

УНИВЕРСИТЕТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

На правах рукописи

СМИРНОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА НАРУЖНЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ
СМЕННЫМИ МНОГОГРАННЫМИ ПЛАСТИНАМИ**

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
Кузнецов Владимир Анатольевич

Москва 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	10
1.1 Метод обработки выглаживанием наружных цилиндрических поверхностей.....	10
1.2 Применение системного анализа при исследовании метода обработки выглаживанием с изменением способа установки инструмента.	14
1.3 Математическое моделирование процессов, происходящих при выглаживании.	20
1.4 Качество обработанной выглаживанием поверхности.	28
1.5 Особенности контактной деформации в процессе обработки выглаживанием.	45
1.6 Инструментальные материалы для изготовления деформирующих элементов, применяемых при выглаживании.	48
Выводы.	50
Цель и задачи исследования.....	53
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СМП И ЗАГОТОВКИ. РАСЧЕТ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ВЫГЛАЖИВАНИЯ НАРУЖНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИЗМЕНЕНИЕМ СПОСОБА УСТАНОВКИ СМП.....	54
2.1 Влияние способа установки инструмента на силу, контактное давление и цикличность нагружения при выглаживании.	55
2.2 Определение площади и конфигурации области контакта СМП и обрабатываемой заготовки.	57
2.2.1 Определение площади пластического контакта с помощью моделирования контактного взаимодействия обрабатываемой заготовки и СМП в программной среде Компас 3D.....	60

2.2.2 Методика моделирования контакта инструмента с заготовкой в программной среде трехмерного твердотельного моделирования.	61
2.2.3 Определение зависимости глубины внедрения СМП в материал обрабатываемой заготовки от способа установки инструмента.	65
2.2.4 Расчет площади и ширины пятна контакта.	70
2.3 Расчет силы выглаживания, среднего давления в контакте и цикличности нагружения.	73
Выводы.	77
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.	79
3.1 Материальное обеспечение экспериментальных исследований.	79
3.1.1 Объекты исследований.	79
3.1.2 Инструмент и инструментальные материалы.	80
3.1.3 Специальная технологическая оснастка.	81
3.1.4 Измерительное и технологическое оборудование.	84
3.2 Технологические режимы выглаживания.	85
3.3 Методика установки инструмента.	87
3.4 Методика исследования качества поверхности.	90
3.4.1 Шероховатость обработанной поверхности.	90
3.4.3. Коэффициент изменения шероховатости.	90
3.5 Планирование экспериментальных исследований.	90
3.5.1 Планирование поисковых экспериментов.	91
3.5.2 Планирование полных факторных экспериментов.	91
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СПОСОБА УСТАНОВКИ СМП НА ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ВЫГЛАЖЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ.	93

4.1 Экспериментальное определение режимов обработки выглаживанием, интервалов варьирования углов поворота СМП и инструментального материала.....	93
4.2 Экспериментальное исследование зависимости шероховатости поверхности от углов поворота СМП и технологического натяга.	98
4.3 Экспериментальное исследование зависимости шероховатости обработанной поверхности от направления поворота СМП.	107
4.3.1 Экспериментальное исследование зависимости шероховатости обработанной поверхности от направления поворота СМП на образцах, выполненных из стали 45.	108
4.3.2 Экспериментальное исследование зависимости шероховатости обработанной поверхности от направления поворота СМП на образцах, выполненных из стали 75ХГСФ.	114
4.3.3 Анализ результатов экспериментальных исследований зависимости шероховатости обработанной поверхности от величины и направления углов установки СМП.....	120
4.4 Экспериментальное исследование упрочнения поверхностного слоя заготовок, обработанных выглаживанием СМП.....	122
4.5 Экспериментальное исследование влияния износа СМП на шероховатость выглаженных поверхностей.	123
4.6 Технологические рекомендации по обеспечению параметров шероховатости обработанной выглаживанием поверхности.	124
ГЛАВА 5. МЕТОДИКА НАЗНАЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УГЛОВ УСТАНОВКИ СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАТЯГА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ВЫГЛАЖЕННЫХ НАРУЖНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	126

5.1 Методика расчета и назначения рациональных режимов выглаживания и параметров установки СМП по заданным параметрам шероховатости.....	126
5.2 Производственные испытания метода выглаживания с изменением способа установки СМП.	128
Выводы.	134
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.	136
ПРИЛОЖЕНИЕ	139
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	154

ВВЕДЕНИЕ

Выглаживание является одним из наиболее распространенных методов обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). Выглаживание позволяет получать изделия с высокими эксплуатационными характеристиками: высоким качеством обработанной поверхности, повышенной опорной способностью профиля за счет округлой формы микронеровностей, упрочненным поверхностным слоем с образовавшимися в нем остаточными напряжениями сжатия. Данный метод обработки обладает широкими технологическими возможностями: выглаживанием можно производить чистовую отделочную, упрочняющую и калибрующую обработку цилиндрических, конических и плоских поверхностей. Это достигается наличием широкой номенклатуры специального деформирующего инструмента - выглаживателей. При этом стоимость такого узкоспециализированного инструмента относительно высока.

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Актуальность темы обоснована тем, что особенностью современного машиностроения является значительное повышение количества предприятий с мелкосерийным и единичным многономенклатурным типами производства, где невыгодно использование большой номенклатуры специализированного оборудования и инструмента. Однако известно, что изменение способа установки сменных многогранных пластин (СМП) значительно изменяет функциональное назначение инструмента, появляется возможность применять СМП как при резании, так и в процессах обработки ППД.

Кроме того, современные предприятия машиностроительной отрасли должны выдерживать жесткие и весьма разнообразные требования заказчиков к качеству производимой продукции. В связи с этим, задача технологического обеспечения качества и снижения себестоимости производимой продукции за счет использования СМП для выглаживания наружных цилиндрических поверхностей является актуальной. Для решения этой задачи необходимо выявить связи,

определяющие влияние способа установки СМП на параметры качества обработанных выглаживанием поверхностей.

Таким образом, **целью работы** является установление закономерностей влияния технологических факторов (углов установки СМП и технологического натяга) на микрогеометрию обработанной поверхности, на основе выявления взаимосвязей микрогеометрии с силовыми характеристиками и пятном контакта при выглаживании наружных цилиндрических поверхностей.

Научная новизна работы состоит в выявлении связей, определяющих влияние способа установки СМП на параметры качества обработанных выглаживанием поверхностей. На основании результатов исследований установлены:

- зависимости конфигурации и площади пятна контакта СМП с заготовкой от величины и направления изменения углов установки инструмента, технологического натяга и диаметра заготовки, позволившие связать способ установки пластины с силовыми параметрами процесса ППД и использовать данные зависимости в расчетах режимов обработки;
- закономерности изменения глубины внедрения инструмента в металл обрабатываемой заготовки от способа установки пластины, что позволяет применять методику расчета и назначения режимов выглаживания с изменением способа установки СМП как для схемы с жестким, так и с упругим закреплением инструмента;
- зависимости влияния углов установки СМП на величины силы выглаживания, давления в контакте и цикличности нагружения, что позволило функционально связать способ установки СМП, технологические режимы выглаживания и качество обработанной поверхности.

Теоретическая значимость работы заключается в выявлении взаимосвязей параметров шероховатости обработанной выглаживанием поверхности со способом установки СМП и технологическим натягом. А также в установлении закономерностей изменения площади и ширины пятна контакта и глубины внедрения инструмента при изменении углов установки СМП и технологического натяга.

Практическая значимость работы. Для практического применения рассматриваемого метода обработки важно иметь возможность управления достигаемыми параметрами шероховатости обработанной поверхности получаемых изделий с помощью назначения рациональных способов установки инструмента и силовых параметров процесса (силы выглаживания или технологического натяга).

На защиту выносятся:

- функциональные связи способа установки СМП с геометрическими параметрами пятна контакта инструмента и поверхностью заготовки, глубиной внедрения СМП, а также силовыми факторами процесса ППД;
- математические модели, устанавливающие зависимости шероховатости обработанной поверхности от установки СМП при обработке выглаживанием образцов из углеродистых и легированных сталей;
- методика и алгоритм расчета и выбора рациональных углов установки инструмента и технологического натяга (силы) выглаживания, в качестве которого используются СМП для токарной обработки, позволяющая достигать требуемых параметров качества обработанной поверхности.

Методология и методы исследования. Работа выполнена на основе применения основных положений системного анализа технологических систем и методов обработки, технологии машиностроения, планирования эксперимента, статистического анализа результатов экспериментальных исследований.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных научных результатов подтверждена согласованностью результатов теоретических расчетов, экспериментальных данных, а также результатов производственных испытаний на базе завода ОАО "ОК-ЛОЗА".

Апробация работы. Материалы настоящей работы докладывались на трех научно-технических конференциях, а именно: Четвертой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов "Будущее машиностроения России", 2011 г. (МГТУ им. Н.Э. Баумана); 77-й Международной научно-технической конференции ААИ "Автомобиле- и тракторостроение в России:

приоритеты развития и подготовка кадров", 2012 г. (Университет машиностроения); международной конференции "Высокие технологии в машиностроении", Харьков, НТУ "ХПИ", 2012 г.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Метод обработки выглаживанием наружных цилиндрических поверхностей.

Выглаживание как один из методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) уже достаточно широко изучен. Значительный вклад в исследования выглаживания внесли следующие ученые: Я.И. Барац [5], В.Ф. Губанов [16], Э.И. Зубков [25], Д.Г. Одинцов [47], В.А. Кузнецов [32,38], А.Н. Резников [54], В.М. Смелянский [57,58,59], З.В. Степачева [64], В.М. Торбило [67,68], В.К. Яценко [84], А.Г. Мосталыгин [45], Г.П. Башков [6], И.Н. Бобровский [9], Э.Г. Грановский [12], Л.И. Маркус [43], Д.А. Тихонов [66].

Метод обработки	Ra	Радиус округления микронеровностей	Относительные размеры опорной части, %	
			профиля t_p	площади t_f
	мкм			
Алмазное выглаживание	0,16	1000	30	15
	0,08	1500	45	20
	0,04	2500	70	40
	0,02	3500	87	50
Суперфиниширование	0,08	350	25	8
	0,04	450	35	14
Полирование	0,16	200	18	5
	0,08	300	22	8
	0,04	400	30	15
Тонкое шлифование	0,16	70	4	1,5
	0,04	100	7	2,0

Рисунок 1.1 – Характеристики микрогеометрии поверхности после различных методов отделочной обработки [47].

Данный метод обладает широкими технологическими возможностями, с помощью выглаживания можно производить чистовую отделочную, упрочняющую и калибрующую обработки. Метод выглаживания, при достаточной производительности, позволяет получать изделия с исключительными эксплуатационными свойствами: высоким качеством поверхностного слоя, повышенной опорной способностью профиля обработанной поверхности, упрочненным поверхностным слоем, образованием в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия. В зависимости от различных технологических условий, данный

метод позволяет достигнуть точности 6 ... 7 квалитетов и шероховатости $Ra=0,16$... 0,02 мкм. Характеристики микрогеометрии выглаженных поверхностей, в сравнении с аналогичными характеристиками поверхностей, обработанных иными методами отделочной обработки, также подтверждают эффективность выглаживания [47, с. 153] (рисунок 1.1).

Сущность выглаживания заключается в том [25], что инструмент с заданными геометрическими характеристиками рабочей части и при соответствующе установленных технологических режимах процесса внедряется в поверхностный слой обрабатываемой заготовки и скользит, пластически деформируя микронеровности, образованные на операциях предшествующей обработкой. В результате данного воздействия изменяются физико-механические свойства обработанной поверхности (рисунок 1.2) [90].

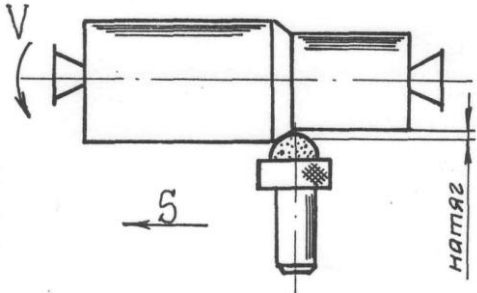
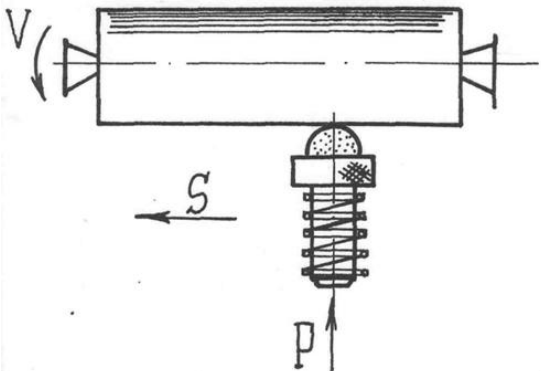


Рисунок 1.2 – Обработка выглаживанием наружной цилиндрической поверхности заготовки на токарном станке [90].

Известны две основные схемы реализации метода выглаживания, которые представлены в таблице 1.1 [25, с. 10].

1) Выглаживание с жестким закреплением инструмента («жесткое выглаживание») [57,67]. Осуществляется при жесткой кинематической связи между инструментом и заготовкой, такой же, как при точении. При обработке выглаживающий инструмент внедряется в материал заготовки на определенную глубину, зависящую от пластичности обрабатываемого материала, шероховатости поверхности и радиуса выглаживателя и варьирующуюся от нескольких

Таблица 1.1 - Основные схемы обработки наружных цилиндрических поверхностей выглаживанием [25].

№ п.п.	Схема обработки	Вид обработки.
1		Выглаживание с жестким закреплением инструмента.
2		Выглаживание с упругим закреплением инструмента.

микрометров до сотых долей миллиметра. Одним из основных технологическим режимом выглаживания с жестким закреплением инструмента является задаваемая глубина внедрения в материал обрабатываемой заготовки (технологический натяг) [67].

Преимущества «жесткого» выглаживания:

- возможность обработки прерывистых поверхностей;
- возможность исправления погрешности геометрической формы, полученной на предшествующих операциях обработки;
- удобство использования (предварительная и окончательная обработка возможна за один установ заготовки).

Недостатки «жесткого» выглаживания:

- требуется обеспечение малых допусков на биение и геометрическую форму обрабатываемой поверхности;

- повышенные требования к жесткости технологической системы.

Жесткое выглаживание, в виду простоты реализации, успешно применялось и применяется как в условиях крупносерийного и серийного, так и мелкосерийного и единичного производств [25, с. 8].

2) Выглаживание с упругим закреплением инструмента («упругое» выглаживание) [67]. Инструмент поджимается к обрабатываемой поверхности с силой заданной величины. Сила прижима инструмента контролируется и поддерживается постоянными приборами контроля на протяжении всего времени обработки. Конструктивно, прижим инструмента, обеспечивается упругими элементами в виде разнообразных пружин, гидравлики и тп.. Основным технологическим режимом при "упругом" выглаживании является сила выглаживания (сила прижима инструмента к обрабатываемой поверхности).

Преимущества «упругого» выглаживания:

- обеспечение практически постоянной силы выглаживания;
- независимость от погрешностей базирования и установки инструмента;
- независимость от погрешностей геометрической формы поверхности обрабатываемой заготовки.

Недостатки «упругого» выглаживания:

- затруднения при обработке прерывистых поверхностей;
- нельзя уменьшить погрешность геометрической формы, полученную на предыдущих операциях механической обработки;
- сравнительно более сложная конструкция оснастки и инструмента.

Упругое выглаживание нашло более широкое применение из-за простоты и удобства в настройке и процессе обработки. Однако, ввиду конструктивной сложности оснастки, выглаживание с упругой установкой инструмента более подходит для применения в условиях единичного и мелкосерийного производств [25, с. 11].

1.2 Применение системного анализа при исследовании метода обработки выглаживанием с изменением способа установки инструмента.

Рассмотренные в пункте 1.1 основные схемы реализации метода обработки выглаживанием могут быть исполнены в различных вариациях по применяемому инструменту и технологической оснастке. В большинстве случаев данные схемы разрабатывались, реализовывались и исследовались с применением специального инструмента - выглаживателей. В современном машиностроении, номенклатура применяемых выглаживателей довольно широка. Что касается формы рабочей части данных деформирующих инструментов, наибольшее применение нашли сферические и цилиндрические выглаживатели. Выбор формы рабочей части выглаживателей зависит от вида обрабатываемой поверхности. Выглаживатели сферической формы более универсальны, так как пригодны для обработки наружных и внутренних поверхностей вращения, а также плоских поверхностей. Выглаживателями цилиндрической формы возможно обрабатывать только наружные поверхности вращения. Цилиндрические выглаживатели обеспечивают более высокое качество поверхности и менее склонны к вибрациям в процессе обработки. Поэтому, при выглаживании наружных цилиндрических поверхностей более целесообразно применять деформирующий инструмент цилиндрической формы [67].

Однако, в работе [25] были проведены исследования метода выглаживания с применением стандартного режущего инструмента, выполненного в виде сменных многогранных пластин (СМП) из керамики. Это направление развития метода выглаживания явилось отражением существующих в металлообрабатывающей промышленности тенденций универсализации используемых инструментов, оборудования и оснастки. Успешное применение СМП обработки наружных цилиндрических поверхностей выглаживанием основано на применении принципов системного анализа в исследованиях данного метода обработки [30].

Важным шагом на пути эффективного развития метода обработки выглаживанием явилось рассмотрение метода механической обработки как

системы, состоящей из отдельных, взаимосвязанных характеристик (рисунок 1.4): способа воздействия, обрабатывающего инструмента, кинематических, силовых и статических характеристик [25,30,32].

Важно отметить, что изучение отдельных характеристик метода обработки выглаживанием осуществлено в целом ряде работ [32,47,58,67,74,76], анализ которых показал [25], что наименее исследованными являются статические характеристики, в частности способ установки инструмента, на основе которого возможно качественное развитие метода выглаживания.

В работах [57, 67] была описана схема обработки наружных поверхностей вращения с угловой установкой выглаживателя цилиндрической формы (рисунок 1.3 [67, с. 90]). При обработке цилиндрическим выглаживателем, инструмент устанавливается перпендикулярно оси вращения заготовки или под некоторым углом наклона в сторону, противоположную направлению движения подачи. В работе [57, с. 53-56] автором доказано, что выглаживание с угловой установкой цилиндрического деформирующего инструмента равносильно выглаживанию без поворота инструмента, но с большим радиусом рабочей части выглаживателя.

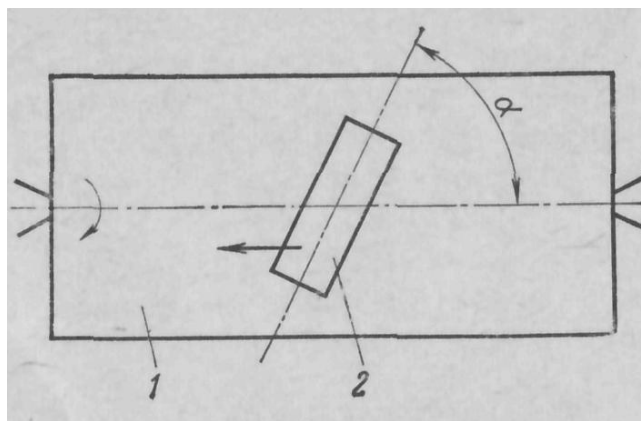


Рисунок 1.3 – Схема обработки выглаживанием с угловой установкой инструмента: 1 – заготовка; 2 – цилиндрический выглаживатель [67].

Группа статических характеристик в большей мере позволяет использовать различные поверхности инструмента. Помимо этого, появляется возможность относительно просто трансформировать процесс резания в ППД, а также, за счет изменения способа установки СМП, совместить процессы резания и ППД [25, с. 14].



Рисунок 1.4 - Структурная схема метода механической обработки [25,30,32].

В работах [31,32,38] были исследованы три основные схемы (рисунок 1.5) установки инструмента, выполненного в виде СМП, позволяющие производить отделочно-упрочняющую обработку выглаживанием.

В работах [25,32,38] данные схемы были проанализированы и сделаны выводы, что способ установки СМП оказывает существенное влияние на технологические возможности процесса выглаживания и достигаемые параметры качества деталей.

Изменение способа установки СМП, по существу, равнозначно изменению ее геометрии, то это позволяет использовать для того или иного способа воздействия различные участки поверхности СМП. Для выявления всех вариантов установки инструмента в работах [25,31,32,38] был применен морфологический анализ.

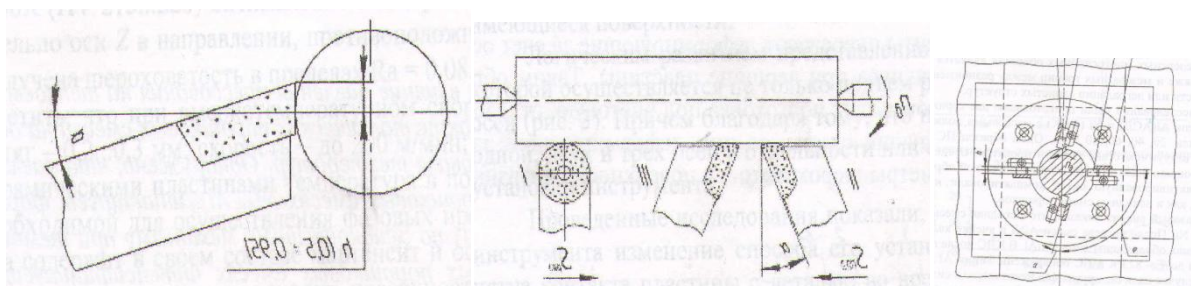


Рисунок 1.5 – Основные схемы обработки выглаживанием с применением в качестве инструмента СМП [31,32,38].

Э.И. Зубковым был сделан анализ, а затем и морфологический синтез способов установки инструмента, выполненного в виде СМП, что позволило получить морфологическую таблицу способов установки СМП (рисунок 1.6) [25, с. 61], насчитывающую двадцать семь возможных схем установки СМП. Где каждый способ установки обрабатываемого элемента рассматривался в трехкоординатной системе, в которой каждое положение инструмента (СМП) обеспечивается соответствующими углами поворота на некоторую величину вокруг одной, двух или трех осей в отдельности или одновременно [25,32,38].

Величина угла поворота СМП устанавливалась таким образом, чтобы в установившемся режиме обеспечивалось нормальное протекание процесса обработки [25,32,38].

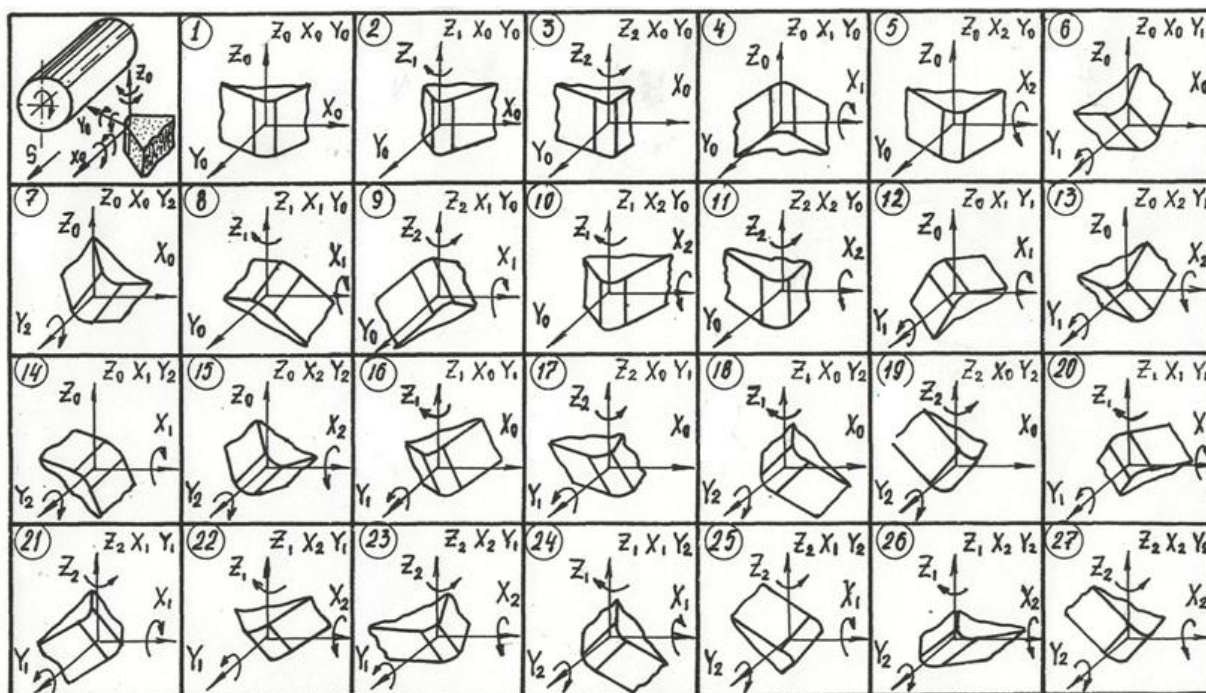


Рисунок 1.6 – Морфологическая таблица возможных способов установки СМП [25].

Направление угла поворота СМП устанавливалось как условно отрицательным, так и условно положительным, о чем свидетельствуют индексы 0, 1, 2 возле обозначения осей координат [25,32,38].

Индекс «0» говорит о том, что инструмент не имеет угла поворота вокруг оси, возле обозначения которой ставится этот индекс [25,32,38].

Индекс «1» ставится в том случае, если имеется поворот СМП вокруг оси на некоторый угол в условно положительном направлении, совпадающем с направлением движения часовой стрелки [25,32,38].

Индекс «2» указывает на то, что имеет место поворот СМП на некоторый условно отрицательный угол, т.е. в направлении, противоположном направлению движению часовой стрелки [25,32,38].

В результате литературного и морфологического анализов и ряда экспериментов, автором работы [25] было установлено функциональное назначение СМП в зависимости от определенного способа установки инструмента:

1) способы установки по схемам 1...4, 6...9, 12, 14, 16... 21 и 25 обеспечивают обработку наружных цилиндрических поверхностей выглаживанием;

- 2) способы установки 22, 23, 24, 27 обеспечивают совмещенную обработку резанием и ППД;
- 3) способы установки 5, 10, 11, 13, 15, 26 обеспечивают стандартную токарную обработку [25,32,36,38].

Установка СМП по схеме 22 позволяет реализовать резание по предварительно упрочненному слою, что, возможно, ведет к снижению силы резания и равномерности срезаемого слоя; при установке по способу 24 в начале осуществляется срезание припуска на механическую обработку, а затем выглаживание, что обеспечивает повышение качества обработанной поверхности [25,32,36,38].

Установка инструмента по схемам 23 и 27 обеспечивает неравномерную долю участия выглаживания и точения в процессе обработки. В схеме установки 23 основная доля принадлежит выглаживанию, и лишь некоторая работа в формировании поверхности совершается методом тонкого точения, а в схеме 27 основная обработка выполняется точением, а выглаживанием происходит только некоторое сглаживание микронеровностей. Установка инструмента в соответствии со схемой 5, но со смещением вдоль оси OZ вверх будет обеспечивать комбинированную обработку резанием (режущей кромкой) с последующим выглаживанием (задней поверхностью и радиусом переходных поверхностей СМП) [25,32,36,38].

В итоге, автором работы [25, с. 64] сделано заключение, что наибольшее распространение в теоретических и экспериментальных исследованиях получили методы обработки, схожие по своим признакам с установкой инструмента по схемам 1, 5, 7, 10, 11, 15 и 26.

На основе всего описанного выше, автором работы [25] после анализа литературных источников и проведенного морфологического синтеза способов установки СМП, был сделан вывод о том, что изменение способа установки инструмента будет обеспечивать различную геометрию пятна контакта СМП с поверхностью обрабатываемой заготовки. Что, в свою очередь, оказывает заметное влияние на такие параметры процесса выглаживания как: среднее

давление в пятне контакта, силу выглаживания, цикличность нагружения, условия трения и температуру, что в конечном итоге формирует требуемые параметры качества [32,38].

В связи с этим, в работе [25] было проведено теоретическое и экспериментальное изучение возможных схем установки инструмента, использовавшего СМП, с позиций контактного воздействия и обеспечения качества обработанной поверхности. Экспериментальным исследованиям были подвергнуты пять способов, обеспечивающих обработку выглаживанием: 1, 2, 3, 6, 7. На основе результатов экспериментальных исследований были предложены технологические рекомендации, использование которых позволяет получить необходимые параметры качества выглаженной поверхности в зависимости от вида обработки (отделочная или упрочняющая).

Таким образом, руководствуясь вышеизложенным, можно отметить основные направления, по которым целесообразно проводить дальнейшие исследования:

- теоретическое и экспериментальное изучение способов установки СМП (не рассмотренных в работе [25]), с позиций контактного взаимодействия и технологического обеспечения качества обработанной поверхности;
- выявление зависимостей технологических факторов на качество обработанной поверхности при различных способах установки СМП (не рассмотренных в работе [25]);
- исследование влияния конфигурации и площади области контакта СМП с заготовкой на качество обработанной поверхности при разных способах установки СМП;
- исследование влияния материала СМП на качество обработанной поверхности при разных способах установки инструмента.

1.3 Математическое моделирование процессов, происходящих при выглаживании.

При отделочно-упрочняющая обработке ППД не происходит отрыва частиц материала в виде стружки от поверхности обрабатываемой заготовки. Это

обстоятельство накладывает существенный отпечаток на условия и параметры протекания контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью [25].

Данному вопросу посвящен ряд работ [22,24,25,39,53,58,68,75,80]. В которых значительное внимание уделялось анализу контактных явлений, ограниченных размерами, площадью и конфигурацией области взаимодействия поверхностей инструмента и детали, т. н. «пятна контакта». Размеры пятна контакта принято определять двумя характеристиками [25, с. 15]:

- а) шириной контакта – это расстояние между начальной и конечной точками контакта индентора с обрабатываемой поверхностью в направлении движения подачи;
- б) длиной контакта – определяется как расстояние между начальной и конечной точками контакта деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью в направлении вектора скорости главного движения обработки.

Ширину и длину пятна контакта формируют две области [25, с. 17]:

- первая (является наиболее нагруженной областью) обеспечивает пластическое взаимодействие передней поверхности деформирующего элемента с поверхностью заготовки;
- вторая область обеспечивает упругое взаимодействие по задней поверхности деформирующего элемента.

Различными авторами были получены аналитические выражения для расчета ширины и длины пятна контакта (приведены в таблице 1.2 [25, с. 18]).

В работе [25, с. 17] показано, что ширину и длину пятна контакта между деформирующим элементом и поверхностью заготовки формируют следующие параметры:

- упругое взаимодействие;
- пластическое внедрение;
- упругое восстановление;
- высота волны перед деформирующим элементом;
- кривизна обрабатываемой поверхности;

- кривизна деформирующего элемента;
- физико-механические свойства материала детали (твердость, предел текучести и т.д.).

Таблица 1.2 - Аналитические выражения для определения ширины и длины контакта [25].

№ п.п.	Выражение для определения параметра	Автор и литературный источник
1	$\dot{a}_1 \cong \sqrt{2R_\phi (h + \Delta)}; \quad a_2 \cong \sqrt{2R_\phi \Delta};$ $b_1 \cong \sqrt{\frac{2R_{\dot{a}}R_\phi}{R_{\dot{a}} + R_\phi} (h + \Delta)}; \quad b_2 \cong \sqrt{\frac{2R_{\dot{a}}R_\phi}{R_{\dot{a}} + R_\phi} \Delta};$ <p>$R_{\dot{a}}, R_{\text{ш}}$ – радиус детали и выглаживающего шарика; h – остаточная деформация; Δ – упругая деформация.</p>	Д.Д. Папшев [48]
2	$a_1 = b_1 \sqrt{R + r / R}; \quad a_2 = b_2 \sqrt{R + r / R};$ $b_1 = 0,017rE_1 \quad b_2 = 0,009rE_2$ <p>R, r – радиусы детали и деформирующего элемента; E_1, E_2 – углы контакта между передней и задней поверхностями деформирующего элемента с деталью.</p>	А.Н. Резников [53]
3	$a_1 = \sqrt{2R(h_t + h_\phi + h_a)}; \quad a_2 = \sqrt{2R(h_t + \frac{1}{3}h_\phi)};$ $b_1 = \sqrt{2\dot{a}_1(S - S^2)}; \quad b_2 = 0,8\sqrt{Rh_\phi};$ <p>R – радиус деформирующего элемента; $h_y, h_{\text{п}}$ – глубина упругого и пластического внедрения деформирующего элемента; h_b – высота волны перед деформирующим элементом; S – подача.</p>	В.М. Горбило [68]
4	$a = \sin \varphi_s / \rho_s; \quad b = \sin \varphi_v / \rho_v$ <p>$\sin \varphi_s, \sin \varphi_v$ - синусы углов внедрения соответственно в плоскости подачи и вектора скорости; ρ_s, ρ_v - кривизна соприкасающихся элементов соответственно в плоскости, проходящей через ось заготовки в плоскости вектора скорости.</p>	О.С. Черненко [76]
5	<p>a - экспериментально измеряемая величина;</p> $b = a \sqrt{\frac{Ro}{R\ddot{r}\ddot{e}}} \times \frac{2 \cos \psi}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{a \cos \psi}{R\ddot{r}\ddot{e}}\right)^2}}$ <p>Ro - радиус обрабатываемой заготовки; $R\ddot{r}\ddot{e}$ - радиус деформирующего элемента; ψ - угол поворота относительно горизонтальной оси (параллельной движению подачи).</p>	Э.И. Зубков [25]

Другим важным параметром процессов ППД является площадь контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью [6,25,48,51,58,68,70,73,76].

Площадь контакта является основным параметром, определяющий величину контактного давления, интенсивность деформации, цикличность нагружения, производительность процесса и теплонапряженность контактного взаимодействия инструмента с заготовкой [25, с. 17]. Необходимо отметить, что фактическая площадь контакта всегда отличается от расчетной вследствие шероховатости и волнистости реальных контактирующих поверхностей (рисунок 1.7 [85, с. 36]).

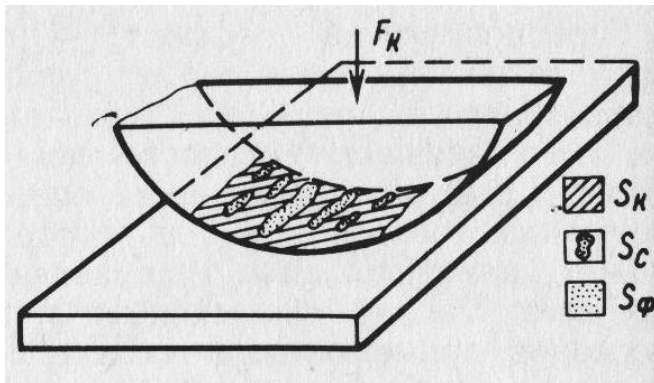


Рисунок 1.7 – Схема площади контакта: S_k – номинальная, S_c – контурная, S_ϕ – фактическая [85].

В таблице 1.3 представлены некоторые известные аналитические зависимости для расчета площади контакта, для различных условий обработки и форм рабочей части деформирующего элемента в процессах поверхностного пластического деформирования [25, с. 20].

