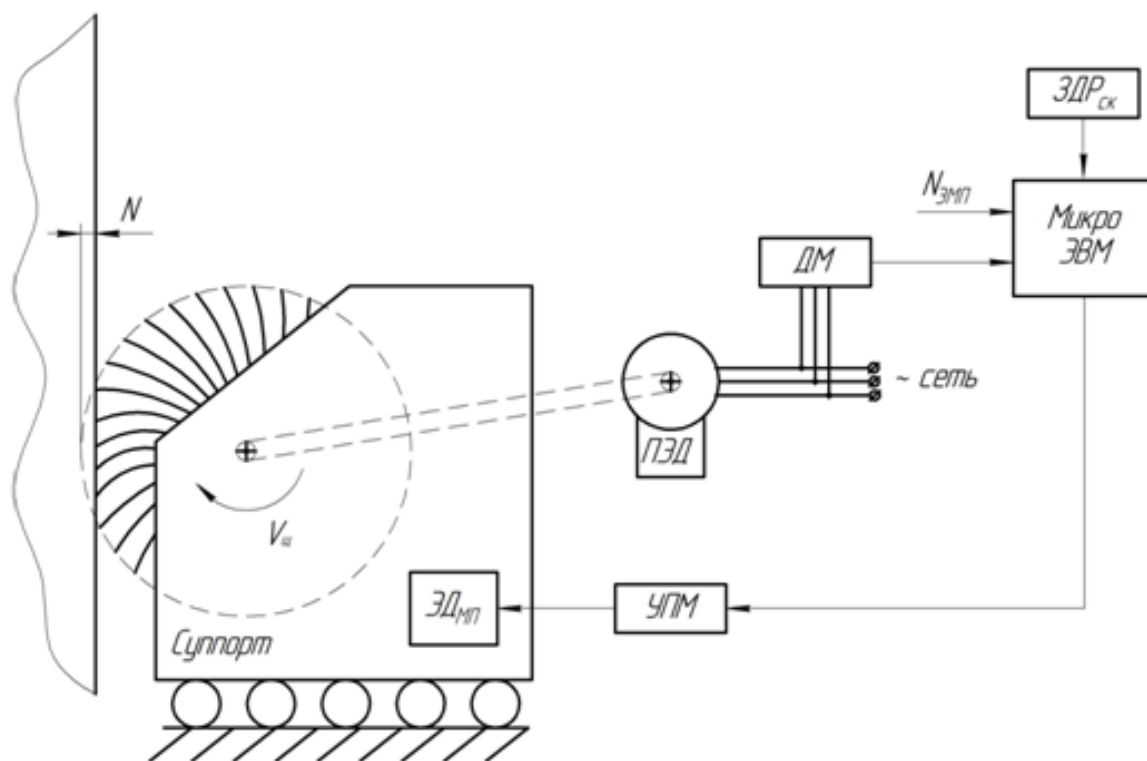
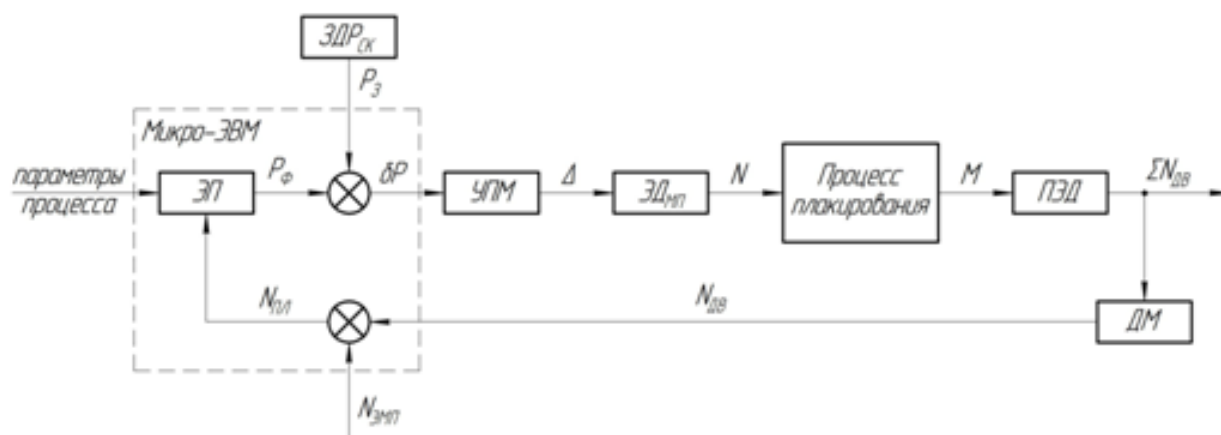


Рисунок 5.1 – Блок-схема адаптивной системы управления процессом плакирования

Управление суппортом, осуществляющим обработку детали, производится с помощью электродвигателя микроперемещений  $ЭД_{МП}$  и управляемого преобразователя мощности  $УПМ$ . Измерение мощности, потребляемой приводным электродвигателем  $ПЭД$  от питающей сети, производится с помощью датчика активной мощности  $ДМ$ . Обработка измерительной информации производится в вычислительном блоке *Микро-ЭВМ*, куда вводится информация о необходимой величине контактной силы задатчиком  $ЗДР_{СК}$  и мощности, расходуемой на процесс трения щетки о поверхность элемента материала покрытия  $N_{ЭМП}$ .

На рис. 5.2 представлена функциональная схема системы управления процессом плакирования.



ЭП – электронный преобразователь;

ЗДР<sub>СК</sub> – задатчик величины контактной силы;

УПМ – управляемый преобразователь мощности;

ЭД<sub>МП</sub> – электродвигатель микроперемещений;

ПЭД – приводной электродвигатель;

ДМ – датчик активной мощности

Рисунок 5.2 – Функциональная схема САУ процессом плакирования

ЭП – электронный преобразователь; ЗДР<sub>СК</sub> – задатчик величины контактной силы; УПМ – управляемый преобразователь мощности; ЭД<sub>МП</sub> – электродвигатель микроперемещений; ПЭД – приводной электродвигатель; ДМ – датчик активной мощности

В системе управления можно выделить прямой канал регулирования – от параметров процесса до общей мощности, потребляемой ПЭД,  $\Sigma N_{ДВ}$  и канал обратной связи – от  $\Sigma N_{ДВ}$  до мощности, расходуемой в зоне плакирования,  $N_{ПЛ}$ . Система сравнивает реальную и заданную контактную силу (5.1) и с помощью ЭД<sub>МП</sub> корректирует натяг при их несоответствии.

Установив такую систему, появляется возможность компенсации динамических и температурных погрешностей обработки, поддержания необходимой контактной силы, и как следствие повышение качества обработки. Предлагаемая модель адаптивной системы управления является основой для дальнейшей разработки более сложных, гибких систем управления, охватывающих большее количество параметров процесса плакирования. Данные системы, оперирующие огромными массивами данных, для обеспечения высокой производительности заставляют обращаться к разработке новых принципов и средств обработки информации. Среди которых, особое внимание привлекают оптические методы или точнее методы электронно-оптической обработки информации с применением ЭВМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был рассмотрен сравнительно новый способ поверхностной обработки - деформационное плакирование гибким инструментом.

1. Для выявления вопросов, требующих более глубокого рассмотрения, был проведен литературно-патентный обзор. В качестве приоритетных были выбраны направления: вопросы повышения стойкости проволочного инструмента и вопросы автоматизации процесса плакирования для предотвращения воздействия внешних факторов на процесс нанесения покрытия.

2. Была предложена математическая модель расчета геометрических и энергосиловых параметров процесса обработки деталей плоской и цилиндрической формы механическими вращающимися щетками. Полученная модель была подвергнута проверке с помощью компьютерного моделирования и показала высокую степень корреляции с смоделированными данными. Разработан алгоритм для расчета для геометрических и силовых параметров процесса плакирования.

3. Разработана методика и номограммы для определения максимальных напряжений и зоны допустимых напряжений, возникающих в ворсе проволочного инструмента. По которым производится подбор материала ворса механической щетки. Данный процесс подробно описан и рассмотрен на примере.

4. Для предотвращения воздействия внешних факторов на процесс деформационного плакирования предложена реализация автоматической системы управления на основе микро-ЭВМ.

По данной теме опубликовано 5 статей в рецензируемых научных журналах [23-27] (приложения В-Ж); 1 статья в журнале [28], входящим в перечень рекомендуемых ВАК; получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [29-30].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анцупов, В. П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом : Монография / В. П. Анцупов. – Магнитогорск : МГТУ им. Носова, 1999. – 241 с.
2. А. с. 57162 СССР, МКИ С 23 С 7/00. Способ нанесения металлических покрытий / А. А. Абиндер (СССР). – № 8206 ; заявл. 02.06.37 ; опубл. 31.05.40. – 2 с. : ил.
3. Берсудский, А. Л. Технологическое обеспечение долговечности деталей машин на основе упрочняющей обработки с одновременным нанесением анти-фрикционных покрытий : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук : 05.02.08 / Берсудский Анатолий Леонидович. – Саратов, 2008. – 36 с.
4. А. с. 1285057 СССР, МКИ С 23 С 8/60. Устройство для фрикционно-механического нанесения покрытий / О. В. Чекулаев, Г. В. Симонов, И. А. Зимин, Р. А. Марков (СССР). – № 3885019/22-02 ; заявл. 10.04.85 ; опубл. 23.01.87, Бюл. № 3. – 2 с. : ил.
5. Оншин, Н.В. Исследование коэффициента трения при плакировании деталей гибким инструментом / Н. В. Оншин, Р. Н. Савельева // Процессы и оборудование металлургического производства : сб. науч. тр. – Магнитогорск : МГТУ. – 2001. – С. 70-73.
6. Папшев, Д. Д. Технологические основы повышения надежности и долговечности деталей машин поверхностным упрочнением: Учеб. пособ. / Д. Д. Папшев. – Самара : СГТУ, 1993. – 74 с.
7. Pat. 6025014 United States Patent, IPC B 05 D 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.

8. Pat. 03158477 Japan, IPC C 23 C 24/04, C 23 C 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.
9. Pat. 01162781 Japan, IPC C 23 C 24/04, B 23 K 20/12, B 23 K 35/24, C 23 C 26/00. Mechanical plating method / Koshiha Giichi, Ikegami Yiji, Tatenou Noboru, Kamiya Tsuyoshi. ; assignee Nippon Yakin Kogyo Co Ltd. – № 1987000321345 ; appl. Dec. 21. 1987 ; publ. Jun. 27. 1989.
10. Pat. 04198490 Japan, IPC C 23 C 24/04, C 23 C 26/00. Brush for mechanical plating / Horioka Katsuhiko, Kannou Noboru. ; assignee Nippon Yakin Kogyo Co Ltd. – № 1990000333238 ; appl. Nov. 29. 1990 ; publ. July. 17. 1992.
11. Pat. 04198489 Japan, IPC C 23 C 24/04, C 23 C 26/00. Pretreatment of brush for mechanical plating / Horioka Katsuhiko, Kannou Noboru. ; assignee Nippon Yakin Kogyo Co Ltd. – № 1990000333237 ; appl. Nov. 29. 1990 ; publ. July. 17. 1992.
12. Белевский, Л. С. Анализ геометрических и энергетических параметров зоны контакта ворса металлической щетки с обрабатываемой поверхностью / Л. С. Белевский, Ю. В. Санкин // Теория и практика производства метизов : межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск : МГМИ. – 1989. – Вып. 15. – С. 169-178.
13. Кургузов, Ю. И. Технологическое обеспечение качества поверхности при упрочнении механическими щетками / Ю. И. Кургузов, Д. Д. Папшев // Вест- ник машиностроения. – 1986. – № 4. – С. 54-58.
14. Кургузов, Ю. И. Упрочнение кромок лопаток рабочих колес газотурбинных двигателей / Ю. И. Кургузов, М. Ю. Кургузов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2010. – № 4. – С. 120-127.

15. Блинов, В. С. Совершенствование технологии холодного плакирования стальной ленты металлизацией поверхности основы : автореф. дис. ... канд. техн. Наук : 05.03.05 / Блинов Владимир Степанович. – Магнитогорск, 2002. – 19 с.
16. Булатов, М. В. Повышение надежности направляющих скольжения металлорежущих станков при капитальном ремонте / М. В. Булатов. – М. : Машино-строение, 1984. – 40 с.
17. Дема, Р. Р. Продление ресурса сменного оборудования метизных агрегатов на основе моделирования процесса изнашивания и применения плакирования рабочих поверхностей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Дема Роман Рафаэлевич. – Магнитогорск, 2005. – 19 с.
18. Анцупов, В. П. Повышение стойкости режущего инструмента нанесением композиционных антифрикционных покрытий / В. П. Анцупов, А. Н. Завалищин, В. И. Кадошников, Р. Р. Дема // Технология машиностроения. – 2003. – № 4. – С. 10-11.
19. Проскуряков, Ю. Г. Исследование зоны контакта механической щетки с обрабатываемым изделием / Ю. Г. Проскуряков, В. С. Ершов // Исследование технологических процессов упрочняюще калибрующей и формообразующей обработки металлов: межвуз. сб. – Ростов-на-Дону. – 1970. – С. 144-154.
20. Ершов, В. С. Геометрия процесса чистовой обработки деталей механическими щетками / В. С. Ершов // Технология производства сельскохозяйственных машин : межвуз. сб. – Ростов-на-Дону. – 1969. – С.109-118.
21. Зотов, А. В. Методика расчета геометрических и силовых параметров зоны контакта при плакировании изделий гибким инструментом / А. В. Зотов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2012. – № 3. – С. 85-88.

22. Леванцевич, М. А. Выбор рациональных режимов плакирования направляющих скольжения металлорежущих станков / М. А. Леванцевич, Н. Н. Максимченко, А. А. Лукашик // Механика машин, механизмов и материалов. – 2009. – № 2. – С. 80-82.
23. Семенченко, Н. В., Гуляев, В. А., Севостьянов, А. С. Автоматизация процесса плакирования гибким инструментом плоских поверхностей деталей // Академическая наука - проблемы и достижения н.-и. ц. «Академический». - Том. 2. / North Charleston, SC, USA, 2014. – С. 127-130.
24. Semenchenko NV, Semenov KO, Hryachkov KO (2015) ESTIMATING METHOD OF CALCULATIONS ACCURACY FOR DEFORMATION CLADDING BY CAE ANALYSIS. ISJ Theoretical & Applied Science 08 (28): 86-88.
25. Semenchenko NV, Hryachkov KO (2015) CONTROL METHOD OF DEFORMATION CLADDING BASED ON POWER PARAMETERS. ISJ Theoretical & Applied Science 08 (28): 89-91.
26. Semenchenko NV, Hryachkov KO (2015) TRENDS OF THE DEFORMATION CLADDING BY FLEXIBLE TOOL. ISJ Theoretical & Applied Science 09 (29): 105-114.
27. Semenchenko NV, Hryachkov KO (2015) MATHEMATICAL MODELS FOR CALCULATING GEOMETRICAL AND FORCE PARAMETERS OF DEFORMATION CLADDING PROCESS. ISJ Theoretical & Applied Science 09 (29): 115-118.
28. Зотов, А. В., Драчев, О. И., Семенченко, Н. В. Анализ напряженного деформированного состояния проволочных элементов гибкого инструмента // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. №20 (123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 21-23.