Таблица 1.3 - Аналитические выражения для определения площади контакта при выглаживании [25].

Форма деформирующего элемента	Выражение для определения параметра	Автор и литературный источник
сфера	$F = \frac{3}{8} R_\phi \sqrt{\frac{R_d}{R_d \pm R_\phi}} \left[\sqrt{(h + \Delta)\Delta} + \Delta + \frac{1}{4} \sqrt{\Delta h} \right]$ <p>где, R_d, R_ϕ – радиус детали и выглаживающего шарика; h – остаточная деформация; Δ – упругая деформация.</p>	Д.Д. Папшев [49]
цилиндр	$A_c = 5,6\sqrt{RD}(h_d + h_b) - \text{контакт сплошной};$ $A_r = A_c \frac{bh_d^\epsilon}{R_z^{\epsilon \bar{n}\bar{o}}} - \text{контакт прерывистый};$ <p>где, R – радиус деформирующего элемента; D – диаметр детали; h_d – действительный натяг; h_b – высота волны; ϵ, κ – константы, характеризующие опорную кривую; $R_z^{\epsilon \bar{n}\bar{o}}$ – исходная шероховатость заготовки.</p>	В.М. Смелянский [58]

Продолжение таблицы 1.3		
сфера	$F = 0,25\pi ab;$ $F = 0,75 \left[\frac{P}{HV} + 2,32 \left(\frac{1-\mu^2}{E} PR \right)^{\frac{2}{3}} \right]$ <p>где, а – ширина контакта; b – длина контакта; P – усилие выглаживания; HV – твердость материала по Викерсу; R – радиус деформирующего элемента; μ – коэффициент трения; E – модуль упругости.</p>	В.М. Торбило [68]
сфера	$F = \pi lb;$ <p>где, l – большая ось эллипса; b – малая ось эллипса.</p>	Г.П. Башков [6]
конический ролик	$F = 2a^2 \cos \alpha \int_A^B \sqrt{x^2 - \left(\frac{r-h}{a}\right)^2} dx;$ $A = \frac{r-h}{a}; B = \frac{r}{a}; a = tg \alpha;$ <p>где, α – угол между образующей калибрующей части инструмента и обработанной поверхностью; h – глубина внедрения ролика; r – радиус ролика.</p>	М.М. Жасимов [24]
сфера	$F = \frac{\pi}{2} RR_z;$ $F = \pi \frac{\sin \varphi_s \sin \phi_v}{\rho_s \rho_v};$	О.С. Черненко [76]
конический ролик	$F = \frac{\pi \sin \varphi_1 \sin \varphi_2}{2\rho_s \rho_v} \left(1 + \frac{\sin \varphi_1}{2tg \xi}\right);$	
тороконус	$F = \frac{\pi}{2} \rho_s^{-1,5} \rho_v^{-0,5} (2 \sin \varphi - tg \xi)^2 \left(\frac{1 + 2 \sin \varphi - tg \xi}{2tg \xi} \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_v}}\right);$	
сфероконус	$F = \frac{\pi}{2} \left(\frac{R}{\cos \gamma}\right)^2 (2 \sin \varphi - tg \xi)^2 \left(1 + \frac{2 \sin \varphi - tg \xi}{2tg \xi \sqrt{\cos \gamma}}\right);$	
цилиндр с угловой установкой	$F = 4\pi \sin^2 \varphi \left[\left(1 + \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_b}}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{\rho_b}{\rho_a}}\right) \rho_a \rho_b \right]^{-1};$ $\rho_a = \frac{\sin^2 \gamma}{R_3};$ $\rho_b = \frac{\cos^2 \gamma}{R_3} + \frac{1}{R};$ <p>где, ρ_s, ρ_v – кривизна соприкасающихся элементов в плоскости подачи и плоскости вектора скорости; sin φ_s, sin φ_v – синусы углов внедрения в плоскости подачи и вектора скорости; φ – угол внедрения;</p>	

	ξ - угол между образующими ролика и заготовки; φ_1, φ_2 - углы внедрения торовой части ролика; ρ_a, ρ_b - кривизна контакта в плоскости, проходящей через ось цилиндра и заготовки; γ - угол наклона оси цилиндра инструмента к оси заготовки; R_3, R - радиус заготовки и деформирующего инструмента.	
--	---	--

В исследовании [25] подробно рассмотрена задача нахождения площади пятна контакта и ее конфигурации при обработке наружных цилиндрических поверхностей инструментом, выполненным в виде СМП стандартного типоразмера для токарной обработки.

Для решения данной задачи, автором работы [25] был разработан алгоритм расчета геометрии площади контакта (рисунок 1.8) и создана математическая модель по этому алгоритму.

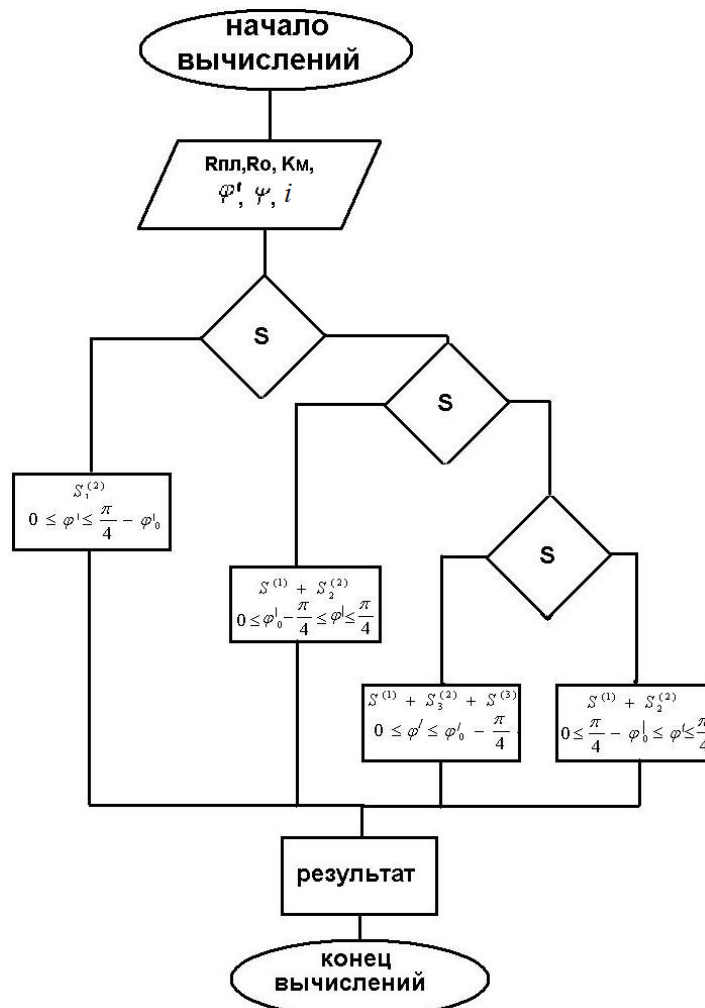


Рисунок 1.8 - Алгоритм расчета геометрии контакта инструмента с деталью.

Исходными данными служат:

r - радиус СМП (мм);

R_0 - радиус обрабатываемой детали (мм);

i – технологический натяг (мкм);

φ', ψ - углы поворота инструмента (град.);

a – длина «большой» полуоси эллипса (определяется экспериментально) (мм);

K_m - коэффициент, учитывающий материал детали.

Однако, вышеизложенная математическая модель неудобна для практического применения. Алгоритм и применяемые аналитические выражения достаточно сложны. Кроме того, в числе исходных данных присутствует экспериментально определяемая величина a (длина площадки контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью). Кроме того, существенными недостатками данной модели является то, что в расчетах не учитывается глубина внедрения СМП в металл заготовки. А также то, что физико-механические свойства обрабатываемого материала учитываются косвенным образом - посредством коэффициента K_m .

Математические модели для расчета длины, ширины и площади пятна контакта, разработанные разными авторами, чаще всего служили подмоделями при моделировании каких-либо параметров процесса выглаживания, которые оказывают влияние на качество обработанной поверхности после отделочной или упрочняющей обработки. Например, площадь и размеры области контакта использовались некоторыми исследователями для нахождения аналитических выражений для расчетов контактной температуры при выглаживании.

В работах [67,68,69,70] площадь и размеры области контакта были использованы для теоретических расчетов силы выглаживания, трения при выглаживании, а также для теоретических исследований основных параметров силового взаимодействия в процессе обработки выглаживанием. Данные исследования представляют интерес, так как параметры силового взаимодействия

в процессе механической обработки оказывают существенное влияние на микро- и макрогеометрию обработанной поверхности.

В.М. Торбило были получены выражения для расчета:

1) нормальной P_y , осевой P_x и тангенциальной P_z составляющих силы выглаживания [67, с. 9]:

$$P_x = C_x R^{0,5} h^{1,5} \sigma_T;$$

$$P_y = C_y R h \sigma_T;$$

$$P_z = C_z R^{0,5} h^{1,5} \sigma_T,$$

Где: C_x, C_y, C_z – коэффициенты, учитывающие условия обработки;

R – радиус рабочей части выглаживающего инструмента;

h – глубина внедрения выглаживающего инструмента;

σ_T – предел текучести обрабатываемого материала.

2) обобщенного параметра силового воздействия при выглаживании. Физический смысл этого параметра следующий – это эквивалентное контактное давление, приведенное к одному циклу деформации. Аналитические выражения обобщенного параметра силового взаимодействия B [68, с. 76-78]:

$$B = P_0 \times N^m;$$

$$N = \frac{a}{s} \times i = \frac{1,65}{s} \sqrt{\frac{P}{HV}};$$

$$P_0 = \frac{P}{F \times HV}$$

Где:

P_0 – безразмерное давление;

N^m – накопленная деформация;

m – показатель степени, характеризующий число циклов деформации;

N – цикличность нагружения;

a – длина области контакта (мм);

s – движение подачи инструмента (мм/об);

i – число проходов;

P – контактное давление (Мпа);

HV – твердость обрабатываемого материала по Виккерсу (Мпа);

F – площадь области контакта (мм^2).

3) коэффициента трения при выглаживании [68, с. 93]:

$$f = f_a + \frac{3(b_1 - b_2)}{8R}$$

Где:

f_a – адгезионный коэффициент трения; b_1, b_2 – малые полуоси эллипса ($b_1 + b_2 = b$ – ширина области контакта) (мм); r – радиус инструмента (мм).

1.4 Качество обработанной выглаживанием поверхности.

Качество поверхностей деталей характеризуется микрогеометрией и физико-механическими свойствами поверхностного слоя металла. Качество поверхности оказывает определяющее влияние на эксплуатационные свойства деталей машин и механизмов (см. таблица 1.4 [46, с. 85]).

Геометрические отклонения реальной поверхности заготовок и деталей условно подразделяются на макрогеометрические и микрогеометрические (шероховатость). В качестве критерия оценки данного деления принято

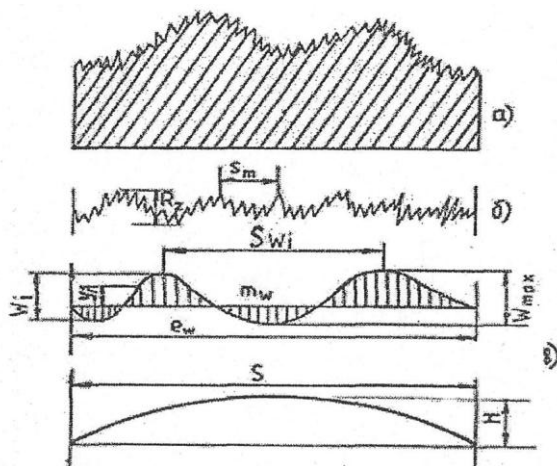


Рисунок 1.9 - Схема макро- и микрогеометрических отклонений поверхности детали: а) профиль поверхности детали; б) микронеровности; в) макронеровности [46].

отношение длины шага неровностей S к высоте неровностей H . Если $S/H > 1000$ – это значит, что наблюдаются макроотклонения или отклонения от требуемой геометрической формы детали (конусность, овальность и др.); при $S/H = 50 \dots 1000$ - имеет место волнистость поверхности; при $S/H < 50$ - шероховатость поверхности (рисунок 1.9 [46, с. 40]).

Оценка волнистости обработанной поверхности производится по трем параметрам [46, с. 39-41]:

- по высоте волнистости W_z ;
- по наибольшей высоте волнистости W_{max} ;
- и по среднему шагу волнистости S_w .

Высота волнистости W_z – среднее арифметическое значение из пяти высот макронеровностей W_i , измеренных на базовой длине l_w , которая должна быть больше пятикратного наибольшего шага волнистости [46]:

$$W_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 W_i$$

Наибольшая высота волнистости W_{max} - расстояние между самой высокой и самой низкой точками профиля волнистости, измеренное на одной волне в пределах базовой длины l_w [46].

Средний шаг волнистости S_w – это среднее арифметическое значение из расстояний S_{wi} между одноименными сторонами соседних волн, измеренными по средней линии профиля в пределах базовой длины [46]:

$$S_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{wi}$$

Средняя линия профиля волнистости представляет собой номинальный профиль поверхности. Средняя линия делит профиль волнистости так, что на участке измерения сумма квадратов расстояний Y_i точек профиля волнистости до этой линии минимальна [46].

Базовая линия волнистости проводится эквидистантно средней линии профиля. Волнистость определяется без учета шероховатости и отклонений геометрической формы [46].

Шероховатость поверхности – это совокупность неровностей со сравнительно малыми шагами, образующих микрорельеф поверхности. Шероховатость поверхности определяется профилем, который представляет собой линию пересечения поверхности плоскостью, которая перпендикулярна направлению макронеровностей. Параметры шероховатости поверхности оцениваются в пределах длины базовой линии. При определении параметров профиля шероховатости отсчет высот микронеровностей производится от средней линии.

Средняя линия профиля – это базовая линия, соответствующая номинальному профилю детали, делящая реальный профиль так, что в пределах базовой длины сумма квадратов отклонений профиля от этой линии минимальна [46, с. 41].

Базовая длина l – это длина базовой линии, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности. Длина поверхности, на которой оцениваются параметры шероховатости, называется длиной оценки L . Она может содержать как одну, так и несколько базовых длин l [46, с. 41].

Для оценки шероховатости поверхности используют около 30 параметров. ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 27964-88 регламентируют шероховатость поверхности шестью параметрами [14,15,46]:

1) среднее арифметическое отклонение профиля R_a - среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} |y_i|$$

где n_1 - число выбранных точек на базовой длине, y_i - расстояние между точкой реального профиля и средней линией профиля [46, с. 42];

2) высота неровностей R_z - средняя величина высот пяти наибольших выступов $Y_{p_{mi}}$ и глубин пяти наибольших впадин профиля $Y_{v_{mi}}$.

$$R_z = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |y_{p_{mi}}| + \sum_{i=1}^5 |y_{v_{mi}}| \right]$$

т.е. R_z - это высота неровностей профиля по 10 точкам [46, с. 42];

3) наибольшая высота микронеровностей R_{max} – это расстояние между линией выступов и линией впадин профиля в пределах базовой длины. Линии выступов и впадин профиля – это линии, эквидистантные средней линии, проходящие соответственно через высшую или низшую точку профиля в пределах базовой длины [46, с. 42]. Между параметрами шероховатости R_a , R_z и R_{max} в работе [27] установлена следующая корреляционная связь:

Таблица 1.4 - Взаимосвязь основных характеристик поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами [46].

Эксплуатационные свойства		Геометрические характеристики поверхности									Физико-механические свойства			
		Шероховатость						Волнистость		Погрешность формы	Наклеп		Остаточные напряжения	
		R _a	R _Z	S _m	tp	r	r'	W _a	S _w		H _{max}	HV	h _v	б
1. Износостойкость в условиях трения	сухого	+	+	+	++	++	-	+	+	+	++	++	++	++
	граничного	+++	+	+++	++	++	+	++	++	+	++	-	++	-
	жидкостного	++	+	+++	++	+	+	++	++	+	-	-	-	-
	гидроабразивного	+	+	+	++	++	-	-	-	-	++	++	++	++
2. Усталостная прочность в условиях:	норм. температуры	++	++	++	+	-	++	-	+	+	++	++	++	++
	повыш. температуры	++	++	++	+	-	++	-	+	+	+	+	-	-
	агрессивной среды	++	++	++	+	-	++	-	+	+	+	+	+	+
3. Коррозионная стойкость		++	++	++	++	-	+	++	+	-	++	++	++	++
4. Эрозионная стойкость		++	++	+	++	+	-	-	-	-	++	++	++	++
5. Кавитационная стойкость		++	++	+	++	+	-	-	-	-	++	++	++	++
6. Стойкость к корроз. растрескиванию		++	++	++	+	+	++	-	-	-	++	++	++	++
7. Фреттинг-коррозия		++	++	+	++	+	-	+	+	+	+	+	+	+
8. Прочность сопряжений		+	+	+	+	++	-	+	+	+	+	+	-	-
9. Прочность сцепления покрытий		+	++	++	+	+	+	+	+	-	++	+	++	+
10. Контактная жесткость		+	+	+	++	++	-	+	+	+	++	-	+	-
11. Плотность соединений		++	+	+	++	-	-	++	+	+	++	+	-	-
12. Виброустойчивость		+	+	++	+	++	-	+	+	+	+	+	-	-
13. Обтекаемость газами и жидкостями		+	+	+	++	+	++	+	+	+	-	-	-	-
14. Отражательная способность		+	++	++	+	+	+	+	+	+	++	+	+	+
15. Эмиссия электронов		+	+	+	+	+	+	-	-	-	++	++	+++	-

где r - радиус скругления выступов, r' - радиус кривизны на дне впадин

- для точения и магнитно-абразивной обработки $R_Z = 5 R_a, R_{max} = 6 R_a$;
- для шлифования и суперфиниширования $R_Z = 5,5 R_a, R_{max} = 7 R_a$;
- для ППД, полирования и притирки (плосковершинной) $R_Z = 4 R_a, R_{max} = 5 R_a$;

4) средний шаг неровностей профиля S_m – определяется как среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины:

$$S_m = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} S_{mi}$$

где n_2 - число шагов в пределах базовой длины, S_{mi} - шаг неровностей профиля i -того участка - длина отрезка средней линии профиля, содержащая выступ профиля и сопряженную с ним впадину профиля [46, с. 43];

5) средний шаг местных выступов профиля S – это среднее арифметическое значение шагов местных выступов профиля (по вершинам) в пределах базовой длины:

$$S = \frac{1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} S_i$$

где n_3 - число шагов неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины, S_i - шаг местных выступов профиля, определяемый как длина отрезка средней линии между проекциями на нее двух наивысших точек соседних выступов профиля [46, с. 43];

б) относительная опорная длина профиля t_p - это отношение опорной длины профиля l_p к базовой длине (%):

$$t_p = \frac{l_p}{l} \times 100\%$$

где l_p – это опорная длина профиля, определяемая суммой длин отрезков, отсеченных на заданном уровне p выступов профиля линией, параллельной средней линии в пределах базовой длины:

$$l_p = \sum_{i=1}^{n_4} B_i$$

где B_i - длина отрезка, отсекаемого на выступе профиля, n_4 - число отсекаемых выступов профиля [46, с. 43].

Перечисленные параметры шероховатости поверхности позволяют охарактеризовать высоту, шаг и форму микрорельефа. При равных высотных параметрах микрорельеф может иметь различную форму, шаг (рисунок 1.10 [46, с. 44]) и различное влияние на эксплуатационные свойства детали.

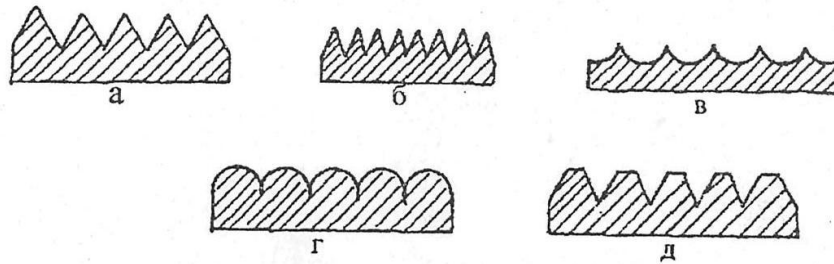


Рисунок 1.10 - Микропрофиль поверхности: а, б - среднежесткий; в - маложесткий; г, д - жесткий [46].

При оценке шероховатости высотные параметры R_a и R_z являются основными. Параметр R_z обычно применяется для поверхностей с большой ($R_z > 20$ мкм) и малой ($R_z < 0,08$ мкм) шероховатостью, параметр R_a - для поверхностей со средней шероховатостью ($0,08 < R_z < 20$ мкм, т.е. $0,02 < R_a < 5$ мкм). Высотный параметр R_{max} используется для характеристики равномерности неровностей, например, глубины отдельных рисок [46, с. 44].

Шаговые параметры шероховатости S и S_m определяют взаимное расположение характерных точек неровностей и форму профиля (совместно с параметрами R_a и R_z). Увеличение S и S_m (при неизменных высотных параметрах) приводит к тому, что микропрофиль поверхности становится более пологим. При уменьшении разницы между S и S_m профиль неровностей становится более однородным, регулярным [46, с. 44].

Параметр t_p (относительная опорная длина профиля) дает наиболее полное представление о форме микронеровностей, жесткости профиля и степени заполнения профиля материалом. По кривым изменения t_p по высоте уровня сечения профиля можно судить о форме неровностей и его жесткости (рисунок 1.11 [46, с. 44]).

Трение и износ деталей машин и механизмов в значительной степени определяется формой и высотой шероховатости. Тонкие и частые микронеровности обеспечивают большую износостойкость, чем неровности той же высоты, но большего шага. При жидкостном трении и малой высоте неровностей направление следов механической обработки значения не имеет [46, с. 86].

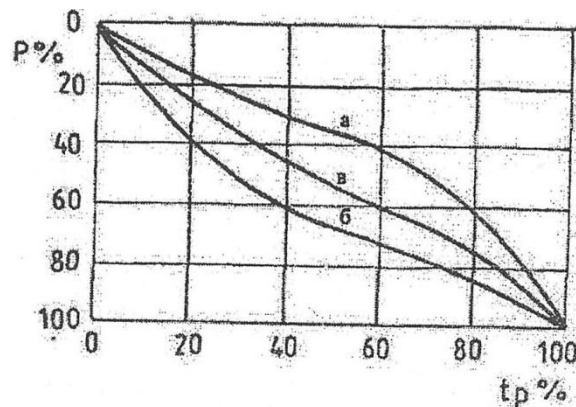


Рисунок 1.11 - Кривые опорных линий профилей: *а* - жестких, *б* - малой жесткости, *в* - средней жесткости [46].

Деформационное упрочнение, также именуемое наклепом, увеличивает твердость поверхностного слоя (ПС), в результате чего уменьшаются взаимное внедрение и деформации микровыступов трущихся поверхностей. Кроме этого, в пластически деформированном ПС активизируются диффузионные процессы и химические реакции, способствующие образованию на стальных деталях твердых соединений оксидов железа (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4). Данные соединения характерны для окислительного износа, который протекает с наименьшей интенсивностью. Упрочнение препятствует развитию пластических деформаций в ПС трущихся деталей, при которых может происходить их холодная сварка (адгезия или схватывание), приводящая к наиболее интенсивному изнашиванию. Перенаклеп металла значительно снижает его износостойкость, т.к. перенаклеп приводит к снижению предела пластичности и микродефектам в виде нарушения сплошности материала [46, с. 86-87].

Технологические остаточные напряжения в ПС детали не оказывают существенного влияния на изнашивание трущихся пар, т.к. в течении короткого времени работы они релаксируют и в ПС формируются остаточные напряжения сжатия. Но, если большие остаточные напряжения распространяются в ПС на значительную глубину (превышающую 0,5 мм), то остаточные напряжения растяжения увеличивают износ, а напряжения сжатия его уменьшают. Но по сравнению с шероховатостью остаточные напряжения оказывают на износ менее выраженное влияние (таблица 1.4 [46, с. 87]).

Большое количество деталей гидравлических машин и механизмов работает в условиях гидроабразивного и кавитационного изнашивания. В большом количестве исследований экспериментально установлено, что интенсивность гидроабразивного изнашивания деталей зависит от физико-механического состояния их ПС. Шероховатость поверхности оказывает большое влияние на износ только в начальный период гидроабразивного воздействия. Гидроабразивная износостойкость возрастает с уменьшением высотных параметров шероховатости поверхности [46, с. 87].

Большим количеством работ разных авторов убедительно было доказано влияние состояния ПС на усталостную прочность деталей. Дефекты и неровности на поверхности детали, работающей в условиях циклической и знакопеременной нагрузки, вызывают концентрацию напряжений и выступают в качестве очагов субмикроскопических нарушений сплошности материала ПС, его разрыхления, что служит основной причиной зарождения усталостных трещин [46, с. 88].

Практически все характеристики состояния поверхности детали оказывают влияние на коррозионную стойкость металлов. Она увеличивается с уменьшением шероховатости поверхности, с увеличением радиусов округления впадин, с уменьшением степени и глубины наклепа, с уменьшением остаточных напряжений растяжения и т.д. Методы обработки, формирующие ПС с малой высотой микронеровностей, без глубоких

отдельных рисок, со сглаженным профилем микронеровностей, с малой глубиной и степенью наклепа, остаточные напряжения сжатия обеспечивают высокую коррозионную стойкость деталей машин и механизмов [46, с. 96].

Наиболее распространенные лезвийные и абразивные методы механической обработки создают в ПС большинства конструкционных сталей и сплавов остаточные напряжения растяжения и наклеп. Это снижает коррозионную стойкость и увеличивает склонность металла к коррозионному растрескиванию. Для устранения данного вредного влияния механической обработки рекомендуется проводить термообработку деталей после механической обработки, удалять деформированный слой путем химического травления или электрохимической обработки, а также, по возможности, применять такие методы механической обработки, которые бы создавали в ПС остаточные напряжения сжатия при минимальном его наклепе. Подобная обработка повышает устойчивость ПС к коррозионному растрескиванию [46, с. 98-99].

Шероховатость, глубина и степень упрочнения ПС, вид и величина остаточных напряжений, химический и фазово-структурный состав ПС оказывают существенное влияние на коррозионно-усталостную прочность деталей, изготовленных из сталей и сплавов. Присутствие коррозионной среды катализирует зарождение и рост усталостных трещин, в значительной мере снижая усталостную прочность деталей [46, с. 99].

Коррозионно-усталостная прочность снижается по мере увеличения шероховатости поверхности, наклепа и при наличии остаточных напряжений растяжения в ПС. Например, при усталостных испытаниях гладких шлифованных образцов из стали 30ХГСНА в водопроводной воде предел выносливости снизился с 650 МПа до 80...100 МПа, а образцов из стали ЭИ643 - с 700 МПа до 120 МПа по сравнению с образцами, испытанными на воздухе. Виброшлифование и виброполирование повышают коррозионно-усталостную прочность стали 30ХГСНА до 200 МПа, а после обработки ППД предел выносливости в водопроводной воде был выше, чем после

шлифования и испытаний образцов на воздухе ($\sigma_{-1}=650...700$ МПа). Это объясняется положительным влиянием остаточных напряжений сжатия, образовавшихся в процессе обработки ППД, снижением шероховатости поверхности, в особенности после алмазного выглаживания [46, с. 99].

Так как основными входными параметрами процесса, обеспечивающими формирование заданной микрогеометрии обработанной выглаживанием поверхности, являются технологические режимы обработки, то, в проведенных ранее исследованиях, довольно большое количество авторов этому вопросу уделяли значительное внимание [12,25,42,43,45,67,68,74].

В результате проведенных исследований, авторами работ [25, 45, 57, 67, 74] было установлено, что из технологических параметров, оказывающих воздействие на микрогеометрию обработанной поверхности, наиболее значимыми являются сила выглаживания P (для схемы с упругим закреплением инструмента), задаваемый натяг пластического деформирования i (для обработки с жестким закреплением инструмента) и движение подачи инструмента S .

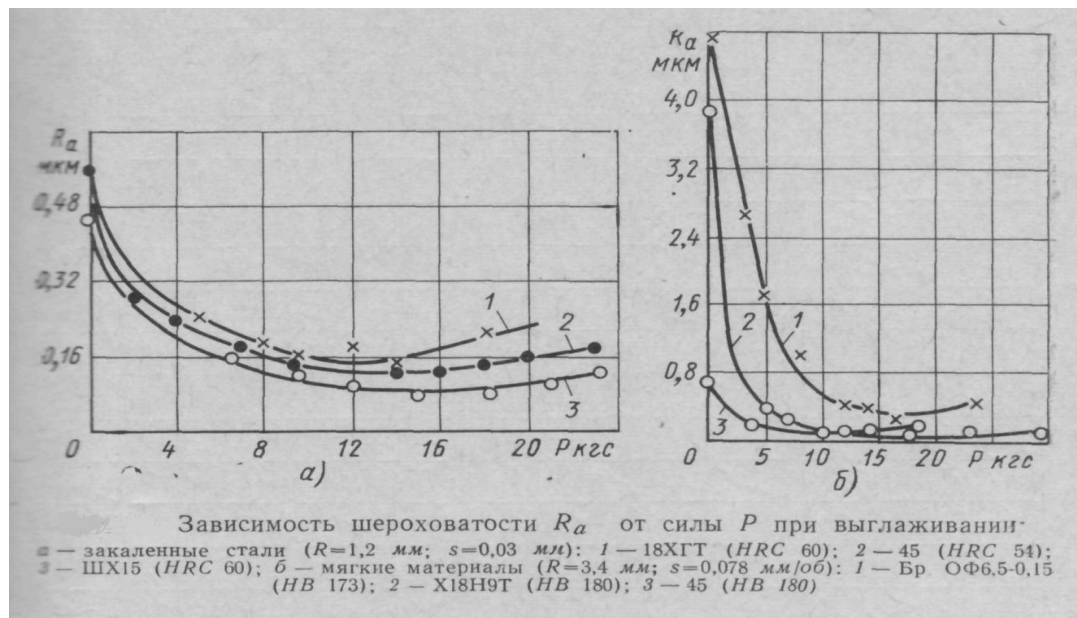


Рисунок 1.12 - Зависимость среднего арифметического отклонения профиля R_a от силы выглаживания P при обработке различных материалов [67].

Большое количество экспериментальных исследований в данной области были выполнены В.М. Торбило. В работе [67] изложены результаты

экспериментов по определению характера зависимости достигаемого высотного параметра шероховатости R_a от технологических режимов обработки выглаживанием.

Зависимость шероховатости поверхности (по параметру R_a) от силы выглаживания (рисунок 1.12) качественно одинакова для различных обрабатываемых материалов [67, с. 29]. График зависимости шероховатости от силы выглаживания имеет три характерных участка: 1) участок уменьшения величины шероховатости от исходной до минимальной; 2) участок с наименьшей шероховатостью; 3) участок последующего увеличения шероховатости по сравнению с минимальной величиной. Данный характер зависимости автор [67] объясняет тем, что при малых силах выглаживания контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью происходит по вершинам неровностей, имеющих малую опорную площадь. Поэтому на площадях контакта развиваются значительные по величине контактные давления, превышающие предел текучести обрабатываемого материала и вызывающие пластическую деформацию микронеровностей. По мере продолжения роста силы выглаживания увеличивается и глубина внедрения. Растет площадь контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. Кроме этого, в процессе пластической деформации ПС металла сильно упрочняется. Все это увеличивает сопротивление ПС пластической деформации, и величина шероховатости с увеличением силы уменьшается менее интенсивно [67].

При определенных значениях силы выглаживания достигается полное сглаживание исходных микронеровностей и образуется шероховатость, образованная уже самим процессом выглаживания (величиной движения подачи и пластическими искажениями). Поэтому, увеличение силы выглаживания в пределах второго участка графика не вызывают существенного изменения величины шероховатости по параметру R_a [67].

При дальнейшем возрастании силы выглаживания происходит увеличение высоты неровностей по сравнению с наименьшей, так как ПС

обрабатываемого металла подвергается чрезмерно интенсивной деформации. Возможно даже разрушение ПС, что проявляется как резкое увеличение шероховатости и в появлении микротрещин на обработанной поверхности [67].

Подача инструмента, названа автором работы [67, с. 31] вторым по значению фактором процесса выглаживания, влияющим на высотные параметры шероховатости (рисунок 1.13). С увеличением подачи увеличивается и высота микронеровностей. Кроме того, увеличение подачи уменьшает кратность приложения нагрузки, т.е. число циклов нагружения каждой точки обрабатываемой поверхности. При этом величина остаточной пластической деформации уменьшается, что также приводит к росту шероховатости при увеличении подачи. Наименьшая шероховатость (по параметру R_a) достигается при подаче 0,02 - 0,04 мм/об. При подачах



Рисунок 1.13 - Зависимость среднего арифметического отклонения профиля R_a от величины движения подачи инструмента s при обработке различных материалов [67].
 меньших 0,02 мм/об уменьшения высоты шероховатости не наблюдается, или она возрастает по сравнению с наименьшей. Это объясняется пластическим искажением микропрофиля и перенаклепом поверхности вследствие большой кратности приложения нагрузки (более 20 раз). При увеличении величины подачи инструмента свыше 0,08 - 0,10 мм/об происходит выраженное увеличение высоты шероховатости. Это объясняется

уменьшением степени пластической деформации вследствие малой кратности приложения нагрузки (менее 2 - 4 раз) [67].

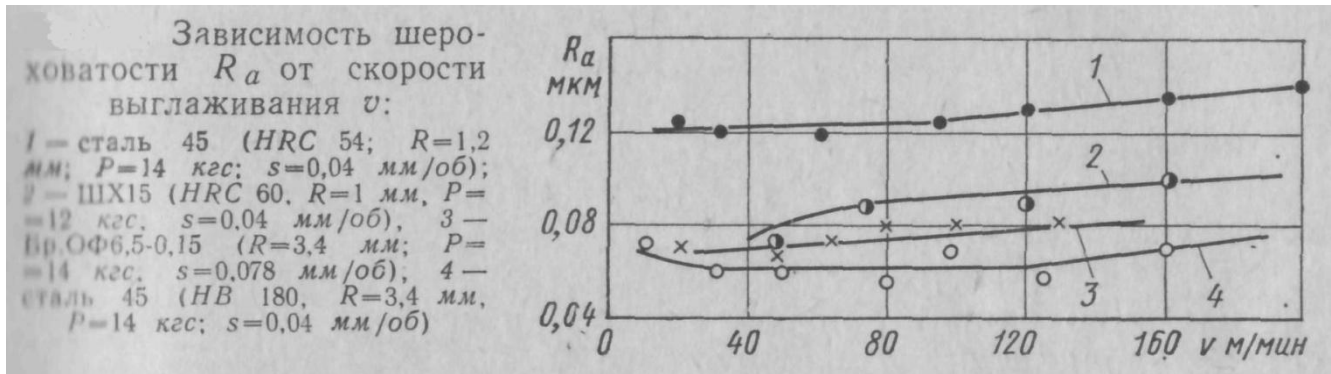


Рисунок 1.14 - Зависимость среднего арифметического отклонения профиля R_a от скорости обработки V [67].

Скорость выглаживания мало влияет на величину шероховатости [25,45,67,]. При изменении скорости от 16 до 120 м/мин величина шероховатости (по параметру R_a) практически не изменяется. Увеличение скорости выглаживания от 120 до 200 м/мин приводит к небольшому увеличению высотных параметров шероховатости (рисунок 1.14 [67, с. 33]).

Зависимость высоты шероховатости от числа проходов инструмента, полученная автором работы [67, с. 32] представлена графически на рисунке 1.15. Основное уменьшение высоты микронеровностей происходит при

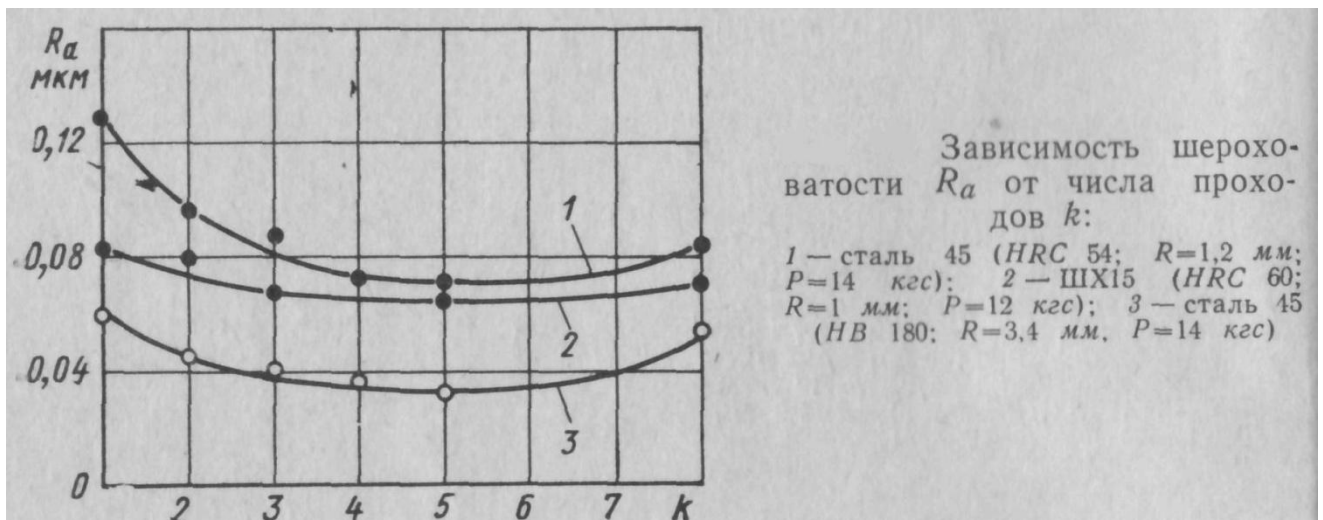
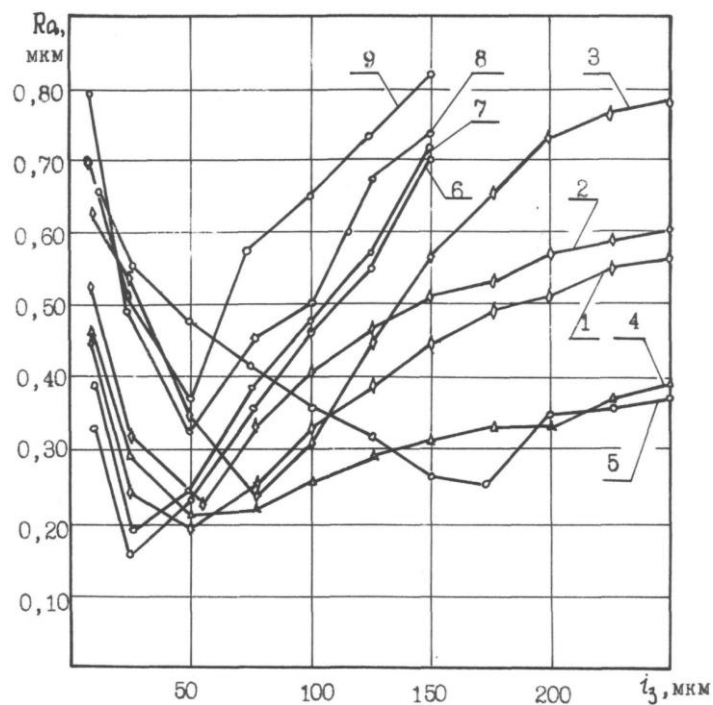


Рисунок 1.15 - Зависимость среднего арифметического отклонения профиля R_a от числа проходов k [67].

первом проходе инструмента. С увеличением числа проходов до 3 - 5 шероховатость уменьшается, но менее выражено. Это объясняется тем, что

повторные проходы производятся по сглаженной и упрочненной поверхности. Поэтому, автор работы [67] делает вывод о целесообразности назначения 1 - 2 проходов деформирующего инструмента.

В работе [25] были проведены масштабные экспериментальные исследования выглаживания СМП и жестким закреплением инструмента. Характер зависимости высоты микронеровностей от величины заданного технологического натяга (рисунок 1.16 [25, с. 174]) схож с зависимостью



Зависимость шероховатости поверхности от заданного натяга: $X_0Y_0Z_0$, закаленные стали /ВОК75, $R_{пл}=1,2\text{мм}$ /, неазакаленные стали/ОНТ-20, $R_{пл}=1,6\text{мм}$ /, $S=0,05\text{мм/об}$; 1-ст. 45/HV 210...220/, $V=70\text{м/мин}$; 2-ст. 45, $V=110\text{м/мин}$; 3-ст. 45, $V=280\text{м/мин}$; 4-18ХГТ /HV 170...175/, $V=110\text{м/мин}$; 5-38ХНЭМФА/HV 265...260/, $V=110\text{м/мин}$; 6-ст. 40Х/HRC 35...40/, $V=46\text{м/мин}$; 7-ст. 45/HRC 60...62/, $V=55\text{м/мин}$; 8-ст. 45, $V=70\text{м/мин}$; 9-ст. 45, $V=110\text{м/мин}$.

Рисунок 1.16 - Зависимость среднего арифметического отклонения профиля R_a от заданного технологического натяга i при обработке различных материалов [25]. шероховатости от силы (при обработке по упругой схеме) (рисунок 1.12), полученной автором работы [67]. Это объясняется тем, что заданный натяг при жесткой установке инструмента является силовым технологическим

режимом процесса, аналогичным силе выглаживания при обработке по упругой схеме.

Кроме того, в работе [25] был проведен полный факторный эксперимент по исследованию зависимости шероховатости обработанной поверхности от основных технологических факторов. Графическое изображение полученных данных представлено на рисунке 1.17 [25, с. 188]. При планировании

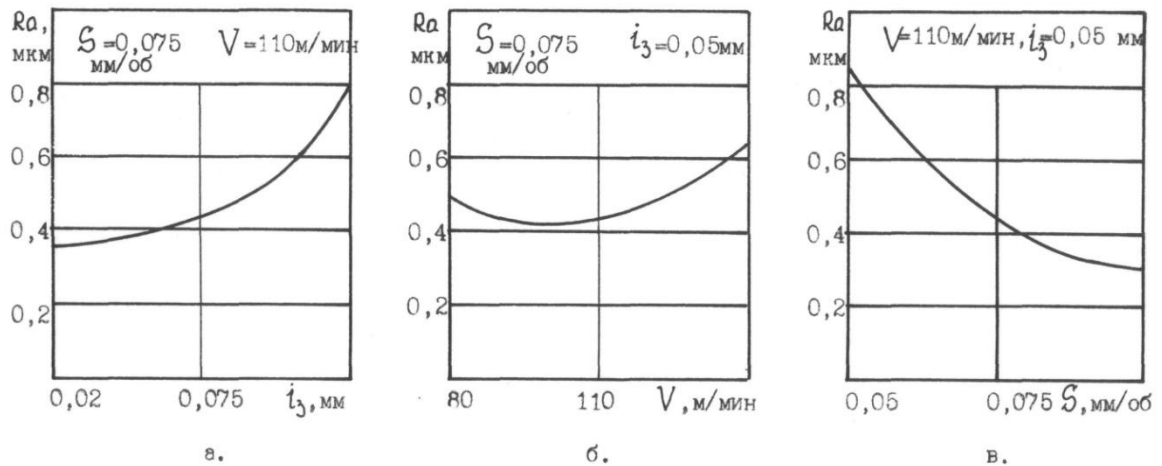


Рисунок 1.17 - Зависимость среднего арифметического отклонения профиля R_a от технологического натяга (а); скорости обработки (б); подачи инструмента (в) [25].

эксперимента была использована только одна схема установки СМП №1 (рисунок 1.6), где инструмент находится в исходном положении без каких-либо поворотов вокруг осей. Все представленные зависимости имеют схожий характер с зависимостями, полученными В.М. Торбило для алмазного выглаживания в работе [67].

Несмотря на существенное количество проведенных технологических исследований, до настоящего времени не было получено общеупотребительной зависимости для количественного определения шероховатости выглаженной поверхности. В работе [59] данный факт объясняется очень сложным взаимодействием большого числа факторов при обработке, а также недостаточным вниманием к особенностям пластического течения металла в очаге деформации, в результате которого формируется шероховатость поверхности. В работе [57] было экспериментально установлено, что наименьшей высоты микронеровностей ПС можно достичь

при обработке выглаживанием с действительным внедрением инструмента $h_D = (1,1...1,3)Rz_{ИСХ}$ (где $Rz_{ИСХ}$ - исходная высота неровностей обрабатываемой поверхности). На основе этого, автором работы был сделан вывод, что оптимальная величина шероховатости достигается на режимах, обеспечивающих образование очага деформации 3-го вида (рисунок 1.18 [59, с. 107]).

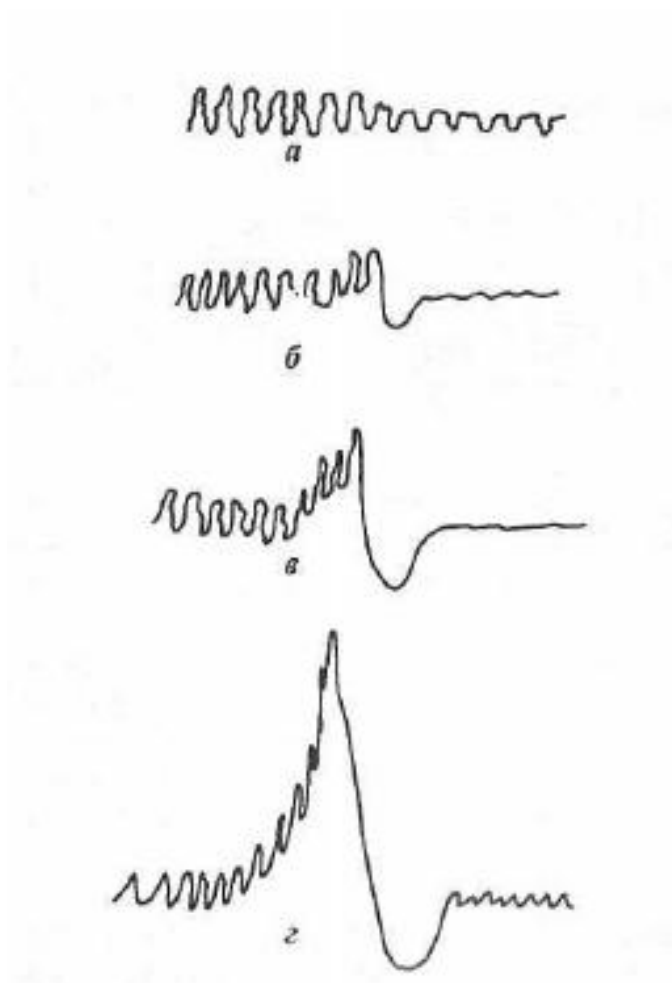


Рисунок 1.18 - Профили очагов деформации, возникающие при выглаживании: а) очаг деформации 1-го вида; б) очаг деформации 2-го вида; в) очаг деформации 3-го вида; г) очаг деформации 4-го вида [59].

Известно, что заметную роль в формировании шероховатости играет вторичное пластическое течение металла в область обработанной поверхности. Экспериментально установлено, что вторичное искажение микропрофиля наблюдается в тем большей степени, чем больше величина пластического подъема (восстановления) и меньше радиус задней

внеконтактной поверхности очага деформации (рисунок 1.19 [59, с. 162]). Этот вывод подтверждается практикой ППД, из которой известно, что большие значения радиусов деформирующих инструментов и малые углы задних поверхностей инструмента, которые обеспечивают каплевидную форму контактной области, благоприятно влияют на формирование нужной шероховатости потому, что обеспечивают плавный выход металла из-под инструмента, в результате которого не происходит значительного вторичного искажения микропрофиля, достигнутого на площадке контакта [59].

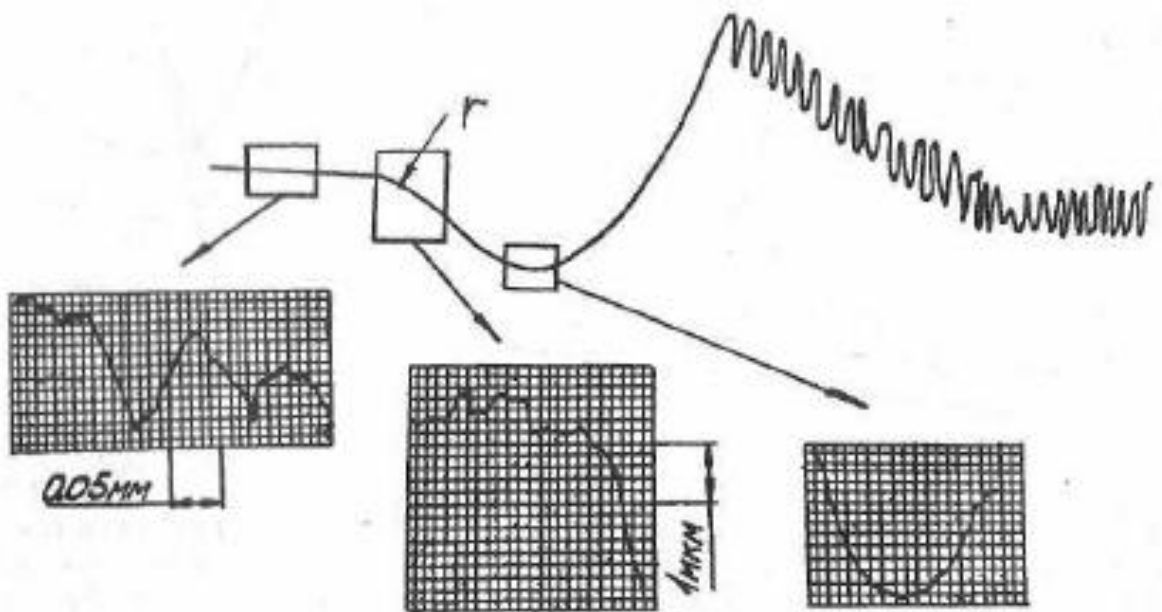


Рисунок 1.19 - Трансформация шероховатости в очаге деформации [59].

Основываясь на приведенных в пункте 1.4 данных из литературных источников, можно сделать вывод о том, что выглаживание с применением в качестве инструмента как специальных выглаживателей, так и СМП для токарной обработки, позволяет достигать шероховатости обработанной поверхности $R_a=0,63...0,04$ мкм. Изменения размеров деталей в результате выглаживания не выходят за пределы полей допусков, т.е. это процесс без размерной обработки, и требуемая точность размеров и формы деталей должна быть обеспечена на предшествующих операциях.

Потому, что при выглаживании с изменением способа установки СМП одними из основных режимов обработки являются углы поворота пластины,

необходимо провести полные факторные эксперименты для выявления зависимостей достигаемых параметров качества обработанного ПС от углов установки инструмента. В качестве параметров качества обработанной поверхности в данной работе рассматриваются четыре параметра из шести, регламентируемых ГОСТ 2789-73 [14] и ГОСТ 27964-88 [15], а именно: среднее арифметическое отклонение профиля R_a ; относительная опорная длина профиля t_p ; средний шаг местных выступов профиля S ; средний шаг неровностей профиля S_m . Высота неровностей R_z и наибольшая высота неровностей R_{max} не использовались в качестве параметров качества в экспериментальных исследованиях, так как данные параметры имеют корреляционную связь с параметром R_a , установленную в работе [27]:

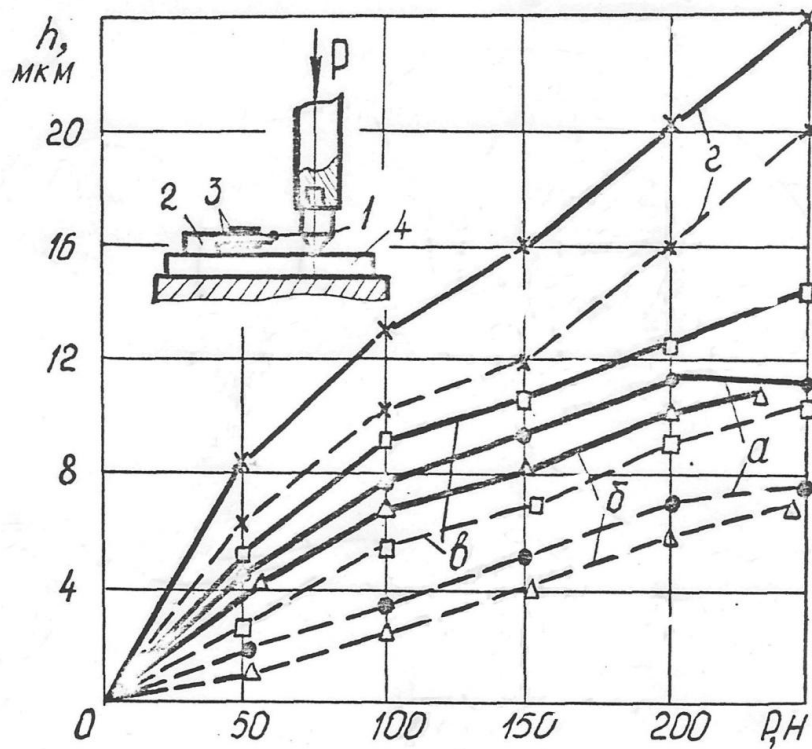
- для точения и магнитно-абразивной обработки $R_z = 5 R_a, R_{max} = 6 R_a$;
- для шлифования и суперфиниширования $R_z = 5,5 R_a, R_{max} = 7 R_a$;
- для ППД, полирования и притирки (плосковершинной) $R_z = 4 R_a, R_{max} = 5 R_a$.

1.5 Особенности контактной деформации в процессе обработки выглаживанием.

В процессе выглаживания обрабатываемая поверхность испытывает как пластические, так и упругие деформации. От их соотношения зависят многие показатели качества выглаженной поверхности, в том числе и параметры шероховатости [68].

Для определения соотношения между упругой и пластической составляющими деформации металла при выглаживании автором работы [68] были проведены эксперименты при статическом вдавливании выглаживателя и в процессе выглаживания. Мерой деформации была принята глубина внедрения выглаживателя в поверхность детали. Для измерения упругой h_u и пластической h_n глубины внедрения выглаживателя в поверхность образца при статическом вдавливании использовалось специальное приспособление. Результаты экспериментов показаны на рисунке 1.20 [68, с. 28].

Исследования показали, что полная глубина внедрения деформирующего инструмента в материал обрабатываемой заготовки относительно мала и составляет для закаленных сталей 2 - 10 мкм и 5 - 25 мкм для незакаленных сталей. Из рисунка 1.20 видно, что доля упругих деформаций в общей деформации довольно велика, в особенности для закаленных сталей, и составляет для сталей У10А и ШХ15 (HRC 62) - 40 ... 80 %, для стали 40Х (HRC 54) - 35 ... 70 %, а для незакаленной стали 40Х (НВ 180) - 20 ... 45 %. С увеличением силы внедрения, увеличивается деформация и одновременно увеличивается доля пластической деформации. Однако, даже при больших силах (200 - 300 Н) доля упругой деформации довольно велика [68].



Зависимость глубины статического внедрения от нагрузки: а - У10А, HRC 62; б - ШХ15, HRC 62; в - 40Х, HRC 54; г - 40Х, НВ 180; а, б, в - R = 1 мм; г - R = 2,5 мм;

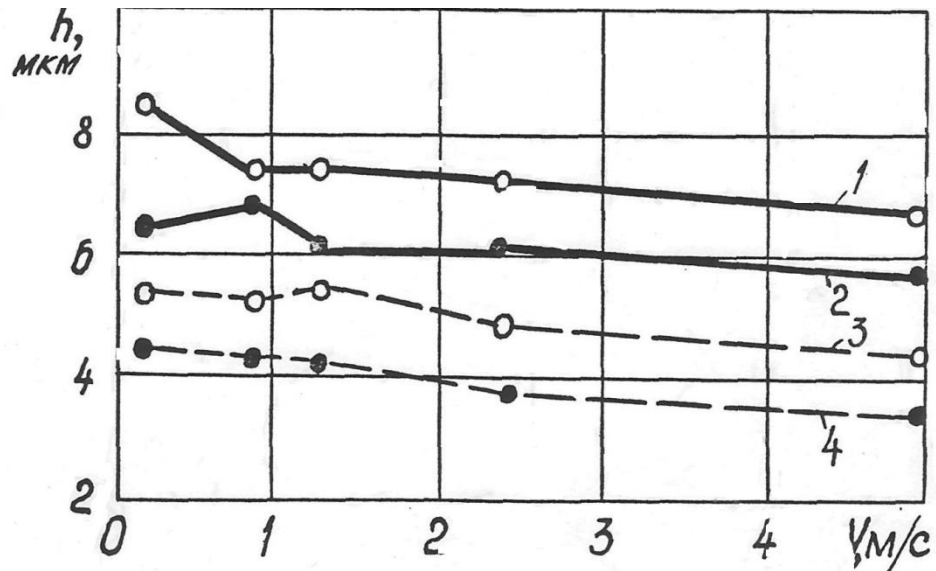
— полное внедрение, - - - пластическое внедрение;

1 — выглаживатель, 2 — упругий элемент, 3 — тензодатчики, 4 — образец.

Рисунок 1.20 - Зависимость глубины статического внедрения от нагрузки при испытаниях различных материалов [68].

Проведенные измерения полного и пластического внедрения инструмента в процессе выглаживания с различными скоростями на токарном станке

(рисунок 1.21 [68, с. 28]) показали, что соотношение между упругой и пластической деформацией поверхностного слоя во всем диапазоне обычно применяющихся скоростей выглаживания практически такое же, как и при статическом вдавлении.



Зависимость глубины внедрения от скорости выглаживания: 1,3 – 40Х, НРС 54; 2,4 – У10А, НРС 62.

Режимы выглаживания: $P=250Н$, $S=0,02$ мм/об; $R=1$ мм

— полное внедрение, - - - пластическое внедрение.

Рисунок 1.21 - Зависимость глубины внедрения инструмента от скорости выглаживания [68].

Анализ экспериментальных исследований приводит к выводу, что обрабатываемая заготовка должна рассматриваться как упругое тело. Нельзя пренебрегать упругой составляющей деформации. Кроме того, на основе экспериментальных данных автором работы [68, с. 48-49] были выявлены следующие основные особенности контактной деформации при выглаживании:

- 1) При выглаживании наблюдается объемная деформация, т.е. перемещение материала в контактной области происходит в направлении действия силы выглаживания, в направлениях скорости главного движения обработки, подачи инструмента и в противоположных им направлениях.

- 2) В процессе выглаживания одновременно протекают два процесса: нагружения за пределом упругости в зоне деформирования, примыкающей к передней части пятна контакта, и упругой разгрузки в зоне, примыкающей к задней части пятна контакта.
- 3) Перед выглаживателем образуется волна деформируемого металла, заметно изменяющая конфигурацию и размеры пятна контакта.
- 4) Вследствие того, что величина движения подачи инструмента меньше ширины контакта, деформация является циклической с изменением нагружения от цикла к циклу.
- 5) Степень деформации относительно мала. Для высокопрочных закаленных сталей она не превышает $\epsilon_i \approx 0,1$.
- 6) Вместе с пластической деформацией в пятне контакта имеет присутствует значительная упругая деформация. Они соизмеримы по величине, в некоторых случаях упругая деформация является преобладающей.
- 7) Контактные деформации относительно малы. Полная глубина внедрения инструмента в обрабатываемую поверхность составляет - 3 ... 15 мкм, глубина пластического внедрения - 0,5 ... 10 мкм, площадь контакта - 0,02 ... 0,2 мм², толщина деформируемого слоя - 0,1 ... 0,3 мм.
- 8) Выглаживаемая поверхность обладает определенной шероховатостью, высота которой соизмерима с глубиной действительного внедрения инструмента.

1.6 Инструментальные материалы для изготовления деформирующих элементов, применяемых при выглаживании.

К наиболее распространенным инструментальным материалам, применяемым для изготовления деформирующих элементов (выглаживателей), относятся [25, с. 44]:

- природные и синтетические алмазы;

- твердые сплавы;
- минералокерамика и металлокерамика.

В большом количестве исследований [5,16,54,57,58,67,68,74,84,86,92,93], посвященных методу выглаживания, в качестве инструментального материала использовался алмаз. Который обладает рядом следующих преимуществ [25, с. 46]:

- высокой твердостью;
- низким коэффициентом трения по металлу;
- высокой теплопроводностью;
- высоким пределом упругости;
- неокисляемостью;
- отсутствием адгезии.

Однако, автором работы [25, с. 46] были отмечены следующие недостатки алмаза, ограничивающие его применение в качестве инструментального материала для изготовления деформирующих элементов (выглаживателей):

- высокая стоимость;
- необходимость специального виброустойчивого оборудования;
- повышенная хрупкость;
- невысокий предел красностойкости (700 ... 800°С).

В работе [25] для исследования процесса выглаживания были применены инструменты (гамма унифицированных СМП для токарной обработки) из керамики, представляющие оксидно-нитридную и оксидно-карбидную группы. Марки использовавшейся керамики: ВОК -60, ВОК-75, Силинит-Р и ОНТ-20. Свой выбор в пользу керамики автор аргументирует следующими положениями:

- недостаточно изученным поведением керамики в качестве материала, используемого в процессах ППД [25];
- необходимостью более полного использования положительных качеств керамики как инструментального материала, ее размерной и геометрической

формы, воплощенной в виде СМП, а также нахождение специфической области ее эффективного применения [25];

- сравнительный анализ, проведение новых и подтверждение ранее проведенных исследований по выявлению преимуществ и недостатков керамики по сравнению с традиционно используемыми материалами в процессах ППД [25].

В ходе исследований, выполненных в работе [25] было установлено, что СМП, выполненные из вышеперечисленных марок керамики, полностью удовлетворяют условиям обеспечения ППД во всем диапазоне технологических режимов, соответствующих чистовой обработке.

В настоящее время, СМП для лезвийной обработки материалов резанием изготавливаются из различных инструментальных материалов, которые подразделяются на следующие основные классы:

- быстрорежущие стали;
- твердые сплавы;
- металлокерамика;
- сверхтвердые материалы (кубический нитрид бора, искусственные алмазы).

Авторами работ [16,25,45] сделаны обоснованные выводы о том, что для исследования выглаживания СМП наибольший интерес будут представлять инструменты, изготовленные из твердых сплавов и минералокерамики. Быстрорежущая сталь мало применима по причине низкой теплостойкости и недостаточной твердости. СМП из сверхтвердых материалов сравнительно редко используются в условиях современных металлообрабатывающих производств.

Выводы.

1) Метод механической обработки выглаживанием обладает широкими технологическими возможностями, с помощью выглаживания возможно производить чистовую отделочную, упрочняющую и калибрующую обработки. Метод выглаживания, при достаточной производительности,

позволяет получать изделия с высоким качеством обработанной поверхности, высокой опорной способностью, упрочненным поверхностным слоем с образовавшимися в нем сжимающими остаточными напряжениями. В зависимости от технологических условий, данный метод позволяет достигать 6 ... 7 квалитетов точности и шероховатости до $Ra=0,16 \dots 0,02$ мкм.

2) В качестве деформирующего инструмента для обработки выглаживанием можно использовать не только специальные выглаживатели, но и стандартные СМП для токарной обработки при изменении способа их установки.

3) На основании анализа возможных способов установки СМП для реализации метода выглаживания наружных поверхностей вращения, были сделаны выводы, что способ установки СМП оказывает существенное влияние как на технологические возможности процесса выглаживания, так и на достигаемые параметры качества обработанных поверхностей. Это объясняется тем, что при изменении схемы установки инструмента изменяется и геометрические параметры области контакта (площадь и размеры пятна контакта) СМП с заготовкой.

4) Из работ разных авторов известны несколько математических моделей для определения площади и конфигурации контактной области, образующейся в процессе обработки выглаживанием наружных цилиндрических поверхностей. Для выглаживания с применением в качестве инструмента СМП также была разработана методика расчета геометрических параметров пятна контакта, но существенными недостатками данной математической модели является то, что в расчетах не учитывается величина глубины внедрения СМП в металл заготовки, и то, что физико-механические свойства обрабатываемого материала учитываются косвенным образом.

5) Качество обработанных выглаживанием поверхностей характеризуется геометрическими характеристиками поверхности и физико-механическими свойствами поверхностного слоя металла. Качество поверхности оказывает

сильное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин и механизмов.

б) Разными авторами было выполнено значительное количество исследований влияния различных технологических факторов на качество выглаженной поверхности. Но для метода выглаживания с применением СМП еще не проводились полно-факторные экспериментальные исследования влияния способа установки инструмента на достигаемые параметры шероховатости обработанной поверхности.

7) На основе анализа известных данных экспериментов по исследованию особенностей контактной деформации при выглаживании, был сделан вывод, что обрабатываемая заготовка должна рассматриваться как упругое тело. Нельзя пренебрегать упругой составляющей деформации, так как упругая и пластическая составляющие соизмеримы по величине.

8) Для исследования выглаживания СМП, наиболее целесообразно применять инструменты, изготовленные из современных твердых сплавов и минералокерамики. Быстрорежущая сталь мало применима по причине низкой теплостойкости и недостаточной твердости. СМП из сверхтвердых материалов сравнительно редко используются на современных металлообрабатывающих производствах.

Сделанные на основе анализа литературных источников выводы, позволили сформулировать цели и задачи исследования.

Цель и задачи исследования.

Целью исследования является установление закономерностей влияния технологических факторов (углов установки СМП и технологического натяга) на микрогеометрию обработанной поверхности, на основе выявления взаимосвязей микрогеометрии с силовыми характеристиками и пятном контакта при выглаживании наружных цилиндрических поверхностей.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **задачи**:

- 1) Разработать методику определения конфигурации и площади пятна контакта СМП с обрабатываемой поверхностью при изменении способа установки инструмента;
- 2) Разработать математическую модель расчета контактных давлений в зоне контакта СМП с заготовкой, силы выглаживания и цикличности нагружения в зависимости от способа установки инструмента;
- 3) Экспериментально установить зависимости параметров качества обработанной выглаживанием поверхности от технологических режимов и способа установки СМП;
- 4) Разработать методику и технологические рекомендации по выбору рациональных параметров установки СМП для обеспечения заданных параметров качества обработанных выглаживанием поверхностей;
- 5) Провести производственные испытания процесса выглаживания СМП, разработанной методики назначения режимов и параметров установки инструмента.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СМП И ЗАГОТОВКИ. РАСЧЕТ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ВЫГЛАЖИВАНИЯ НАРУЖНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИЗМЕНЕНИЕМ СПОСОБА УСТАНОВКИ СМП.

Как известно из работ [25,30,31,32,38], основанных на системном анализе методов механической обработки – основной функцией статических характеристик является обеспечение определенного относительного положения инструмента и заготовки в процессе обработки. Их выбор определяется направлением и величиной действующих сил, а также формой и взаимным расположением инструмента и обрабатываемой заготовки. Кроме того, корректный выбор статических характеристик во много определяет степень точности, достигаемой в процессе механической обработки [32, с. 214].

Компенсация системы внешних сил специально создаваемыми усилиями закрепления ограничивает взаимное перемещение инструмента и обрабатываемой заготовки, и, как следствие, изменение размера обрабатываемой поверхности. Недостаточная величина усилий закрепления приводит к периодическим отжатию в технологической системе и вибрациям, которые отрицательно сказываются на достигаемых параметрах микро- и макрогеометрии обработанной поверхности. Если обработка осуществляется деформирующим инструментом, в частности выглаживанием СМП, его перемещения и вибрации в процессе работы приводят к изменению технологического натяга или силы выглаживания (в зависимости от применяемой схемы с жестким или упругим закреплением инструмента), что приводит к неоднородности геометрических и физико-механических параметров качества обработанной поверхности. Это снижает эксплуатационные свойства деталей, так как геометрические характеристики поверхностного слоя определяют длительность и интенсивность приработки трущихся поверхностей, а физико-механические свойства – величину износа детали в процессе длительной эксплуатации [32, с. 214].

обоснована результатами работ многих исследователей метода обработки выглаживанием. В работе [25] были установлены закономерности влияния способа установки СМП на площадь и конфигурацию области пятна контакта, и выполнены экспериментальные исследования зависимостей качества поверхности обработанных выглаживанием заготовок от способа установки инструмента и технологических режимов обработки [62].

Для корректного прогнозирования качества обработанных поверхностей необходимо перейти к параметрическому моделированию процесса выглаживания СМП. Для этого, необходимо разработать математическую модель, описывающую количественные отношения основных параметров процесса выглаживания с применением СМП и их влияние на достигаемое качество обработанной поверхности. В качестве параметров в данной работе рассматриваются [62, с. 20]:

- а) способ установки инструмента: углы установки СМП, технологический натяг (для "жесткого" выглаживания);
- б) геометрические параметры пятна контакта (площадь, длина и ширина) – определяются параметрами а);
- в) силовые параметры процесса (сила, контактное давление, цикличность нагружения) – зависят от параметров б);
- г) параметры качества обработанной поверхности: среднее арифметическое отклонение профиля Ra , относительная опорная длина профиля tp , средний шаг неровностей профиля Sm , средний шаг местных выступов профиля S , коэффициент улучшения шероховатости $K = Ra_{исх}/Ra$.

При этом, следует учесть тот факт, что для схемы с упругим закреплением инструмента сила выглаживания P будет являться одним из технологических режимов обработки наряду с углами установки СМП, скоростью выглаживания и величиной движения подачи инструмента [62].

Математическая модель, описывающая зависимости способа установки инструмента, силовых параметров процесса обработки, геометрических параметров пятна контакта и их влияние на достигаемые параметры качества

обработанной выглаживанием поверхности, - неудобна для практического использования в производственном процессе. Поэтому, возникает необходимость решения "обратной задачи" – т.е. разработки методики расчета и выбора углов установки СМП и силовых параметров (технологического натяга i или силы выглаживания P) в зависимости от требуемой микрогеометрии обработанной поверхности. Таким образом, можно представить структурную схему данного исследования следующим образом (рисунок 2.2 [62, с. 21]).