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014612918 Российская Федерация. Расчет параметров плоского контакта при плакировании проволочным инструментом / Бобровский А. В., Зотов А. В., Семенченко Н. В. ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет» ; № 2014610212 ; заявл. 16.01.2014 ; опубл. 20.04.2014. Бюл. №4 (90). – 1 с.
30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014612919 Российская Федерация. Расчет параметров цилиндрического контакта при плакировании гибким инструментом / Бобровский А. В., Зотов А. В., Семенченко Н. В. ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет» ; № 2014610213 ; заявл. 16.01.2014 ; опубл. 20.04.2014. Бюл. №4 (90). – 1 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Расчетно-аналитический метод определения геометрических и силовых параметров зоны контакта при ДПГИ (при обработке плоских поверхностей)

Параметры режима обработки и характеристики инструмента

$\mu$  Угол трения, град

$N$  Натяг, мм

$R$  Радиус фиктивной заделки, мм

$l$  Длина изгибающейся части ворса, мм

$d$  Диаметр ворса, мм

$k$  Коэффициент плотности набивки ворса

$E$  Модуль упругости первого рода для материала ворса щетки, МПа

$kd$  Коэффициент динамичности

$i$  Номер ворсинки в контакте

Расчет вводных параметров

$J = 0.05 \cdot d^4$  Момент инерции ворсинки, мм<sup>4</sup>

$H = E \cdot J$  Жесткость ворса, Н\*мм<sup>2</sup>

$d_{ekv} = d \cdot kd^{0.25}$  Эквивалентный диаметр ворса, мм

$f_{in} = \arccos\left(1 - \frac{N}{l + R}\right)$  Угол входа гибких элементов в зону контакта, град

$\Delta f_i = \frac{\pi \cdot d}{4 \cdot k \cdot (l + R)}$  Шаг ворса по длине окружности, град

$\gamma = f_{in} - (i - 1) \cdot \Delta f_i$  Угол рассматриваемого гибкого элемента, град

$\zeta = \mu + \gamma$  Угловой коэффициент подобия, град

# Цикл подбора модулярного угла, град

Приближение 1, точность 1 град

```

α := | Δα ← 1·deg
      α ← 35deg
      X1 ← l + R - N
      while X < X1
      | k ← sin(α)
      | ϕ ← asin(1/k · sin(ζ/2))
      | Fk ← ∫0π/2 1 / √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | Fϕ ← ∫0ϕ 1 / √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | β ← Fk - Fϕ
      | Ek ← ∫0π/2 √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | Eϕ ← ∫0ϕ √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | x1 ← [2/β · (Ek - Eϕ) - 1] · cos(ζ) + 2/β · k · cos(ϕ) · sin(ζ) · l
      | y1 ← [2/β · k · cos(ϕ) · cos(ζ) - 2/β · (Ek - Eϕ) - 1] · sin(ζ) · l
      | X ← [R + l - (l - x1)] · cos(γ) - y1 · sin(γ)
      | Y ← y1 · cos(γ) + [R + l - (l - x1)] · sin(γ)
      | P ← β2 · H / l2
      | α ← α - Δα
      α ← α + Δα
      α

```

Приближение 2, точность 0.1 град

```

α := | Δα ← 1·deg
      X1 ← l + R - N
      α ← α + Δα
      Δα ← 0.1·deg
      while X < X1
      | k ← sin(α)
      | ϕ ← asin(1/k · sin(ζ/2))
      | Fk ← ∫0π/2 1 / √(1 - k2·(sin(ϕ))2) dϕ
      | Fϕ ← ∫0ϕ 1 / √(1 - k2·(sin(ϕ))2) dϕ
      | β ← Fk - Fϕ
      | Ek ← ∫0π/2 √(1 - k2·(sin(ϕ))2) dϕ
      | Eϕ ← ∫0ϕ √(1 - k2·(sin(ϕ))2) dϕ
      | x1 ← [2/β · (Ek - Eϕ) - 1] · cos(ζ) + 2/β · k · cos(ϕ) · sin(ζ) · l
      | y1 ← [2/β · k · cos(ϕ) · cos(ζ) - 2/β · (Ek - Eϕ) - 1] · sin(ζ) · l
      | X ← [R + l - (l - x1)] · cos(γ) - y1 · sin(γ)
      | Y ← y1 · cos(γ) + [R + l - (l - x1)] · sin(γ)
      | P ← β2 · H / l2
      | α ← α - Δα
      α ← α + Δα
      α

```

Приближение 3, точность 0.01 град

```

α := | Δα ← 0.1·deg
      X1 ← l + R - N
      α ← α + Δα
      Δα ← 0.01·deg
      while X < X1
      | k ← sin(α)
      | ϕ ← asin(1/k · sin(ζ/2))
      | Fk ← ∫0π/2 1 / √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | Fϕ ← ∫0ϕ 1 / √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | β ← Fk - Fϕ
      | Ek ← ∫0π/2 √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | Eϕ ← ∫0ϕ √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | x1 ← [2/β · (Ek - Eϕ) - 1] · cos(ζ) + 2/β · k · cos(ϕ) · sin(ζ) · l
      | y1 ← [2/β · k · cos(ϕ) · cos(ζ) - 2/β · (Ek - Eϕ) - 1] · sin(ζ) · l
      | X ← [R + l - (l - x1)] · cos(γ) - y1 · sin(γ)
      | Y ← y1 · cos(γ) + [R + l - (l - x1)] · sin(γ)
      | P ← β2 · H / l2
      | α ← α - Δα
      α ← α + Δα
      α

```

Приближение 4, точность 0.001 град

```

α := | Δα ← 0.01·deg
      X1 ← l + R - N
      α ← α + Δα
      Δα ← 0.001·deg
      while X < X1
      | k ← sin(α)
      | ϕ ← asin(1/k · sin(ζ/2))
      | Fk ← ∫0π/2 1 / √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | Fϕ ← ∫0ϕ 1 / √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | β ← Fk - Fϕ
      | Ek ← ∫0π/2 √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | Eϕ ← ∫0ϕ √(1 - k2 · (sin(ϕ))2) dϕ
      | x1 ← [2/β · (Ek - Eϕ) - 1] · cos(ζ) + 2/β · k · cos(ϕ) · sin(ζ) · l
      | y1 ← [2/β · k · cos(ϕ) · cos(ζ) - 2/β · (Ek - Eϕ) - 1] · sin(ζ) · l
      | X ← [R + l - (l - x1)] · cos(γ) - y1 · sin(γ)
      | Y ← y1 · cos(γ) + [R + l - (l - x1)] · sin(γ)
      | P ← β2 · H / l2
      | α ← α - Δα
      α ← α + Δα
      α

```

α Вывод модулярного угла, град

## Расчет промежуточных параметров

$k = \sin(\alpha)$  Модуль

$\psi = \arcsin\left(\frac{1}{k} \cdot \sin\left(\frac{\zeta}{2}\right)\right)$  Амплитуда эллиптического интеграла

$\omega = 2 \cdot k \cdot \cos(\psi)$  Моментный коэффициент подобия

$Fk = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$  Полный эллиптический интеграл первого рода

$F\phi = \int_0^{\psi} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$  Эллиптический интеграл Лежандра первого рода

$\beta = Fk - F\phi$  Силовой коэффициент подобия

$Ek = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$  Полный эллиптический интеграл второго рода

$E\phi = \int_0^{\psi} \sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$  Эллиптический интеграл Лежандра второго рода

Координата точки контакта в подвижной системе координат по оси X

$$x = \left[ \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - 1 \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\psi) \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot l$$

Координата точки контакта в подвижной системе координат по оси Y

$$y = \left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - 1 \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot l$$

Координата точки контакта в неподвижной системе координат по оси X

$$X = [R + l - (l - x)] \cdot \cos(\gamma) - y \cdot \sin(\gamma)$$

Координата точки контакта в неподвижной системе координат по оси Y

$$Y = y \cdot \cos(\gamma) + [R + l - (l - x)] \cdot \sin(\gamma)$$

### Расчет выходных параметров

$y_{max}=y$  Максимальный прогиб ворса, мм

$P = \frac{k d \cdot \beta^2 \cdot H}{l^2}$  Сила в контакте гибкого элемента с деталью, Н

$M = \frac{\omega}{\beta} \cdot P \cdot l$  Изгибающий момент, действующий на конец гибкого элемента, Н\*м

$\sigma = \frac{k \cdot \cos(\psi) \cdot \beta \cdot E \cdot d_{ekv}}{l}$  Максимальные напряжения в ворсе, в МПа

### Вывод параметров

$y_{max}$  Максимальный прогиб ворса, мм

$P$  Сила в контакте гибкого элемента с деталью, Н

$M$  Изгибающий момент, действующий на конец гибкого элемента, Н\*м

$\sigma$  Максимальные напряжения в ворсе, в МПа

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2014612918**

**Расчет параметров плоского контакта при плакировании  
проволочным инструментом**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального  
образования «Тольяттинский государственный университет»  
(RU)*

Авторы: *Бобровский Александр Викторович (RU), Зотов Алексей  
Викторович (RU), Семенченко Николай Владимирович (RU)*

Заявка № **2014610212**

Дата поступления **16 января 2014 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **12 марта 2014 г.**



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов

Рисунок А.1 – Свидетельство о государственной регистрации программы для  
ЭВМ

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Расчетно-аналитический метод определения геометрических и силовых параметров зоны контакта при ДПГИ (при обработке цилиндрических поверхностей)

Параметры режима обработки и характеристики инструмента

$\mu$  Угол трения, град

$N$  Натяг, мм

$R$  Радиус фиктивной заделки, мм

$Rd$  Радиус детали, мм

$l$  Длина изгибающейся части ворса, мм

$d$  Диаметр ворса, мм

$k$  Коэффициент плотности набивки ворса

$E$  Модуль упругости первого рода для материала ворса щетки, МПа

$kd$  Коэффициент динамичности

$i$  Номер ворсинки в контакте

Расчет вводных параметров

$J := 0.05 \cdot d^4$  Момент инерции ворсинки, мм<sup>4</sup>

$H := E \cdot J$  Жесткость ворса, Н\*мм<sup>2</sup>

$d_{ekv} := d \cdot kd^{0.25}$  Эквивалентный диаметр ворса, мм

$f_{i_n} := \arccos \left[ \frac{(R + l)^2 + (R - N + Rd + l)^2 - Rd^2}{(R + l) \cdot (2 \cdot R - 2 \cdot N + 2 \cdot Rd + 2 \cdot l)} \right]$  Угол входа гибких элементов в зону контакта, град

$\Delta f_i := \frac{\pi \cdot d}{4 \cdot k \cdot (1 + R)}$  Шаг ворса по длине окружности, град

$f_i := f_{i_n} - (i - 1) \cdot \Delta f_i$  Угол рассматриваемого гибкого элемента, град

$Y_x := (R + l) \cdot \sin(f_i)$  Координата точки контакта по оси Y, мм

Подбор переходного угла ворса, град

```

γ0 := γ ← 0
α ← 35.0·deg
Δγ ← 0.001·deg
while Y ≥ 0
  while X < 1 + R - N
    Δα ← 0.1·deg
    ζ ← μ + γ
    k ← sin(α)
    φ ← asin( $\frac{I}{k} \cdot \sin(\frac{\zeta}{2})$ )
    Fk ←  $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
    Fφ ←  $\int_0^{\phi} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
    β ← Fk - Fφ
    Ek ←  $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
    Eφ ←  $\int_0^{\phi} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
    x1 ←  $\left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\zeta) \cdot 1$ 
    y1 ←  $\left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
    X ← [R + 1 - (1 - x1)] · cos(γ) - y1 · sin(γ)
    Y ← y1 · cos(γ) + [R + 1 - (1 - x1)] · sin(γ)
    P ← β2 ·  $\frac{H}{I^2}$ 
    α ← α - Δα
  α ← α + 2 · Δα
  Δα ← 0.001·deg

```

```

while X < 1 + R - N
    ζ ← μ + γ
    k ← sin(α)
    φ ← asin( $\frac{I}{k} \cdot \sin(\frac{\zeta}{2})$ )
    Fk ←  $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
    Fφ ←  $\int_0^{\phi} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
    β ← Fk - Fφ
    Ek ←  $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
    Eφ ←  $\int_0^{\phi} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
    x1 ←  $\left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\zeta) \cdot 1$ 
    y1 ←  $\left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
    X ← [R + 1 - (1 - x1)] · cos(γ) - y1 · sin(γ)
    Y ← y1 · cos(γ) + [R + 1 - (1 - x1)] · sin(γ)
    P ←  $\beta^2 \cdot \frac{H}{I^2}$ 
    α ← α - Δα
    α ← α + Δα
    γ ← γ - Δγ
    X ← (1 + R - N - 20)
γ

```

$\gamma^0$  Вывод переходного угла ворса, град

Цикл подбора угла положения ворса, град

Приближение 1, точность 1 град

```

γ := γ ← fn - Δfn
Δγ ← 1·deg
C ← √(-N·(N - 2·Rd)·(2·R - N + 2·l)·(2·R - N + 2·Rd + 2·l))
Y ← R + 1 - (R2 + l2 - 0.5·C + R·(Rd + 2·l - N) + l·(Rd - N)) / (R - N + Rd + 1)
while Y > Yx
    X ← Rd + R + 1 - N
    Y ← 0
    Δα ← 0.1·deg
    α ← 35.0·deg
    φ ← asin(Y / Rd)
    ζ ← μ + γ + φ
    while (Rd + R + 1 - N - X)2 + Y2 < Rd2
        k ← sin(α)
        φ ← asin((l / k) · sin(ζ / 2))
        Fk ← ∫0π/2 l / √(l2 - k2 · (sin(φ))2) dφ
        Fφ ← ∫0φ l / √(l2 - k2 · (sin(φ))2) dφ
        β ← Fk - Fφ
        Ek ← ∫0π/2 √(l2 - k2 · (sin(φ))2) dφ
        Eφ ← ∫0φ √(l2 - k2 · (sin(φ))2) dφ
        x1 ← [ (2 / β) · (Ek - Eφ) - l ] · cos(ζ) + (2 / β) · k · cos(φ) · sin(ζ) · 1
        y1 ← [ (2 / β) · k · cos(φ) · cos(ζ) - (2 / β) · (Ek - Eφ) - l ] · sin(ζ) · 1
        X ← R - N + Rd + 1 - √(Rd2 - [(R + x1) · sin(γ) + y1 · cos(γ)]2)
        A ← √(N - R - 1 + R · cos(γ) + x1 · cos(γ) - y1 · sin(γ))
        B ← √(N - R - 2·Rd - 1 + R · cos(γ) + x1 · cos(γ) - y1 · sin(γ))
        Y ← -A·B·i if γ ≥ γ0
            A·B·i otherwise
        fix ← asin(Y / Rd)
        α ← α - Δα

```

$$\alpha \leftarrow \alpha + 2 \cdot \Delta\alpha$$

$$\Delta\alpha \leftarrow 0.001 \cdot \text{deg}$$

$$\text{while } (Rd + R + 1 - N - X)^2 + Y^2 < Rd^2$$

$$k \leftarrow \sin(\alpha)$$

$$\phi \leftarrow \arcsin\left(\frac{l}{k} \cdot \sin\left(\frac{\zeta}{2}\right)\right)$$

$$Fk \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{l}{\sqrt{l^2 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$$

$$F\phi \leftarrow \int_0^{\phi} \frac{l}{\sqrt{l^2 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$$

$$\beta \leftarrow Fk - F\phi$$

$$Ek \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{l^2 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$$

$$E\phi \leftarrow \int_0^{\phi} \sqrt{l^2 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$$

$$x1 \leftarrow \left[ \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - l \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$$

$$y1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - l \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$$

$$X \leftarrow R - N + Rd + 1 - \sqrt{Rd^2 - [(R + x1) \cdot \sin(\gamma) + y1 \cdot \cos(\gamma)]^2}$$

$$A \leftarrow \sqrt{N - R - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$$

$$B \leftarrow \sqrt{N - R - 2 \cdot Rd - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$$

$$Y \leftarrow \begin{cases} -A \cdot B \cdot i & \text{if } \gamma \geq \gamma_0 \\ A \cdot B \cdot i & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{fix} \leftarrow \arcsin\left(\frac{Y}{Rd}\right)$$

$$\alpha \leftarrow \alpha - \Delta\alpha$$

$$\alpha \leftarrow \alpha + \Delta\alpha$$

$$\gamma \leftarrow \gamma - \Delta\gamma$$

$$\gamma \leftarrow \gamma + \Delta\gamma$$

$$\gamma$$

Приближение 2, точность 0.1

```

 $\gamma := \Delta\gamma \leftarrow 1 \cdot \text{deg}$ 
 $\gamma \leftarrow \gamma + \Delta\gamma$ 
 $\Delta\gamma \leftarrow 0.1 \cdot \text{deg}$ 
 $C \leftarrow \sqrt{-N \cdot (N - 2 \cdot R_d) \cdot (2 \cdot R - N + 2 \cdot 1) \cdot (2 \cdot R - N + 2 \cdot R_d + 2 \cdot 1)}$ 
 $Y \leftarrow R + 1 - \frac{2 \cdot R^2 + 2 \cdot 1^2 - C - 2 \cdot N \cdot R + 2 \cdot R \cdot R_d - 2 \cdot N \cdot 1 + 4 \cdot R \cdot 1 + 2 \cdot R_d \cdot 1}{2 \cdot (R - N + R_d + 1)}$ 
while  $Y > Y_x$ 
     $X \leftarrow R_d + R + 1 - N$ 
     $Y \leftarrow 0$ 
     $\Delta\alpha \leftarrow 0.1 \cdot \text{deg}$ 
     $\alpha \leftarrow 35.0 \cdot \text{deg}$ 
     $\varphi \leftarrow \arcsin\left(\frac{Y}{R_d}\right)$ 
     $\zeta \leftarrow \mu + \gamma + \varphi$ 
    while  $(R_d + R + 1 - N - X)^2 + Y^2 < R_d^2$ 
         $k \leftarrow \sin(\alpha)$ 
         $\phi \leftarrow \arcsin\left(\frac{1}{k} \cdot \sin\left(\frac{\zeta}{2}\right)\right)$ 
         $F_k \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
         $F_\phi \leftarrow \int_0^\phi \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
         $\beta \leftarrow F_k - F_\phi$ 
         $E_k \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
         $E_\phi \leftarrow \int_0^\phi \sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
         $x1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (E_k - E_\phi) - 1 \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\zeta) \cdot 1$ 
         $y1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (E_k - E_\phi) - 1 \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
         $X \leftarrow R - N + R_d + 1 - \sqrt{R_d^2 - [(R + x1) \cdot \sin(\gamma) + y1 \cdot \cos(\gamma)]^2}$ 
         $A \leftarrow \sqrt{N - R - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
         $B \leftarrow \sqrt{N - R - 2 \cdot R_d - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
         $Y \leftarrow \begin{cases} -A \cdot B \cdot i & \text{if } \gamma \geq \gamma_0 \\ A \cdot B \cdot i & \text{otherwise} \end{cases}$ 
         $\text{fix} \leftarrow \arcsin\left(\frac{Y}{R_d}\right)$ 
         $\alpha \leftarrow \alpha - \Delta\alpha$ 
     $\alpha \leftarrow \alpha + 2 \cdot \Delta\alpha$ 
     $\Delta\alpha \leftarrow 0.001 \cdot \text{deg}$ 

```

```

while  $(Rd + R + 1 - N - X)^2 + Y^2 < Rd^2$ 
|  $k \leftarrow \sin(\alpha)$ 
|  $\phi \leftarrow \arcsin\left(\frac{I}{k} \cdot \sin\left(\frac{\zeta}{2}\right)\right)$ 
|  $Fk \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
|  $F\phi \leftarrow \int_0^{\phi} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
|  $\beta \leftarrow Fk - F\phi$ 
|  $Ek \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
|  $E\phi \leftarrow \int_0^{\phi} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
|  $x1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\zeta) \cdot 1$ 
|  $y1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
|  $X \leftarrow R - N + Rd + 1 - \sqrt{Rd^2 - [(R + x1) \cdot \sin(\gamma) + y1 \cdot \cos(\gamma)]^2}$ 
|  $A \leftarrow \sqrt{N - R - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
|  $B \leftarrow \sqrt{N - R - 2 \cdot Rd - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
|  $Y \leftarrow \begin{cases} -A \cdot B \cdot i & \text{if } \gamma \geq \gamma_0 \\ A \cdot B \cdot i & \text{otherwise} \end{cases}$ 
|  $fix \leftarrow \arcsin\left(\frac{Y}{Rd}\right)$ 
|  $\alpha \leftarrow \alpha - \Delta\alpha$ 
|  $\alpha \leftarrow \alpha + \Delta\alpha$ 
|  $\gamma \leftarrow \gamma - \Delta\gamma$ 
|  $\gamma \leftarrow \gamma + \Delta\gamma$ 
|  $\gamma$ 

```

Приближение 3, точность 0.01

```

 $\gamma := \Delta\gamma \leftarrow 0.1 \cdot \text{deg}$ 
 $\gamma \leftarrow \gamma + \Delta\gamma$ 
 $\Delta\gamma \leftarrow 0.01 \cdot \text{deg}$ 
 $C \leftarrow \sqrt{-N \cdot (N - 2 \cdot R_d) \cdot (2 \cdot R - N + 2 \cdot 1) \cdot (2 \cdot R - N + 2 \cdot R_d + 2 \cdot 1)}$ 
 $Y \leftarrow R + 1 - \frac{2 \cdot R^2 + 2 \cdot 1^2 - C - 2 \cdot N \cdot R + 2 \cdot R \cdot R_d - 2 \cdot N \cdot 1 + 4 \cdot R \cdot 1 + 2 \cdot R_d \cdot 1}{2 \cdot (R - N + R_d + 1)}$ 
while  $Y > Y_x$ 
     $X \leftarrow R_d + R + 1 - N$ 
     $Y \leftarrow 0$ 
     $\Delta\alpha \leftarrow 0.1 \cdot \text{deg}$ 
     $\alpha \leftarrow 35.0 \cdot \text{deg}$ 
     $\varphi \leftarrow \arcsin\left(\frac{Y}{R_d}\right)$ 
     $\zeta \leftarrow \mu + \gamma + \varphi$ 
    while  $(R_d + R + 1 - N - X)^2 + Y^2 < R_d^2$ 
         $k \leftarrow \sin(\alpha)$ 
         $\phi \leftarrow \arcsin\left(\frac{I}{k} \cdot \sin\left(\frac{\zeta}{2}\right)\right)$ 
         $F_k \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
         $F_\phi \leftarrow \int_0^\phi \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
         $\beta \leftarrow F_k - F_\phi$ 
         $E_k \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
         $E_\phi \leftarrow \int_0^\phi \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
         $x1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (E_k - E_\phi) - I \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\zeta) \cdot 1$ 
         $y1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (E_k - E_\phi) - I \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
         $X \leftarrow R - N + R_d + 1 - \sqrt{R_d^2 - [(R + x1) \cdot \sin(\gamma) + y1 \cdot \cos(\gamma)]^2}$ 
         $A \leftarrow \sqrt{N - R - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
         $B \leftarrow \sqrt{N - R - 2 \cdot R_d - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
         $Y \leftarrow \begin{cases} -A \cdot B \cdot i & \text{if } \gamma \geq \gamma_0 \\ A \cdot B \cdot i & \text{otherwise} \end{cases}$ 
         $\text{fix} \leftarrow \arcsin\left(\frac{Y}{R_d}\right)$ 
         $\alpha \leftarrow \alpha - \Delta\alpha$ 
     $\alpha \leftarrow \alpha + 2 \cdot \Delta\alpha$ 
     $\Delta\alpha \leftarrow 0.001 \cdot \text{deg}$ 

```

```

while  $(Rd + R + 1 - N - X)^2 + Y^2 < Rd^2$ 
|  $k \leftarrow \sin(\alpha)$ 
|  $\phi \leftarrow \text{asin}\left(\frac{I}{k} \cdot \sin\left(\frac{\zeta}{2}\right)\right)$ 
|  $Fk \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
|  $F\phi \leftarrow \int_0^{\phi} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
|  $\beta \leftarrow Fk - F\phi$ 
|  $Ek \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
|  $E\phi \leftarrow \int_0^{\phi} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
|  $x1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\zeta) \cdot 1$ 
|  $y1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
|  $X \leftarrow R - N + Rd + 1 - \sqrt{Rd^2 - [(R + x1) \cdot \sin(\gamma) + y1 \cdot \cos(\gamma)]^2}$ 
|  $A \leftarrow \sqrt{N - R - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
|  $B \leftarrow \sqrt{N - R - 2 \cdot Rd - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
|  $Y \leftarrow \begin{cases} -A \cdot B \cdot i & \text{if } \gamma \geq \gamma_0 \\ A \cdot B \cdot i & \text{otherwise} \end{cases}$ 
|  $\text{fix} \leftarrow \text{asin}\left(\frac{Y}{Rd}\right)$ 
|  $\alpha \leftarrow \alpha - \Delta\alpha$ 
|  $\alpha \leftarrow \alpha + \Delta\alpha$ 
|  $\gamma \leftarrow \gamma - \Delta\gamma$ 
|  $\gamma \leftarrow \gamma + \Delta\gamma$ 
|  $\gamma$ 

```

Приближение 4, точность 0.001

```

 $\gamma := \Delta\gamma \leftarrow 0.01 \cdot \text{deg}$ 
 $\gamma \leftarrow \gamma + \Delta\gamma$ 
 $\Delta\gamma \leftarrow 0.001 \cdot \text{deg}$ 
 $C \leftarrow \sqrt{N \cdot (N - 2 \cdot R_d) \cdot (2 \cdot R - N + 2 \cdot 1) \cdot (2 \cdot R - N + 2 \cdot R_d + 2 \cdot 1)}$ 
 $Y \leftarrow R + 1 - \frac{2 \cdot R^2 + 2 \cdot 1^2 - C - 2 \cdot N \cdot R + 2 \cdot R \cdot R_d - 2 \cdot N \cdot 1 + 4 \cdot R \cdot 1 + 2 \cdot R_d \cdot 1}{2 \cdot (R - N + R_d + 1)}$ 
while  $Y > Y_x$ 
   $X \leftarrow R_d + R + 1 - N$ 
   $Y \leftarrow 0$ 
   $\Delta\alpha \leftarrow 0.1 \cdot \text{deg}$ 
   $\alpha \leftarrow 35.0 \cdot \text{deg}$ 
   $\varphi \leftarrow \arcsin\left(\frac{Y}{R_d}\right)$ 
   $\zeta \leftarrow \mu + \gamma + \varphi$ 
  while  $(R_d + R + 1 - N - X)^2 + Y^2 < R_d^2$ 
     $k \leftarrow \sin(\alpha)$ 
     $\phi \leftarrow \arcsin\left(\frac{1}{k} \cdot \sin\left(\frac{\zeta}{2}\right)\right)$ 
     $F_k \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
     $F_\phi \leftarrow \int_0^\phi \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
     $\beta \leftarrow F_k - F_\phi$ 
     $E_k \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
     $E_\phi \leftarrow \int_0^\phi \sqrt{1 - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
     $x1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (E_k - E_\phi) - 1 \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\zeta) \cdot 1$ 
     $y1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (E_k - E_\phi) - 1 \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
     $X \leftarrow R - N + R_d + 1 - \sqrt{R_d^2 - [(R + x1) \cdot \sin(\gamma) + y1 \cdot \cos(\gamma)]^2}$ 
     $A \leftarrow \sqrt{N - R - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
     $B \leftarrow \sqrt{N - R - 2 \cdot R_d - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
     $Y \leftarrow \begin{cases} -A \cdot B \cdot i & \text{if } \gamma \geq \gamma_0 \\ A \cdot B \cdot i & \text{otherwise} \end{cases}$ 
     $\text{fix} \leftarrow \arcsin\left(\frac{Y}{R_d}\right)$ 
     $\alpha \leftarrow \alpha - \Delta\alpha$ 
   $\alpha \leftarrow \alpha + 2 \cdot \Delta\alpha$ 
   $\Delta\alpha \leftarrow 0.001 \cdot \text{deg}$ 

```

```

while  $(Rd + R + 1 - N - X)^2 + Y^2 < Rd^2$ 
|  $k \leftarrow \sin(\alpha)$ 
|  $\phi \leftarrow \operatorname{asin}\left(\frac{I}{k} \cdot \sin\left(\frac{\zeta}{2}\right)\right)$ 
|  $Fk \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
|  $F\phi \leftarrow \int_0^{\phi} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
|  $\beta \leftarrow Fk - F\phi$ 
|  $Ek \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
|  $E\phi \leftarrow \int_0^{\phi} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
|  $x1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\zeta) \cdot 1$ 
|  $y1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
|  $X \leftarrow R - N + Rd + 1 - \sqrt{Rd^2 - [(R + x1) \cdot \sin(\gamma) + y1 \cdot \cos(\gamma)]^2}$ 
|  $A \leftarrow \sqrt{N - R - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
|  $B \leftarrow \sqrt{N - R - 2 \cdot Rd - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
|  $Y \leftarrow \begin{cases} -A \cdot B \cdot i & \text{if } \gamma \geq \gamma_0 \\ A \cdot B \cdot i & \text{otherwise} \end{cases}$ 
|  $\text{fix} \leftarrow \operatorname{asin}\left(\frac{Y}{Rd}\right)$ 
|  $\alpha \leftarrow \alpha - \Delta\alpha$ 
|  $\alpha \leftarrow \alpha + \Delta\alpha$ 
|  $\gamma \leftarrow \gamma - \Delta\gamma$ 
|  $\gamma \leftarrow \gamma + \Delta\gamma$ 
|  $\gamma$ 

```

$\gamma$  Вывод угла положения ворса, град

$\varphi := \operatorname{asin}\left(\frac{Yx}{Rd}\right)$  Пиблизительный угол положения ворса на детали, град

$\zeta := \mu + \gamma + \varphi$  Угловой коэффициент подобия, град

Цикл подбора модулярного угла, град

```

α := Δα ← 0.1·deg
X ← Rd + R + 1 - N
Y ← 0
α ← 35.0·deg
while (Rd + R + 1 - N - X)2 + Y2 < Rd2
| k ← sin(α)
| ϕ ← asin( $\frac{I}{k} \cdot \sin(\frac{\zeta}{2})$ )
|  $F_k \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
|  $F_\phi \leftarrow \int_0^\phi \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
| β ← Fk - Fϕ
|  $E_k \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
|  $E_\phi \leftarrow \int_0^\phi \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
|  $x1 \leftarrow \left[ \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (E_k - E_\phi) - I \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
|  $y1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (E_k - E_\phi) - I \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
|  $X \leftarrow R - N + Rd + 1 - \sqrt{Rd^2 - [(R + x1) \cdot \sin(\gamma) + y1 \cdot \cos(\gamma)]^2}$ 
| A ←  $\sqrt{N - R - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
| B ←  $\sqrt{N - R - 2 \cdot Rd - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
| Y ← -A·B·i
| α ← α - Δα
α ← α + 2·Δα
Δα ← 0.001·deg

```

```

while  $(Rd + R + 1 - N - X)^2 + Y^2 < Rd^2$ 
|  $k \leftarrow \sin(\alpha)$ 
|  $\phi \leftarrow \arcsin\left(\frac{I}{k} \cdot \sin\left(\frac{\zeta}{2}\right)\right)$ 
|  $Fk \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
|  $F\phi \leftarrow \int_0^{\phi} \frac{I}{\sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$ 
|  $\beta \leftarrow Fk - F\phi$ 
|  $Ek \leftarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
|  $E\phi \leftarrow \int_0^{\phi} \sqrt{I - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$ 
|  $x1 \leftarrow \left[ \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
|  $y1 \leftarrow \left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - I \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot 1$ 
|  $X \leftarrow R - N + Rd + 1 - \sqrt{Rd^2 - [(R + x1) \cdot \sin(\gamma) + y1 \cdot \cos(\gamma)]^2}$ 
|  $A \leftarrow \sqrt{N - R - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
|  $B \leftarrow \sqrt{N - R - 2 \cdot Rd - 1 + R \cdot \cos(\gamma) + x1 \cdot \cos(\gamma) - y1 \cdot \sin(\gamma)}$ 
|  $Y \leftarrow -A \cdot B \cdot i$ 
|  $\alpha \leftarrow \alpha - \Delta\alpha$ 
 $\alpha \leftarrow \alpha + \Delta\alpha$ 
 $\alpha$ 

```

° Вывод модулярного угла, град

## Расчет промежуточных параметров

$k := \sin(\alpha)$  Модуль

$\psi := \operatorname{asin}\left(\frac{l}{k} \cdot \sin\left(\frac{\zeta}{2}\right)\right)$  Амплитуда эллиптического интеграла

$\omega := 2 \cdot k \cdot \cos(\psi)$  Моментный коэффициент подобия

$$Fk := \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{l}{\sqrt{l - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$$
 Полный эллиптический интеграл первого рода

$$F\phi := \int_0^{\psi} \frac{l}{\sqrt{l - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2}} d\phi$$
 Эллиптический интеграл Лежандра первого рода

$\beta := Fk - F\phi$  Силовой коэффициент подобия

$$Ek := \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{l - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$$
 Полный эллиптический интеграл второго рода

$$E\phi := \int_0^{\psi} \sqrt{l - k^2 \cdot (\sin(\phi))^2} d\phi$$
 Эллиптический интеграл Лежандра второго рода

Координата точки контакта в подвижной системе координат по оси X

$$x := \left[ \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - l \right] \cdot \cos(\zeta) + \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\psi) \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot l$$

Координата точки контакта в подвижной системе координат по оси Y

$$y := \left[ \frac{2}{\beta} \cdot k \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(\zeta) - \left[ \frac{2}{\beta} \cdot (Ek - E\phi) - l \right] \cdot \sin(\zeta) \right] \cdot l$$

Координата точки контакта в неподвижной системе координат по оси X

$$X := \left[ R - N + Rd + l - \sqrt{Rd^2 - [(R + x) \cdot \sin(\gamma) + y \cdot \cos(\gamma)]^2} \right]$$

Координата точки контакта в неподвижной системе координат по оси Y

$$A := \sqrt{N - R - l + R \cdot \cos(\gamma) + x \cdot \cos(\gamma) - y \cdot \sin(\gamma)}$$

$$B := \sqrt{N - R - 2 \cdot Rd - l + R \cdot \cos(\gamma) + x \cdot \cos(\gamma) - y \cdot \sin(\gamma)}$$

$$Y := \begin{cases} -A \cdot B \cdot i & \text{if } \gamma \geq \gamma_0 \\ -|A \cdot B \cdot i| & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\varphi := \operatorname{asin}\left(\frac{Y}{Rd}\right)$  Угол положения ворса на детали, в рад

## Расчет выходных параметров

$y_{\max} := y$  Максимальный прогиб ворса, мм

$P := k d \cdot \beta^2 \cdot \frac{H}{l^2}$  Сила в контакте гибкого элемента с деталью, Н

$M := \frac{\omega}{\beta} \cdot P \cdot l$  Изгибающий момент, действующий на конец гибкого элемента, Н\*м

$\sigma := \frac{k \cdot \cos(\psi) \cdot \beta \cdot E \cdot d_{ekv}}{1}$  Максимальные напряжения в ворсе, в МПа

## Вывод параметров

$y_{\max}$  Максимальный прогиб ворса, мм

$P$  Сила в контакте гибкого элемента с деталью, Н

$M$  Изгибающий момент, действующий на конец гибкого элемента, Н\*м

$\sigma$  Максимальные напряжения в ворсе, в МПа



Рисунок Б.1 – Свидетельство о государственной регистрации программы для  
ЭВМ

## **ПРИЛОЖЕНИЕ В**

Опубликованные работы

*Материалы IV международной научно-практической  
конференции*

# **Академическая наука - проблемы и достижения**

**7-8 июля 2014 г.**

North Charleston, USA

Том 2

Рисунок В.1 – Обложка сборника

ISBN 978-1-50051-703-8



**CreateSpace**  
**4900 LaCross Road,**  
**North Charleston, SC, USA 29406**  
**2014**

Рисунок В.2 – Выходные данные сборника

УДК 621.793

Семенченко Н.В.<sup>2</sup>, Гуляев В.А.<sup>1</sup>, Севостьянов А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, <sup>2</sup>студент, Тольяттинский государственный университет,  
кафедра: оборудование и технологии машиностроительного производства

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЛАКИРОВАНИЯ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ**

Получение качественного поверхностного слоя, причем с минимальными затратами времени и средств, всегда будет одним из приоритетных направлений развития отрасли машиностроения. В последнее время количество финишных способов обработки поверхности (будь то только упрочняющая обработка или обработка с нанесением покрытия) серьезно возросло. Среди многообразия различных финишных операций заметно выделяется способ деформационного плакирования, представляющий собой процесс термомеханического формирования поверхностного слоя, основанный на явлениях схватывания и направленного переноса материала покрытия при трении.

Для автоматизации процессов обработки (разработки систем управления) необходимо наличие математической модели, описывающей процесс и обладающей достаточной точностью определения параметров обработки. Теория гибких упругих стержней [1], основанная на точном решении уравнения упругой линии, позволяет наиболее точно описать процесс изгиба ворса проволоочного инструмента. На ее основе разработана математическая модель [2], связывающая между собой основные параметры зоны контакта механической щетки и обрабатываемой поверхности детали.

Использование в качестве выходной координаты процесса деформационного плакирования силы, возникающей при контакте гибкого элемента с обрабатываемым изделием наиболее предпочтительно для построения адаптивных систем управления, т.к. контактная сила в достаточной мере характеризует процесс плакирования плоских поверхностей деталей. Однако измерение силы в зоне контакта при плакировании является достаточно сложной задачей и осуществляется большей частью в экспериментально-исследовательских целях на станочном оборудовании, специально приспособленном для таких испытаний [3].