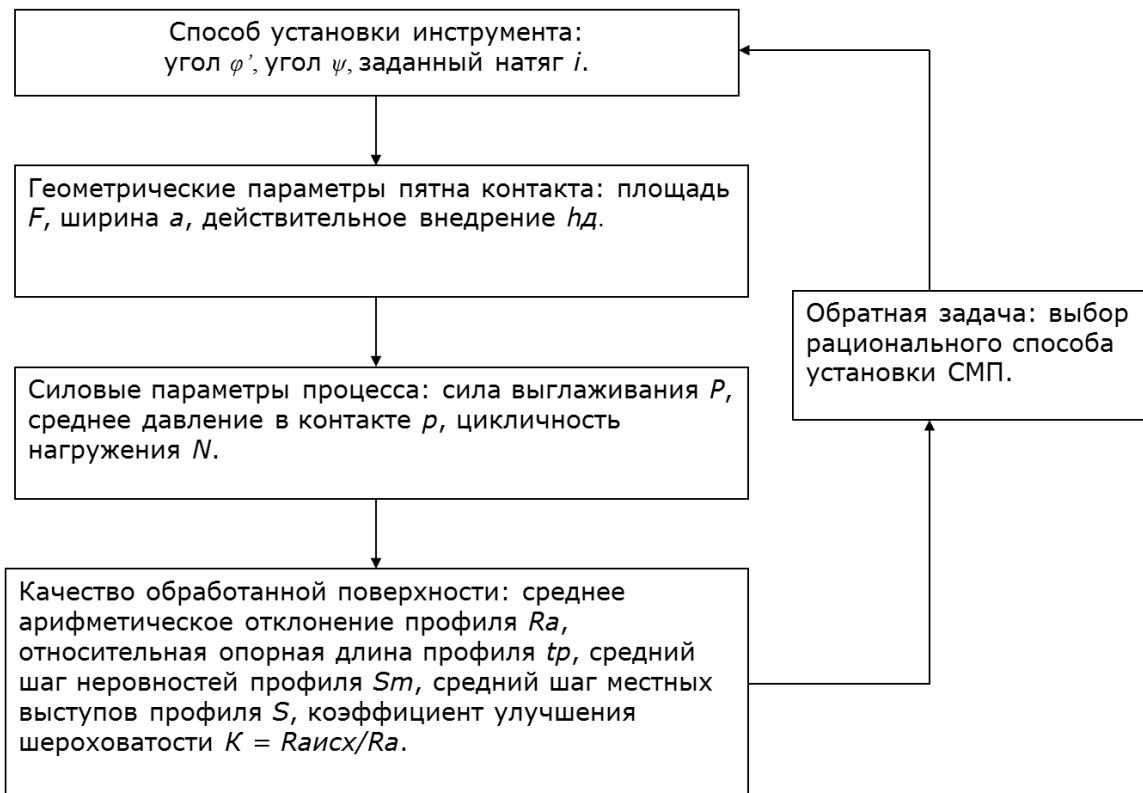


Рисунок 2.2- Структурная схема исследования взаимного влияния параметров процесса обработки выглаживанием с использованием в качестве инструмента СМП [62].

2.2 Определение площади и конфигурации области контакта СМП и обрабатываемой заготовки.

Особенностью контактной деформации в процессе обработки выглаживанием является наличие в контактной области значительной доли упругой деформации. Пластическая и упругая составляющие деформации соизмеримы по величине, а в некоторых случаях упругая деформация является преобладающей [68]. Поэтому, для выявления зависимостей

площади и ширины контактной области от схемы установки инструмента в данной работе была использована формула В.М. Торбило [68, с. 69], которая определяет площадь контактной области как сумму площадей пластического и упругого контактов:

$$F = F_n + F_y = 0,75 \left[\frac{P}{HV} + 2,32 \left(\frac{1-\mu}{E} R^* \times P \right)^{2/3} \right], \quad (2.1)$$

где F - полная площадь контакта (мм^2), P - сила выглаживания (Н), R^* - приведенный радиус (мм), HV - твердость материала заготовки (МПа), E и μ - модуль Юнга и коэффициент Пуассона обрабатываемого материала [62].

Приведенный радиус кривизны R^* позволяет учитывать влияние радиуса вершины СМП и радиуса обрабатываемой заготовки на величину площади их контакта. Метод приведенного радиуса применяется при решении контактных задач для тел двоякой кривизны и основан на допущении о возможности представить контакт двух тел двоякой кривизны как обобщенный контакт шара приведенного радиуса и плоскости [40].

Если контакт СМП и обрабатываемой цилиндрической заготовки производится при установке инструмента по схеме $X_0Y_0Z_0$ (т.е. без поворота пластины), то приведенный радиус кривизны R^* определяется как для случая пластического контакта двух цилиндров, оси которых пересекаются под углом 90° [40, с. 51]:

$$R^* = (r \times R)^{1/2}, \quad (2.2)$$

где: r – радиус вершины СМП (мм); R – радиус обрабатываемой заготовки (мм).

При установке СМП с поворотом вокруг горизонтальной оси OY на угол ψ контакт инструмента и обрабатываемой поверхности будет проходить не по дугам окружностей радиусами r и R , а по дугам эллипсов с радиусами кривизны r_1 и R_1 , соответственно (рисунок 2.3).

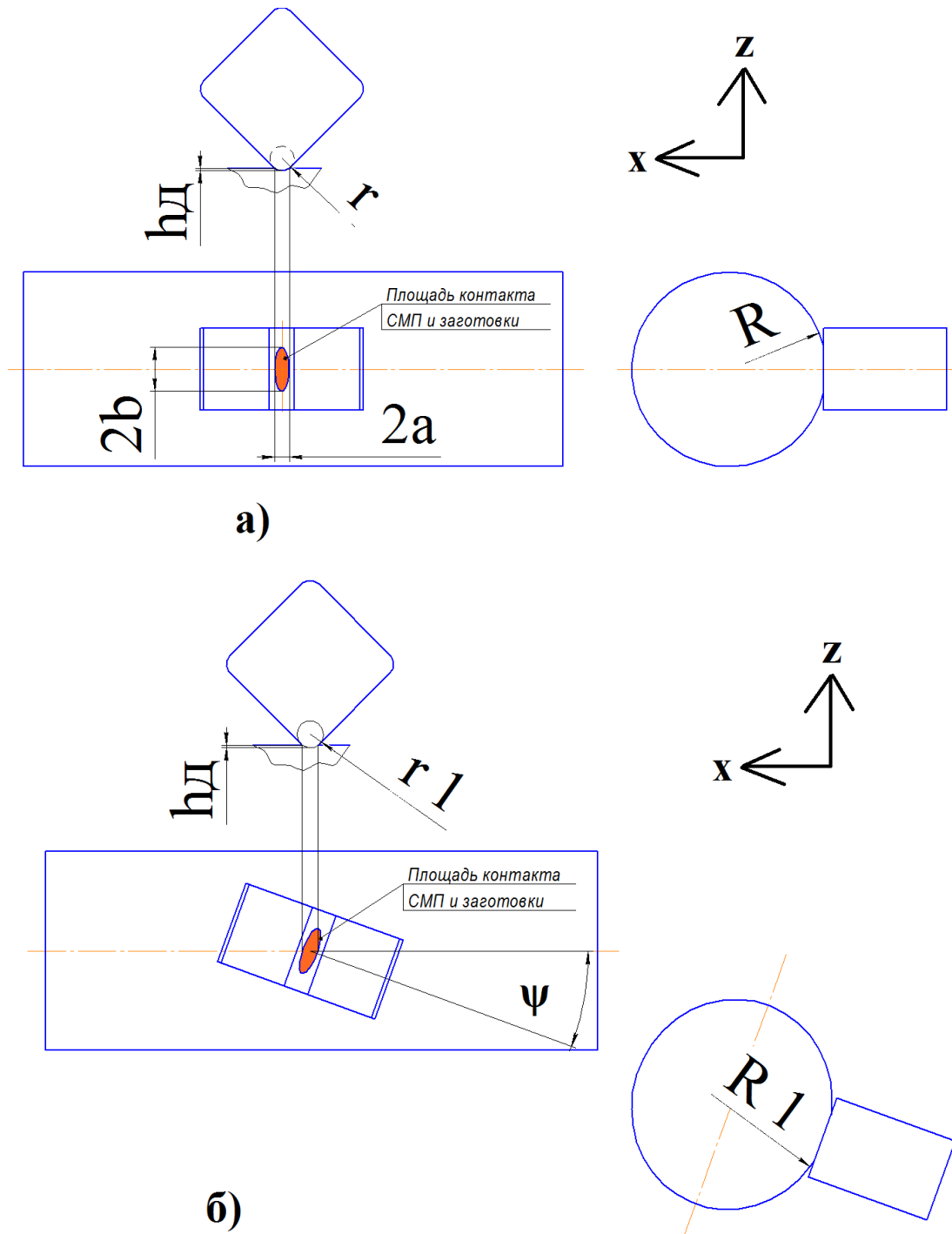


Рисунок 2.3-Схема контакта СМП с заготовкой при установке инструмента по схеме $X_0Y_0Z_0$ – а); и по схеме $X_0Y_1Z_0$ или $X_0Y_2Z_0$ – б).

С помощью элементарных тригонометрических преобразований выразим радиусы кривизны эллипсов r_1 и R_1 [40]:

$$r_1 = \frac{r \times \sin(90^\circ)}{\sin(90^\circ - \psi)}; R_1 = \frac{R}{\cos(\psi)^2}, \quad (2.3)$$

Таким образом, в случае контакта обрабатываемой заготовки с СМП, установленной по схемам $X_0Y_1Z_0$ и $X_0Y_2Z_0$ (с поворотом инструмента на угол ψ), приведенный радиус кривизны R^* рассчитывается следующим образом [40]:

$$R^* = (r1 \times R1)^{1/2}, \quad (2.4)$$

Площадь пластического контакта F_n рассчитывается по формуле Ф.П. Боудена и Д. Тейбора [7] как площадь восстановленного отпечатка после вдавливания СМП с силой P в материал с твердостью HV [68, с. 65]:

$$F_n = \frac{P}{HV}, \quad (2.5)$$

Для вычисления площади пластического контакта было применено трехмерное твердотельное моделирование в программе Компас 3D. Исходными данными послужили: геометрия СМП (радиус вершины r (мм), длина режущей кромки iC (мм), толщина пластины s (мм), угол при вершине в плане ε (град.), задний угол $\alpha=0^\circ$), диаметр заготовки D (мм), углы установки инструмента φ' и ψ (град.), глубина внедрения СМП в металл заготовки h (мкм) [62, с. 20-21].

2.2.1 Определение площади пластического контакта с помощью моделирования контактного взаимодействия обрабатываемой заготовки и СМП в программной среде Компас 3D.

Моделирование контактного взаимодействия инструмента с поверхностью заготовки в процессе выглаживания СМП позволяет получать данные о площади, конфигурации и размерах пятна пластического контакта, которые можно использовать как при проведении теоретических и экспериментальных исследований, так и при проектировании технологических процессов обработки ППД. Данный способ моделирования контактного взаимодействия инструмента и заготовки может применяться для исследования различных методов ППД, а не только метода выглаживания с применением СМП [35].

Моделирование контактного взаимодействия цилиндрической заготовки и инструмента в программе для твердотельного моделирования Компас 3D позволяет максимально точно определять площадь и геометрическую форму области пластического контакта в статике [35]. Возможность применения данного моделирования обоснована анализом экспериментальных данных в работе [68] которые показывают, что соотношение между упругой и пластической деформацией поверхностного слоя во всем диапазоне обычно применяющихся скоростей выглаживания практически такое же, как и при вдавливании индентора в неподвижный образец.

2.2.2 Методика моделирования контакта инструмента с заготовкой в программной среде трехмерного твердотельного моделирования.

После запуска программы Компас 3D необходимо выбрать создание модели в среде 3-х мерного твердотельного моделирования. Вначале потребуется создать эскиз цилиндрической заготовки нужного диаметра. Далее, посредством операции «Выдавливание» создается модель заготовки (рисунок 2.4 [35, с. 146]).

Далее, необходимо создать плоскость, в которой будет определен эскиз СМП. Для этого нужно выбрать любую плоскость, кроме той, где создан эскиз заготовки, и выполнить в выбранной плоскости эскиз в виде прямой – это будет ось вращения модели инструмента [35].

Затем, нужно выбрать операцию создать плоскость «Под углом к другой плоскости» и создать плоскость для эскиза СМП и задать произвольный угол – угол, под которым будет находится новая плоскость по отношению к другой – базовой. Величину данного угла можно легко изменять в режиме редактирования [35].

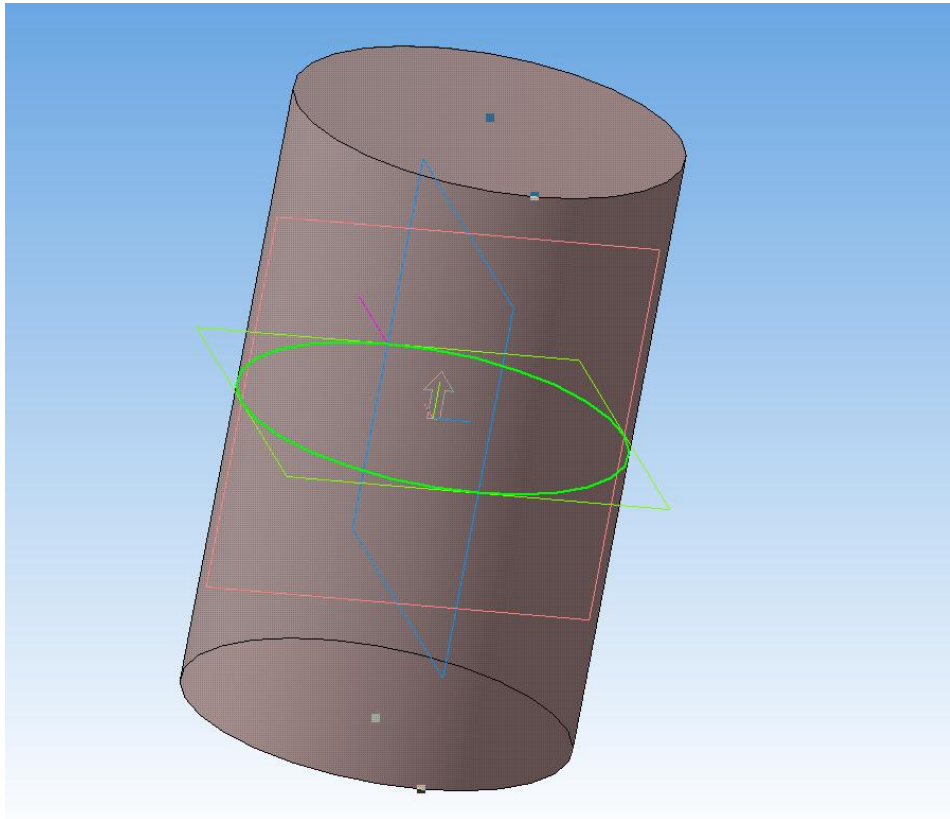


Рисунок 2.4 - Создание модели заготовки [35].

Во вновь созданной плоскости, необходимо создать эскиз СМП, в данном случае – токарной пластины геометрии *SNMG* с длиной режущей кромки 12,7 мм, толщиной 7,94 мм, радиусом вершины 1,2 мм. После чего выбрать операцию «Вырезать выдавливанием», в строке состояния в низу окна программы ввести: направления выдавливания – в две стороны; расстояние 1 = расстояние 2 = 3,97 мм (т.е. толщина токарной пластины деленная на два) (рисунок 2.5 [35, с. 146]).

Построив модели заготовки и инструмента (СМП), возможно смоделировать их контактное взаимодействие в статике, для этого нужно выбрать эскиз СМП в панели дерева построения слева в окне программы и активировать режим редактирования эскиза. В режиме редактирования выделить весь эскиз инструмента и, посредством операции «Переместить» внедрить эскиз инструмента в модель заготовки на нужную глубину (мкм).

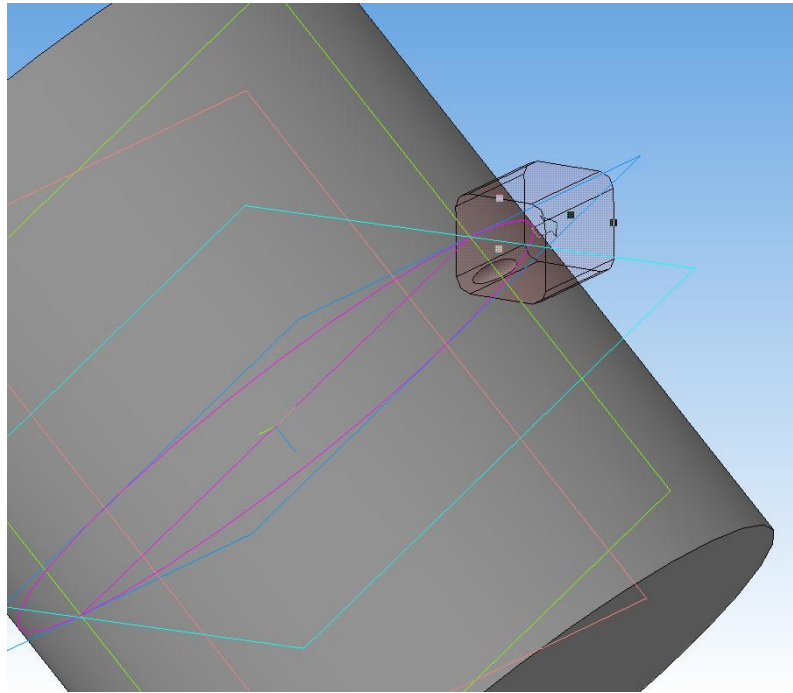


Рисунок 2.5 - Создание модели инструмента [35].

Далее, нужно выйти из режима редактирования эскиза, после чего с поверхности модели детали будет удален тот объем, который занимает модель инструмента при заданной величине технологического натяга. В итоге, получаем область пластического контакта заготовки с СМП. С помощью команды «Измерить» находится расчетная площадь области пластического контакта и ее размеры (рисунок 2.6 [35, с. 147]).

Посредством созданных моделей можно моделировать контактные взаимодействия при изменении положения СМП, а именно:

- 1) при повороте СМП на угол φ' вокруг вертикальной оси OZ путем поворота на этот угол эскиза СМП в режиме редактирования (рисунок 2.7 [35, с. 148]);
- 2) при повороте пластины на угол ψ вокруг горизонтальной оси OY , перпендикулярной направлению движения подачи путем изменения угла, под которым находится плоскость эскиза СМП [35].

Данная методика позволяет моделировать контактное взаимодействие заготовки и инструмента любых форм и размеров, и может быть осуществлена не только в программной среде твердотельного моделирования

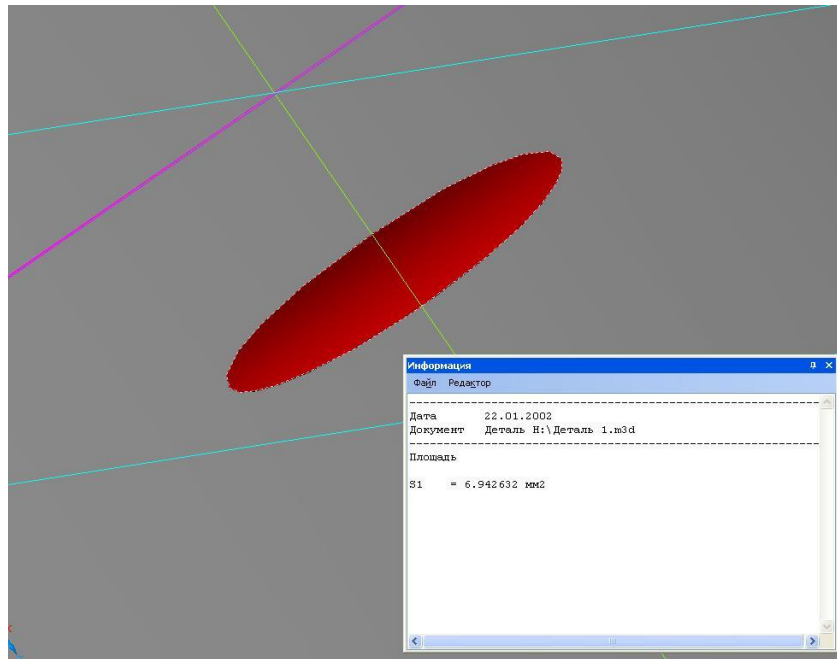


Рисунок 2.6 - Измерение площади области контакта [35].

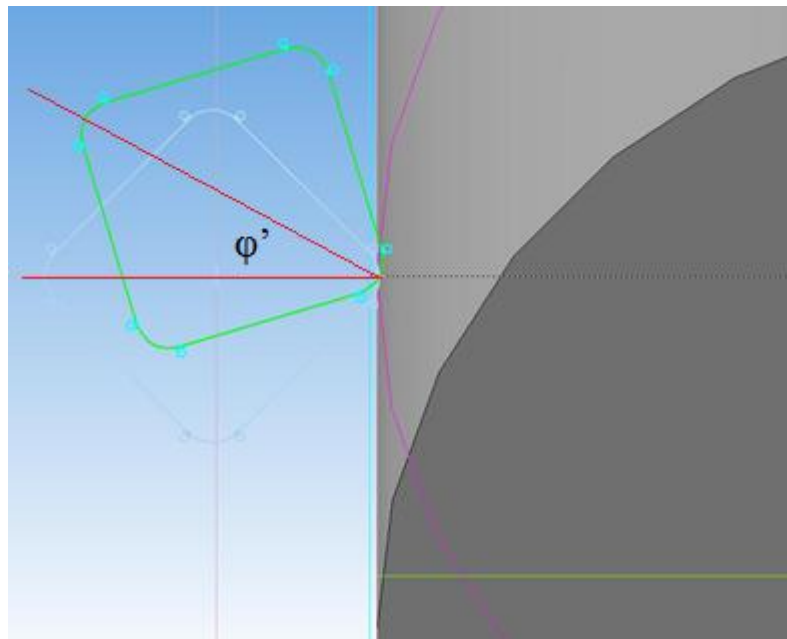


Рисунок 2.7 - Изменение угла установки инструмента ϕ' [35].

Компас 3D, но и в других инженерных САПР, таких как *Solid Works* и *Solid Edge*. Кроме того, определенные данным методом показатели величины площади и конфигурации пятна пластического контакта хорошо соотносятся с данными, полученными экспериментальными методами пластического моделирования и непосредственного внедрения твердого индентора в металлические образцы с последующим измерением полученной контактной площадки под микроскопом [25, 35, 68].

2.2.3 Определение зависимости глубины внедрения СМП в материал обрабатываемой заготовки от способа установки инструмента.

В перечне исходных данных для моделирования контакта инструмента с заготовкой в Компас 3D есть неизвестная - глубина внедрения СМП h (см. пункт 2.3). Для определения глубины внедрения СМП в металл заготовки h и закономерности ее изменения при изменении способа установки инструмента был проведен ряд экспериментов, в которых процесс выглаживания прерывался при установившемся режиме обработки. В результате появилась возможность изучить профилограмму переходного участка между выглаженной и необработанной поверхностями. Запись профилограмм переходной зоны осуществлялась на профилографе-профилометре *Mahr MarSurf M300*. При измерении записанных профилограмм устанавливалась глубина внедрения h . В качестве образцов были использованы валы из стали 45 диаметром от 70 до 85 мм [62].

Были исследованы схемы из морфологической таблицы возможных способов установки СМП (рисунок 1.5, пункт 1.2), обеспечивающие обработку выглаживанием: схема № 1 где СМП находится в исходном положении, $\varphi' = \psi = 0^\circ$; схемы № 2, 3, 6, 7 где СМП поворачивается вокруг одной из осей; схемы № 16, 17, 18, 19 где СМП поворачиваются вокруг двух осей OZ и OY одновременно на углы $\pm\varphi'$ и $\pm\psi$ соответственно.

Было проанализировано более 50 профилограмм переходной зоны между обработанной и необработанной поверхностями. Это позволило установить, что глубина внедрения h и ширина контактной области a (а как следствие и площадь контакта) сильно зависят от схемы установки инструмента. Профилограммы с нанесенными размерами глубины внедрения СМП приведены в Приложении А.

Поворот СМП на угол φ' вокруг вертикальной оси OZ в интервалах $[-10^\circ; 0^\circ]$ и $[0^\circ; 10^\circ]$ значительно (в 2-3 раза) увеличивает глубину внедрения СМП, предположительно за счет перераспределения сил, возникающих в процессе выглаживания (рисунок 2.8). При повороте на угол $-\varphi'$ (в

направлении движения продольной подачи инструмента) глубина внедрения увеличивается на 10 - 15 % больше, чем при повороте в положительном направлении. Рост глубины внедрения приводит к пропорциональному увеличению площади F и ширины контакта a . При этом, форма пятна контакта остается практически неизменной при повороте СМП на угол φ' - это отпечаток эллиптической формы с большей полуосью сориентированной вдоль вектора скорости главного движения выглаживания [62, с. 21].

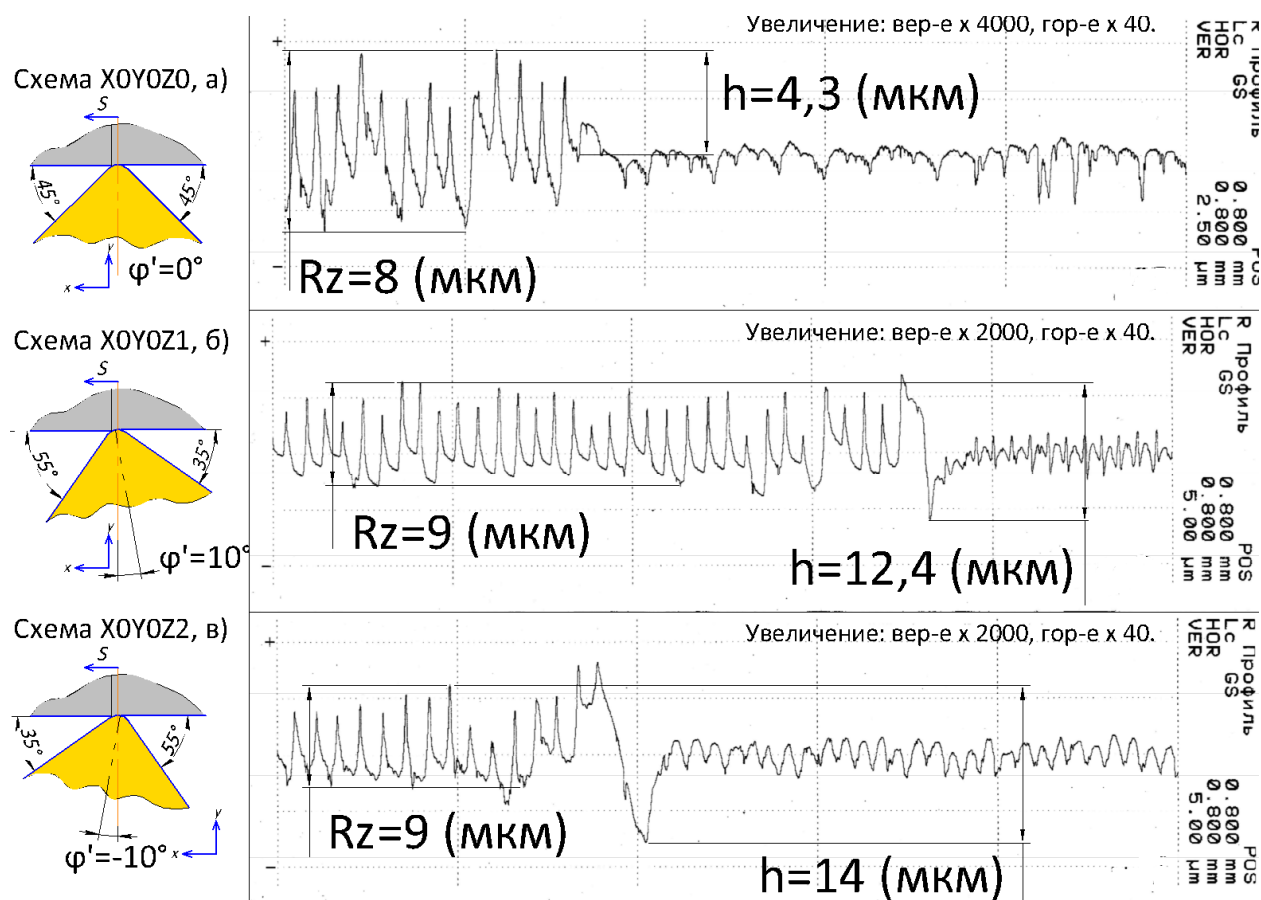


Рисунок 2.8 - Профилотграммы очагов деформации при повороте СМП вокруг вертикальной оси OZ [62].

Угол ψ поворота СМП вокруг горизонтальной оси OY не приводит к значительному изменению глубины внедрения h , так как установка инструмента под углом ψ фактически увеличивает радиус СМП в плоскости, параллельной движению подачи [58]. Увеличение радиуса инструмента влечет за собой увеличение площади контакта и, следовательно, уменьшение глубины внедрения, так как требуется приложить большее усилие для обеспечения достаточного удельного давления для внедрения инструмента в

материал. В тоже время, за счет поворота эллиптического пятна контакта в направлении оси заготовки увеличивается ширина контакта a без заметного увеличения площади пятна контакта F (рисунок 2.9 [62, с. 22]).

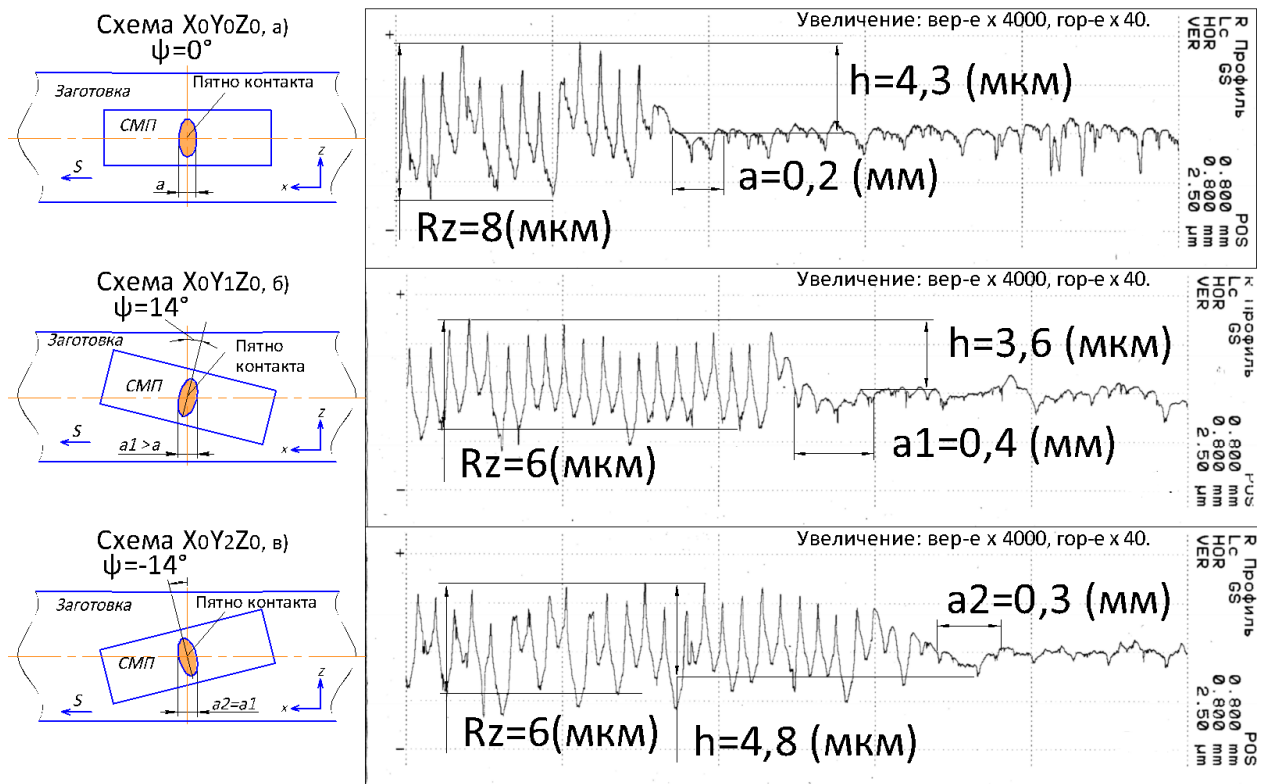


Рисунок 2.9 - Профилограммы очагов деформации при повороте СМП вокруг горизонтальной оси OY [62].

Зависимости относительного внедрения инструмента в материал заготовки от углов установки СМП были получены посредством регрессионного анализа графических зависимостей, построенным по экспериментальным данным (рисунок 2.10). Относительное внедрение определялось как отношение величины глубины внедрения h к технологическому натягу i . Из приведенных графиков видно, что наибольшее относительное внедрение СМП достигается при установке инструмента по схемам № 2 и 17. Наименьшее относительное внедрение наблюдается при установке СМП по схемам № 6 и 7. Диапазон величин углов поворота пластин был установлен экспериментально в пределах от -15° до 15° , при установке СМП с большими углами поворота глубина внедрения h , a ,

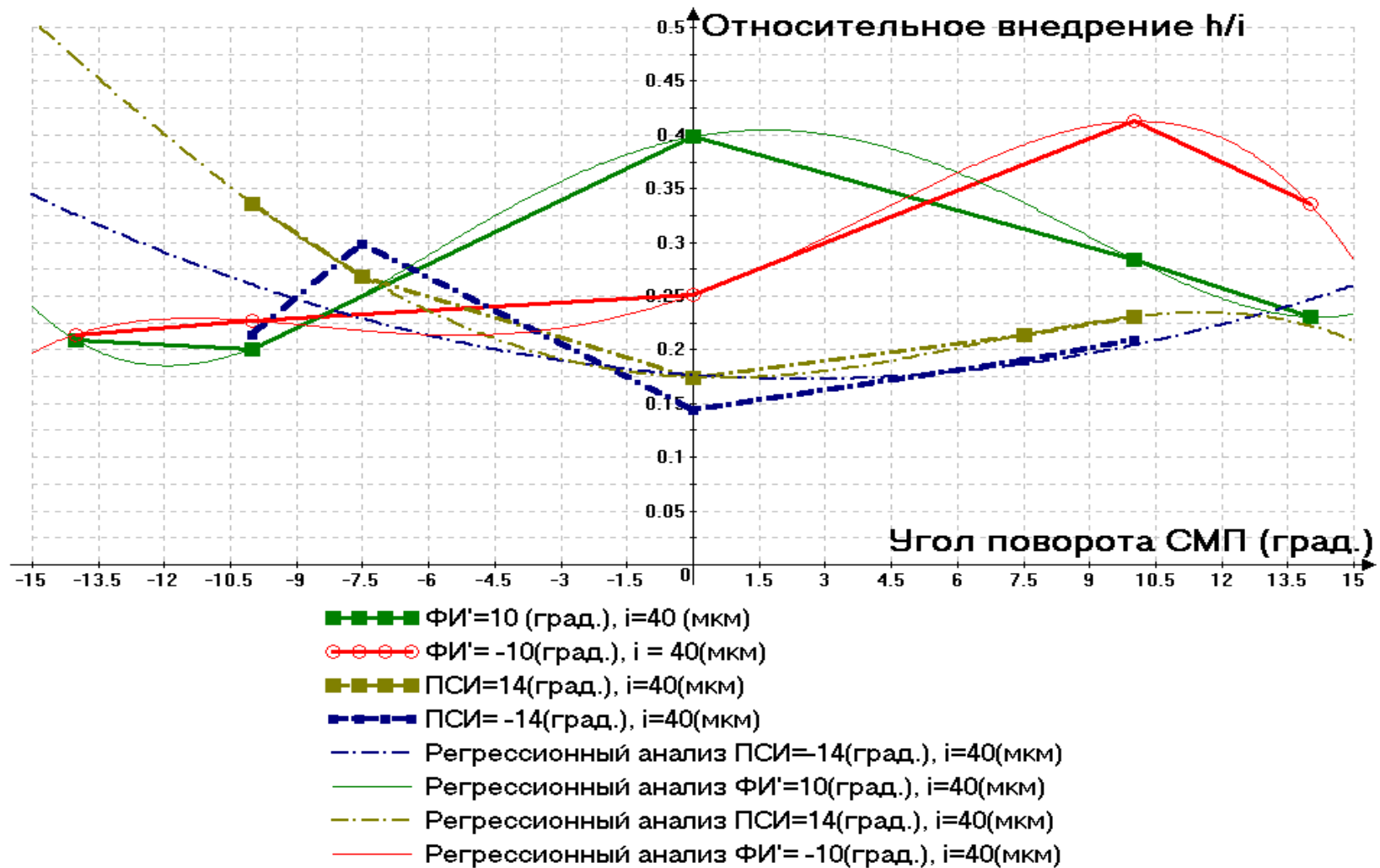


Рисунок 2.10 - Зависимость величины относительного внедрения от способа установки СМП.