В этой связи для разработчиков САУ представляет интерес использование энергетических параметров обработки, которые, как и силы, возникающие в зоне контакта проволоочного инструмента с поверхностью обрабатываемого изделия, дают комплексную информацию о процессе плакирования, характеризую и материал детали, и параметры гибкого инструмента, и производительность обработки.

Для моделирования энергосиловых параметров на участке скольжения сжато-изогнутого ворса по плоской поверхности детали воспользуемся математической моделью [2].

Контактная сила определяется в каждой точке площади зоны контакта:

$$P_i = \beta_i^2 \frac{EJ}{l_H^2} g^4, \quad (1)$$

где  $\beta_i$  - силовой коэффициент подобия;  $E$  - модуль упругости, Па;  $J$  - осевой момент инерции площади поперечного сечения, мм<sup>4</sup>;  $l_H$  - длина изгибающейся части проволоочки, мм;  $g$  - коэффициент, учитывающий динамику вращения проволоочного инструмента.

Суммарный вращающий момент в зоне контакта, определяется как сумма моментов  $i$ -тых элементов:

$$M = \sum_{i=1}^k \left( \frac{\omega_i}{\beta_i} \cdot P_i \cdot l_H \right) \cdot \frac{B}{d_B}, \quad (2)$$

где  $\omega_i$  - моментный коэффициент подобия;  $B$  - ширина гибкого инструмента, мм;  $d_B$  - диаметр ворса, мм.

Мощность двигателя инструмента, расходуемая в процессе плакирования:

$$N_{\text{дв}} = N_{\text{пл}} + N_{\text{эмп}}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{пл}} = M \cdot V_{\text{ок}} / R_{\text{ш}}$  - мощность двигателя, расходуемая в зоне плакирования, Вт;  $N_{\text{эмп}}$  - мощность двигателя, расходуемая в зоне контакта с элементом материала покрытия, Вт [4].

Во время плакирования изделий величина контактной силы изменяется вследствие различных внешних факторов, что приводит к изменению условий обработки и негативно сказывается на качестве нанесенного покрытия. Поддержание силы на строго определенном уровне в процессе обработки требует больших вычислительных мощностей, вследствие сложности алгоритма ее расчета. Применение микропроцессорной техники и появление мощных однокристальных микро-ЭВМ значительно расширило вычислительные возможности систем управления и открыло хорошие перспективы для использования энергетических параметров в адаптивных циклах [3].

Здесь заслуживает внимания способ управления деформационным плакированием гибким инструментом, который позволяет в числе других возмущающих факторов, имеющих функциональную составляющую, компенсировать частично и температурные погрешности от нагрева детали в процессе обработки [5]. Его реализация в представлена на рис. 1.

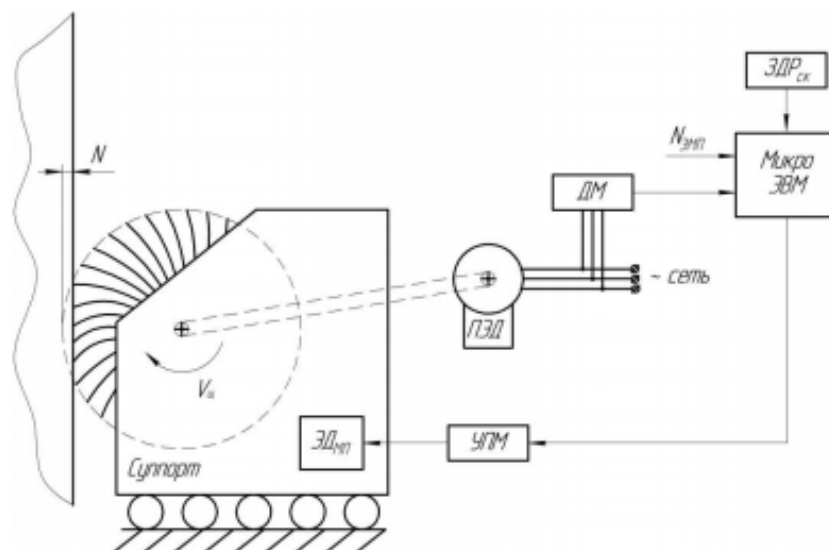


Рис. 1. Блок-схема адаптивной системы управления процессом плакирования

Управление суппортом, осуществляющим обработку детали, производится с помощью электродвигателя микроперемещений  $\text{ЭД}_{\text{МП}}$  и управляемого преобразователя мощности  $\text{УПМ}$ . Измерение мощности, потребляемой приводным электродвигателем  $\text{ПЭД}$  от питающей сети, производится с помощью датчика активной мощности  $\text{ДМ}$ . Обработка измерительной информации производится в вычислительном блоке  $\text{Микро-ЭВМ}$ , куда вводится информация о необходимой величине контактной силы задатчиком  $\text{ЗДР}_{\text{СК}}$  и мощности, расходуемой на процесс трения щетки о поверхность элемента материала покрытия  $N_{\text{ЭМП}}$ .

На рис. 2 представлена функциональная схема системы управления процессом плакирования.

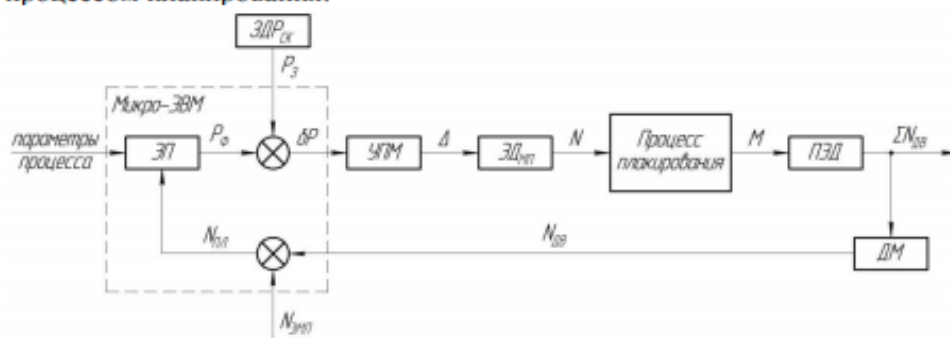


Рис. 2. Функциональная схема САУ процессом плакирования:  
 $\text{ЭП}$  – электронный преобразователь;  $\text{ЗДР}_{\text{СК}}$  – задатчик величины контактной силы;  $\text{УПМ}$  – управляемый преобразователь мощности;  $\text{ЭД}_{\text{МП}}$  –

электродвигатель микроперемещений; ПЭД – приводной электродвигатель;  
ДМ – датчик активной мощности

В системе управления можно выделить прямой канал регулирования – от параметров процесса до общей мощности, потребляемой ПЭД,  $\Sigma N_{дв}$  и канал обратной связи – от  $\Sigma N_{дв}$  до мощности, расходуемой в зоне плакирования,  $N_{пл}$ . Система сравнивает реальную и заданную контактную силу (1) и с помощью ЭДМП корректирует натяг при их несоответствии.

Установив такую систему, появляется возможность компенсации динамических и температурных погрешностей обработки, поддержания необходимой контактной силы, и как следствие повышение качества обработки. Предлагаемая модель адаптивной системы управления является основой для дальнейшей разработки более сложных, гибких систем управления, охватывающих большее количество параметров процесса плакирования. Данные системы, оперирующие огромными массивами данных, для обеспечения высокой производительности заставляют обращаться к разработке новых принципов и средств обработки информации. Среди которых, особое внимание привлекают оптические методы или точнее методы электронно-оптической обработки информации с применением ЭВМ [6].

#### Список литературы:

1. Попов Е. П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М.: Наука, 1986. 296 с.
2. Зотов, А.В. Математическое моделирование расчета геометрических и энергосиловых параметров при деформационном плакировании / А.В. Зотов, О.И. Драчев // Перспективные технологии XXI века. В 2 книгах. К. 2: монография / В. Н. Ардатов, Ю.В. Бахтина, П.П. Бескид и др. - Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2013. - Разд. 2.4. - С. 79-94.
3. Решетов А. Г. Автоматизация шлифования и размерного контроля деталей. СПб.: Политехника, 2003. 193 с.
4. Анцупов В. П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. 241 с.
5. Зотов А.В., Семенченко Н.В. Стабилизация энергосиловых параметров при плакировании гибким инструментом // Механика XXI века. XII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: Изд-во БрГУ, 2013. – С. 126-128.
6. Солдатов А. А., Гуляев В. А., Жилин А. А., Белоус Д. В. Разработка автоматизированной системы бесконтактного контроля геометрических параметров кузова автомобиля // Известия Волгоградского государственного университета : межвуз. Сб. науч. Ст. №1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – С. 46-48.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г**

Опубликованные работы

**Teoretičeskaâ i prikladnaâ  
nauka**

---

**Theoretical & Applied  
Science**

**08 (28)**

**2015**

Рисунок Г.1 – Обложка сборника

## **International Scientific Journal Theoretical & Applied Science**

### **Editor-in Chief:**

**Alexandr Shevtsov (KZ)**

Hirsch index:

**h Index RISC = 1 (56)**

### **The Editorial Board:**

Prof. Vladimir Kestelman (USA)

**h Index Scopus = 2 (30)**

Prof. Arne Jönsson (Sweden)

**h Index Scopus = 3 (18)**

Prof. Sagat Zhunisbekov (KZ)

Founder : **International Academy of Theoretical & Applied Sciences**

Published since 2013 year.

Issued Monthly.

International scientific journal «Theoretical & Applied Science», registered in France, and indexed more than 36 international scientific bases.

Address of editorial offices: Djambyl street 128, 080000, Taraz, KZ.

Phone: +777727-606-81

E-mail: [T-Science@mail.ru](mailto:T-Science@mail.ru)

<http://T-Science.org>

**Impact Factor ICV = 6.630**

**Impact Factor ISI = 0.829**  
based on International Citation Report (ICR)

ISSN 2308-4944



9 772308 494157

© Collective of Authors

© «Theoretical & Applied Science»

Рисунок Г.2 – Выходные данные сборника

**Impact Factor:**

|                          |                         |                      |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912       | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIIHII (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042       |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031  |                      |

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)**International Scientific Journal  
Theoretical & Applied Science**

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2015 Issue: 08 Volume: 28

Published: 30.08.2015 <http://T-Science.org>**SECTION 7. Mechanics and machine construction.****Nikolai Vladimirovich Semchenko**Student of the Department  
«Equipment and technology of machine-building  
production»  
FSBEI HPE «Togliatti State University», Russia  
[bonder64@mail.ru](mailto:bonder64@mail.ru)**Kirill Olegovich Semenov**Student of the Department  
«Equipment and technology of machine-building  
production»  
FSBEI HPE «Togliatti State University», Russia**Konstantin Olegovich Hryachkov**Student of the Department  
«Equipment and technology of machine-building  
production»  
FSBEI HPE «Togliatti State University», Russia**ESTIMATING METHOD OF CALCULATIONS ACCURACY FOR  
DEFORMATION CLADDING BY CAE ANALYSIS**

**Abstract:** This report describes the mathematical model describing the process of deformation cladding by flexible tool for flat surfaces. The proposed method of evaluating mathematical model can significantly save time and money spent on development process, because it identifying errors in calculations by the fast and cheap CAE analysis. We did assessment of this mathematical model of the proposed method, which showed a high degree of conformity between the calculated and experimental data.

**Key words:** flexible tool; wire tool; cladding; strength; deflection.

**Language:** English

**Citation:** Semchenko NV, Semenov KO, Hryachkov KO (2015) ESTIMATING METHOD OF CALCULATIONS ACCURACY FOR DEFORMATION CLADDING BY CAE ANALYSIS. ISJ Theoretical & Applied Science 08 (28): 86-88.

**Soi:** <http://s-o-i.org/1.1/TAS-08-28-14> **Doi:**  <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2015.08.28.14>

The performance of surface layer of friction pairs is one of the most important factors of reliable work of equipment, which determined by the process of their manufacture. Finishing operations, such as cladding by flexible tool, make great contribution to surface layer creation. Deformation cladding by flexible tool apply for transfer the alloy material from donor surface to detail surface layer by the thermomechanically with help a rotating wire brush [1-4].

We need a mathematical model describing the cladding process and having highly accurate calculations for enhance the technological capabilities and successful resolution of questions about increase tool life. The mathematical model has been created [5] with help the theory by flexible elastic rods [6]. This model connects the main parameters of the contact zone. According the model

the algorithm has been created for calculating geometrical and force parameters of the contact zone [7]. It is consist of cycles with consistent increase accuracy of calculations. The output data of the algorithm are the main parameters of cladding process, such as:

The strength in the contact zone compressed-bent wire with surface of detail,  $P_c$ :

$$P_{Li} = \beta_i^2 \frac{EJ}{l_H^2} g^4, \quad (1)$$

where  $\beta_i$  - the power factor of similarity;  $E$  - elastic modulus, Pa;  $J$  - axial moment of inertia,  $\text{mm}^4$ ;  $l_H$  - curving length of wire, mm;  $g$  - coefficient of wire tool dynamics [3].

The deflection by flexible tools wire:

$$y_{Li} = \left[ \frac{2}{\beta} k, \cos(\psi_{0a}) \cos(\zeta_{0a}) - \left( \frac{2}{\beta} (E(\psi_{Li}) - E(\psi_{0a})) - 1 \right) \sin(\zeta_{0a}) \right] \cdot l_H, \quad (2)$$



## Impact Factor:

|                          |                         |                      |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912       | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIIHII (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042       |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031  |                      |

where  $k$  - modulus of elliptic integral;  $E(\psi_0)$  - Legendre's elliptic integral of second kind;  $E(\psi_L)$  - Legendre's complete elliptic integral of second kind.

Each new mathematical model is required to undergo an experimental test. Different kinds of programs that implement calculations by the finite element method is used to detect errors and assess

the adequacy of new models. These programs have highly accurate calculations.

We made CAE-analysis of stress-strain state of mechanical brush wire in the program NX Advanced Simulation to verify the adequacy of the developed model [8-10]. Schematic diagram of the study is shown in Fig. 1.

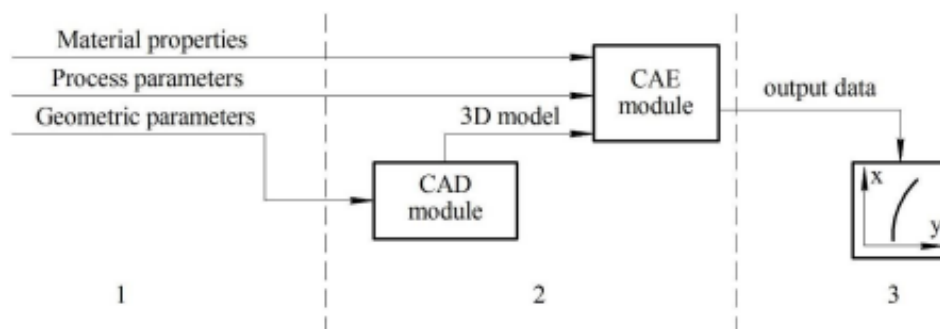


Figure 1 – Schematic diagram of the study:  
1 – Pre-process (input data); 2 – process; 3 – Post-process (output data).

Pre-process is input data of cladding process, the geometric parameters of tool and material properties.

The modeling process in the program has two stages. The first stage is creation of 3D model of the tool based on set parameters in the CAD module. The second stage is stress-strain state calculation of created 3D model in the CAE module.

Post-process is a function of the output data of the simulation object, for subsequent analysis.

According to this scheme (Fig. 1) we analyzed the data, calculated by the developed model. Input data: the detail surface is flat & process parameters:  $d=0,2$  mm;  $l=60$  mm;  $R=100$  mm;  $N=1,5$  mm. In the simulation, we used the contact force was calculated by the formula (1) and the deflection of the wire by flexible tool was calculated by the formula (2). The results of calculation and simulation are shown in Fig. 2.

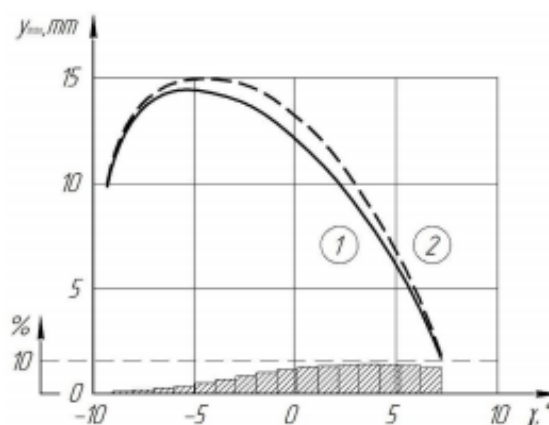


Figure 2 – Changing the wire deflection on the contact zone:  
1 – the calculated values; 2 – the modeled values; error value.

Error in the calculations on the contact zone was 1...9%. That tells us about the high degree of

correlation between the calculated and experimental data and the adequacy of the developed model.

**Impact Factor:**

|                          |                         |                      |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912       | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIIHII (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042       |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031  |                      |

After verification of the model in the CAE module, go to the more expensive step - experimental verification. Author [6] made a video shoot wire rotating brush in contact with the detail with help high-speed camera VS-FAST (5000 Hz). The discrepancy between the coordinate points of the elastic line calculation model and experimental results was 7...11%. We have this dispersion because flexible wires have a small change in the length.

The proposed method of evaluating mathematical model can significantly save time and money spent on development process, because it identifying errors in calculations by the fast and cheap CAE analysis. At the same time, we still need an experimental validation. The developed mathematical model showed a high adequacy at each stage of testing that does possible using of the model in further.

*Scientific research was executed under direction of Guljaev V.A, Cand. of Sc., associate professor, and Zotov A.V., senior lecturer of the Department «Equipment and technology of machine-building production» FSBEI HPE «Togliatti State University», Russia.*

**References:**

1. Ancupov VP (1999) Teoriya i praktika plakirovaniya izdelij gibkim instrumentom. Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova, 1999. 241 p.
2. Bokov AI (2001) Povyshenie dolgovechnosti detalej metallurgicheskogo oborudovaniya metodom plakirovaniya gibkim instrumentom s uchetom ego iznosa i ustalostnogo razrusheniya: dissertaciya kandidata tekhnicheskikh nauk. Magnitogorsk 2001. 129 p.
3. Kurguzov YI (2010) Uprochnenie kromok lopatok rabochih koles gazoturbinnih dvigatelej // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskie nauki. 2010. № 4. pp. 120-127.
4. Platov SI, Dema RR, Zotov AV (2013) Model' formirovaniya tolshchiny plakirovannogo sloya na detalyah par treniya tekhnologicheskogo oborudovaniya // Vestnik MGTU im. G.I. Nosova. 2013. №1. pp. 69-72.
5. Zotov AV (2013) Matematicheskoe modelirovanie rascheta geometricheskikh i ehnergosilovykh parametrov pri deformacionnom plakirovanii / A.V. Zotov, O.I. Drachev // Perspektivnye tekhnologii XXI veka. V 2 knigah. K. 2: monografiya / V. N. Ardat'ev, YU.V. Bahtina, P.P. Beskid i dr. - Odessa: KUPRIENKO SV, 2013. - Razd. 2.4. - pp. 79-94.
6. Popov EP (1986) Teoriya i raschet gibkikh uprugih sterzhnej. Moscow: Nauka, 1986. - 296 p.
7. (2014) Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM № 2014612918. Rossijskaya Federaciya. Raschet parametrov ploskogo kontakta pri plakirovanii provolochnym instrumentom / Bobrovskij A.V., Zotov A.V., Semenchko N.V.; zayavitel' i pravoobladatel' FGBOU VPO «Tol'yattinskij gosudarstvennyj universitet». - № 2014610212; zayavl. 16.01.2014; opubl. 20.04.2014, Reestr programm dlya EHVM - 1 p.
8. Goncharov PS (2012) NX Advanced Simulation. Inzhenernyj analiz / Goncharov P.S., Artamonov I.A., Halitov T.F., Denisihin S.V., Sotnik D.E. - Moscow: DMK Press, 2012. - 504 p.
9. (2014) Reiner Anderl, Peter Binde Kinematics, FEA, CFD, EM and Data Management. With Numerous Examples of NX 9. Hanser Fachbuchverlag, Oct. 1, 2014 - 396 p.
10. Goncharov P, Artamonov I, Khalitov T (2014) Engineering Analysis with NX Advanced Simulation. Lulu Press inc, Dec. 2, 2014 - Technology & Engineering - 672 p.



**ПРИЛОЖЕНИЕ Д**  
Опубликованные работы

**Teoretičeskaâ i prikladnaâ  
nauka**

---

**Theoretical & Applied  
Science**

**08 (28)**

**2015**

Рисунок Д.1 – Обложка сборника

## **International Scientific Journal Theoretical & Applied Science**

### **Editor-in Chief:**

**Alexandr Shevtsov (KZ)**

Hirsch index:

**h Index RISC = 1 (56)**

### **The Editorial Board:**

Prof. Vladimir Kestelman (USA)

**h Index Scopus = 2 (30)**

Prof. Arne Jönsson (Sweden)

**h Index Scopus = 3 (18)**

Prof. Sagat Zhunisbekov (KZ)

Founder : **International Academy of Theoretical & Applied Sciences**

Published since 2013 year.

Issued Monthly.

International scientific journal «Theoretical & Applied Science», registered in France, and indexed more than 36 international scientific bases.

Address of editorial offices: Djambyl street 128, 080000, Taraz, KZ.

Phone: +777727-606-81

E-mail: [T-Science@mail.ru](mailto:T-Science@mail.ru)

<http://T-Science.org>

**Impact Factor ICV = 6.630**

**Impact Factor ISI = 0.829**  
based on International Citation Report (ICR)

ISSN 2308-4944



9 772 308 494 157

© Collective of Authors

© «Theoretical & Applied Science»

Рисунок Д.2 – Выходные данные сборника

## Impact Factor:

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIHHI (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

## International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2015 Issue: 08 Volume: 28

Published: 30.08.2015 <http://T-Science.org>

**Nikolai Vladimirovich Semenchko**

Student of the Department  
«Equipment and technology of machine-building  
production»  
FSBEI HPE «Togliatti State University», Russia  
[bonder64@mail.ru](mailto:bonder64@mail.ru)

**Konstantin Olegovich Hryachkov**

Student of the Department  
«Equipment and technology of machine-building  
production»  
FSBEI HPE «Togliatti State University», Russia

SECTION 7. Mechanics and machine construction.

## CONTROL METHOD OF DEFORMATION CLADDING BASED ON POWER PARAMETERS

**Abstract:** This report describes the method of process control deformation cladding based on power parameters. We created the nomogram for determining the maximum strength in the contact zone during deformation cladding of flat surfaces. We have developed algorithm of an automatic control system, which eliminate the influence of wear wire and stabilize the quality parameters of coating layer at high level.

**Key words:** wire tool; cladding; contact force; nomogram; control method.

**Language:** English

**Citation:** Semenchko NV, Hryachkov KO (2015) CONTROL METHOD OF DEFORMATION CLADDING BASED ON POWER PARAMETERS. ISJ Theoretical & Applied Science 08 (28): 89-91.

**Soi:** <http://s-o-i.org/1.1/TAS-08-28-15> **Doi:** <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2015.08.28.15>

At present, methods of combined manufacturing of the surface layer apply to improve durability and reliability of details. One of these methods is deformation cladding by flexible tool [1-5]. This manufacturing method improves quality of surface layer. It is increases fatigue endurance, contact endurance, corrosion resistance and wear resistance.

The force ( $P$ ) in the contact zone of compressed-bent wire with surface of detail is one of the most important energy and power characteristics. It has strong effect on the quality of coatings

produced. Changing the contact force worsens the surface layer during processing. A good solution of this problem is control process of deformation cladding. This makes high quality of the coating formed. Contact force changes throughout contact zone. Figure 1 shows the dependence of the contact force for one of the wire of metal brush.

Process parameters: the diameter of wire –  $d=0,22\text{ mm}$ ; the radius of fictitious seal –  $R=100\text{ mm}$ ; the length of wire curved –  $l_s=60\text{ mm}$ , negative allowance –  $N_s=1,5\text{ mm}$ .

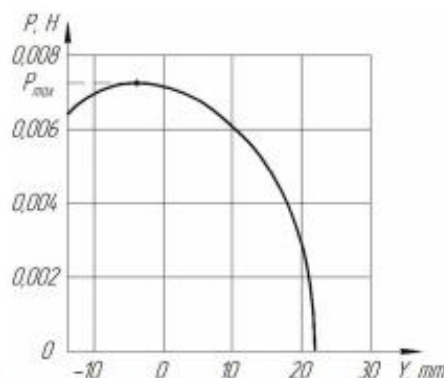


Figure 1 - Dependence of contact force with Y coordinate throughout the contact zone [6].

## Impact Factor:

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PHHI (Russia) = 0.179  |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

We determine the value of the function extremum ( $P_{max}$ ) based on the schedule (Fig. 1) and take it for a control parameter. The maximum contact force influences formation of coating thickness. Large the contact force causes shearing of the coating layer with help flexible elements of brush. This is unwanted return process of cladding material from the details. Natural wear of the wire affects parameters of deformation cladding, this leads to change of the contact force.

Natural wear of wire defines according article [7, 8], mm:

$$\Delta l = \mu \cdot \tau^{nm}, \quad (1)$$

where  $\mu$  – equivalent speed of natural wear,  $\tau^{nm}$  – time of natural wear ( $\tau^{nm}=250...280$  hour) [9].

After determining the natural wear, we can calculate change of the negative allowance  $\Delta N$ . This will make the condition  $P_{max}=const$ . Control of process based on this principle of calculation.

Nomogram for definition maximum stress and character wear of the wire tool was proposed in the article [10].

We created the nomogram for determining the maximum contact force without the rotation dynamics (Figure 2). This nomogram illustrates this control method.

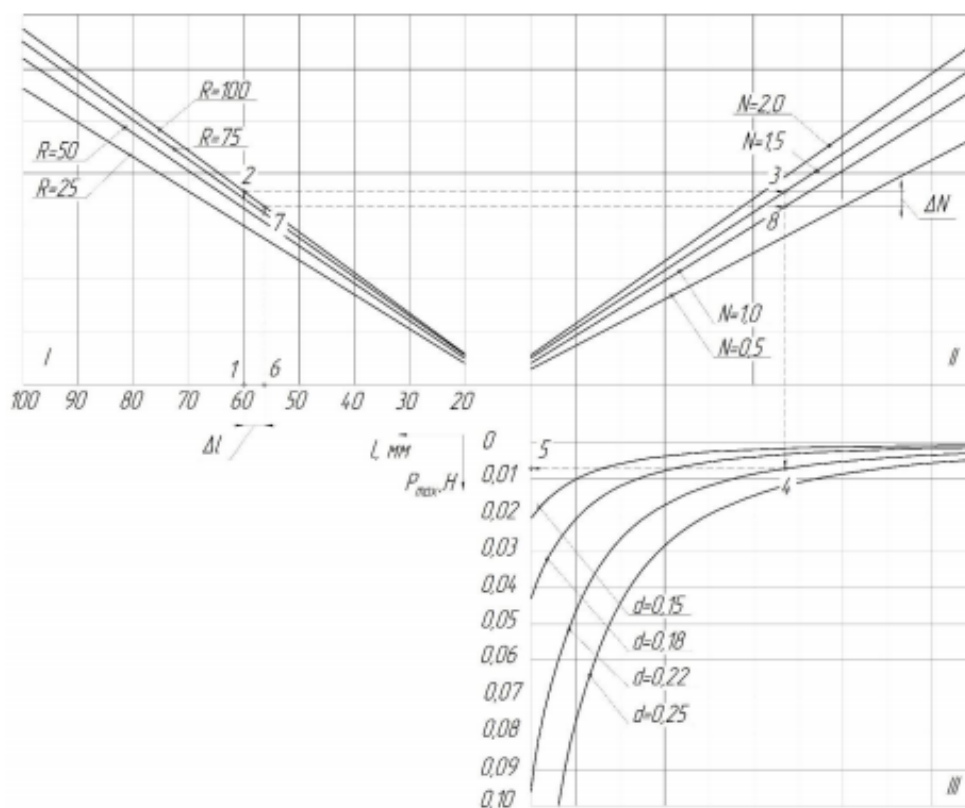


Figure 2 - The nomogram for determining the maximum strength in the contact zone during deformation cladding of flat surfaces.

This nomogram enough shows the principle of process control. In the example we use the previously defined parameters. Packing density of the wire provides a constant radius fictitious seal ( $R=const$ ). We calculate necessary change of negative allowance to contact force is being constant, with normal wear of wire tool.

We determine route of the nomogram (Fig. 2) 1-2-3-4-5. We choose the processing parameters in respective quadrants and get the maximum contact force –  $P_{max}$ . We define the define length of the wire at the currently time of processing –  $l_c$ .

$$l_c = l_n - \Delta l \quad (2)$$

**Impact Factor:**

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIHHI (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

The control system makes adjustments negative allowance ( $\Delta N$ ) in process of cladding to maintain a constant contact force. Adjustments negative allowance is the difference between points 3 and 8 at the nomogram (Fig. 2). The new route 6-7-8-4-5 is fully matching these criteria  $P_{\max} = \text{const}$ .

If you will use this nomogram you easy pick up the appropriate mode based on the power parameters of process in the cladding zone. If you will use this control method you can eliminate the influence of wear wire and stabilize the quality parameters of coating layer at high level.

*Scientific research was executed under direction of Guljaev V.A. Cand. of Sc., associate professor, and Zotov A.V., senior lecturer of the Department «Equipment and technology of machine-building production» FSBEI HPE «Togliatti State University», Russia.*

**References:**

1. Platov SI, Dema RR, Zotov AV (2013) Model' formirovaniya tolshchiny plakirovannogo sloya na detalyah par treniya tekhnologicheskogo oborudovaniya // Vestnik MGTU im. G.I. Nosova. 2013. №1. pp. 69-72.
2. Ancupov VP (1999) Teoriya i praktika plakirovaniya izdelij gibkim instrumentom. Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova, 1999. 241 p.
3. Belevskij LS (1987) Poverhnostnoe plasticheskoe deformirovanie s odnovremennym naneseniem pokrytij // Izv. Vuzov. Chernaja metallurgiya. – 1987. - №7. – pp. 104-106.
4. Kurguzov YI (2010) Uprochnenie kromok lopatok rabochih koles gazoturbinnih dvigatelej // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskie nauki. 2010. № 4. pp. 120-127.
5. Belevskij LS (1996) Plasticheskoe deformirovanie poverhnostnogo sloya i formirovanie pokrytiya pri nanesenii gibkim instrumentom. – Magnitogorsk: Licej RAN, 1996. – 231 p.
6. Zotov AV (2012) Metodika rascheta geometricheskikh i silovykh parametrov zony kontakta pri plakirovanii izdelij gibkim instrumentom // Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. № 3. pp. 85-88.
7. Bokov AI (2001) Povyshenie dolgovechnosti detalej metallurgicheskogo oborudovaniya metodom plakirovaniya gibkim instrumentom s uchetom ego iznosa i ustalostnogo razrusheniya: dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk. Magnitogorsk 2001. 129 p.
8. Semenchenko NV, Zotov AV, Emel'yanova NA (2014) Vliyanie iznosa instrumenta na moshchnost' i udarnuyu silu pri upravlenii processom plakirovaniya // Sbornik nauchnykh dokladov «Sovremennaya nauka. Novye perspektivy» (30.01.2014 - 31.01.2014) - Varshava: Bydgoshch: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2014. pp. 20-23.
9. Savel'ev VB, Ancupov VP, Bokov AI (1999) Nomogramma dlya opredeleniya resursa gibkogo plakiruyushchego instrumenta // Modelirovanie i razvitie tekhnologicheskikh processov obrabotki metallov davleniem: sb. nauch. tr. Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova. 1999. pp. 183-189.
10. Zotov AV, Semenchenko NV (2013) Selecting a material for pile wire tool // Pressing issues and priorities in development of the scientific and technological complex: research articles, B&M Publishing, San Francisco, California. 2013. pp. 113-116.



**ПРИЛОЖЕНИЕ Е**

Опубликованные работы

**Teoretičeskaâ i prikladnaâ  
nauka**

---

**Theoretical & Applied  
Science**

**09 (29)**

**2015**

Рисунок Е.1 – Обложка сборника

# International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

## Editor-in Chief:

Alexandr Shevtsov (KZ)

Hirsch index:

**h Index RISC = 1 (56)**

## The Editorial Board:

Prof. Vladimir Kestelman (USA)

**h Index Scopus = 2 (30)**

Prof. Arne Jönsson (Sweden)

**h Index Scopus = 3 (18)**

Prof. Sagat Zhunisbekov (KZ)

Founder : **International Academy of Theoretical & Applied Sciences**

Published since 2013 year.

Issued Monthly.

International scientific journal «Theoretical & Applied Science», registered in France, and indexed more than 36 international scientific bases.

Address of editorial offices: Djambyl street 128, 080000, Taraz, KZ.

Phone: +777727-606-81

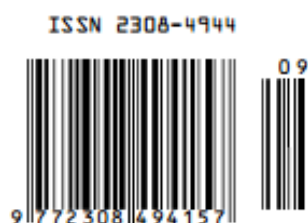
E-mail: [T-Science@mail.ru](mailto:T-Science@mail.ru)

<http://T-Science.org>

**Impact Factor ICV = 6.630**

**Impact Factor ISI = 0.829**

based on International Citation Report (ICR)



© Collective of Authors

© «Theoretical & Applied Science»

**Impact Factor:**

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIHHI (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)**International Scientific Journal  
Theoretical & Applied Science**

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2015 Issue: 09 Volume: 29

Published: 30.09.2015 <http://T-Science.org>**Nikolai Vladimirovich Semenenko**Student of the Department  
«Equipment and technology of machine-building  
production»  
FSBEI HPE «Togliatti State University», Russia  
[bonder64@mail.ru](mailto:bonder64@mail.ru)**Konstantin Olegovich Hryachkov**Student of the Department  
«Equipment and technology of machine-building  
production»  
FSBEI HPE «Togliatti State University», Russia**SECTION 7. Mechanics and machine  
construction.****TRENDS OF THE DEFORMATION CLADDING BY FLEXIBLE TOOL**

**Abstract:** This report describes the basic trends of the deformation cladding by flexible tool, changes have occurred during development of this method. Main directions during development of the deformation cladding had been classified. The existing schemes of deformation cladding, the application of additional effects, constructions of alloy elements, constructions of flexible tools have been analyzed. We discussed their strengths and weaknesses. Possible direction of further development was revealed.

**Key words:** flexible tool; cladding; coating method; scheme of the process; constructions of alloy elements; additional effects; constructions of flexible tools.

**Language:** Russian

**Citation:** Semenenko NV, Hryachkov KO (2015) TRENDS OF THE DEFORMATION CLADDING BY FLEXIBLE TOOL. ISJ Theoretical & Applied Science 09 (29): 105-114.

**SoI:** <http://s-o-i.org/1.1/TAS-09-29-21> **Doi:** <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2015.09.29.21>

**ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТОДА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПЛАКИРОВАНИЯ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ**

**Аннотация:** В данной статье рассмотрены основные тенденции развития метода деформационного плакирования гибким инструментом, рассмотрены изменения, произошедшие с данным методом. Классифицированы основные направления развития процесса ДПГИ, проанализированы предложенные схемы реализации процесса, применение дополнительных физических воздействий, конструкции элемента материала покрытия и конструкции гибкого инструмента; рассмотрены их слабые и сильные стороны. Выявлено возможное направление дальнейшего развития данного метода нанесения покрытий.