следовательно, и относительное внедрение h/i резко уменьшается. Причина в том, что с ростом ширины контакта увеличивается и площадь, а с увеличением угла поворота φ' возникают условия, облегчающие проникновение СМП в материал заготовки, вследствие этого пропорционально увеличивается и требуемое усилие выглаживания. Это приводит, в свою очередь, к увеличению упругих отжатий в технологической системе.

Для определения глубины внедрения h , которое необходимо для определения пластической площади контакта, были построены графические зависимости по экспериментальным данным и проведен регрессионный анализ. В результате были получены кривые аппроксимации (рисунок 2.11), при помощи которых можно определять глубину внедрения, которая соответствует той или иной схеме

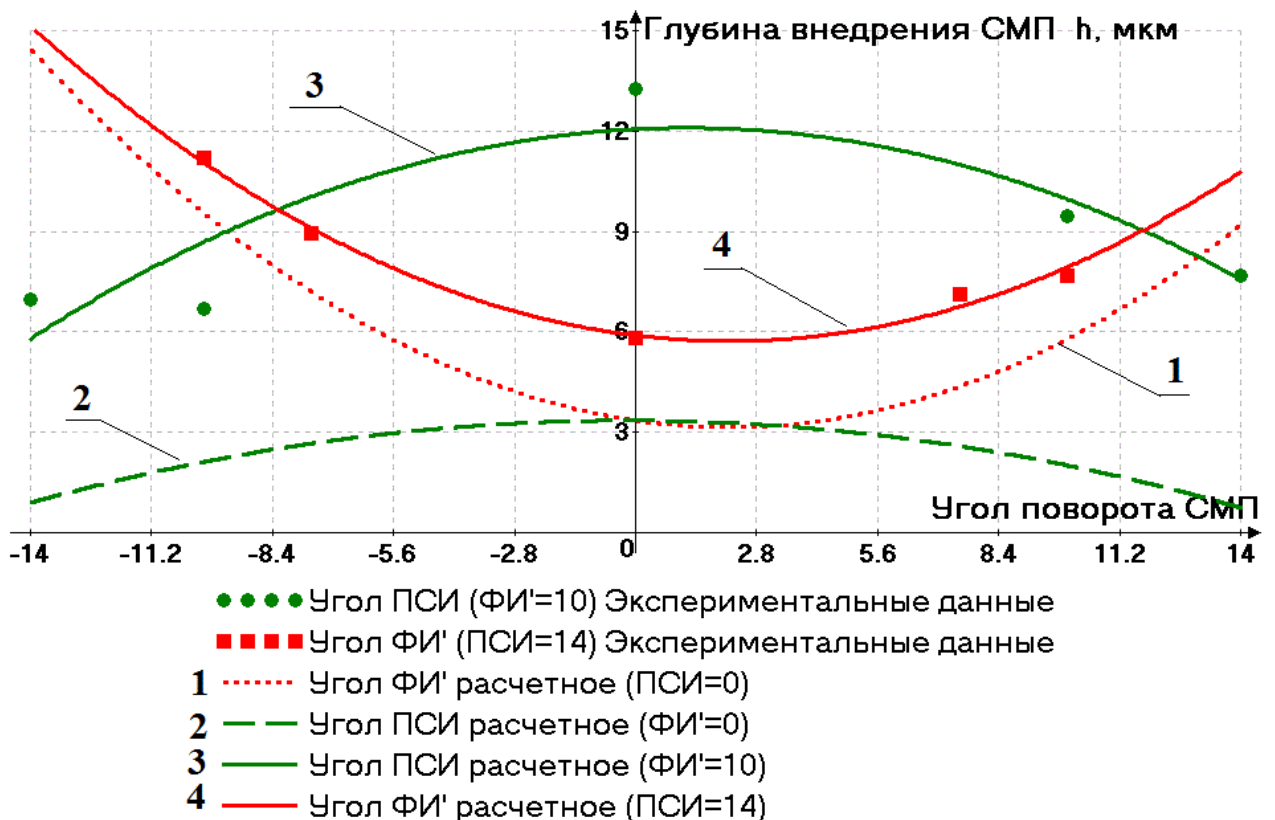


Рисунок 2.11 - Зависимость глубины внедрения СМП h от углов установки инструмента. установки СМП (определяемой углами φ' и ψ). Аналитическое выражение для определения глубины внедрения инструмента по заданным величинам (и направлениям) углов поворота СМП φ' и ψ , находится из графического решения системы уравнений с двумя неизвестными. В качестве уравнений используются

кривые аппроксимации для зависимости h от каждого из двух углов в отдельности:

$$h = 0.043277\varphi'^2 - 0.18758\varphi' - 0.013\psi^2 - 0.0078\psi + 3.35, \quad (2.6)$$

Выражение (2.6) позволяет вычислять глубину внедрения СМП h с достаточной степенью точности, в пределах 15 % (см. пункт 2.3.4), без проведения трудоемких опытов по получению очага деформации и исследованию его профилограммы, соответствующего рассматриваемой схеме установки инструмента.

2.2.4 Расчет площади и ширины пятна контакта.

После вычисления глубины внедрения h СМП в металл обрабатываемой заготовки, соответствующих рассматриваемым схемам установки инструмента, были вычислены величины площадей пластического контакта F_{II} , посредством моделирования в Компас 3D. Пользуясь формулой Ф.П. Боудена и Д. Тейбора [7], основанной на выражении силы P (Н) через пластическую площадь контакта вдавливаемого индентора и материала образца (площадь восстановленного отпечатка) F_{II} (мм²), имеющего твердость HV (МПа), была рассчитана сила выглаживания [62, с. 23]:

$$P = F_{II} \times HV, \quad (2.7)$$

Определив величину силы выглаживания, соответствующую рассматриваемым схемам установки инструмента - можно рассчитать полную площадь контакта СМП с заготовкой F . Для вычисления полной площади контакта (т.е. площадь пластического контакта + площадь упругого контакта), среднего давления на площадке контакта и цикличности нагружения была использована формула В.М. Торбило (2.1) [68]. После выполнения расчетов, построения графических зависимостей и проведения регрессионного анализа - были впервые получены аналитические и графические зависимости полной площади контакта СМП и поверхности обрабатываемой заготовки от способа установки инструмента (рисунок 2.12) [62].

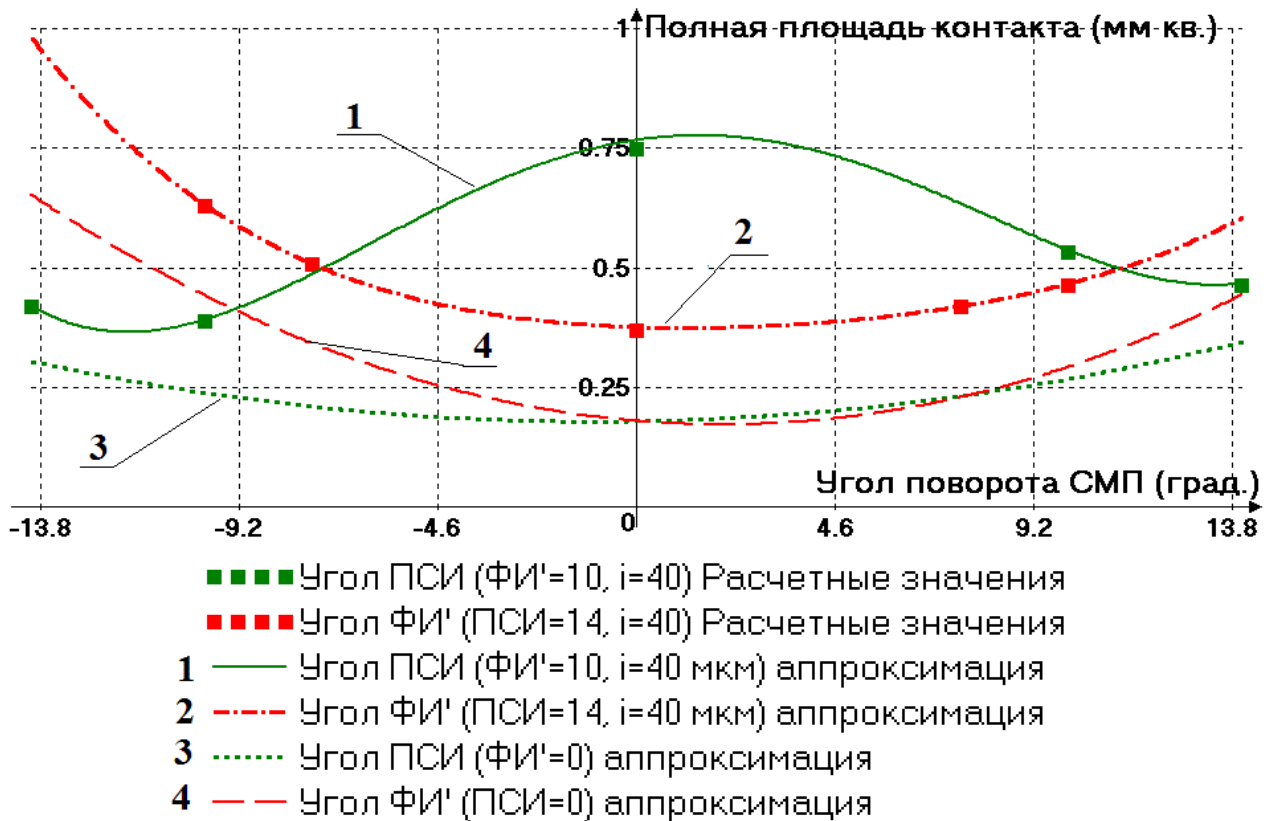


Рисунок 2.12 - Зависимость полной площади контакта F от способа установки СМП.

Аналитическое выражение для определения полной площади контакта F , соответствующей рассматриваемой схеме установки СМП, получено с помощью регрессионного анализа экспериментальных данных:

$$F = 0.00187\varphi'^2 - 0.00746\varphi' + 0.00074\psi^2 + 0.00148\psi + 0.179, \quad (2.8)$$

Как видно из графика, представленного на рисунке 2.12, полная площадь контакта сильно варьируется при изменении величины и направления углов поворота СМП. Характер зависимостей имеет много общего с зависимостями глубины внедрения h от способа установки СМП (рисунок 2.11). Это объясняется тем, что площадь контакта F и ширина пятна контакта a в значительной мере определяется глубиной внедрения h СМП в металл заготовки.

Угол поворота пластины φ' приводит к увеличению полной площади контакта независимо от направления поворота. При повороте на угол $-\varphi'$ площадь контакта увеличивается несколько интенсивнее, так как действительное внедрение СМП несколько больше при повороте пластины по направлению движения подачи

инструмента, при неизменных прочих технологических параметрах. При установке СМП с углами поворота φ' выходящими за пределы интервала $[-14^\circ; 14^\circ]$ необходимо уменьшать технологический натяг (при "жестком" выглаживании), так как увеличение площади контакта свыше $0,8 - 0,9 \text{ мм}^2$ приводит к значительному возрастанию силы, что может вызвать перенаклеп и разрушение ПС или нарушить стабильность процесса обработки и привести к сильным вибрациям. В любом случае, это приведет к снижению качества обработанной поверхности. При использовании схемы с упругим закреплением инструмента назначение углов φ' за пределами интервала значений $[-14^\circ; 14^\circ]$ потребует назначения большой силы выглаживания, что также может ухудшить качество процесса обработки. Поэтому, применение схем установки СМП с углами поворота φ' большими по величине, чем 14° целесообразно при упрочняющей обработке на станках с большой жесткостью и высококачественной системой подвода СОТС.

Угол поворота пластины ψ приводит к уменьшению величины полной площади контакта независимо от направления поворота, при неизменной величине технологического натяга или силы выглаживания (при "жесткой" или "упругой" схеме соответственно). Причем, уменьшение площади контакта F не сопровождается выраженным уменьшением ширины пятна контакта a , что способствует сохранению цикличности нагружения, соответствующей контакту с большей площадью. Данная особенность схемы установки СМП с поворотом на угол ψ может успешно применяться при чистовой отделочной обработке с минимальными усилиями выглаживания.

При увеличении углов поворота СМП φ' и ψ в обоих направлениях, ширина пятна контакта a увеличивается (рисунок 2.13). В первом случае, это связано с увеличением ширины контакта за счет увеличения глубины внедрения h , а во втором - за счет роста ширины контакта при повороте эллиптической области контакта вдоль оси вращения заготовки.

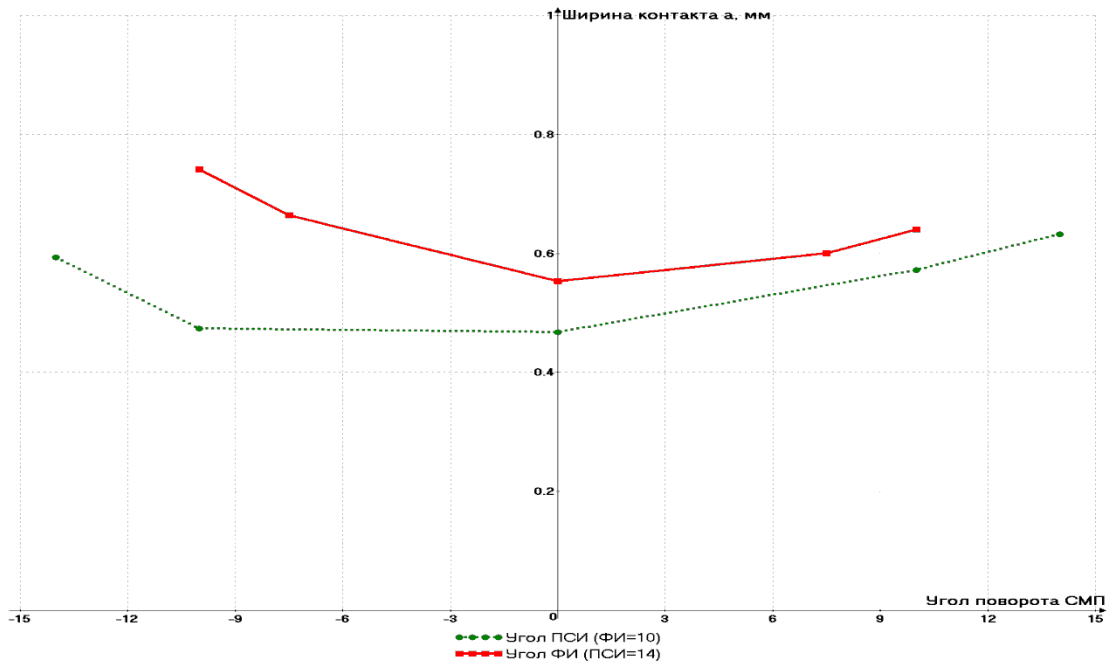


Рисунок 2.13 - Зависимость ширины пятна контакта a от способа установки СМП.

Для проверки адекватности методики расчета полной площади F и ширины a пятна контакта были проведены соответствующие эксперименты: выполнена обработка выглаживанием СМП с покрытием CVD , на котором оставался след после одного прохода, и замер полученной области на контактно-оптической координатно-измерительной машине $DKM 1-300DP$. Результаты измерений показали расхождение с расчетными данными в пределах 10% [62, с. 23].

2.3 Расчет силы выглаживания, среднего давления в контакте и цикличности нагружения.

Сила выглаживания P вычислялась по формуле (2.7), а среднее давление в контакте p рассчитывалось следующим образом [62, с. 23]:

$$p = \frac{P}{F}, \quad (2.9)$$

где F - полная площадь контакта (мм^2), P - сила выглаживания (Н).

При изменении способа установки СМП сила выглаживания варьируется в широком диапазоне (рисунок 2.14 [62, с. 23]). Наибольших значений (1200 – 1400 (Н)) сила достигает при установке пластины с поворотом вокруг вертикальной

оси на угол $\varphi' = -7^\circ \dots -14^\circ$, вместе с тем, прямо пропорционально увеличивается и площадь контакта - поэтому среднее давление в контакте p увеличивается менее интенсивно с 1500 до 1800 (МПа) (рисунок 2.15 [62, с. 23]).

Зависимость силы выглаживания от величины и направления угла поворота ψ (вокруг горизонтальной оси OY) имеет иной характер - при увеличении угла поворота ψ сила возрастает менее интенсивно (в сравнении с поворотом на угол φ'), примерно в 2 раза на интервалах изменения угла ψ $[-14^\circ; 0^\circ]$ и $[0^\circ; 14^\circ]$. При повороте СМП на углы φ' и ψ совместно, сила выглаживания уменьшается весьма значительно (примерно с 1100 до 500 (Н) при $\varphi'=10^\circ$), но из-за пропорционального уменьшения площади контакта давление изменяется незначительно (1600-1700 МПа) [62].

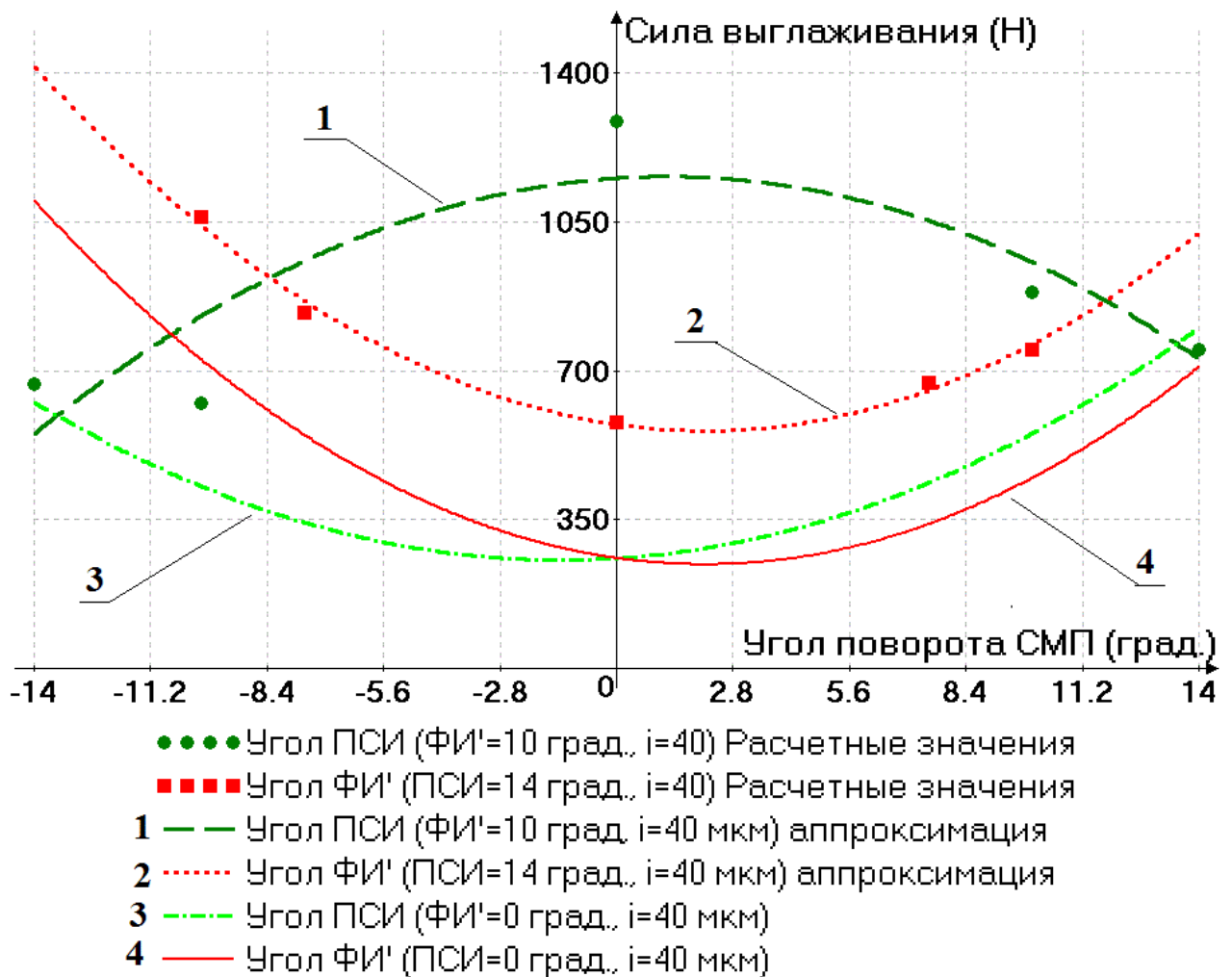


Рисунок 2.14 - Зависимость силы выглаживания P от углов установки СМП [62].

Для оценки степени адекватности разработанной методики расчета силы выглаживания был проведен эксперимент по измерению силы выглаживания посредством универсального динамометра УДМ-600. Образец из стали 09Г2С с исходной шероховатостью $Ra=2,5$ (мкм) обрабатывался выглаживанием с установкой СМП по схеме X0Y0Z0 (углы установки $\varphi'=\psi=0^\circ$), заданным технологическим натягом $i=10$ (мкм), со скоростью $V=100$ (м/мин), подачей $s=0,1$ (мм/об.). Расхождения экспериментальных данных по величине силы выглаживания и расчетных значений находятся в пределах 20% (Приложение Б).

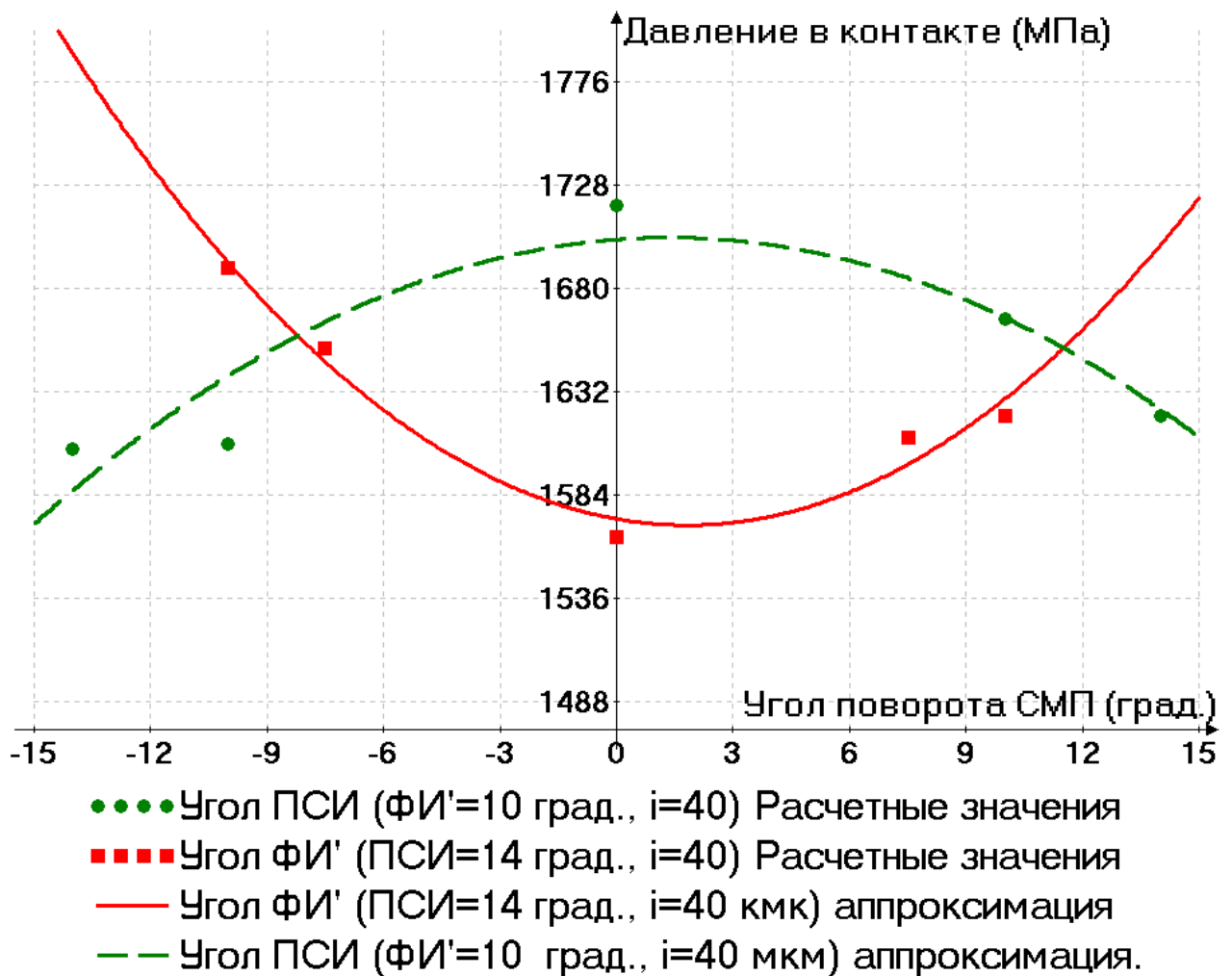


Рисунок 2.15 - Зависимость среднего давления в контакте p от углов установки СМП [62].

При использовании в качестве инструмента СМП, силовые параметры процесса выглаживания приближаются, по своим величинам, к силе и давлению, возникающим при обработке силовым выглаживанием [67,68] и обкатыванием

роликами [8]. Сравнительно большие величины силы выглаживания и среднего давления в контакте объясняются тем, что площадь контакта СМП с заготовкой существенно больше (в 2 - 4 раза) площади контакта стандартного сферического выглаживателя с обрабатываемой поверхностью. Это позволяет применять выглаживание с СМП при скоростной обработке поверхностей вращения большого диаметра с увеличенными подачами (до $s = 0,12 \dots 0,15$ мм/об).

Цикличность нагружения N была рассчитана по формуле [68, с. 77]:

$$N = \frac{a}{s}, \quad (2.10)$$

где, a - ширина пятна контакта (мм), s - движение подачи инструмента (мм/об) .

Величина цикличности нагружения (рассчитанная для подачи $s = 0,08$ мм/об) увеличивается в интервале 4 - 10 раз при повороте СМП вокруг вертикальной оси OZ на угол φ' в интервалах $[-10^\circ; 0^\circ]$ и $[0^\circ; 10^\circ]$ и вокруг горизонтальной оси OY на угол ψ в интервалах $[-14^\circ; 0^\circ]$ и $[0^\circ; 14^\circ]$, соответственно (рисунок 2.16 [62, с. 24]). В первом случае это связано с увеличением ширины контакта за счет увеличения глубины внедрения, а во втором - за счет роста ширины пятна контакта при повороте СМП вдоль оси вращения заготовки.

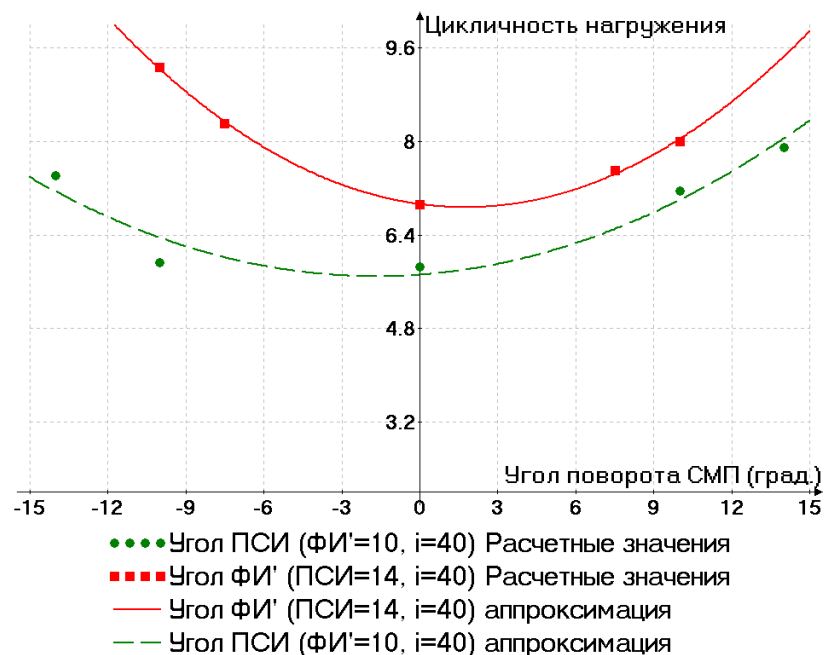


Рисунок 2.16 - Зависимость цикличности нагружения N от углов установки СМП [62].

Увеличение цикличности нагружения N вместе с увеличением углов поворота СМП означает, что существует возможность назначать большую подачу инструмента, оставаясь в интервале цикличности нагружения, рекомендованной авторами работ [67, 81] для отделочно-упрочняющей обработки ($6 \leq N \leq 20$), что приводит к росту производительности процесса выглаживания при сохранении требуемого качества обработанной поверхности [62].

Выводы.

- 1) Углы установки СМП φ' и ψ , в зависимости от своей величины и направления поворота, существенно влияют на глубину внедрения h СМП при выглаживании с жестким закреплением инструмента. При установке СМП с увеличением угла поворота φ' от 0° до $\pm 14^\circ$ глубина внедрения h увеличивается в 2-3 раза.
- 2) Полная площадь контакта F СМП и заготовки, а также ширина пятна контакта a в значительной мере определяются способом установки инструмента. Угол поворота пластины φ' приводит к увеличению полной площади контакта F независимо от направления поворота. Установка СМП с углами поворота φ' выходящими за пределы интервала $[-14^\circ; 14^\circ]$ увеличивает величину площади контакта до $0,8 - 0,9 \text{ мм}^2$ и больше, что приводит к значительному возрастанию силы выглаживания. Что повышает вероятность снижения качества обработанной поверхности. Применение схем установки СМП с углами поворота φ' большими по величине, чем 14° целесообразно при упрочняющей обработке на станках с большой жесткостью и качественной системой подачи СОТС.
- 3) Угол поворота пластины ψ приводит к уменьшению полной площади контакта F независимо от направления поворота, при неизменной величине технологического натяга i или силы выглаживания P (при "жесткой" или "упругой" схеме соответственно). Уменьшение площади контакта F не сопровождается выраженным уменьшением ширины контакта a , что способствует сохранению цикличности нагружения N соответствующей контакту с большей площадью. Данная особенность схемы установки СМП с поворотом на угол ψ

может успешно применяться при чистовой отделочной обработке с минимальными усилиями выглаживания.

4) С увеличением углов поворота СМП φ' и ψ в обоих направлениях, ширина пятна контакта a увеличивается. В первом случае это связано с увеличением ширины контакта за счет роста глубины внедрения h , а во втором - за счет роста ширины контакта при повороте пластины вокруг горизонтальной оси OY и удлинении больших полуосей эллиптической области контакта.

5) Сила выглаживания P и среднее давление в контакте p интенсивно изменяются при смене схемы установки СМП. Наибольших значений сила достигает при установке пластины с поворотом вокруг вертикальной оси на угол $\varphi' = -14^\circ \dots -10^\circ$: 1000 - 1400 (Н). Прямо пропорционально растет и площадь контакта - поэтому среднее давление в контакте p увеличивается менее интенсивно с 1500 до 1800 (МПа).

6) С увеличением угла поворота ψ сила выглаживания возрастает, примерно в 2 раза на интервалах изменения угла ψ $[-14^\circ; 0^\circ]$ и $[0^\circ; 14^\circ]$. При повороте СМП на углы φ' и ψ совместно, сила выглаживания значительно снижается (примерно с 1100 до 500 (Н) при $\varphi' = 10^\circ$), но из-за пропорционального уменьшения площади контакта давление остается практически неизменным (1600-1700 МПа).

7) При использовании в качестве выглаживающего инструмента СМП, силовые параметры процесса выглаживания приближаются, по своим величинам, к силе и давлению, возникающим при обработке силовым алмазным выглаживанием и обкатыванием. Это позволяет применять выглаживание с СМП при скоростной обработке поверхностей вращения большого диаметра с увеличенной величиной подачи (до 0,16 мм/об).

8) Величина цикличности нагружения N увеличивается в интервале 4 - 10 раз при повороте СМП как на угол φ' , так и на угол ψ . Данные силовые параметры процесса позволяют назначать величину подачи инструмента $s = 0,08 \dots 0,16$ мм/об. Это увеличивает производительность выглаживания СМП в 1,5 – 2 раза по сравнению с алмазным выглаживанием при неизменном достижении требуемого качества обработанных поверхностей.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

3.1 Материальное обеспечение экспериментальных исследований.

3.1.1 Объекты исследований.

В качестве объектов исследования использовались заготовки типа вал диаметром от 30 до 85 мм, длиной от 65 до 100 мм (рисунок 3.1), как имеющие, так и не имеющие канавок для выхода и входа инструмента в контакт с обрабатываемой поверхностью.