**Ключевые слова:** гибкий инструмент; плакирование; метод нанесения покрытий; схема реализации процесса; конструкции ЭМП; дополнительные воздействия; конструкции гибкого инструмента.

Деформационное плакирование – один из универсальных методов модификации поверхностного слоя рабочих поверхностей деталей, позволяющий добиться не только упрочнения поверхности, но и, одновременно, нанести на нее покрытие [1]. В отличие от других методов нанесения служебных покрытий, данный метод не требует предварительной обработки поверхности изделия, так как очистка поверхности осуществляется в процессе плакирования.

В настоящее время происходит внедрение данного метода в разные отрасли промышленности, в частности в производства биметаллической ленты и проволоки, нанесения служебных покрытий на детали, работающие в узлах трения, восстановления изношенных деталей, нанесения защитных и

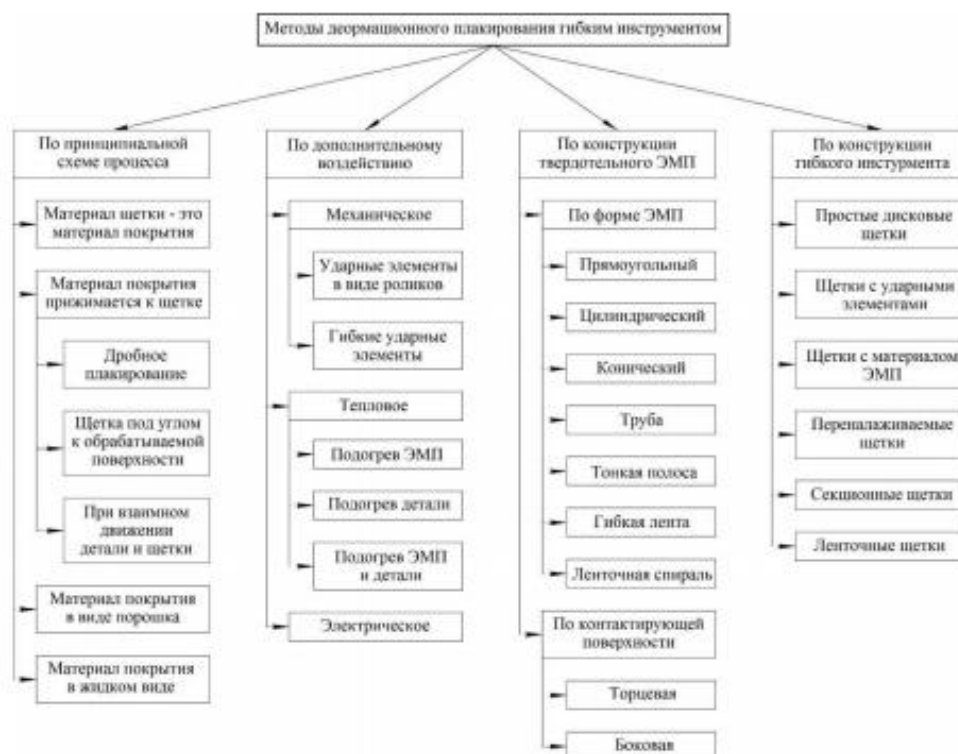
антикоррозионных покрытий. Метод деформационного плакирования с каждым годом претерпевает модернизацию и развитие. На рис. 1 представлены основные направления развития метода плакирования.

Представленная классификация показывает, что развитие плакирования происходит в разных направлениях, изменяются конструкции установок для нанесения покрытия, процесс плакирования дополняется физическими воздействиями с целью его интенсификации, совершенствуются составы наносимого материала, выбираются оптимальные скорости обработки, принципиальные схемы реализации процесса, улучшаются конструкции гибкого инструмента (механической щетки) и многое другое.



## Impact Factor:

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIHHC (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |



**Рисунок 1 – Классификация методов ДПИ.**

### СХЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПЛАКИРОВАНИЯ

Существуют две принципиально различные схемы реализации процесса деформационного плакирования. Первая (рис. 2), предложенная в 1960 году изобретателями: Смирновым И.М.,

Николаевым Н.А., Крыловым С.Д. [2], отличается тем, что в качестве материала наносимого покрытия выступают проволочные элементы гибкого инструмента. Данную схему рекомендуется применять ее авторами для нанесения серебряного покрытия.

# Impact Factor:

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | ПИИЦ (Russia) = 0.179  |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

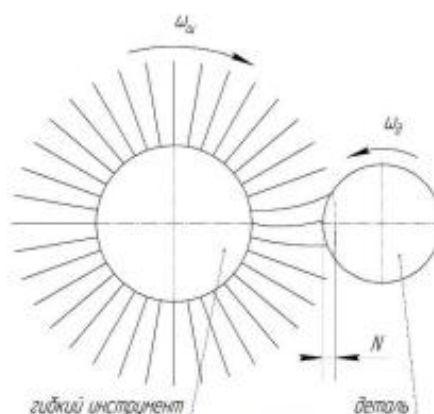


Рисунок 2 – Схема ДПИ №1.

Она получила свое развитие в работе [3], где рекомендовано ее применение при нанесении никеля, черных и тугоплавких металлов.

Вторая же схема (рис. 3) предложена изобретателем Абиндером А.А. еще в 1937 году [4]. В которой механическая щетка играет роль механического переносчика частиц с элемента материала покрытия на обрабатываемую поверхность детали.

Именно данная схема плакирования приобрела большую популярность и получила свое развитие во многих научных работах. В таких как работы исследователей из Магнитогорского государственного технического университета, где была предложена схема дробного плакирования (рис. 4), разработанная с целью получения покрытий толщиной от 100 до 1000 мкм и более [5].

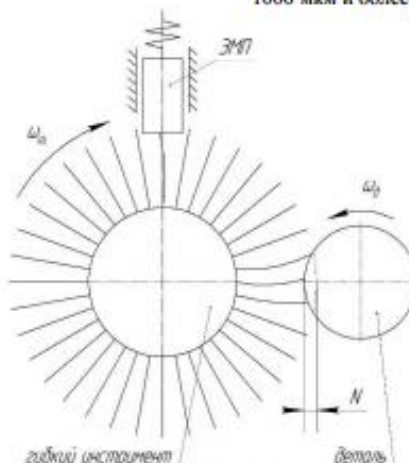


Рисунок 3 – Схема ДПИ №2.

Отличие данной схемы состоит в сообщении дополнительного движения обрабатываемой детали в направлении перпендикулярной оси щетки, что позволяет достичь эффекта

многократного временного взаимодействия гибких элементов инструмента и обрабатываемой поверхности детали.

# Impact Factor:

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | ПИИЦ (Russia) = 0.179  |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

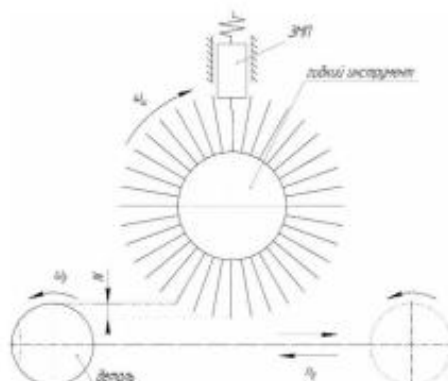


Рисунок 4 – Схема дробного плакирования.

Так же механическая щетка может устанавливаться под углом к плакируемой поверхности детали (рис. 5), так при плакировании деталей цилиндрической формы, продольные оси обрабатываемой детали и щетки могут перекрещиваться в пространстве, то есть их проекции могут быть перпендикулярны, либо пересекаться под углом 25-45 градусов [4, 6-16].

Чаще всего данная схема применяется для плакирования проволоки или ленты, что снижает разнотолщинность наносимого на нее покрытия. Данный метод получил свое развитие в работе [17], где применена оригинальная траектория движения плакируемой ленты и в работе [18], где добавлено возмущающее воздействие в виде кручения на обрабатываемую проволоку.

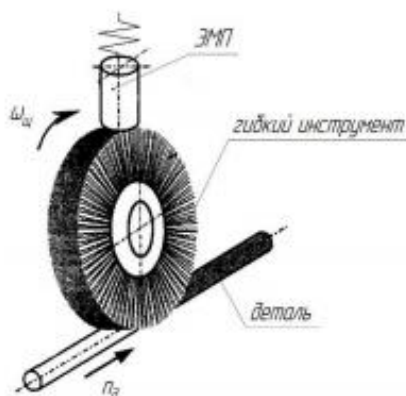


Рисунок 5 – Схема плакирования проволоки.

Еще одна схема реализации процесса плакирования представлена на рис. 6, которая чаще всего применяется при обработке плоских и широких деталей. В литературе [1, 19, 20] обрабатываемая поверхность движется

поступательно относительно щетки в двух направлениях, что позволяет наносить на поверхность покрытие с необходимым рисунком, например в виде сетки, для повышения маслостойкости поверхностного слоя.

## Impact Factor:

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIIHЦ (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

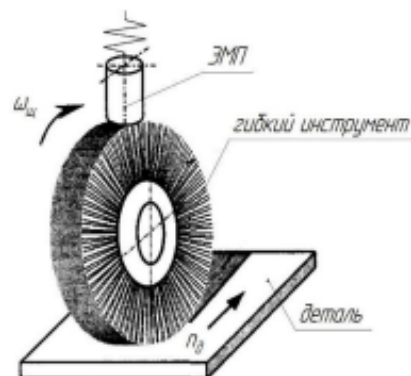


Рисунок 6 – Схема плакирования листа.

В процессе развития, метода деформационного плакирования гибким инструментом материал покрытия стали применять не только в виде твердого бруска, прижимаемого к щетке. Изобретателями: Белевский Л.С., Харитонов А.О., Кутлубаев И.М., Серов Н.В. был предложен метод плакирования для нанесения тугоплавких материалов с использованием материала покрытия в виде порошка, подаваемого в непосредственно зону контакта гибкого инструмента с поверхностью детали [21].

В работах же [22-26] изобретатели: Берсудский А.Л., Малышев В.П. и др. предлагают использовать материал покрытия в жидком состоянии на основе хлорида меди.

Все данные подходы имеют место в производственной практике и показывают хорошие результаты, при правильном выборе метода для конкретных условий обработки.

## ПРИМЕНЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Для интенсификации процесса деформационного плакирования в ряде работ авторы предлагают использовать дополнительное механическое, тепловое или электрическое воздействие на процесс.

Авторы изобретения [27] предлагают дополнительно воздействовать на обрабатываемую поверхность, пластически деформировать ее ударными элементами в виде роликов, установленных на гибком инструменте. Что повышает прочностные характеристики обработанной поверхности. В изобретении [28] для механического воздействия на поверхность предусмотрены гибкие ударные элементы, представляющие из себя жесткие ворсинки

(жесткость которых больше жесткости остального ворса в 3-3000 раз), установленные в цилиндрической щетке в шахматном порядке, которые обеспечивают получение на поверхности обрабатываемого изделия рисунка определенного профиля. В работах [29, 30] используются интересные варианты комплектации ворса щеток, рабочие элементы которых состоят из ворсинок разной твердости и чередуются между собой. При этом гибкие элементы из более мягкого материала выполнены в виде трубок и армированы более твердым ворсом.

Другие же исследователи предлагают тепловое воздействие в виде предварительного нагрева плакируемой детали [31], что ускоряет начало процесса термомеханического переноса частиц материала покрытия на обрабатываемую поверхность. Так же для ускорения процесса переноса авторы работ [16, 32, 33] предлагают нагревать элемент из материала покрытия. Что и сделали изобретатели в работе [34], они нагревали элемент из материала покрытия пропуская через него электрический ток, через специальный цилиндрический ролик. Применение данных методик позволяет осуществлять нанесение покрытий из твердых малопластичных металлов.

Электрическое же воздействие на процесс, представлено не только в работах [34, 35], где оно использовано для разогрева элемента из материала покрытия. Оно так же используется для расширения возможностей процесса плакирования путем нанесения более твердых, чем основа, токопроводящих материалов за счет совмещения процессов электрической эрозии и электроискрового легирования [36].

**Impact Factor:**

ISRA (India) = 1.344  
 ISI (Dubai, UAE) = 0.829  
 GIF (Australia) = 0.356  
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
 ПИНЦ (Russia) = 0.179  
 ESJI (KZ) = 1.042  
 SJIF (Morocco) = 2.031

ICV (Poland) = 6.630

### ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЭМП

Одним из направлений развития технологии плакирования гибким инструментом является совершенствование конструкции, формы и размеров элемента материала покрытия. Был предложен целый ряд различных конструкций ЭМП в форме брусков прямоугольного сечения [37].

Изобретатели предлагали разные конструкции установок с цилиндрическими стержнями из материала покрытия [38–40] для получения однородных покрытий по всей длине обработки. Для экономии цветных металлов за счет сплавления с другими металлами и одновременного нанесения сплавов на поверхность авторы [41] снабдили устройство, помимо одного основного ЭМП, дополнительными брусками из различных металлов, причем бруски расположены в порядке возрастания температуры плавления материалов брусков, последовательно друг за другом по направлению вращения щетки. Предложены так же устройства для подачи элемента материала покрытия в зону обработки [42, 43], с помощью которых осуществляется контролируемый прижим ЭМП к торцевой поверхности механической щетки, где ЭМП устанавливается в направляющую трубку, а величина силы прижима контролируется натяжным винтом. Само же устройство устанавливается либо перпендикулярно к оси вращения гибкого инструмента [42], либо под специально рассчитанным углом к касательной, проведенной в точку касания бруска и щетки [43].

Авторы изобретения [34], с целью повышения качества покрытия, предлагают конец бруска, контактирующий с ворсом щетки, выполнить в виде конуса и установить его с натягом к щетке с возможностью вращения. Так же выполняют элементы материала покрытия в виде тонких полос [44] и гибких лент [35] для обработки, чаще всего, длинных металлических полос. Данные методы позволяют повысить равномерность и толщину наносимого покрытия, что положительно сказывается на качестве обработанных изделий.

С целью расширения технологических возможностей метода деформационного плакирования, за счет устранения эффекта перемешивания поверхностного слоя материала покрытия в зоне контакта с ворсом проволоочного инструмента, ЭМП выполнен в виде полого цилиндра (трубы) [45]. Данный способ получил свое развитие в работе [46], где предложено использовать элемент из материала покрытия в виде набора концентрично расположенных цилиндров, изготовленных из различных

материалов и расположенных в определенной последовательности начиная с наружного.

Для нанесения покрытий из малопластичных твердых материалов авторами работы [47] предложено изготавливать ЭМП в виде ленточной спирали, один конец которой установлен с возможностью контакта с механической щеткой, а ось спирали параллельна оси гибкого инструмента. Сама же спираль устанавливается в специальную теплоизолирующую оправку с направляющими.

Кроме применения более новых форм ЭМП в процессе развития были предложены и разные способы контакта элемента с периферией гибкого инструмента. Контакт торцевой поверхностью [38–43, 45, 46] можно считать «классическим», так как он предлагается к использованию начиная с самых ранних работ и используется чаще всего. Кроме него для экономии материала покрытия и снижения энергозатрат в процессе съема материала покрытия металлической щеткой и повышения стойкости гибкого инструмента, материал покрытия прижимается к щетке боковой поверхностью, а сам он имеет возможность осевого вращения в процессе обработки [48].

В развитие данного направления авторами [49] было предложено специальное устройство для подачи ЭМП в зону покрытия, выполненного в виде ролика и установленного на оси с возможностью вращения; снабженное механизмом прижима его посредством пружины к периферии щетки. Данное устройство отличается тем, что снабжено механизмом регулирования силы прижатия и тормозной колодкой, что дает возможность более гибкой настройки.

### ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИЙ ГИБКОГО ИНСТРУМЕНТА

В наши дни известно довольно много различных видов гибких инструментов, таких как: дисковые, валковые, кольцевые, торцевые, концевые, плоские, пучковые, секционные, ленточные щетки и даже иглофрезы [50]. Однако не все виды данных инструментов могут быть применены для деформационного плакирования, потому что при плакировании необходимо обеспечить не только определенное напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя, но также и определенную тепловое воздействие [51, 52].

Чаще всего при нанесении покрытий методом плакирования используются простые и универсальные дисковые щетки, изготовленные из проволоки различных марок стали:



## Impact Factor:

ISRA (India) = 1.344  
ISI (Dubai, UAE) = 0.829  
GIF (Australia) = 0.356  
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
PIIHQ (Russia) = 0.179  
ESJI (KZ) = 1.042  
SJIF (Morocco) = 2.031

ICV (Poland) = 6.630

- легированной пружинной, термически обработанной (ГОСТ 14963-78),
- низкоуглеродистой, термически обработанной (ГОСТ 3282-74),
- углеродистой инструментальной У7А, У8А (ГОСТ 1435-99),
- пряди стальных канатов (ГОСТ 7372-79),
- металлокорд (ГОСТ 14311-85).

Не существует единого мнения о материале для производства ворса гибкого инструмента.

Для повышения качества обработки и расширения возможностей ДПГИ в конструкцию щеток вносятся различные дополнения. В работе [27] авторами, для достижения дополнительной пластической деформации, ворс щетки предлагается комбинировать с ударными элементами в форме роликов, которые в процессе обработки ударяются об обрабатываемую поверхность детали, вызывая ее дополнительное упрочнение. В качестве дополнительных ударных элементов может выступать так же ворс самой щетки [28], авторами предложен метод комбинирования ворса проволоочного инструмента из проволоки различной жесткости, для обеспечения дополнительного ударного воздействия на обрабатываемую поверхность.