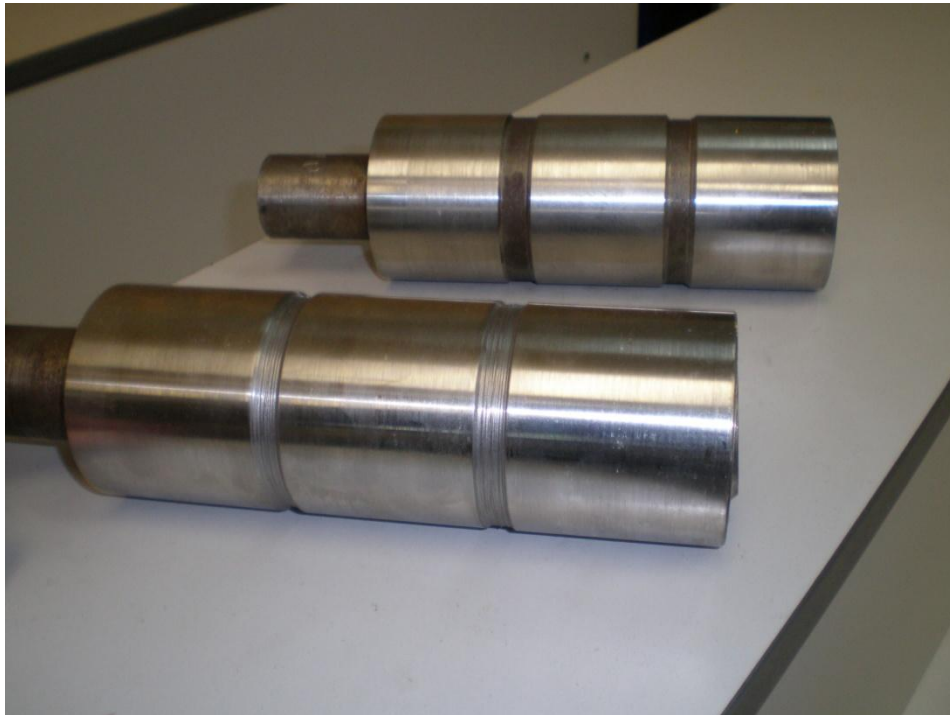


Рисунок 3.1-Экспериментальные образцы.

Так как выглаживание является чистовой операцией технологического процесса, исходная шероховатость обрабатываемой поверхности была обеспечена чистовым точением и варьировалась в пределах $Ra = 2,0 \dots 1,2$ мкм. Для предварительной обработки использовались токарные пластины фирм *Sandvik Coromant* и *Lamina* [88, 89].

Предшествующая выглаживанию токарная обработка наружных цилиндрических поверхностей экспериментальных образцов производилась в центрах с применением поводкового патрона (радиальное биение не превышало $2,5 \dots 3$ мкм), по аналогии с работой [25, с. 102].

При исследованиях использовались образцы, выполненные из конструкционной стали 45 и легированной подшипниковой стали нового поколения 75ХГСФ.

3.1.2 Инструмент и инструментальные материалы.

Для экспериментов в данной работе применялись оснастка и инструмент, обеспечивающие выглаживание с жесткой схемой установки инструмента [25]. В качестве инструмента были использованы сменные многогранные пластины для токарной обработки стандартных типоразмеров фирмы *Sandvik Coromant* геометрии *SNGN 120712* ($\epsilon = 90^\circ$), с радиусом вершины $r = 1,2$ мм (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 - Токарные пластины, использованные при обработке выглаживанием.

Пластины такой формы сочетают в себе элементы, позволяющие осуществлять различные способы воздействия на обрабатываемую деталь: резание, пластическое деформирование и их совмещение. СМП данной геометрии и типоразмера были отобраны в исполнении из четырех материалов: 650, 670, 1690, 6190 (по классификации фирмы-производителя) [89].

Материал токарной пластины 650 (аналог ВОК-63) – смешанная керамика на основе оксида алюминия. Высокая теплопроводность и износостойкость.

Предпочтительно рекомендуется для продолжительной высокоскоростной чистовой обработки [89].

Материал 670 (отечественные марки отсутствуют) – керамика на основе карбида кремния, усиленная волокнами оксида алюминия, обладает чрезвычайно высокой изгибной прочностью. Рекомендуется для обработки закаленных деталей в неблагоприятных условиях [89].

Материал 1690 (аналог Силинит-Р с износостойким покрытием) – керамика на основе нитрида кремния с покрытием *CVD*. Благодаря своим режущим свойствам керамика 1690 рекомендуется для легких черновых и получистовых и финишных операций при обработке чугуна [89].

Материал токарной пластины 6090 (аналог Силинит-Р) – керамика на основе чистого нитрида кремния, обеспечивает хорошую износостойкость при высоких температурах. Рекомендуется для высокоскоростной черновой и чистовой обработки чугуна в хороших условиях, также допустимы незначительные прерывания процесса резания [89].

3.1.3 Специальная технологическая оснастка.

Для реализации процесса выглаживания СМП, необходимо токарный резец, оснащенный СМП, повернуть относительно оси *OX* (рисунок 3.3) в направлении вращения детали n_d на угол, равный заднему углу резца α и приподнять вершину резца относительно оси вращения заготовки. В достигнутом положении инструмента и заготовки, СМП контактирует с заготовкой цилиндрической поверхностью, образованной при сопряжении ее задних поверхностей и имеющей радиус равный радиусу вершин [36, с. 24].

В полученном взаимном положении инструмента и заготовки, возможен поворот СМП относительно трех взаимно перпендикулярных осей, что будет оказывать существенное влияние на протекание процесса пластического деформирования [36, с. 24].

Для проведения экспериментальных исследований было спроектировано и изготовлено оригинальное технологическое приспособление (рисунок 3.3) [3].

Данное приспособление состоит из корпуса 1 с цилиндрическим отверстием, в котором базируется оправка 2, в котором зажимается державка с СМП 4.

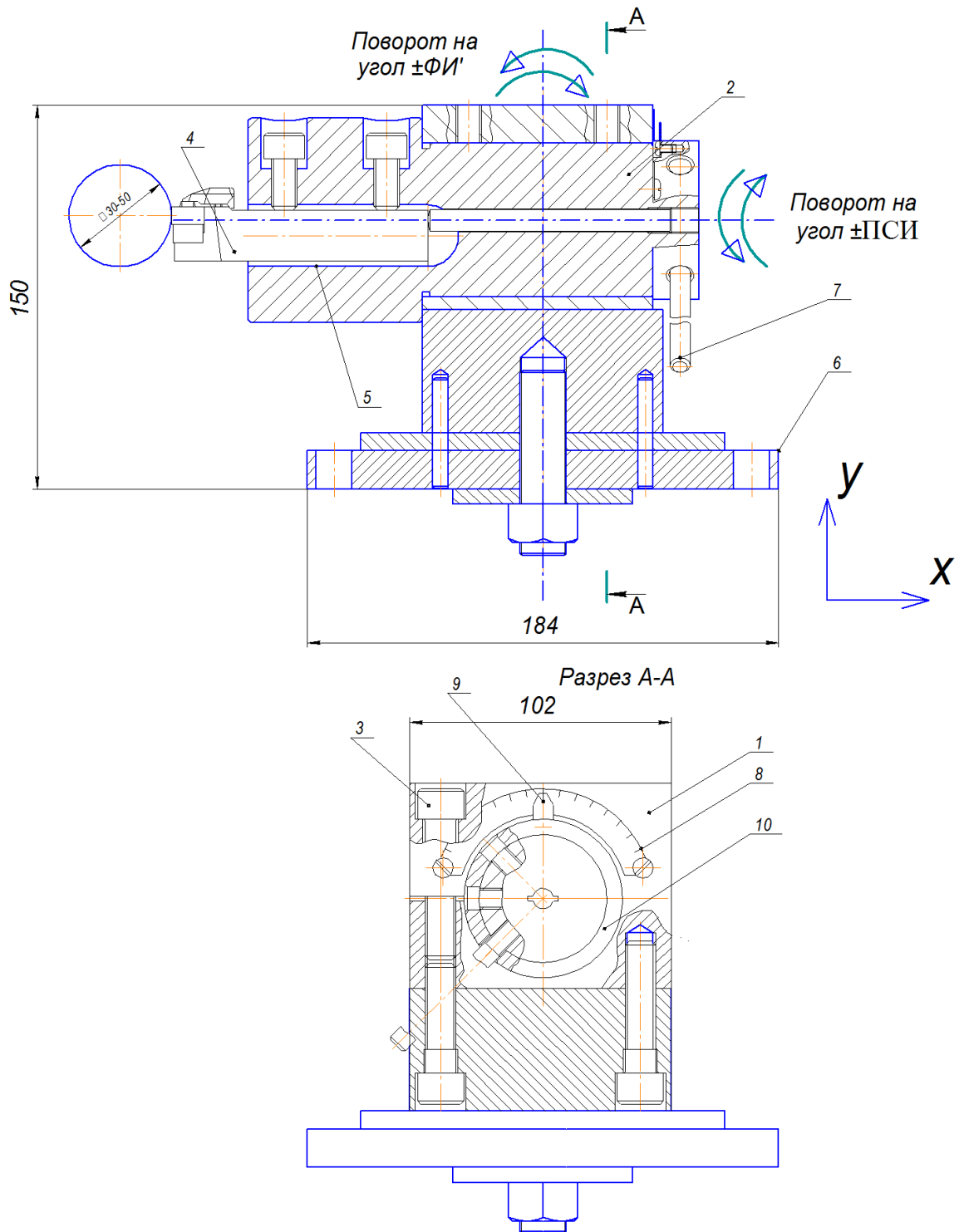


Рисунок 3.3 - Сборочный чертеж технологического приспособления для обработки выглаживанием с применением СМП.

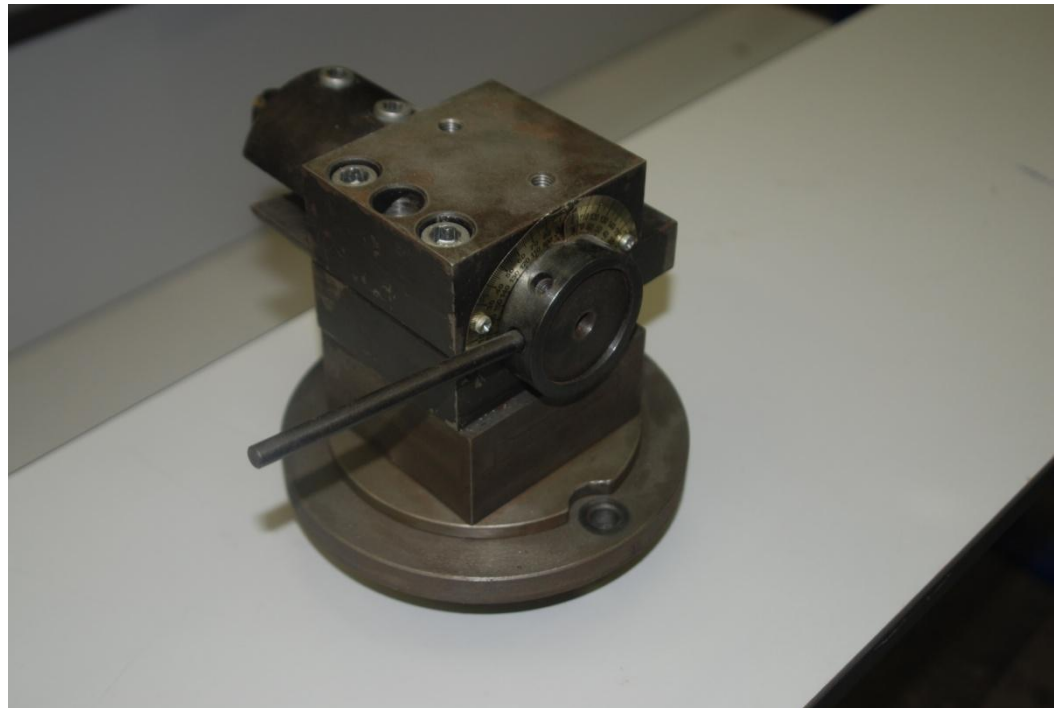


Рисунок 3.4 - Фотографии технологического приспособления.

Державка базируется по плоскости 5 и зажимается двумя винтами. Высота вершины СМП корректируется подкладными пластинами. Зажим оправки в корпусе осуществляется двумя винтами 3. Поворот оправки с деформирующим инструментом осуществляется с помощью рукоятки 7, установленной в одно из трех резьбовых отверстий (конкретное отверстие выбирается из соображений удобства поворота в определенном диапазоне углов). Угол поворота

устанавливается по угловой шкале 8, закрепленной на задней плоскости корпуса, с помощью стрелки 9 связанной с оправкой через втулку 10 [36, с. 26].

Для поворота инструмента относительно оси OY необходимо отпустить винты 3 и с помощью рукоятки 7 выполнить поворот оправки 2 на нужный угол. Поворот относительно оси OZ осуществляется посредством вращения всего приспособления по базирующей поверхности суппорта станка, где устанавливается стандартный резцедержатель. Для чего, фланец 6 должен иметь диаметр, соответствующий диаметру установочного места для резцедержателя на суппорте станка [36, с. 26].



Рисунок 3.5 - Фотография технологического приспособления на станке в процессе обработки.

3.1.4 Измерительное и технологическое оборудование.

Для экспериментальных исследований было использовано следующее оборудование и средства измерений: универсальный токарно-винторезный станок 1А62, профилограф-профилометр *Mahr MarSurf M 300*, координатно-измерительная машина *DKM 1-300DP*, твердомер ТП-2 "Виккерс",

микротвердомер ПМТ-3М, универсальный динамометр УДМ-600, штангенциркуль, калибр скоба.



Рисунок 3.6 - Прибор для измерения поверхностей *Mahr MarSurf M 300* [91].

3.2 Технологические режимы выглаживания.

Экспериментальные исследования были проведены в диапазонах варьирования режимов обработки, принятых на основании технологических рекомендаций, предложенных в работах [45,58,68], выполненных в работе [25] экспериментальных исследований, а также по данным предварительных поисковых экспериментов.

Исследования закономерности влияния технологического натяга и углов поворота СМП на параметры качества обработанной выглаживанием поверхности проводилось на следующих режимах:

- заданный натяга $i = 10, 20, 30, 50, 100, 140$ мкм.
- подача инструмента $s = 0,08$ мм/об;
- скорость обработки 50-150 м/мин (в зависимости от диаметра обрабатываемой детали).

Наиболее сложной задачей при настройке режимов обработки для конкретной операции является максимально точная установка технологического натяга. При проведении данных экспериментальных исследований применялась методика настройки, описанная в работах [25,45]. Сущность этой методики заключается в использовании "сигнальной лампочки", которая загорается при соприкосновении

инструмента с поверхностью заготовки (замыкается электрическая цепь) и выставления нулевого положения СМП по лимбу продольной салазки станка. Затем, посредством индикаторной головки с ценой деления 0,001 - 0,01 мм, производится настройка на нужную величину заданного технологического натяга i (рисунки 3.7 и 3.8).



Рисунок 3.7 - Настройка на заданный технологический натяг.



Рисунок 3.8 - Установка индикатора перемещений, для настройки на заданный натяг.

3.3 Методика установки инструмента.

При проведении экспериментальных исследований, описываемых в данной работе, использовались следующие схемы установки СМП: №1 ($Z_0X_0Y_0$), №2 ($Z_1X_0Y_0$), №3 ($Z_2X_0Y_0$), №6 ($Z_0X_0Y_1$), №7 ($Z_0X_0Y_2$), №16 ($Z_1X_0Y_1$), №17 ($Z_2X_0Y_1$), №18 ($Z_1X_0Y_2$), №19 ($Z_2X_0Y_2$) (пункт 2.3.2.1, рисунок 2.7).

Реализация схемы установки $Z_0X_0Y_0$ представлена на рисунке 3.9 [37. с. 71]. Изменение способа обработки с точения на выглаживание производится без поворотов СМП вокруг осей, а только за счет подъема токарной пластины выше оси обрабатываемой заготовки на величину, приблизительно равную половине толщины СМП (рисунок 3.10).

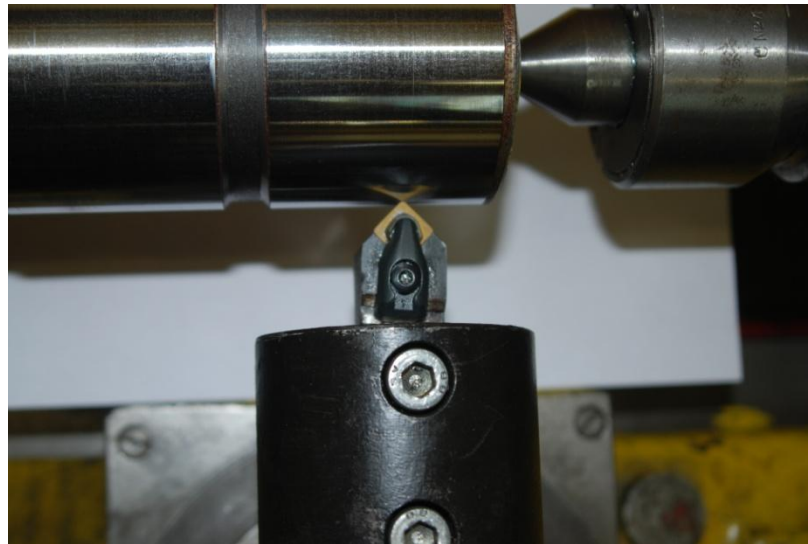


Рисунок 3.9 - Установка СМП по схеме $Z_0X_0Y_0$ ($\varphi'=0^\circ$, $\psi=0^\circ$) [37].

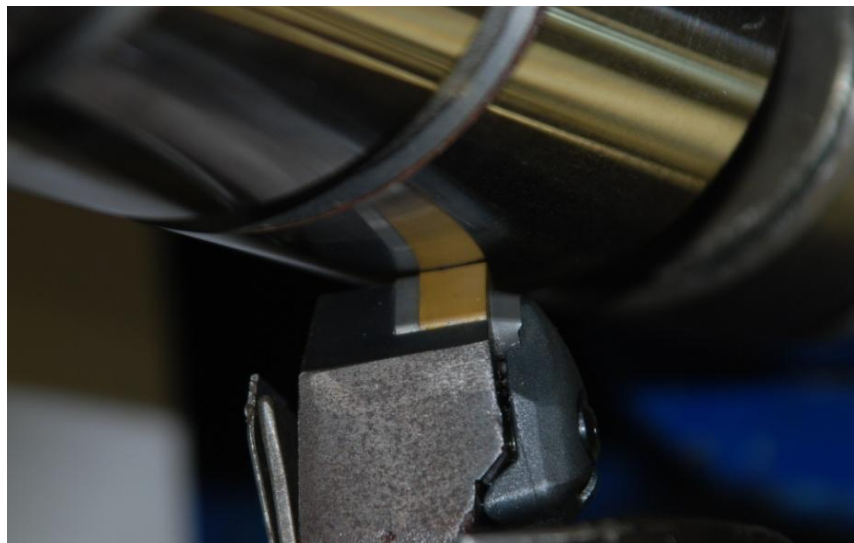


Рисунок 3.10 - Контакт СМП с заготовкой по схеме $Z_0X_0Y_0$ ($\varphi'=0^\circ$, $\psi=0^\circ$).

Реализация схем установки $Z_1X_0Y_0$ и $Z_2X_0Y_0$ представлена на рис. 3.11 [37, с. 71] и 3.12 соответственно. Данный способ установки СМП получается из предыдущего посредством поворота инструмента вокруг вертикальной оси OZ в направлении подачи или против направления подачи.

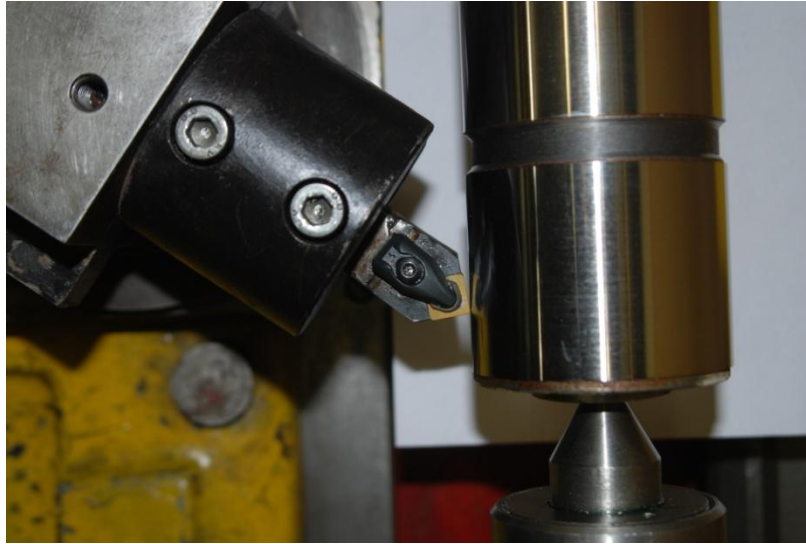


Рисунок 3.11. Установка СМП по схеме $Z_1X_0Y_0$, поворот вокруг оси OZ по направлению подачи (на угол $-\varphi'$) [37].

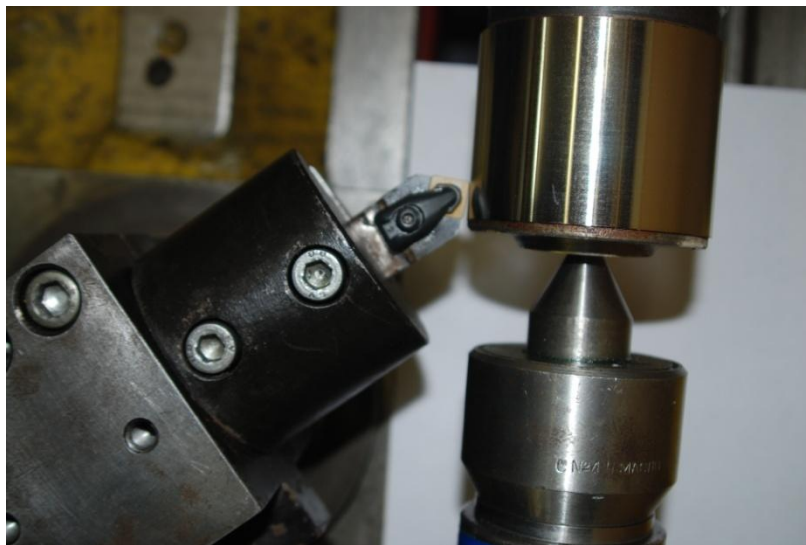


Рисунок 3.12. Установка СМП по схеме $Z_2X_0Y_0$, поворот вокруг оси OZ против направления подачи (на угол φ').

Реализация схем установки $Z_0X_0Y_1$ и $Z_0X_0Y_2$ представлена на рисунках 3.13 [37, с. 71] и 3.14 соответственно. Данный способ установки СМП получается из способа, выполняемого по схеме $Z_0X_0Y_0$ посредством поворота инструмента вокруг горизонтальной оси OY в направлении, противоположном направлению подачи инструмента или совпадающем с направлением подачи.

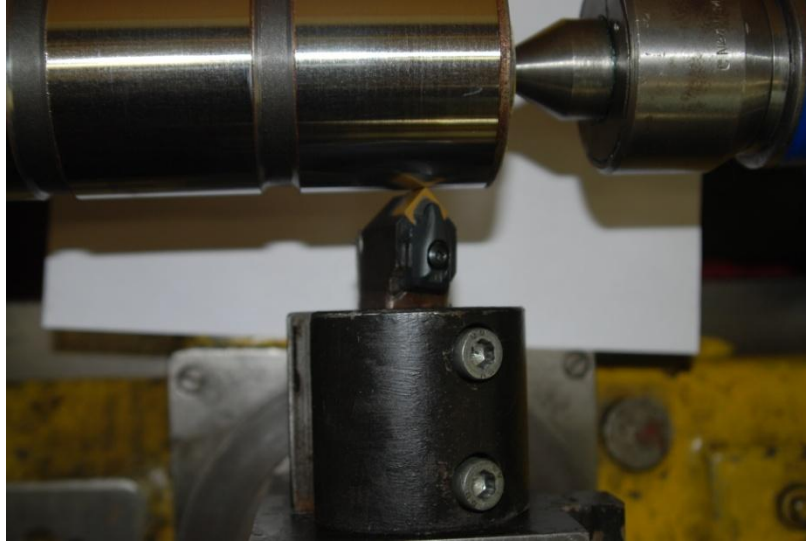


Рисунок 3.13. Установка СМП по схеме $Z_0X_0Y_1$, поворот вокруг оси OY против направления подачи (на угол ψ) [37].

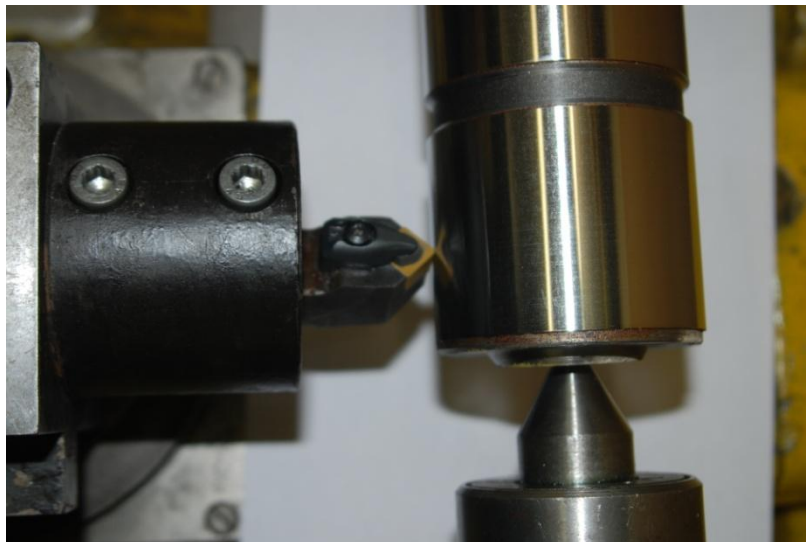


Рисунок 3.14. Установка СМП по схеме $Z_0X_0Y_2$, поворот вокруг оси OY в направлении подачи (на угол ψ).

Схемы установки $Z_1X_0Y_1$, $Z_1X_0Y_2$, $Z_2X_0Y_1$, $Z_2X_0Y_2$. Данные способы установки СМП получаются из способа, выполняемого по схеме $Z_0X_0Y_0$ посредством поворота инструмента вокруг горизонтальной оси OY и вертикальной оси OZ одновременно в различных направлениях относительно направления подачи инструмента.

3.4 Методика исследования качества поверхности.

3.4.1 Шероховатость обработанной поверхности.

Качество выглаженной поверхности оценивалось по основным параметрам шероховатости обработанной поверхности, регламентируемым ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 27964-88 [14, 15]:

- среднее арифметическое отклонение профиля R_a (мкм);
- относительная опорная длина профиля t_p (%);
- средний шаг местных выступов профиля S (мм);
- средний шаг неровностей профиля S_m (мм);

Измерения производились на приборе профилографе-профилометре Mahr MarSurf M 300.

3.4.3. Коэффициент изменения шероховатости.

Данный коэффициент показывает степень снижения шероховатости поверхности после обработки R_a в сравнении с исходной шероховатостью до обработки $R_{a_{исх}}$.

$$K = R_{a_{исх}}/R_a.$$

Коэффициент улучшения шероховатости достаточно информативный показатель, хорошо характеризующий эффективность процесса отделочной обработки. Кроме того, данный коэффициент удобен в практическом применении при проектировании технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей.

3.5 Планирование экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования в данной работе выполнялись в два этапа:

- 1 этап - поисковые однофакторные эксперименты;
- 2 этап - серия полных факторных экспериментов.

3.5.1 Планирование поисковых экспериментов.

Однофакторные поисковые эксперименты были выполнены для определения наилучшего инструментального материала СМП и режимов выглаживания, таких как диапазон скоростей обработки и интервал изменения технологического натяга, а также для определения интервалов варьирования углов поворота СМП в схемах установки, приведенных в пункте 3.3.

В качестве образцов использовать цилиндрические заготовки, изготовленные из конструкционной углеродистой стали 45 и легированной подшипниковой стали нового поколения 75ХГСФ.

3.5.2 Планирование полных факторных экспериментов.

После проведения серии поисковых однофакторных экспериментов и анализа полученных данных, было выполнено планирование трех полных факторных экспериментов для нахождения зависимостей параметров шероховатости обработанной поверхности от параметров, определяющих геометрию пятна контакта СМП и обрабатываемой заготовки: технологического натяга i , угла φ' поворота инструмента вокруг вертикальной оси, угла ψ поворота инструмента вокруг горизонтальной оси [10].

Для определения совместного влияния технологического натяга i и углов поворота φ' и ψ на шероховатость обработанной поверхности Ra и коэффициент улучшения шероховатости K при выглаживании образцов из стали 45 был спланирован полный факторный эксперимент вида 2^3 . Уровни и интервалы варьирования факторов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Уровни варьирования факторов.

Факторы	Уровни			Интервал варьирования
	верхний	основной	нижний	
X_1 – угол φ' (град.)	10	7,5	5	2,5
X_2 – угол ψ (град)	15	10	5	5
X_3 – заданный натяг i (мкм)	60	40	20	20

Опыты трижды повторялись на каждом уровне каждого фактора. Шероховатость образцов, достигнутая при предварительной токарной обработке, приблизительно была одинакова и равнялась $Ra = 1,25 \dots 1,8$ (мкм).

Как видно из таблицы 3.1, поворот СМП осуществлялся только в одном направлении, против движения подачи инструмента. Это было сделано для того, чтобы избежать излишнего увеличения интервалов варьирования факторов, что может отрицательным образом сказаться на точности полученных аналитических моделей зависимости параметров шероховатости от углов поворота СМП.

Для оценки изменения параметров качества поверхности в зависимости от направления углов поворота φ' и ψ были выполнены два полных факторных эксперимента вида 2^2 с одинаковыми уровнями и интервалами варьирования факторов для двух материалов образцов (сталь 45 и 75ХГСФ), которые представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Уровни варьирования факторов.

Факторы	Уровни			Интервал варьирования
	верхний	основной	нижний	
X_1 – угол φ' (град.)	10	0	-10	10
X_2 – угол ψ (град)	14	0	-14	14

Опыты трижды повторялись на каждом уровне каждого фактора. Шероховатость образцов, достигнутая при предварительной обработке резанием, приблизительно была одинакова и равнялась $Ra = 1,25 \dots 1,95$ (мкм). Технологический натяг i был фиксированным и составлял 40 мкм. Данная технологического натяга, как и величины углов поворота были выбраны по результатам анализа данных полного факторного эксперимента 2^3 .

Статистическая обработка и анализ результатов экспериментальных исследований осуществлялась в соответствии с теорией планирования полных факторных экспериментов [4,10,26].

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СПОСОБА УСТАНОВКИ СМП НА ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ВЫГЛАЖЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

4.1 Экспериментальное определение режимов обработки выглаживанием, интервалов варьирования углов поворота СМП и инструментального материала.

Влияние технологических режимов обработки выглаживанием на шероховатость обработанной поверхности достаточно хорошо исследовано. По материалам экспериментальных исследований большинства авторов [25,68], сделаны выводы о том, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывают величина подачи инструмента s и величина технологического натяга i (для схемы с упругим закреплением инструмента - сила P). Скорость обработки V практически не влияет на достигаемые параметры шероховатости и ограничивается производительностью и стабильностью процесса обработки выглаживанием.

По данным, полученным в работе [68], наименьшая шероховатость достигается при значениях подачи в пределах 0,02 - 0,06 мм/об, а по данным исследования [25]: 0,05-0,08 мм/об. Таким образом, определять наилучшую величину подачи инструмента s для проведения полных факторных экспериментов не было необходимости. Величина подачи была принята равной 0,08 мм/об.

Характер зависимости среднего арифметического отклонения профиля Ra от величины технологического натяга i представляет собой нелинейную зависимость. Присутствует выраженная экстремальная область значений технологического натяга, обеспечивающих минимальную высоту микронеровностей [25]. Для определения этой оптимальной области был выполнен ряд поисковых однофакторных экспериментов на образцах из стали 45 и 75ХГСФ (см. Приложение В). Усредненный результат этих экспериментов представлен на графике на рисунке 4.1.

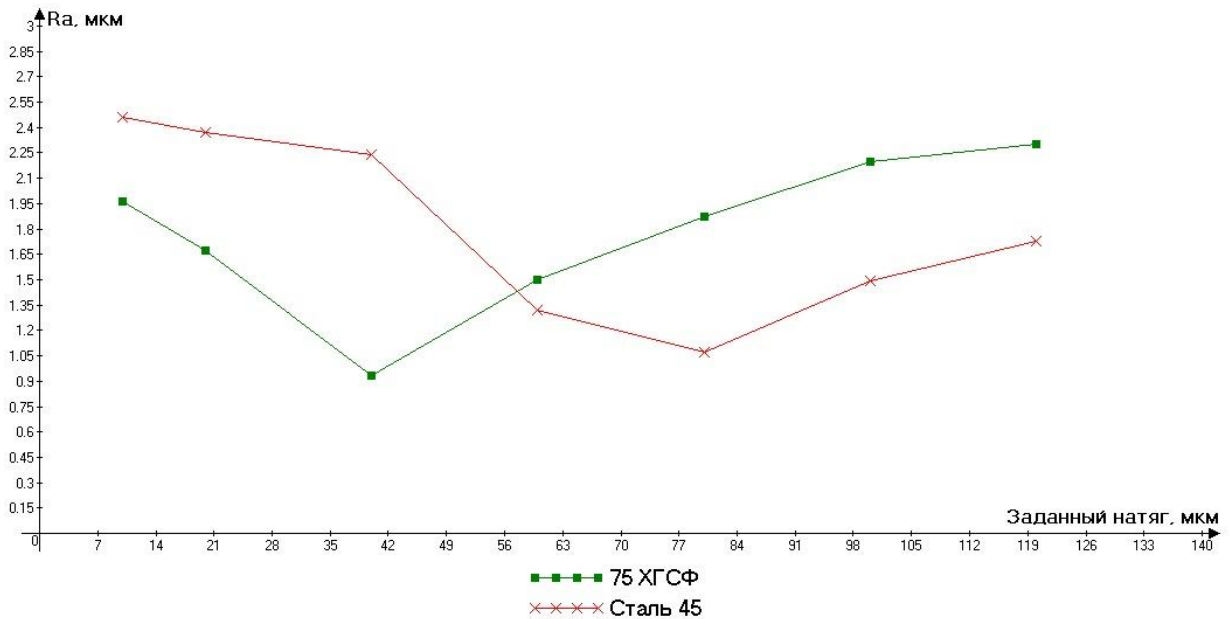


Рисунок 4.1 - Зависимость шероховатости от технологического натяга.

Скорость $V=100$ м/мин, подача $s=0,08$ мм/об.

Наличие данной экстремальной области было отмечено в работах многих исследователей [25, 57, 68]. Нелинейность зависимости связана с наличием двух стадий процесса ППД в условиях изменения заданного натяга i (при "жестком" выглаживании) или силы P (при реализации упругой схемы выглаживания). Первая стадия, имеющая место при малых натягах (небольшой силе), обусловлена смятием микронеровностей, оставшихся от предшествующей механической обработки. Вторая стадия процесса начинается при образовании поверхности с новыми микронеровностями, формирующимися непосредственно самим процессом выглаживания, поэтому, с увеличением величины натяга (или силы выглаживания) с определенного момента шероховатость начинает увеличиваться.

Как видно из графика на рис. 4.1, первая стадия в зоне малых величин технологического натяга i более выражено проявляется при обработке сталей с повышенной твердостью. Для проведения полных факторных экспериментов и дальнейшего исследования влияния натяга на качество обработанной поверхности был выбран основной интервал варьирования величины i от 20 до 60 мкм.