С целью решения проблемы с размещением ЭМП при обработке внутренних поверхностей деталей авторами [53] предложено выполнять металлическую щетку с брусками из материала покрытия и узлами их прижатия, располагающимися между ворсом щетки, причем данные узлы закреплены со стороны основания, а элементы материала покрытия обращены наружу ворса. Что позволяет обрабатывать внутренние поверхности.

Для обработки сложных наружных и внутренних поверхностей предложено использование секционных щеток [54, 55]. Применяя блоки из отдельных секций появляется возможность обработки эвольвентных поверхностей зубчатых колес, шлицевых поверхностей и других сложных по конфигурации, в том числе и внутренних поверхностей. Для интенсификации процесса упрочнения при плакировании гибким инструментом дисковые щетки также изготавливают секционными [56]. Секции у данного вида щеток расположены по окружности, и зачастую, секции чередуются: по жесткости ворса, либо с пустыми секциями без ворса. Что увеличивает энергию удара ворсинок о поверхность обрабатываемого изделия.

Для повышения производительности процесса плакирования и снижения экономических затрат на проволоочные щетки были разработаны конструкции гибкого инструмента [29, 57], обеспечивающие его

переналадку по мере износа (или полного выхода из строя) ворса щетки. Конструкция механической щетки [57] отличается тем, что каждая секция в цилиндрической оправе закреплена затяжным винтом с возможностью перемещения в радиальном направлении, что позволяет подстраивать длину ворса под необходимый размер.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ. НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

Проанализированные работы показывают достаточную изученность процесса деформационного плакирования в плане множества возможных схем реализации процесса, возможности интенсификации процесса дополнительными физическими воздействиями, проработанных конструкций гибкого инструмента, элемента из материала покрытия и конструкций его подачи в зону обработки. Что позволяет использовать данный метод для различного сочетания условий процесса, различными материалами детали, инструмента и материала покрытия, с постоянно высокими показателями качества получаемых изделий.

Основное развитие метода происходит в направлении усовершенствования работы схемы обработки, предложенной изобретателем Абиндером А.А. (рис. 2б). Большое количество различных методик обработки предложено изобретателями, которые охватывают практически все различные сферы применения метода плакирования и позволяют наносить покрытия различного функционального назначения на поверхности изделий машиностроения.

Дальнейшие тенденции развития данного метода, скорее всего, будут направлены на автоматизацию процесса. Так как для нормальной работы проволоочного инструмента в режиме нанесения покрытия на обрабатываемую поверхность детали необходимо постоянство основных параметров, характеризующих этот процесс (скорости вращения ворса гибкого инструмента, усилия прижатия механической щетки к обрабатываемому изделию, температуры процесса и д.р.).

Автоматизация процесса предусматривает управление основными параметрами, следовательно, необходимы зависимости этих параметров от входных параметров процесса плакирования. Что ставит перед нами задачу детального изучения математических моделей описывающих данный процесс.



**Impact Factor:**

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIIHQ (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

*Исследование выполнено под руководством Гуляева В.А., к.т.н. доцент и Зотова А.В., ст. преп. кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» ФГОБУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», Россия*

**References:**

1. Ancupov VP (1999) Teorija i praktika plakirovanija izdelij gibkim instrumentom. Magnitogorsk: MGUTU im. G.I. Nosova, 1999. 241 p.
2. (1961) A.s. 139892 USSR, MKI S 23 S 17/00. Avtomat dlja serebrenija ciferblatov chasov metodom natiraniya / I.M. Smirnova, N.A. Nikolaev, S.D. Krylov // Otkrytija. Izobretenija. 1961. № 14. pp. 59.
3. Bokov AI (2001) Povyshenie dolgovechnosti detalej metallurgicheskogo oborudovanija metodom plakirovanija gibkim instrumentom s ucheto ego iznosa i ustalostnogo razrushenija: Dis. kand. tehn. nauk. Magnitogorsk, 2001. 126 p.
4. (1940) A.s. 57162 USSR, MKI S 23 S 17/00. Sposob nanesenija metallicheskih pokrytij / A.A. Abinder // Otkrytija. Izobretenija. 1940. № 6. pp. 1-3.
5. Onshin NV (2001) Razrabotka i issledovanie metoda drobnogo plakirovanija gibkim instrumentom dlja proizvodstva bimetallicheskih detalej metallurgicheskogo oborudovanija povyshennoj iznosostojkosti: Dis. kand. tehn. nauk. Magnitogorsk, 2001. 119 p.
6. (1995) Sovershenstvovanie tehnologicheskikh processov na metallurgicheskom kombinat / A.A. Gosteev, E.G. Kozodaev, I.G. Gun, V.M. Salganik, V.P. Ancupov, I.Ju. Mezin, V.E. Hrebtov, M.V. Chukin. – M.: Metallurgija, 1995. – 170 p.
7. (1992) A.s. 1733506 USSR, MKI S 23 S 26/00. Sposob nanesenija pokrytij / Ju.V. Sankin, V.D. Gusev // B.I. – 1992. № 18. pp. 101.
8. (1991) A.s. 1687646 USSR, MKI S 23 S 26/00. Sposob nanesenija pokrytij iz aljuminija i ego splavov / I.I. Osheverov, P.N. Smirnov, L.S. Belevskij, V.I. Kadoshnikov, A.Ja. Tonkonogov, V.V. Raevskij // B.I. – 1991. № 40. pp. 92.
9. (1991) A.s. 1682663 USSR, MKI F 16 S 33/12. Sposob poluchenija pary trenija skol'zhenija / V.P. Ancupov, L.S. Belevskij, I.I. Osheverov, P.N. Smirnov, V.A. Dosmanov, N.P. Zaharov, N.A. Pisarev, R.H. Tagirov // B.I. – 1991. № 37. pp. 144.
10. (1991) A.s. 1671733 USSR, MKI S 23 S 26/00. Sposob nanesenija pokrytij na provoloku / I.I. Osheverov, P.N. Smirnov, L.S. Belevskij, V.I. Kadoshnikov // B.I. – 1991. № 31. pp. 84.
11. (1991) A.s. 1668473 USSR, MKI S 23 S 26/00. Sposob nanesenija metallicheskogo pokrytija / V.I. Kadoshnikov, L.S. Belevskij, I.I. Osheverov, P.N. Smirnov, V.L. Trahtengerc // B.I. – 1991. № 29. pp. 121.
12. (1990) A.s. 1558996 USSR, MKI S 23 S 26/00. Ustrojstvo dlja nanesenija metallicheskih pokrytij na lentu / I.I. Osheverov, P.N. Smirnov, A.A. Titova, N.P. Osheverova // B.I. – 1990. № 23. pp. 129.
13. (1986) A.s. 1258873 USSR, MKI S 23 S 8/60. Ustrojstvo dlja nanesenija pokrytij na provoloku / I.I. Osheverov, P.N. Smirnov, L.S. Belevskij, V.V. Krivoshepov, V.I. Kadoshnikov // B.I. – 1986. № 35. pp. 109.
14. (1986) A.s. 1215923 USSR, MKI S 23 K 20/04. Sposob poluchenija bimetallicheskoj lenty / L.S. Belevskij, V.I. Kadoshnikov, I.I. Osheverov, P.N. Smirnov // B.I. – 1986. № 9. pp. 56.
15. Belevskij LS, Buhinik GV, Kadoshnikov VI (1987) Ustanovka dlja nanesenija pokrytija na provoloku i lentu mehanicheskim sposobom // Bjul. In-ta «Chermetinformacija». – 1987. - №3. – pp.51-52.
16. Belevskij LS (1987) Poverhnostnoe plasticheskoe deformirovanie s odnovremennym naneseniem pokrytij // Izv. Vuzov. Chernaja metallurgija. – 1987. - №7. – pp. 104-106.
17. (1990) A.s. 1586878 USSR, MKI S 23 K 26/00. Ustrojstvo dlja nanesenija metallicheskih pokrytij na lentu / P.N. Smirnov, I.I. Osheverov, L.S. Belevskij, A.A. Titova // B.I. – 1990. № 31. pp. 76.
18. (1986) A.s. 1258875 USSR, MKI S 23 K 26/00. Sposob nanesenija pokrytij na provoloku / B.A. Nikiforov, I.I. Osheverov, P.N. Smirnov, L.S. Belevskij, V.V. Krivoshepov, V.I. Kadoshnikov // B.I. – 1986. № 35. pp. 109.
19. Belevskij LS (1996) Plasticheskoe deformirovanie poverhnostnogo sloja i formirovanie pokrytija pri nanesenii gibkim instrumentom. – Magnitogorsk: Licej RAN, 1996. – 231 p.
20. Ancupov VP (1997) Tehnologicheskie osnovy poluchenija bimetallicheskih izdelij



## Impact Factor:

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PHHIQ (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

- plakirovanem gibkim instrumentom: Dis. dokt. tehn. nauk. Magnitogorsk, 1997. 323 p.
21. (1994) A.s. RU 2015853 C1, MPK B22F 7/00. Sposob poluchenija pokrytij na poverhnosti metallicheskih izdelij / Belevskij L.S., Haritonov A.O., Kutlubaev I.M., Serov N.V. // 1994.
  22. (1999) A.s. RU 2138579 C1, MPK S23S 26/00. Sposob uprochnenija detalej s odnoremennym nanoseniem kompozicionnyh pokrytij / Gromakovskij D.G., Bersudskij A.L., Kovshov A.G., Malyshev V.P., Ibatullin I.D. // 1999.
  23. (2007) A.s. RU 2308542 C1, MPK S23S 26/00, 30/00. Sposob nanosenija metallicheskih pokrytij na rabochie poverhnosti detalej mashin / Bersudskij A.L., Malyshev V.P., Astrahanskij A.Ju. // 2007. №29.
  24. (2010) A.s. RU 2399696 C1, MPK S23S 26/00. Sposob uprochnenija detalej s odnoremennym nanoseniem pokrytija / Bersudskij A.L., Zhdanov A.G., Astrahanskij A.Ju., Malyshev V.P. // 2010. №26.
  25. Bersudskij A.L. (1987) Ustoichivost' ostatochnykh naprjazhenij poverhnostnogo sloja pri trenii posle uprochnjajushhej obrabotki s odnoremennym nanoseniem pokrytija: Mezhevuz. sb. nauchn. tr. Sverdlovsk: UPI, 1987. t. 11. pp. 24-27.
  26. Bersudskij A.L. (1987) Mehanizm formirovanija antifrikcionnyh pokrytij pri uprochnjajushhej obrabotke: Mezhevuz. sb. nauchn. tr. Sverdlovsk: UPI, 1987. t. 11. pp. 24-27.
  27. (1990) A.s. 1579744 USSR, MKI B 24 B 39/00. Ustrojstvo dlja nanosenija metallicheskih pokrytij na izdelija / V.S. Blinov, I.I. Osheverov, P.N. Smirnov, L.S. Belevskij // Otkrytija. Izobretenija. – 1990. № 27. pp. 65-66.
  28. (1988) A.s. 1433466 USSR, MKI A 46 B 7/10. Cilindricheskaja shhetka dlja obrabotki poverhnosti / V.S. Blinov, I.I. Osheverov, P.N. Smirnov, L.S. Belevskij, V.V. Belan // 1988. № 40.
  29. (1992) A.s. 1705406 USSR, MKI S 23 S 26/00. Ustrojstvo dlja frikcionnogo mehanicheskogo nanosenija pokrytij / T.K. Soldatova // B.I. – 1992. - № 2. – pp. 118.
  30. (1992) A.s. 1784659 USSR, MKI S 23 S 26/00. Ustrojstvo dlja obrabotki poverhnostej / A.V. Titenok, V.V. Titenok // B.I. – 1992. - № 48. – pp. 85.
  31. (1993) Pat. 1793977 USSR, MKI V 21 V 28/02. Sposob uprochnenija metallicheskoj poverhnosti / L.S. Belevskij, A.I. Starikov, V.P. Ancupov i dr. // Otkrytija. Izobretenija. 1993. № 5. – pp. 188-189.
  32. Kadosnikov VI, Kadosnikova ID (1987) Poverhnostnoe plasticheskoe deformirovanie s odnoremennym nanoseniem pokrytij // Teorija mashin metallurgicheskogo i gornogo oborudovanija: Mezhevuz. sb. nauchn. tr. Sverdlovsk: UPI, 1987. Vyp. 11. pp. 24-27.
  33. Belevskij L.S., Zavalishina EG (1990) Metallizacija poverhnosti stali metallicheskim shhetkami // Teorija i praktika processov obrabotki kompozicionnyh i sploshnyh materialov: Mezhevuz. sb. nauchn. tr. Magnitogorsk: MGMI, 1990. pp. 88-92.
  34. (1987) A.s. 1344588 USSR, MKI V 24 V 39/00. Ustrojstvo dlja nanosenija pokrytij na izdelie / S.S. Dudaev, P.N. Smirnov, I.I. Osheverov, L.S. Belevskij // Otkrytija. Izobretenija. 1987. № 38. pp. 72.
  35. (1990) A.s. 1588803 USSR, MKI S 23 S 26/00. Ustrojstvo dlja nanosenija pokrytija na poverhnost' / S.P. Gurov, S.L. Goncharov, S.Ja. Klepak // Otkrytija. Izobretenija. 1990. № 32. pp. 114-115.
  36. (1992) A.s. 1733502 USSR, MKI S 23 S 26/00. Ustrojstvo dlja nanosenija pokrytij / A.Ju. Happalaev, O.V. Cygulev, V.S. Veremchuk, B.A. Ljashenko, M.M. Abacharaev, A.V. Rutkovskij // Otkrytija. Izobretenija. 1992. № 18. pp. 100-101.
  37. (1994) Konstrukcii slitkopodajushhih ustrojstv v processah nanosenija metallicheskih pokrytij / V.I. Kadosnikov, V.S. Blinov, L.S. Belevskij, I.D. Kadosnikova // Tez. dokl. Mezhsudarstvennoj nauchn.-tehn. konf.: Sostojanie i perspektivy razvitiya nauchno-tehnicheskogo potencijala Juzhno-Ural'skogo regiona. Sekcii: Mashinostroenie, Gornoe delo. Magnitogorsk, 1994. pp. 44-45.
  38. (1996) A.s. 1206068 USSR, MKI V 24 K 39/00. Sposob nanosenija pokrytija / L.S. Belevskij, V.I. Kadosnikov, Ju.M. Mironov, I.D. Kadosnikova // B.I. – 1996. № 3. pp. 54.
  39. (1993) Pat. 2381077, MKI V 21 V 28/02. Sposob uprochnenija metallicheskoj poverhnosti / L.S. Belevskij, A.I. Starikov, V.P. Ancupov i dr. // Otkrytija. Izobretenija. 1993. № 5. – pp. 188-189.
  40. (2007) A.s. RU 2224822 C1, MPK S23S 26/00, 30/00. Sposob nanosenija metallicheskih pokrytij na rabochie poverhnosti detalej mashin / Bersudskij A.L., Malyshev V.P., Astrahanskij A.Ju. // 2007. №29.
  41. (1986) A.s. 1446194 USSR, MKI V 24 K 39/00. Sposob nanosenija pokrytija / L.S. Belevskij, V.I. Kadosnikov, Ju.M. Mironov, I.D. Kadosnikova // B.I. – 1986. № 3. p. 54.
  42. (2010) A.s. RU 2384654 C1, MPK S23S 26/00. Sposob uprochnenija detalej s odnoremennym nanoseniem pokrytija / Bersudskij A.L., Zhdanov A.G., Astrahanskij A.Ju., Malyshev V.P. // 2010. №26.
  43. (1994) A.s. RU 2008367 C1, MPK B22F 7/00. Sposob poluchenija pokrytij na poverhnosti



**Impact Factor:**

ISRA (India) = 1.344  
ISI (Dubai, UAE) = 0.829  
GIF (Australia) = 0.356  
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912  
PIIHII (Russia) = 0.179  
ESJI (KZ) = 1.042  
SJIF (Morocco) = 2.031

ICV (Poland) = 6.630

- metallicheskikh izdelij / Belevskij L.S., Haritonov A.O., Kutlubaev I.M., Serov N.V. // 1994.
44. (1990) A.s. GV 863087, MKI S 23 S 26/00. Ustrojstvo dlja nanesenija metallicheskikh pokrytij na lentu / I.I. Osheverov, P.N. Smirnov, A.A. Titova, N.P. Osheverova // B.I. – 1990. № 23. pp. 129.
45. (1987) A.s. 15990354 SSSR, MKI V 24 V 39/00. Ustrojstvo dlja nanesenija pokrytij na izdelie / S.S. Dudaev, P.N. Smirnov, I.I. Osheverov, L.S. Belevskij // Otkrytija. Izobretenija. 1987. № 38. pp. 72.
46. (1999) A.s. RU 32719 C1, MPK S23S 26/00. Sposob uprochnenija detalej s odnoremennym naneseniem kompozicionnyh pokrytij / Gromakovskij D.G., Bersudskij A.L., Kovshov A.G., Malyshev V.P., Ibatullin I.D. // 1999.
47. (1992) A.s. 1573054 USSR, MKI S 23 S 26/00. Ustrojstvo dlja nanesenija pokrytij / A.Ju. Happalaev, O.V. Cygulev, V.S. Veremchuk, B.A. Ljashenko, M.M. Abacharaev, A.V. Rutkovskij // Otkrytija. Izobretenija. 1992. № 18. pp. 100-101.
48. (1986) A.s. 1482980 USSR, MKI V 24 K 39/00. Sposob nanesenija pokrytija / L.S. Belevskij, V.I. Kadoshnikov, Ju.M. Mironov, I.D. Kadoshnikova // B.I. – 1986. № 3. pp. 54.
49. (1999) A.s. RU 2197562 C1, MPK S23S 26/00. Sposob uprochnenija detalej s odnoremennym naneseniem kompozicionnyh pokrytij / Gromakovskij D.G., Bersudskij A.L., Kovshov A.G., Malyshev V.P., Ibatullin I.D. // 1999.
50. Perepichka EV (1989) Ochistno-uprochnjajushhaja obrabotka izdelij shhetkami – M.: Mashinostroenie, 1989. – 136 p.
51. Ancupov VP, Savel'eva RN, Savel'ev VB Matematicheskoe modelirovanie teplovych processov pri nanesenii stal'nyh pokrytij provolochnymi shhetkami // Izv. vuzov. Mashinostroenie. – 1994. - № 10-12. – pp. 115-119.
52. Ancupov VP, Savel'ev VB, Kadchenko SI (1994) Matematicheskoe modelirovanie poverhnosti metalla pri poverhnostnom plasticheskom deformirovanii shhetkami // Izv. vuzov. Chernaja metallurgija. – 1994. - № 11. – pp. 30-32.
53. (1986) A.s. 1659531 USSR, MKI V 21 K 23/22. Sposoby proizvodstva bimetallicheskoj stalealjuminevoj provoloki / L.S. Belevskij, P.N. Smirnov, I.I. Osheverov, B.A. Nikiforov, G.V. Buhinik, V.E. Bazarova, V.I. Kadoshnikov // B.I. – 1986. № 45. pp. 34.
54. (1999) A.s. RU 2362664 C1, MPK S23S 26/00. Sposob uprochnenija detalej s odnoremennym naneseniem kompozicionnyh pokrytij / Gromakovskij D.G., Bersudskij A.L., Kovshov A.G., Malyshev V.P., Ibatullin I.D. // 1999.
55. (1994) A.s. RU 2053106 C1, MPK B22F 7/00. Sposob poluchenija pokrytij na poverhnosti metallicheskikh izdelij / Belevskij L.S., Haritonov A.O., Kutlubaev I.M., Serov N.V. // 1994.
56. (2010) A.s. RU 2384654 C1, MPK S23S 26/00. Sposob uprochnenija detalej s odnoremennym naneseniem pokrytija / Bersudskij A.L., Zhdanov A.G., Astrahanskij A.Ju., Malyshev V.P. // 2010. №26.
57. (2007) A.s. RU 27999 C1, MPK S23S 26/00, 30/00. Sposob nanesenija metallicheskikh pokrytij na rabochie poverhnosti detalej mashin / Bersudskij A.L., Malyshev V.P., Astrahanskij A.Ju. // 2007. №29.