Скорость выглаживания V влияет на величину шероховатости обработанной поверхности в меньшей степени, чем технологический натяг и подача. Из результатов экспериментальных исследований различных авторов известно, что

при алмазном выглаживании и выглаживании с применением СМП из керамики, величина шероховатости практически не изменяется в широком диапазоне скоростей от 20 до 200 м/мин. Нижний диапазон скоростей нерационален ввиду низкой производительности. Скорость выглаживания от 150 м/мин и выше предъявляет серьезные требования к жесткости станка и качеству подвода СОТС в зону обработки. Так как при больших скоростях возможно появление нежелательных вибраций вследствие недостаточной жесткости станка и повышения температуры в контактной зоне [25, 45].

Однофакторные эксперименты подтвердили заключения вышеупомянутых исследователей (рисунок 4.2).

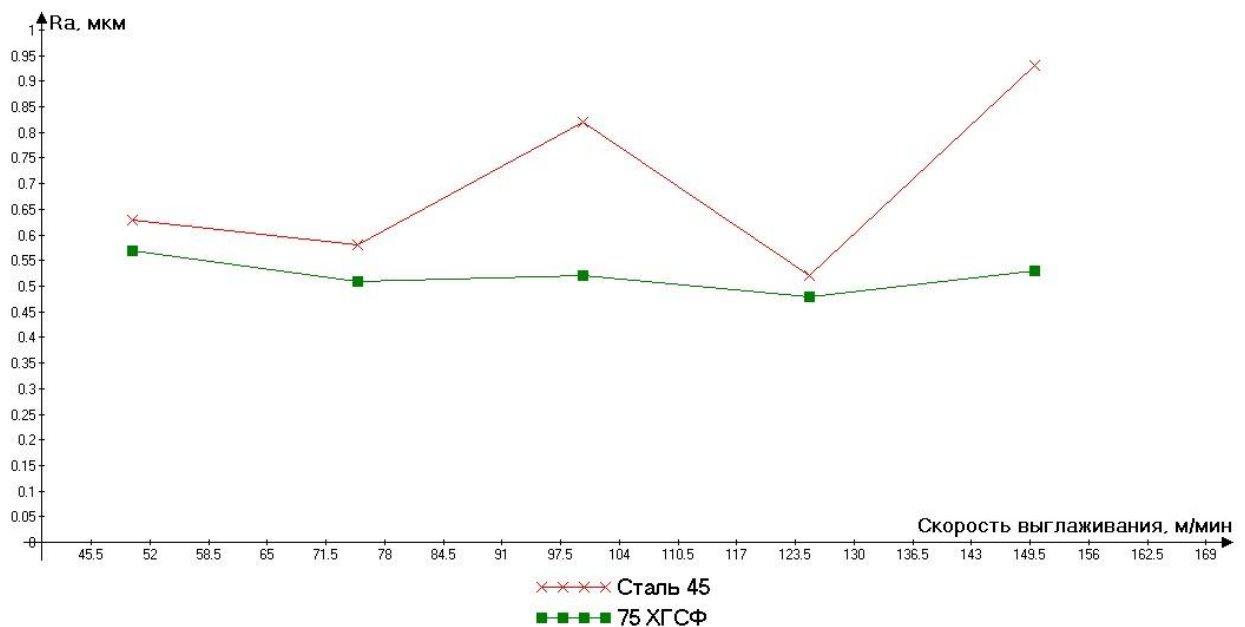


Рисунок 4.2 - Зависимость шероховатости от скорости выглаживания.

Технологический натяг $i=40$ мкм, подача $s=0,08$ мм/об.

При скоростях свыше 150 м/мин стабильность процесса нарушалась и возникали достаточно сильные вибрации, что приводило к браку поверхностного слоя обработанного образца (рисунок 4.3). Поэтому, для проведения дальнейших экспериментальных исследований было принято решение варьировать скорость в пределах 50 - 150 м/мин (в зависимости от диаметра образца) и использовать СОТС.

Для определения интервалов варьирования углов поворота СМП вокруг горизонтальной и вертикальной осей были также выполнены серии однофакторных поисковых экспериментов с применением СМП из четырех

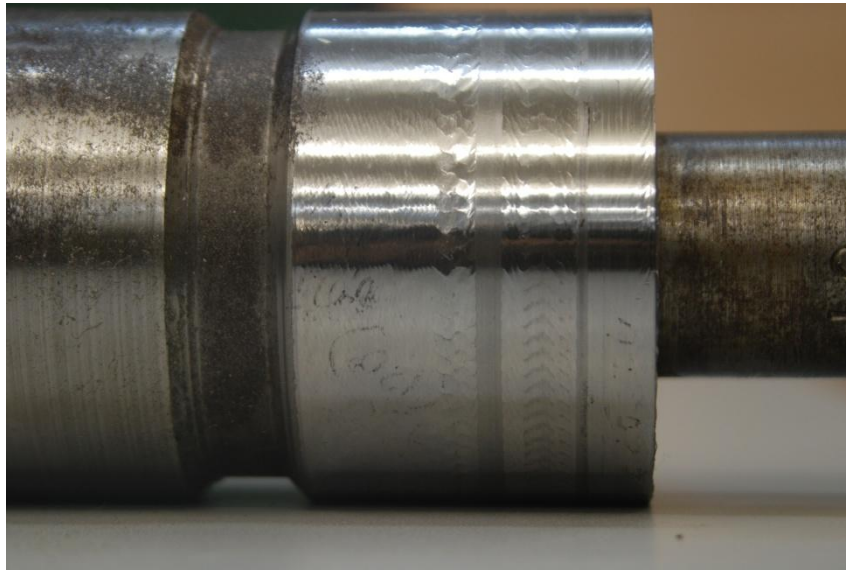


Рисунок 4.3 - Последствия возникновения вибраций в процессе обработки. различных инструментальных материалов и образцов из двух сталей различной твердости и пластичности. Поворот СМП осуществлялся только в одном, условно положительном направлении - против движения подачи инструмента. Обобщенные результаты приведены на рисунках 4.4 и 4.5.

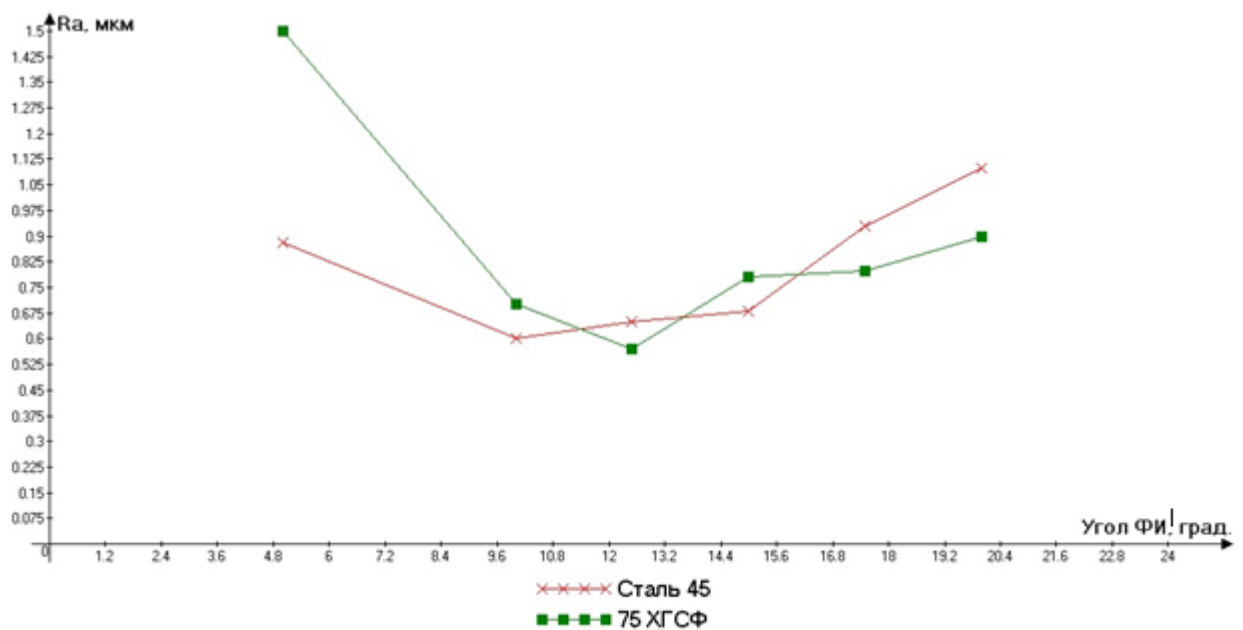


Рисунок 4.4 - Зависимость шероховатости от угла ϕ' поворота СМП.

Технологический натяг $i=40$ мкм, подача $s=0,08$ мм/об., скорость $V=100$ м/мин.

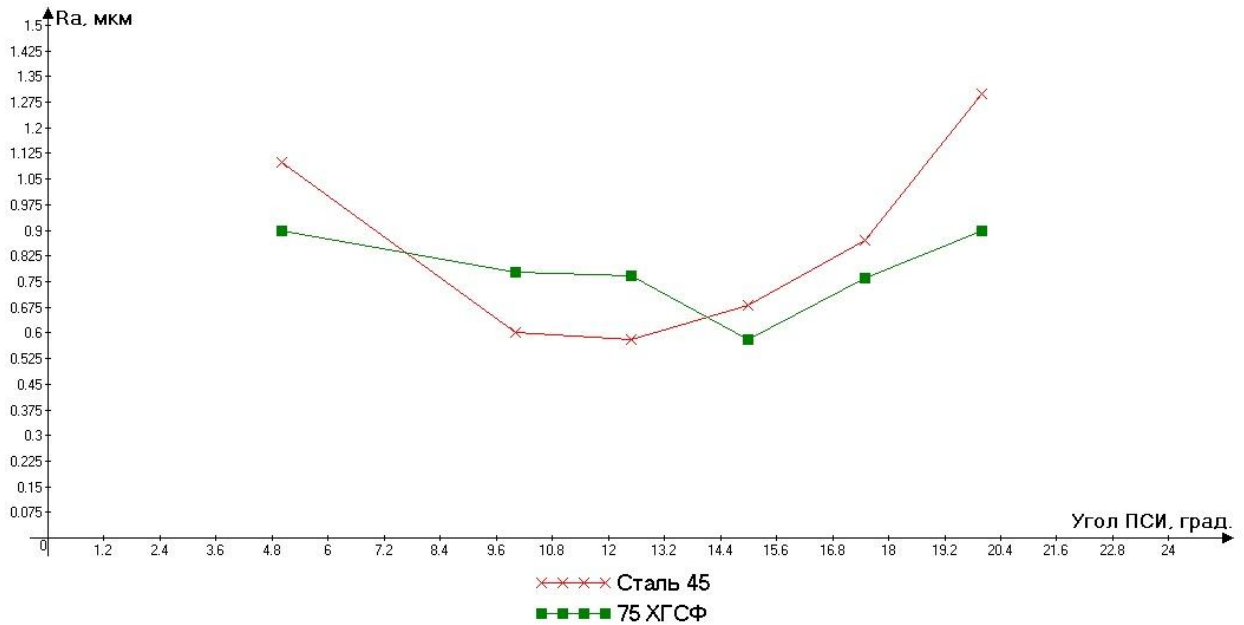


Рисунок 4.5 - Зависимость шероховатости от угла ψ поворота СМП.

Технологический натяг $i=40$ мкм, подача $s=0,08$ мм/об., скорость $V=100$ м/мин.

На приведенных выше графиках наблюдаются некоторые экстремальные области, позволяющие предположить нелинейный характер зависимостей высоты микронеровностей от углов поворота СМП. Для дальнейших исследований совместного воздействия углов поворота СМП на параметры шероховатости обработанной выглаживанием поверхности посредством полных факторных экспериментов были выбраны следующие интервалы варьирования:

- угол φ' : от 0 до 10 градусов;
- угол ψ : от 0 до 15 градусов.

При установке СМП с поворотом вокруг одной из осей на углы большие 10 и 15 градусов соответственно, величина среднего арифметического отклонения профиля Ra начинала возрастать по причине потери стабильности процесса выглаживания. Возникали вибрации, приводившие к выкрашиванию обрабатываемой поверхности. Характер полученной поверхности изображен на фотографии (рисунок 4.3). Увеличение контактной области способствует увеличению силы выглаживания и трения в контактной области, что, в свою очередь, приводит к периодическим отжатию технологической системы и росту контактной температуры.

Влияния инструментального материала, из которого изготовлена СМП, при одинаковой геометрии пластин, на параметры шероховатости обработанной поверхности в ходе поисковых экспериментов выявить не удалось. Поэтому для полных факторных экспериментов были использованы СМП из всех четырех инструментальных материалов (пункт 3.1.2).

Для оценки влияния геометрических параметров контактной области (площади, длины и ширины пятна контакта) на качество обработанной поверхности был использован коэффициент изменения шероховатости ($K=Ra_{ИСХ}/Ra$), для того чтобы учесть максимальное количество различных опытов всех серий поисковых однофакторных экспериментов и минимизировать влияние исходной шероховатости образцов в каждом конкретном случае.

Влияние геометрических параметров на качество обработанной поверхности имеет достаточно сложный характер, так как каждое значение площади, длины и ширины пятна контакта может соответствовать различным комбинациям величин технологического натяга i , углов поворота СМП φ' и ψ , а также диаметра обрабатываемой заготовки. Поэтому, данный вывод может служить подтверждением необходимости комплексного экспериментального исследования влияния статических характеристик метода обработки (углов поворота СМП и технологического натяга) при их совместном воздействии. Для этого, необходимо провести серию полных факторных экспериментов.

4.2 Экспериментальное исследование зависимости шероховатости поверхности от углов поворота СМП и технологического натяга.

Для выявления зависимости шероховатости и коэффициента изменения шероховатости от совместного действия трех факторов, обуславливающих геометрию пятна контакта, был выполнен полный факторный эксперимент типа 2^3 . Модель зависимости функции отклика от входных параметров в данном эксперименте можно представить в следующем общем виде:

$$Ra, K = f(\varphi', \psi, i), \quad (4.1)$$

где Ra и K - функции отклика (среднее арифметическое отклонение профиля поверхности и коэффициент изменения шероховатости соответственно);

φ' - угол поворота СМП вокруг вертикальной оси OZ (град.);

ψ - угол поворота СМП вокруг горизонтальной оси OY (град.);

i - заданный технологический натяг (мкм).

Уровни и интервалы варьирования факторов и матрица планирования с полученными результатами опытов приведены в таблицах 4.1 и 4.2 соответственно [10,26].

Таблица 4.1 - Уровни факторов и их интервалы варьирования.

Факторы	Уровни			Интервал варьирования
	верхний	основной	нижний	
X_1 – угол φ' (град.)	10	7,5	5	2,5
X_2 – угол ψ (град.)	15	10	5	5
X_3 – заданный натяг i (мкм)	60	40	20	20

Таблица 4.2, а) - Матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^3 и измеренные значения величины параметра оптимизации Ra .

№ оп.	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	Ra_1	Ra_2	Ra_3	Ra
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,650	0,501	0,572	0,573
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,412	0,620	0,514	0,515
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,991	0,550	0,812	0,784
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,311	0,423	0,361	0,365
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,933	1,100	1,110	1,047
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,572	0,422	0,491	0,495
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,403	0,351	0,322	0,358
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,521	0,313	0,420	0,418

Таблица 4.2, б) - Матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^3 и измеренные значения величины параметра оптимизации K .

№ оп.	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	K_1	K_2	K_3	K
1	+	-	-	-	+	+	+	-	2,69	3,49	3,06	3,08
2	+	+	-	-	-	-	+	+	4,25	2,82	3,40	3,49
3	+	-	+	-	-	+	-	+	1,26	2,27	1,54	1,69
4	+	+	+	-	+	-	-	-	5,63	4,14	4,85	4,87
5	+	-	-	+	+	-	-	+	1,29	1,09	1,08	1,15
6	+	+	-	+	-	+	-	-	3,15	4,26	3,66	3,69
7	+	-	+	+	-	-	+	-	3,97	4,56	4,97	5,50
8	+	+	+	+	+	+	+	+	3,55	5,91	4,40	4,62

Условия эксперимента:

- материал обрабатываемых образцов - сталь 45, твердость HV 2100...2200 МПа;
- диаметр образцов 78 ... 85 мм;
- Ra исходное = 1,25 ... 1,8 мкм;
- инструмент - СМП фирмы *Sandvik Coromant* геометрии *SNGN 120712*, выполненные из материала 650;
- в качестве технологической среды применялась синтетическая смазочно-охлаждающая жидкость ТНК Универсал S.

План эксперимента типа 2^3 позволяет получать отдельные оценки коэффициентов уравнения регрессии типа [10,26]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (4.2)$$

В результате расчетов были получены следующие значения коэффициентов уравнения 4.2 для параметра Ra :

$$b_0=0,5683; b_1= - 0,1217; b_2= - 0,0883; b_3= 0,01; b_{12}=0,0317; b_{13}= - 0,0017;$$

$$b_{23}= - 0,103; b_{123}= 0,1217.$$

После проведения статистической оценки коэффициентов по табличному значению t критерия, коэффициенты b_3 , b_{12} и b_{13} оказались статистически незначимыми. После подстановки коэффициентов в уравнение 4.2 оно приняло вид:

$$y = 0,5683 - 0,1217x_1 - 0,0883x_2 - 0,103x_2x_3 + 0,1217x_1x_2x_3 \quad (4.3)$$

Проверка адекватности полученной линейной модели по критерию Фишера при 4-х степенях свободы и 5-ти процентном уровне значимости показала, что линейная модель адекватна [10,26]:

$$F = 5,82 \leq F_{кк} = 19,3 \quad (4.4)$$

Однако, для оценки значимости квадратичных коэффициентов уравнения регрессии необходимо сравнить разность между значением параметров отклика в центре плана \bar{y} (при основных уровнях факторов) и величиной свободного члена b_0 с ошибкой эксперимента S_y [10]. Для этого были поставлены три опыта в центре плана и получено среднее значение параметра шероховатости $Ra=0,376$ мкм.

$$|\bar{y} - b_0| = 0,376 - 5683 = 0,1923$$

$$S_y = \sqrt{0,01214} = 0,11 \quad ,(4.5)$$

Как видно из выражения 4.5, полученная разность превышает ошибку эксперимента, что свидетельствует о том, что исследуемая зависимость не может быть с достаточной точностью аппроксимирована полиномом первой степени (4.2). Поэтому, было принято решение о переходе к планированию второго порядка методом ротатабельного центрального композиционного плана. Он позволяет получать уравнение регрессии второй степени вида [10]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad ,(4.6)$$

Матрица планирования второго порядка и полученные результаты опытов по двум параметрам оптимизации Ra и K представлены в таблице 4.3 [10]. После проведения расчетов по параметру Ra и статистической оценки значимости коэффициентов регрессии и подстановки в уравнение (4.6), получаем следующие выражение:

$$y = 0,3624 - 0,1217x_1 - 0,0883x_2 - 0,103x_2x_3 + 0,04228x_1^2 + 0,05465x_2^2 + 0,0757x_3^2 \quad ,(4.7)$$

Таблица 4.3 - Матрица планирования полного факторного эксперимента второго порядка типа 2^3 .

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Ra	K
9	+	-1,682	0	0	2,828	0	0	0,38	4,91
10	+	1,682	0	0	2,828	0	0	0,49	3,57
11	+	0	-1,682	0	0	2,828	0	0,48	4,5
12	+	0	1,682	0	0	2,828	0	0,46	4,93
13	+	0	0	-1,682	0	0	2,828	0,683	3,87
14	+	0	0	1,682	0	0	2,828	0,376	5,28
15	+	0	0	0	0	0	0	0,317	5,73
16	+	0	0	0	0	0	0	0,38	4,6
17	+	0	0	0	0	0	0	0,387	4,52
18	+	0	0	0	0	0	0	0,333	5,25
19	+	0	0	0	0	0	0	0,443	4,95
20	+	0	0	0	0	0	0	0,33	5,3

Проверка адекватности полученной модели по критерию Фишера при 12-ти степенях свободы для старшей дисперсии, 5-ти степенях свободы - для младшей и 5-ти процентном уровне значимости показала, что модель, выраженная полиномом второго порядка, адекватна [10]:

$$F = 4,285 \leq F_{кк} = 4,6777 \quad , (4.8)$$

Для выполнения практических расчетов и построения графиков зависимости параметра шероховатости Ra от трех факторов, необходимо осуществить переход от кодированных значений X_1, X_2, X_3 к натуральным значениям φ', ψ, i . Выражения перехода от кодированных значений факторов к натуральным имеют вид [10, 26]:

$$x_1 = \frac{\varphi' - \varphi'_0}{\Delta\varphi'}; x_2 = \frac{\psi - \psi_0}{\Delta\psi}; x_3 = \frac{i - i_0}{\Delta i}; \quad , (4.9)$$

где, φ'_0, ψ_0, i_0 - значения факторов в натуральных единицах; $\Delta\varphi', \Delta\psi, \Delta i$ - величина интервала варьирования.

Таким образом, переход от кодированных значений к натуральным будет выглядеть следующим образом:

$$x_1 = \frac{\varphi' - 7,5}{2,5}; x_2 = \frac{\psi - 10}{5}; x_3 = \frac{i - 40}{20}; \quad , (4.10)$$

После подстановки значений в натуральных единицах в уравнение регрессии (4.7), получим математическую модель зависимости шероховатости обработанной выглаживанием поверхности от величины углов поворота СМП и технологического натяга:

$$Ra = 1,76 + 0,016\varphi'^2 - 0,15\varphi' - 0,06\psi - 0,01i \quad , (4.11)$$

Графические зависимости параметра оптимизации Ra от величины углов поворота СМП и заданного технологического натяга представлены на рисунках 4.6 и 4.7, соответственно.

Наименьших значений параметр Ra достигает при следующих значениях факторов: угол $\varphi' = 11,1$ град., угол $\psi = 14,04$ град., заданный натяг $i = 40$ мкм (рисунки 4.6 и 4.7). Данным значениям факторов соответствуют следующие значения силовых параметров процесса: сила $P = 550 \dots 700$ (Н), среднее давление в контакте $p = 1550 \dots 1600$ (МПа), цикличность нагружения 8 раз.

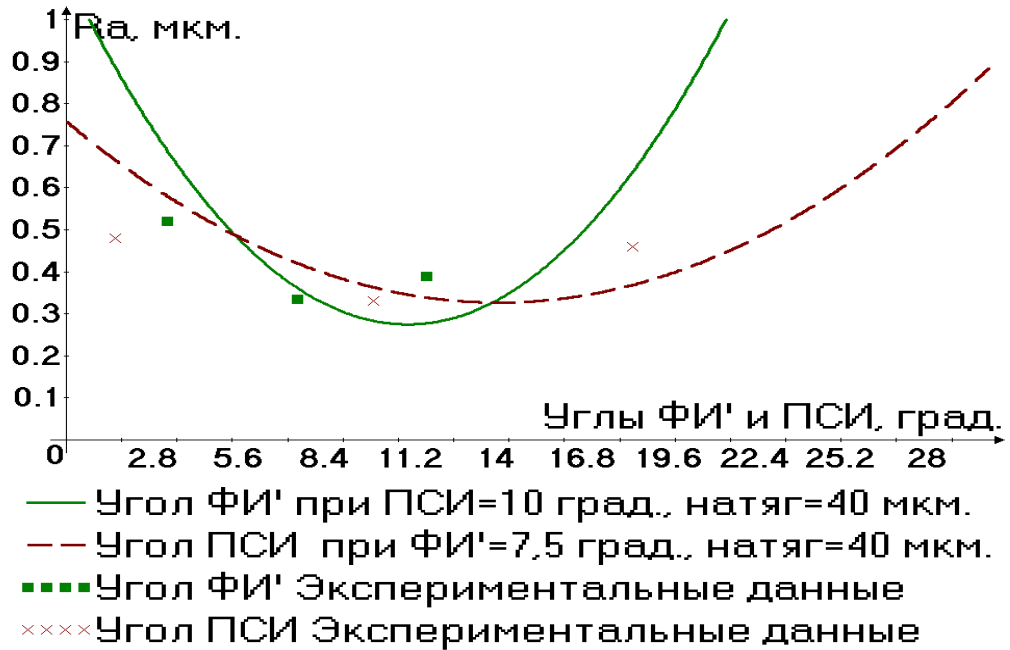


Рисунок 4.6 - Зависимость среднего арифметического отклонения профиля Ra обработанной поверхности от углов поворота СМП φ' и ψ . Образцы из стали 45.

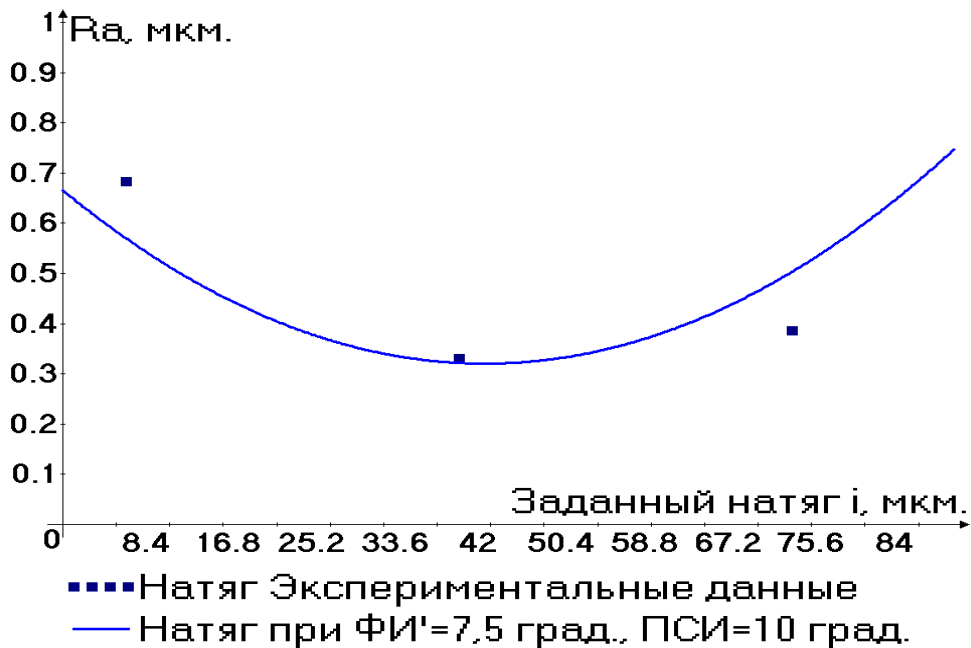


Рисунок 4.7 - Зависимость среднего арифметического отклонения профиля Ra обработанной поверхности от технологического натяга i . Образцы из стали 45.

Зависимости высоты микронеровностей от углов φ' и ψ имеют области экстремума (где среднее арифметическое отклонение профиля изменяется в пределах $0,35...0,45 Ra$), которые соответствуют углам поворота φ от 5° до 14° , ψ от 7° до 20° . На интервалах изменения величин углов поворота φ $[0^\circ;11^\circ]$ и ψ $[0^\circ;15^\circ]$ высота микронеровностей постепенно уменьшается, а при дальнейшем

увеличении угла поворота - начинает возрастать. Это можно объяснить влиянием силовых факторов и кратностью приложения нагрузки. Сила выглаживания возрастает по мере увеличения угла поворота φ' (пункт 2.3.2.2). В интервале изменения угла от 0° до 14° , сила выглаживания P находится в пределе от 300 до 700 (Н). Снижение величины шероховатости на этом отрезке объясняется тем, что складываются оптимальные условия контакта по вершинам микронеровностей, опорная площадь которых мала, поэтому на площадях контакта развивается значительное давление и происходят интенсивные пластические деформации. Образуется очаг деформации 3-го рода, который обеспечивает наибольшее сглаживание исходных микронеровностей [57,58,59]. По мере увеличения угла поворота СМП φ' более 14° уменьшается глубина внедрения СМП h , а, следовательно, уменьшается площадь контакта, сила выглаживания и контактное давление. В результате ухудшаются условия протекания пластической деформации, процесс становится нестабильным, появляются излишние вибрации. Качество обработанной поверхности значительно ухудшается.

Аналогично изменяется характер протекания процесса пластической деформации ПС заготовки при изменении угла установки СМП φ' (если угол ψ при этом находится в диапазоне $10^\circ - 18^\circ$).

Характер экспериментально полученной зависимости среднего арифметического отклонения профиля Ra от заданного технологического натяга i (рисунок 4.7) полностью совпадает с данными поисковых экспериментов (рисунок 4.1) и подтверждает выводы, сделанные в пункте 4.1.

Полученные графические зависимости (рисунки 4.6 и 4.7) были исследованы на экстремумы путем исследования аналитического выражения (рисунок 4.11) с помощью второй производной в программе *Advanced Grapher*. Наименьших значений параметр шероховатости Ra достигает при следующих значениях факторов: угол $\varphi'=11,1$ град., угол $\psi=14,04$ град., заданный натяг $i=40$ мкм. Данные значения факторов в точках экстремумов были учтены при планировании полных факторных экспериментов типа 2^2 для исследования влияния направлений поворота СМП на качество обработанной поверхности.

После проведения расчетов величины коэффициентов регрессии по параметру коэффициента изменения шероховатости K и статистической оценки значимости коэффициентов с последующей подстановкой в уравнение (4.6), получаем следующее выражение:

$$y = 5,09 + 0,6825x_1 + 0,4775x_2 - 0,4979x_1^2 - 0,33x_2^2 - 0,2975x_3^2 \quad ,(4.12)$$

Проверка адекватности полученной модели по критерию Фишера при 12-ти степенях свободы для старшей дисперсии, 5-ти степенях свободы - для младшей и 5-ти процентном уровне значимости показала, что модель, выраженная полиномом второго порядка, адекватна [10]:

$$F = 1,065766 \leq F_{kk} = 4,6777 \quad ,(4.13)$$

После подстановки в выражение (4.12) натуральных значений факторов (4.10) получаем окончательную математическую модель зависимости коэффициента изменения шероховатости K от углов поворота СМП и технологического натяга i , выраженную уравнением регрессии второго порядка:

$$K = 1,47\varphi' + 0,365\psi + 0,06i - 0,08\varphi'^2 - 0,01\psi^2 - 4,89 \quad ,(4.14)$$

После проведения расчетов параметра K по каждому из трех факторов при фиксировании на основном уровне варьирования двух других, были получены графические зависимости, которые представлены на рисунках 4.8 и 4.9, соответственно.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что максимальные значения коэффициента изменения шероховатости достигаются при тех же значениях варьируемых входных факторов, при которых наблюдаются наиболее благоприятные условия протекания процессов пластической деформации в поверхностном слое обрабатываемой заготовки, позволяющие получать наименьшую шероховатость по параметру Ra (рисунки 4.6 и 4.7).

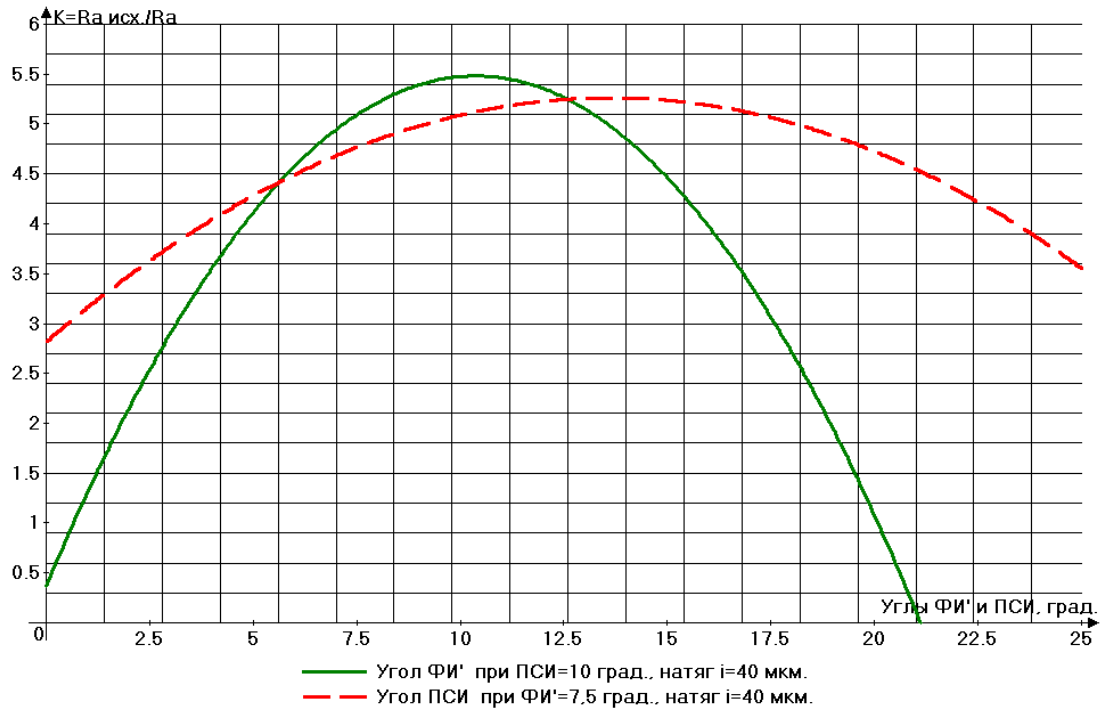


Рисунок 4.8 - Зависимость коэффициента изменения шероховатости K от углов поворота СМП φ' и ψ . Образцы из стали 45.

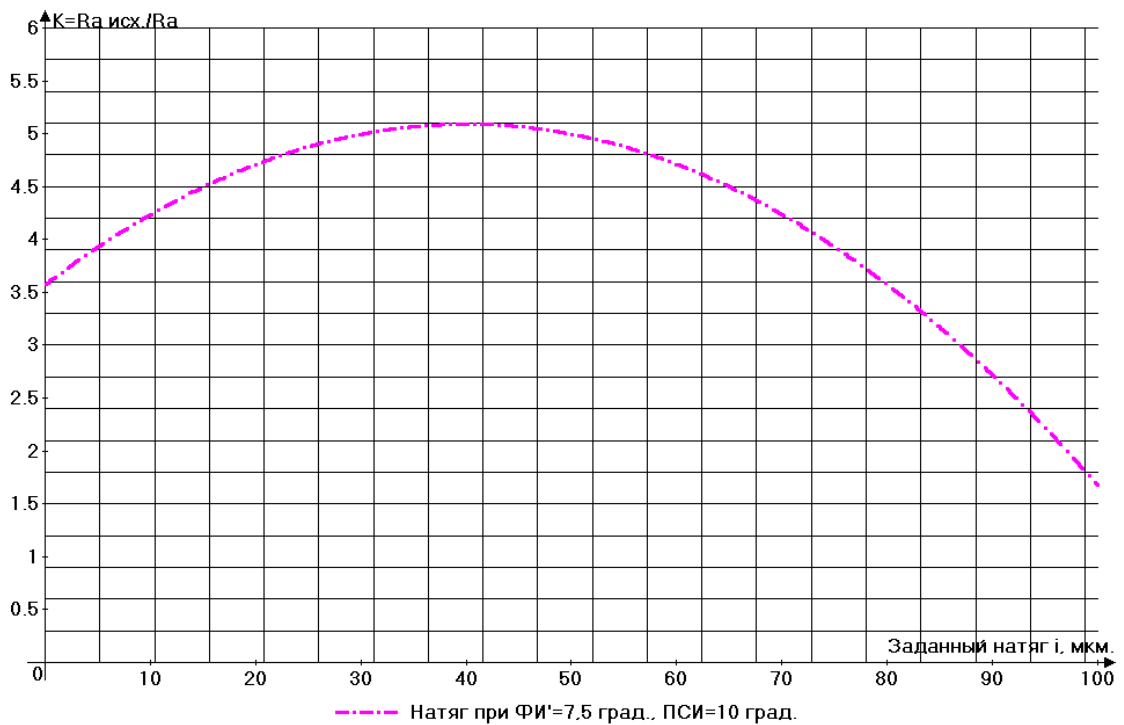


Рисунок 4.9 - Зависимость коэффициента изменения шероховатости K от заданного технологического натяга i . Образцы из стали 45.