**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж**  
Опубликованные работы

**Teoretičeskaâ i prikladnaâ  
nauka**

---

**Theoretical & Applied  
Science**

**09 (29)**

**2015**

Рисунок Ж.1 – Обложка сборника

# **International Scientific Journal Theoretical & Applied Science**

## **Editor-in Chief:**

**Alexandr Shevtsov (KZ)**

Hirsch index:

**h Index RISC = 1 (56)**

## **The Editorial Board:**

Prof. Vladimir Kestelman (USA)

**h Index Scopus = 2 (30)**

Prof. Arne Jönsson (Sweden)

**h Index Scopus = 3 (18)**

Prof. Sagat Zhunisebekov (KZ)

Founder : **International Academy of Theoretical & Applied Sciences**

Published since 2013 year.

Issued Monthly.

International scientific journal «Theoretical & Applied Science», registered in France, and indexed more than 36 international scientific bases.

Address of editorial offices: Djambyl street 128, 080000, Taraz, KZ.

Phone: +777727-606-81

E-mail: [T-Science@mail.ru](mailto:T-Science@mail.ru)

<http://T-Science.org>

**Impact Factor ICV = 6.630**

**Impact Factor ISI = 0.829**  
based on International Citation Report (ICR)

ISSN 2308-4944



9 772 308 14 94 157

© Collective of Authors

© «Theoretical & Applied Science»

**Impact Factor:**

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIIHQ (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)**International Scientific Journal  
Theoretical & Applied Science**

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2015 Issue: 09 Volume: 29

Published: 30.09.2015 <http://T-Science.org>**Nikolai Vladimirovich Semenchko**Student of the Department  
«Equipment and technology of machine-building  
production»  
FSBEI HPE «Togliatti State University», Russia  
[bonder64@mail.ru](mailto:bonder64@mail.ru)**Konstantin Olegovich Hryachkov**Student of the Department  
«Equipment and technology of machine-building  
production»  
FSBEI HPE «Togliatti State University», Russia**SECTION 7. Mechanics and machine  
construction.****MATHEMATICAL MODELS FOR CALCULATING GEOMETRICAL  
AND FORCE PARAMETERS OF DEFORMATION CLADDING  
PROCESS**

**Abstract:** This article describes the main mathematical models describing the deformation cladding by flexible tool; describes changes that happened with the mathematical models. We have defined the model that best describes the process. Possible direction of further development was revealed.

**Key words:** flexible tool; cladding; coating method; mathematical model.

**Language:** Russian English

**Citation:** Semenchko NV, Hryachkov KO (2015) MATHEMATICAL MODELS FOR CALCULATING GEOMETRICAL AND FORCE PARAMETERS OF DEFORMATION CLADDING PROCESS. ISJ Theoretical & Applied Science 09 (29): 115-118.

**Soi:** <http://s-o-i.org/1.1/TAS-09-29-22> **Doi:**  <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2015.09.29.22>

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ПРОЦЕССА ДПГИ**

**Аннотация:** В данной статье рассмотрены основные математические модели, описывающие метод деформационного плакирования гибким инструментом, рассмотрены изменения, произошедшие с данными моделями. Определена модель, наиболее точно описывающая процесс ДПГИ. Выявлено возможное направление дальнейшего развития данного метода нанесения покрытий.

**Ключевые слова:** гибкий инструмент; плакирование; метод нанесения покрытий; математическая модель.

Деформационное плакирование гибким инструментом (ДПГИ) – один из универсальных методов модификации поверхностного слоя деталей пар трения, позволяющий наносить покрытие с одновременной упрочняющей обработкой [1]. Данный метод имеет богатую историю. Изобретателями было предложено множество возможных схем реализации процесса, различные методы интенсификации процесса дополнительными физическими воздействиями, проработаны конструкции гибкого инструмента, элемента из материала покрытия и конструкций его подачи в зону обработки. Что позволило использовать данный метод для различного сочетания условий процесса, с различными материалами детали, инструмента и материала покрытия.

Дальнейшее развитие данного метода предполагает исследования направленные на автоматизацию процесса. Что позволит

стабилизировать основные энергосиловые параметры процесса (скорости вращения вorsa гибкого инструмента, усилия прижатия механической щетки к обрабатываемому изделию, температуры процесса и др.). И как следствие, позволит протекать процессу в установившемся режиме, поддерживая физико-механические характеристики формируемых покрытий на высоком уровне. Автоматизация процесса предусматривает управление основными параметрами, следовательно, необходимы зависимости этих параметров от входных параметров процесса плакирования. Что ставит пред нами задачу детального изучения математических моделей описывающих данный процесс.

Различные подходы к разработке моделей расчета параметров процесса ДПГИ в различных работах определяются их авторами в зависимости от исходных предположений о характере



### Impact Factor:

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIIHЦ (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

взаимодействия гибких элементов проволочного инструмента с обрабатываемой поверхностью

изделия и допущениями, которые заложены ими в расчетную схему (рис. 1).



Рисунок 1 – Классификация математических моделей расчета основных параметров процесса ДППИ.

Так, например, авторы методики [2] Проскуряков Ю.Г., Ершов В.С. сделали допущение, что ворс механической щетки закреплен шарнирно, в то время как для процесса плакирования используется гибкий инструмент с жесткой заделкой проволочных элементов. Что делает невозможным использование данной методики для расчета параметров процесса плакирования.

Автор работы [3] Ершов В.С. предполагает, при расчете геометрических параметров процесса, что ворс щетки на «набегающем» и «сбегающем» участках зоны контакта изогнут в противоположные стороны, как было бы при статическом прижатии гибких элементов к обрабатываемой поверхности. Данная модель так же не подходит для определения параметров процесса плакирования, так как в реальности ворс гибкого инструмента изгибается во время вращения щетки только в одну, противоположную вращению, сторону.

Исследователи в работах [4-6] рассматривают ворс механической щетки как упругую балку при статическом взаимодействии с поверхностью. Авторы представляют ворс, как балку с одним жестко защемленным концом, к которой приложена статическая нагрузка. В работе [7] гибкий элемент (ворс щетки) рассматривается как параболически изогнутая балка, имеющая жесткое закрепление на одном конце. В данном случае математическая модель основана на решении уравнения изогнутой оси металлического ворса в виде параболы. Похожий подход использовался и в работе [18], в которой

изогнутые гибкие элементы, находящиеся в контакте с обрабатываемой поверхностью, рассматриваются в виде балок с большими прогибами. В рассмотренных моделях процесса обработки щетками никак не учтен ударный характер взаимодействия гибких элементов проволочного инструмента с обрабатываемой поверхностью детали. Также, не учтено увеличение силы взаимодействия ворса щетки с поверхностью детали за счет кинетической энергии вращения инструмента. Хотя давления, возникаемые в зоне обработки, будут значительно больше при динамическом воздействии, чем при статическом.

В работах [8, 9] Кургузовым Ю.И. была разработана методика, учитывающая больше аспектов процесса деформационного плакирования, чем в рассмотренных ранее работах. В них форма изгибающейся части металлического ворса определена синусоидой, что было получено на основе экспериментальных данных; в ней учтен так же характер ударной обработки. Эта методика успешно развита в работе [1] Анцуловым В.П., в которой предложены математические модели, описывающие процесс плакирования для вогнутых цилиндрических и плоских поверхностей. Методики [1, 8, 9] определения геометрических и силовых параметров гораздо точнее своих предшественников, но они и дальше продолжали свое развитие. В работе [17] автором рассмотрено взаимодействие гибкого ворса с поверхностью детали и ЭМП не как сухое трение твердых тел, в связи с чем, было получено более

**Impact Factor:**

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIIHQ (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

полное описание процесса взаимодействия инструмента с деталью.

Автором [10], Зотовым А.В., представлена математическая модель расчета геометрических и силовых параметров зоны плакирования, построенная посредством метода эллиптических параметров [11], основанного на точном решении дифференциального уравнения упругой линии (теория гибких упругих стержней), что позволило получить еще более точные результаты. Данная модель позволяет рассчитать с высокой точностью не только силы взаимодействия, вращающие моменты и величину прогибов ворса, но также и напряжения, возникающие в ворсе.

Одной из самых новых работ является [12], где автором Леванцевичем М.А. разработана, отличающаяся от остальных, математическая модель, описывающая процесс плакирования с точки зрения сплошности получаемого при обработке покрытия. Данная модель описывает колебательный характер относительных перемещений металлического ворса проволоочного инструмента с момента его входа в зону контакта с обрабатываемой деталью и на протяжении всего времени контактирования. Максимченко Н.Н. проверена созданная им методика расчета параметров процесса плакирования для получения необходимой сплошности наносимого покрытия [13].

Проанализированные математические модели достаточно подробно отображают процесс развития методик расчета параметров плакирования. От менее точных, неприменимых для определенных условий, моделей до более

точных, позволяющих с высокой достоверностью определять параметры технологического процесса. В процессе развития математические модели претерпевали изменения, постоянно наращивая сложность расчетов, учитывая все больше и больше различных факторов, влияющих на процесс. Что позволило добиться серьезного повышения соответствия расчетных и реальных значений величин, характеризующих процесс плакирования.

Наибольший интерес представляет математическая модель [10], позволяющая определять геометрические и энергосиловые параметры зоны контакта с точностью до 2-6% [14]. По данной методике был разработан алгоритм расчета геометрических и силовых параметров зоны контакта, представляющий собой набор циклов с последовательным повышением точности вычисления. Данный алгоритм позволяет рассчитать параметры процесса, затрачивая на процедуру минимум времени [15]. Полученная точность модели является достаточной для разработки на ее основе системы управления процессом плакирования. Разработка такой системы может заключаться в развитии модели адаптивной системы управления представленной в работе [16].

Установив такую систему, появляется возможность компенсации динамических и температурных погрешностей обработки, поддержания необходимой контактной силы, и как следствие повышение качества обработки.

*Исследование выполнено под руководством Гуляева В.А., к.т.н. доцент и Зотова А.В., ст. преп. кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», Россия.*

**References:**

1. Ancupov VP (1999) Teorija i praktika plakirovanija izdelij gibkim instrumentom. Magnitogorsk: MGUTU im. G.I. Nosova, 1999. 241 p.
2. Proskurjakov JG, Ershov VS (1970) Issledovanie zony kontakta mehanicheskoy shhetki s obrabatyvaemym izdeliem // Issledovanie tehnologicheskikh processov uprochnijushhe-kalibrujushhej i formobrazujushhej obrabotki metallov: Mezhdvuz. sb. Rostov-na-Donu. 1970. pp. 144-154.
3. Ershov VS (1969) Geometrija processa chistovoj obrabotki detalej mehanicheskimi shhetkami // Tehnologija proizvodstva sel'skohozjajstvennyh mashin: Mezhdvuz. sb. Rostov-na-Donu. 1969. pp. 109-118.
4. Makarov AN, Belevskij LS, Kadoshnikov VI (1985) Opredelenie jenergosilovykh parametrov pri obrabotke metallicheskim shhetkami // Teorija i praktika proizvodstva metizov: Mezhdvuz. sb. Sverdlovsk. 1985. Vyp. 12. pp. 29-32.
5. Belevskij LS, Kadoshnikov VI, Melent'eva EJ (1988) Opredelenie jenergosilovykh parametrov pri nanesenii metallicheskih pokrytij mehanicheskim sposobom // Teorija i praktika proizvodstva metizov: Mezhdvuz. sb. Sverdlovsk. 1988. Vyp. 14. pp. 98-104.



# Impact Factor:

|                          |                        |                      |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| ISRA (India) = 1.344     | SIS (USA) = 0.912      | ICV (Poland) = 6.630 |
| ISI (Dubai, UAE) = 0.829 | PIIHQ (Russia) = 0.179 |                      |
| GIF (Australia) = 0.356  | ESJI (KZ) = 1.042      |                      |
| JIF = 1.500              | SJIF (Morocco) = 2.031 |                      |

6. Kadoshnikov VI (1988) Sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva bimetallicheskoj stalealjuminevoj provoloki primeneniem novogo sposoba nanesenija promezhutochnogo sloja: Dis. kand. tehn. nauk. Magnitogorsk, 1988. 192 p.
7. Belevskij LS, Sankin JV (1989) Analiz geometricheskikh i jenergiticheskikh parametrov zony kontakta vorsa metallicheskoj shhetki s obrabatyvaemoj poverhnost'ju // Teorija i praktika proizvodstva metizov: Mezhevuz. sb. Magnitogorsk: MGMI, 1989. Vyp. 15. pp. 169-178.
8. Kurguzov II, Papshev DD (1986) Tehnologicheskoe obespechenie kachestva poverhnosti pri uprochnenii mehanicheskimi shhetkami // Vestnik mashinostroenija. 1986. № 4. pp. 54-58.
9. Kurguzov II (1981) Tehnologicheskoe obespechenie kachestva poverhnostnogo sloja zakalennykh detalej obrabotkoj mehanicheskimi shhetkami: Dis. kand. tehn. nauk. – Kujbyshev, 1981. – 235 p.
10. Zotov AV (2012) Metodika rascheta geometricheskikh i silovykh parametrov zony kontakta pri plakirovanii izdelij gibkim instrumentom // Vektor nauki Tol'jattinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. № 3. pp. 85-88.
11. Popov EP (1986) Teorija gibkikh uprugih sterzhnej. M.: Nauka, 1986. 296 p.
12. Levancevich MA (1987) Model' kontaktnogo vzaimodejstija vrashhajushhejsja metallicheskoj shhetki s poverhnost'ju pri deformacionnom plakirovanii: Mezhevuz. sb. nauchn. tr. Sverdlovsk: UPI, 1987. Vyp. 11. pp. 24-27.
13. Maksimchenko NN (2009) Tehnologicheskoe obespechenie jekspluatacionnykh harakteristik napravljajushhih skol'zhenija formirovaniem antifrikcionnykh pokrytij gibkim instrumentom: Dis. kand. tehn. nauk. – Minsk, 2009. – 131 p.
14. Zotov AV, Drachev OI, Semenchenko NV (2013) Analiz naprazhennogo deformirovannogo sostojanija provolochnykh jelementov gibkogo instrumenta // Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta: mezhevuz. sb. nauch. st. №20 (123) / VolgGTU. – Volgograd, 2013. – 124 p.
15. (2014) Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2014612918. Rossijskaja Federacija. Raschet parametrov ploskogo kontakta pri plakirovanii provolochnym instrumentom / Bobrovskij A.V., Zotov A.V., Semenchenko N.V.; zajavitel' i pravoobladatel' FGBOU VPO «Tol'jattinskij gosudarstvennyj universitet». – № 2014610212; zajavl. 16.01.2014; opubl. 20.04.2014, Reestr programm dlja JeVM – 1 p.
16. Semenchenko NV, Guljaev VA, Sevost'janov AS (2014) Avtomatizacija processa plakirovanija gibkim instrumentom ploskikh poverhnostej detalej // Akademicheskaja nauka - problemy i dostizhenija n.-i. c. «Akademicheskij». - Tom. 2. / North Charleston, SC, USA, 2014. – pp. 127-130.
17. Onshin NV (2001) Razrabotka i issledovanie metoda drobnogo plakirovanija gibkim instrumentom dlja proizvodstva bimetallicheskoj detalej metallurgičeskogo oborudovanija povyshennoj iznosostojkosti: Dis. kand. tehn. nauk. Magnitogorsk, 2001. 119 p.
18. Perepichka EV (1989) Ochistno-uprochnijajushhaja obrabotka izdelij shhetkami – M.: Mashinostroenie, 1989. – 136 p.