4.3 Экспериментальное исследование зависимости шероховатости обработанной поверхности от направления поворота СМП.

Для исследования влияния направления поворота СМП вокруг вертикальной оси OZ и горизонтальной оси OY были выполнены два полных факторных эксперимента типа 2^2 . В ходе которых, были задействованы следующие схемы установки инструмента: №1 ($Z_0X_0Y_0$), №2 ($Z_1X_0Y_0$), №3 ($Z_2X_0Y_0$), №6 ($Z_0X_0Y_1$), №7 ($Z_0X_0Y_2$), №16 ($Z_1X_0Y_1$), №17 ($Z_2X_0Y_1$), №18 ($Z_1X_0Y_2$), №19 ($Z_2X_0Y_2$) (пункт 2.3.2.1, рисунок 2.7). Эксперименты отличались только материалами экспериментальных образцов.

Так, зависимость качества обработанной поверхности по параметрам Ra и K от величины углов поворота СМП наилучшим образом аппроксимируется полиномом второй степени (пункт 4.2), то было принято решение прибегнуть к планированию второго порядка. В качестве плана эксперимента был выбран центральный композиционный ортогональный план второго порядка для двух уровней интервала варьирования факторов. Данный план позволяет получать уравнение регрессии следующего вида [10]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad , (4.15)$$

Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Уровни факторов и их интервалы варьирования.

Факторы	Уровни			Интервал варьирования
	верхний	основной	нижний	
X_1 – угол φ (град.)	10	0	-10	10
X_2 – угол ψ (град.)	14	0	-14	14

Качество поверхности в данных экспериментальных исследованиях оценивалось по пяти параметрам:

- 1) среднее арифметическое отклонение профиля R_a (мкм);
- 2) относительная опорная длина профиля t_p (%);
- 3) средний шаг местных выступов профиля S (мм);
- 4) средний шаг неровностей профиля S_m (мм);
- 5) коэффициент изменения шероховатости $K = Ra_{исх}/Ra$.

В общем виде, модель зависимости функций отклика от входных параметров можно представить в следующем виде:

$$Ra, K, tp, Sm, S = f(\varphi', \psi) \quad (4.16)$$

Далее, подробно рассмотрим экспериментальные исследования и анализ полученных результатов для каждого материала исследуемых образцов в отдельности.

4.3.1 Экспериментальное исследование зависимости шероховатости обработанной поверхности от направления поворота СМП на образцах, выполненных из стали 45.

Условия проведения первого полного факторного эксперимента типа 2^2 :

- материал обрабатываемых образцов - сталь 45, твердость HV 2100...2200 МПа;
- диаметр образцов 74 ... 76 мм;
- Ra исходное = 1,25 ... 1,95 мкм;
- инструмент - СМП фирмы *Sandvik Coromant* геометрии *SNGN 120712*, выполненные из материала 6090 (пункт 3.1.2);
- заданный технологический натяг $i = 40$ мкм;
- величина движения подачи инструмента $s = 0,08$ мм/об;
- скорость выглаживания $V = 55 - 85$ м/мин.;
- в качестве технологической среды применялась синтетическая смазочно-охлаждающая жидкость ТНК Универсал S.

Матрица планирования и средние арифметические результаты опытов представлены в таблице 4.5. Каждый опыт повторялся трижды [10].

Таблица 4.5 - Матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^2 .

№ оп.	X_0	X_1	X_2	$X_1^2-2/3$	$X_2^2-2/3$	$X_1 X_2$	Ra, мкм	K	tp, %	S, мм	Sm, мм
1	+	-	-	1/3	1/3	+	0,504	3,79	60	0,051	0,201
2	+	+	-	1/3	1/3	-	0,402	4,24	67	0,071	0,402
3	+	-	+	1/3	1/3	+	0,381	5,06	67	0,032	0,097
4	+	+	+	1/3	1/3	-	0,81	2,43	50	0,037	0,049
5	+	-	0	1/3	-2/3	0	0,41	5,01	80	0,028	0,103
6	+	+	0	1/3	-2/3	0	0,41	4,62	66	0,042	0,095
7	+	0	-	-2/3	1/3	0	0,644	3,07	49	0,035	0,044
8	+	0	+	-2/3	1/3	0	0,371	5,03	86	0,046	0,085
9	+	0	0	-2/3	-2/3	0	0,393	4,94	85	0,053	0,152

После расчета коэффициентов уравнения регрессии, были получены следующие выражения:

- для параметра Ra :

$$y = 0,3953 - 0,0539x_1 - 0,0013x_2 + 0,0179(x_1^2 - 2/3) + 0,1111(x_2^2 - 2/3) + 0,1317x_1x_2 \quad , (4.17)$$

расчет адекватности модели по критерию Фишера при 24-х степенях свободы для старшей дисперсии, 9-ти степенях свободы для младшей дисперсии и 5 % уровне значимости, показал, что модель адекватна [10, 26]:

$$F = 2,426342 \leq F_{кр} = 2,9 \quad , (4.18)$$

- для параметра K :

$$y = 4,2433 + 0,4294x_1 - 0,2378x_2 - 0,1517(x_1^2 - 2/3) - 0,9233(x_2^2 - 2/3) - 0,77x_1x_2 \quad , (4.19)$$

модель адекватна:

$$F = 0,817 \leq F_{кр} = 2,9 \quad , (4.20)$$

- для параметра tp :

$$y = 67,778 + 4x_1 - 4,5x_2 - 8,33(x_1^2 - 2/3) - 13,83(x_2^2 - 2/3) - 6x_1x_2 \quad , (4.21)$$

после проверки по критерию Фишера, получаем, что модель адекватна:

$$F = 0,46773 \leq F_{кр} = 2,9 \quad , (4.22)$$

- для параметра S :

$$y = 0,043 - 0,006x_1 + 0,007x_2 - 0,002(x_1^2 - 2/3) + 0,004(x_2^2 - 2/3) - 0,004x_1x_2 \quad , (4.23)$$

после проверки по критерию Фишера, получаем, что модель адекватна:

$$F = 0,735 \leq F_{кр} = 2,9 \quad , (4.24)$$

- для параметра Sm :

$$y = 0,136 - 0,024x_1 + 0,069x_2 + 0,064(x_1^2 - 2/3) + 0,029(x_2^2 - 2/3) - 0,062x_1x_2 \quad , (4.25)$$

после проверки по критерию Фишера, получаем, что модель адекватна:

$$F = 0,685 \leq F_{кр} = 2,9 \quad , (4.26)$$

Осуществим переход от кодированных значений факторов к натуральным (4.9):

$$x_1 = \frac{\varphi' - 0}{10}; x_2 = \frac{\psi - 0}{14} \quad , (4.27)$$

После подстановки в выражения 4.17, 4.19, 4.21, 4.23 и 4.25 натуральных значений факторов, получаем окончательные математические модели, описывающие зависимость выходных параметров качества поверхности от факторов эксперимента:

$$Ra = 0,39 - 0,05\left(\frac{\varphi'}{10}\right) + 0,02\left(\frac{\varphi'}{10}\right)^2 + 0,11\left(\frac{\psi}{14}\right)^2 + 0,13\left(\frac{\varphi'}{10}\right)\left(\frac{\psi}{14}\right) \quad ,(4.28)$$

$$K = 4,96 + 0,43\left(\frac{\varphi'}{10}\right) - 0,24\left(\frac{\psi}{14}\right) - 0,15\left(\frac{\varphi'}{10}\right)^2 - 0,92\left(\frac{\psi}{14}\right)^2 - 0,77\left(\frac{\varphi'}{10}\right)\left(\frac{\psi}{14}\right) \quad ,(4.29)$$

$$tp = 82,55 + 4\left(\frac{\varphi'}{10}\right) - 4,5\left(\frac{\psi}{14}\right) - 8,33\left(\frac{\varphi'}{10}\right)^2 - 13,83\left(\frac{\psi}{14}\right)^2 - 6\left(\frac{\varphi'}{10}\right)\left(\frac{\psi}{14}\right) \quad ,(4.30)$$

$$S = 0,043 - 0,006\left(\frac{\varphi'}{10}\right) + 0,007\left(\frac{\psi}{14}\right) - 0,002\left(\frac{\varphi'}{10}\right)^2 + 0,004\left(\frac{\psi}{14}\right)^2 - 0,004\left(\frac{\varphi'}{10}\right)\left(\frac{\psi}{14}\right) \quad ,(4.31)$$

$$Sm = 0,136 - 0,024\left(\frac{\varphi'}{10}\right) + 0,069\left(\frac{\psi}{14}\right) + 0,064\left(\frac{\varphi'}{10}\right)^2 + 0,029\left(\frac{\psi}{14}\right)^2 - 0,062\left(\frac{\varphi'}{10}\right)\left(\frac{\psi}{14}\right) \quad ,(4.32)$$

Для дальнейшего анализа влияния направлений поворота СМП на рассматриваемые параметры качества обработанной выглаживанием поверхности, были построены графические отображения найденных аналитических выражений. Графики были построены в программе *MatLab* в виде трехмерных графиков функции от двух переменных [2, 11].

Область значений и направления углов поворота СМП по параметру наименьшей величины среднего арифметического отклонения профиля Ra , достигаемому после обработки выглаживанием, можно выявить при помощи графика поверхности отклика, представленного на рисунке 4.10.

Как видно из графика, минимальных значений параметр Ra достигается при обработке заготовок из стали 45 с установкой СМП по следующей схеме: угол φ' в интервале $[5^\circ; 10^\circ]$, угол ψ в интервале $[-14^\circ; 5^\circ]$. В данных диапазонах изменения углов установки инструмента наблюдаются показатели относительного внедрения СМП в металл заготовки $h/i = 0,15 \dots 0,3$, что обеспечивает стабильное протекание процесса ППД при обработке пластичных углеродистых сталей. Формируется очаг деформации третьего рода [56,57], с относительно небольшой глубиной внедрения СМП ниже впадин микронеровностей исходной

шероховатости. При достаточной жесткости технологической системы и подаче в зону обработки СОТС, обеспечивается отсутствие вибраций в процессе обработки.

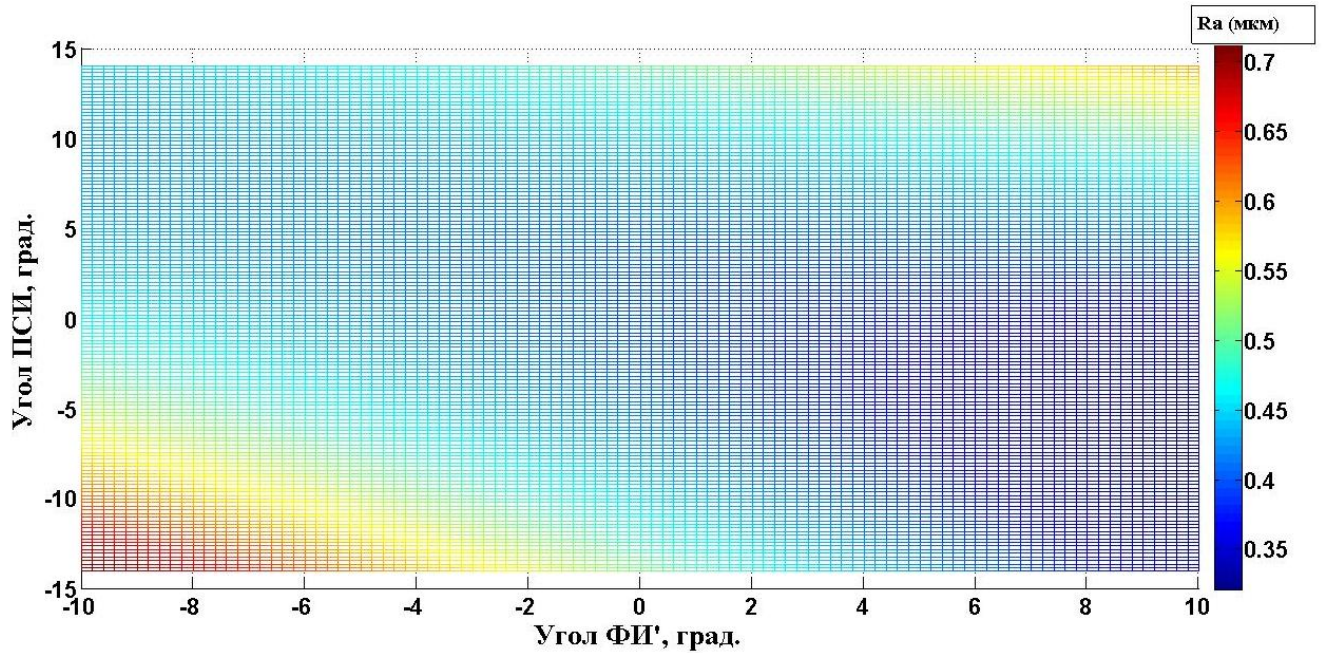


Рисунок 4.10 - Зависимость среднего арифметического отклонения профиля Ra от направления углов поворота СМП, технологический натяг $i = 40$ мкм. Сталь 45.

Схемы установки СМП с углами φ' в интервале $[0^\circ; 10^\circ]$ и ψ в интервале $[10^\circ; 14^\circ]$ не обеспечивают достаточной глубины внедрения СМП h (или относительного внедрения h/i , если рассматривать схему с жестким закреплением инструмента). В результате не происходит полного сглаживания исходных микронеровностей.

Установка СМП с изменением угла φ' в интервале $[-10^\circ; -5^\circ]$ обеспечивает максимальные показатели величины относительного внедрения (до $h/i = 0,43$) при обработке пластичных углеродистых сталей. Поэтому протекание процесса выглаживания сопровождается возникновением значительных сил и давлений в контакте. Возможно возникновение вибраций из-за избыточного нагрева области контакта и отжатый технологической системы. Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , обработанной поверхности при этом повышается.

Наибольшее значение относительной опорной длины профиля tr достигается при обработке поверхности образцов из стали 45 с углами установки СМП

(рисунок 4.11) φ' в интервале $[-5^\circ; 10^\circ]$ ψ в интервале $[-14^\circ; 5^\circ]$. Если учесть, что значение параметра tp , превышающее 60%, считается очень высоким показателем качества отделочной обработки. То можно сказать, что любая схема установки СМП, которая обеспечивает нормальное протекание процесса выглаживания (с образованием очага деформации третьего рода, без вибраций и перенаклепа ПС), обеспечивает получение значения требуемой величины относительной опорной длины профиля обработанной выглаживанием поверхности.

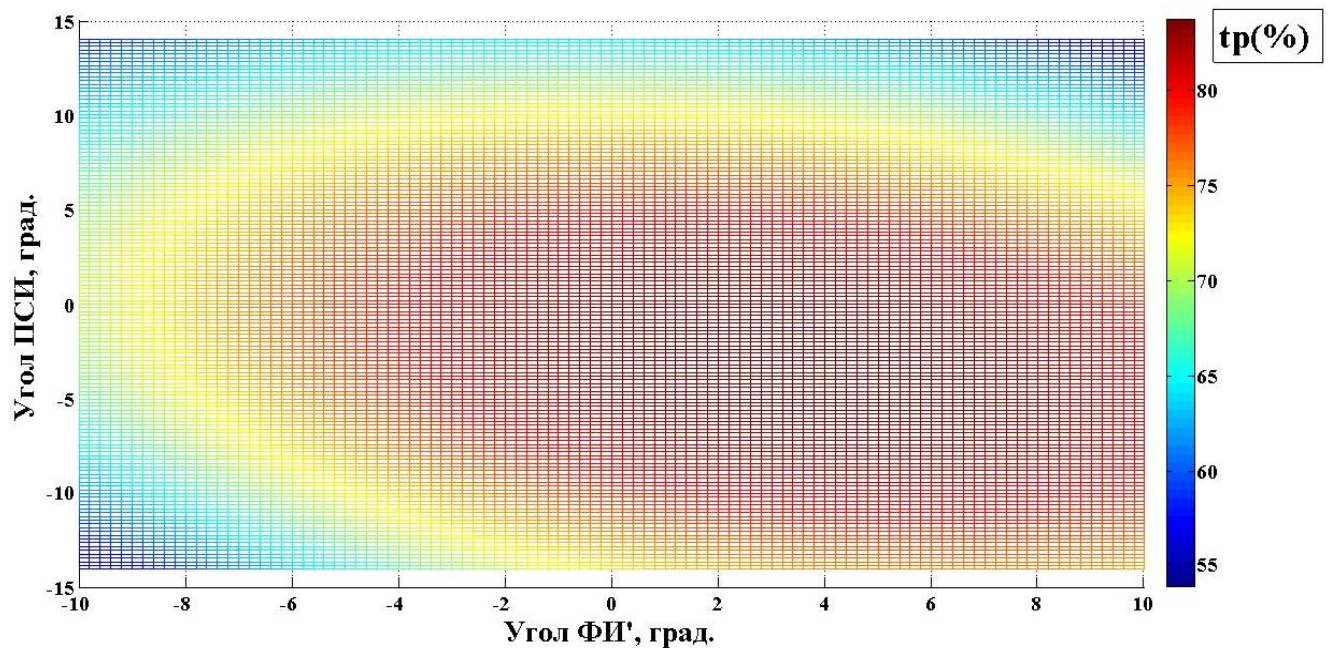


Рисунок 4.11 - Зависимость относительной опорной длины профиля tp от направления углов поворота СМП, технологический натяг $i = 40$ мкм. Сталь 45.

Зависимость коэффициента изменения шероховатости K от направлений поворота СМП представлена на рисунок 4.12 в виде графика поверхности отклика по параметру K . Область рациональных значений по данному параметру схожа с областью минимума для параметра Ra : угол φ' в интервале $[2^\circ; 10^\circ]$, угол ψ в интервале $[-14^\circ; 2^\circ]$.

Влияние углов установки СМП на величину среднего шага местных выступов профиля S при выглаживании заготовок из стали 45 с технологическим натягом $i = 40$ мкм проиллюстрировано графиком на рисунке 4.13. Зависимость среднего шага неровностей профиля Sm от величины и направления углов φ' и ψ , при тех же технологических факторах, показана на рисунке 4.14.

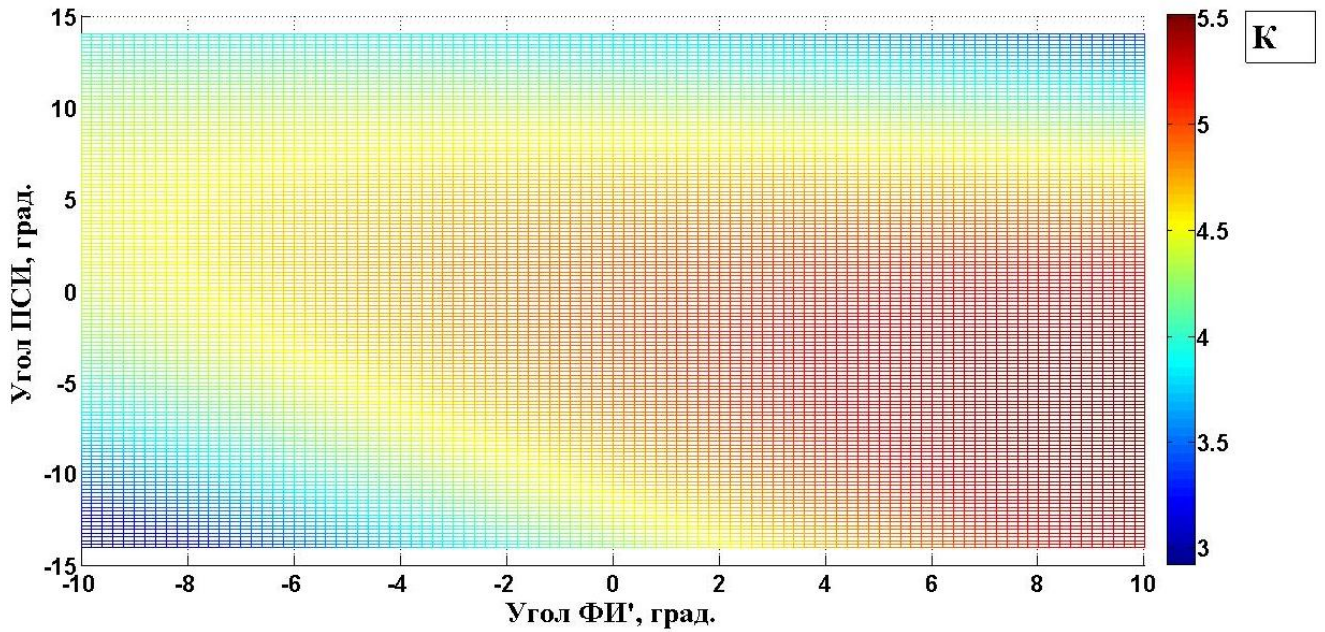


Рисунок 4.12 - Зависимость коэффициента изменения шероховатости K от направления и величины углов поворота СМП, технологический натяг $i = 40$ мкм. Сталь 45.

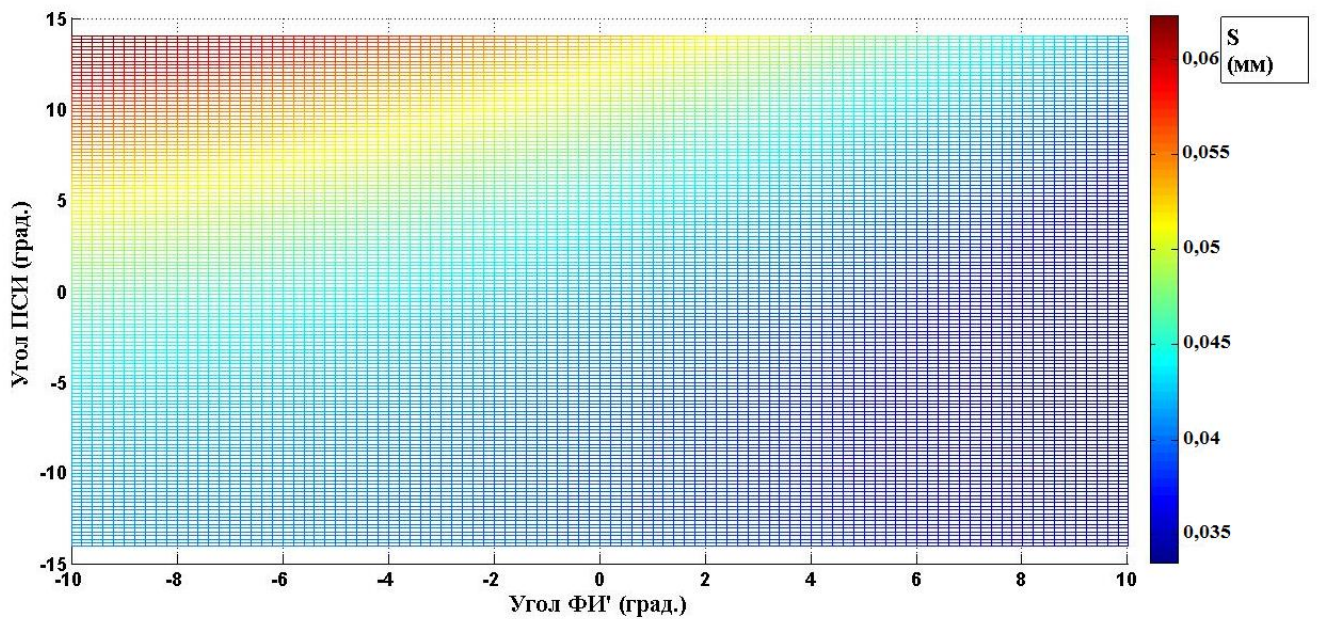


Рисунок 4.13 - Зависимость среднего шага местных выступов профиля S от направления углов поворота СМП, технологический натяг $i = 40$ мкм. Сталь 45.

Как видно из графиков на рисунках 4.13 и 4.14, зависимости величины шаговых параметров шероховатости S и S_m от углов установки СМП имеют весьма схожий характер. Изменение углов установки СМП позволяет гибко управлять достигаемыми шаговыми параметрами шероховатости обработанной поверхности. Пологий профиль микронеровностей после обработки ($S_m = 0,25 \dots 0,3$ мм; $S = 0,05 \dots 0,06$ мм) наблюдается в диапазонах углов установки СМП $\varphi' = -$

$10^\circ \dots 0^\circ$, $\psi = 5^\circ \dots 14^\circ$, которые соответствуют наиболее стабильному протеканию процесса выглаживания СМП.

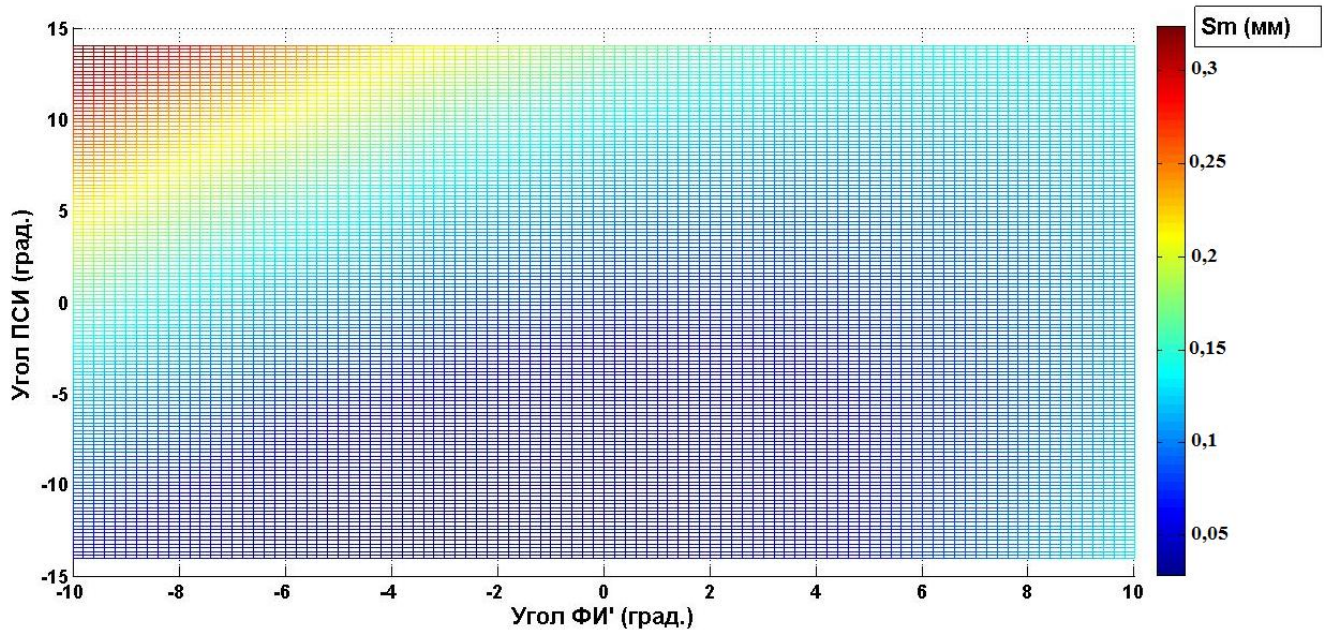


Рисунок 4.14 - Зависимость среднего шага неровностей профиля S_m от направления углов поворота СМП, технологический натяг $i = 40$ мкм. Сталь 45.

4.3.2 Экспериментальное исследование зависимости шероховатости обработанной поверхности от направления поворота СМП на образцах, выполненных из стали 75ХГСФ.

Условия проведения второго полного факторного эксперимента типа 2^2 :

- материал обрабатываемых образцов - подшипниковая сталь нового поколения 75ХГСФ, твердость HV 2500...2800 МПа;
- диаметр образцов 26 ... 28 мм;
- Ra исходное = 1,25 ... 1,95 мкм;
- инструмент - СМП фирмы *Sandvik Coromant* геометрии *SNGN 120712*, выполненные из материала 6090 (см. пункт 3.1.2);
- заданный технологический натяг $i = 40$ мкм;
- величина движения подачи инструмента $s = 0,08$ мм/об;
- скорость выглаживания $V = 55 - 85$ м/мин.;
- в качестве технологической среды применялась синтетическая смазочно-охлаждающая жидкость ТНК Универсал S.

Матрица планирования и полученные средние арифметические результаты опытов представлены в таблице 4.6. Каждый опыт повторялся трижды [10].

Таблица 4.6 - Матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^2 .

№ опыта	X_0	X_1	X_2	$X_1^2 - 2/3$	$X_2^2 - 2/3$	$X_1 X_2$	Ra, мкм	K	tp, %	S, мм	Sm, мм
1	+	-	-	1/3	1/3	+	0,715	2,96	67	0,074	0,163
2	+	+	-	1/3	1/3	-	0,306	7,38	91	0,073	0,258
3	+	-	+	1/3	1/3	+	0,636	3,37	43	0,023	0,067
4	+	+	+	1/3	1/3	-	0,698	2,88	29	0,031	0,051
5	+	-	0	1/3	-2/3	0	0,347	5,99	84	0,063	0,192
6	+	+	0	1/3	-2/3	0	0,485	3,95	51	0,066	0,048
7	+	0	-	-2/3	1/3	0	0,294	8,66	99	0,026	0,078
8	+	0	+	-2/3	1/3	0	0,381	5,59	63	0,060	0,129
9	+	0	0	-2/3	-2/3	0	0,373	5,93	76	0,058	0,115

После расчета коэффициентов уравнений регрессии, были получены следующие выражения:

- для параметра Ra :

$$y = 0,4705 + 0,0347x_1 - 0,0667x_2 + 0,1822(x_1^2 - 2/3) + 0,103(x_2^2 - 2/3) + 0,118x_1x_2 \quad , (4.33)$$

расчет адекватности модели по критерию Фишера при 24-х степенях свободы для старшей дисперсии, 9-ти степенях свободы для младшей дисперсии и 5 % уровне значимости, показал, что модель адекватна [10,26]:

$$F = 0,187791 \leq F_{кр} = 2,9 \quad , (4.34)$$

- для параметра K :

$$y = 5,1896 - 0,3161x_1 + 1,1922x_2 - 2,3072(x_1^2 - 2/3) - 0,1522(x_2^2 - 2/3) - 1,2275x_1x_2 \quad , (4.35)$$

модель адекватна:

$$F = 0,623467 \leq F_{кр} = 2,9 \quad , (4.36)$$

- для параметра tp :

$$y = 67 + 3,83x_1 + 20,33x_2 - 18,5(x_1^2 - 2/3) - 5(x_2^2 - 2/3) - 9,5x_1x_2 \quad , (4.37)$$

после проверки по критерию Фишера, получаем, что модель адекватна:

$$F = 0,15776 \leq F_{кр} = 2,9 \quad , (4.38)$$

- для параметра S :

$$y = 0,052 - 0,002x_1 + 0,01x_2 + 0,007(x_1^2 - 2/3) - 0,014(x_2^2 - 2/3) - 0,002x_1x_2 \quad , (4.39)$$

после проверки по критерию Фишера, получаем, что модель адекватна:

$$F = 2,36 \leq F_{кр} = 2,9 \quad , (4.40)$$

- для параметра Sm :

$$y = 0,175 + 0,009x_1 + 0,051x_2 + 0,029(x_1^2 - 2/3) - 0,008(x_2^2 - 2/3) - 0,025x_1x_2 \quad , (4.41)$$

после проверки по критерию Фишера, получаем, что модель адекватна:

$$F = 1,93 \leq F_{кр} = 2,9 \quad , (4.42)$$

После перехода от кодированных значений факторов к натуральным (4.21) и подстановки в уравнения регрессии 4.33, 4.35, 4.37, 4.39 и 4.41, получаем окончательные аналитические выражения зависимости параметров качества обработанной поверхности от варьируемых факторов эксперимента:

$$Ra = 0,28 + 0,03\left(\frac{\varphi'}{10}\right) - 0,07\left(\frac{\psi}{14}\right) + 0,18\left(\frac{\varphi'}{10}\right)^2 + 0,1\left(\frac{\psi}{14}\right)^2 + 0,12\left(\frac{\varphi'}{10}\right)\left(\frac{\psi}{14}\right) \quad , (4.43)$$

$$K = 6,8286 - 0,3161\left(\frac{\varphi'}{10}\right) + 1,1922\left(\frac{\psi}{14}\right) - 2,3072\left(\frac{\varphi'}{10}\right)^2 - 0,1522\left(\frac{\psi}{14}\right)^2 - 1,2275\left(\frac{\varphi'}{10}\right)\left(\frac{\psi}{14}\right) \quad , (4.44)$$

$$tp = 82,66 + 3,83\left(\frac{\varphi'}{10}\right) + 20,33\left(\frac{\psi}{14}\right) - 18,5\left(\frac{\varphi'}{10}\right)^2 - 5\left(\frac{\psi}{14}\right)^2 - 9,5\left(\frac{\varphi'}{10}\right)\left(\frac{\psi}{14}\right) \quad , (4.45)$$

$$S = 0,052 - 0,002\left(\frac{\varphi'}{10}\right) + 0,01\left(\frac{\psi}{14}\right) + 0,007\left(\frac{\varphi'}{10}\right)^2 - 0,014\left(\frac{\psi}{14}\right)^2 - 0,002\left(\frac{\varphi'}{10}\right)\left(\frac{\psi}{14}\right) \quad , (4.46)$$

$$Sm = 0,175 + 0,009\left(\frac{\varphi'}{10}\right) + 0,051\left(\frac{\psi}{14}\right) + 0,029\left(\frac{\varphi'}{10}\right)^2 - 0,008\left(\frac{\psi}{14}\right)^2 - 0,025\left(\frac{\varphi'}{10}\right)\left(\frac{\psi}{14}\right) \quad , (4.47)$$

Далее, были построены графические зависимости рассматриваемых параметров оптимизации от факторов эксперимента.

Поиск рациональной области величин и направлений углов поворота СМП по параметру среднего арифметического отклонения профиля Ra , выполнен посредством анализа трехмерного графика поверхности отклика, построенному в программе *MatLab* по аналитическому выражению 4.43. Данный график представлен на рис. 4.15.

При обработке выглаживанием с СМП образцов из стали 75ХГСФ, минимальных значений параметр Ra достигает при установке СМП по следующей схеме: угол φ' в интервале $[-10^\circ; 4^\circ]$, угол ψ в интервале $[-7^\circ; 14^\circ]$.

Величина относительного внедрения инструмента при таких углах установки СМП достигает близких к предельному значений $h/i = 0,3 \dots 0,4$. Также и ширина

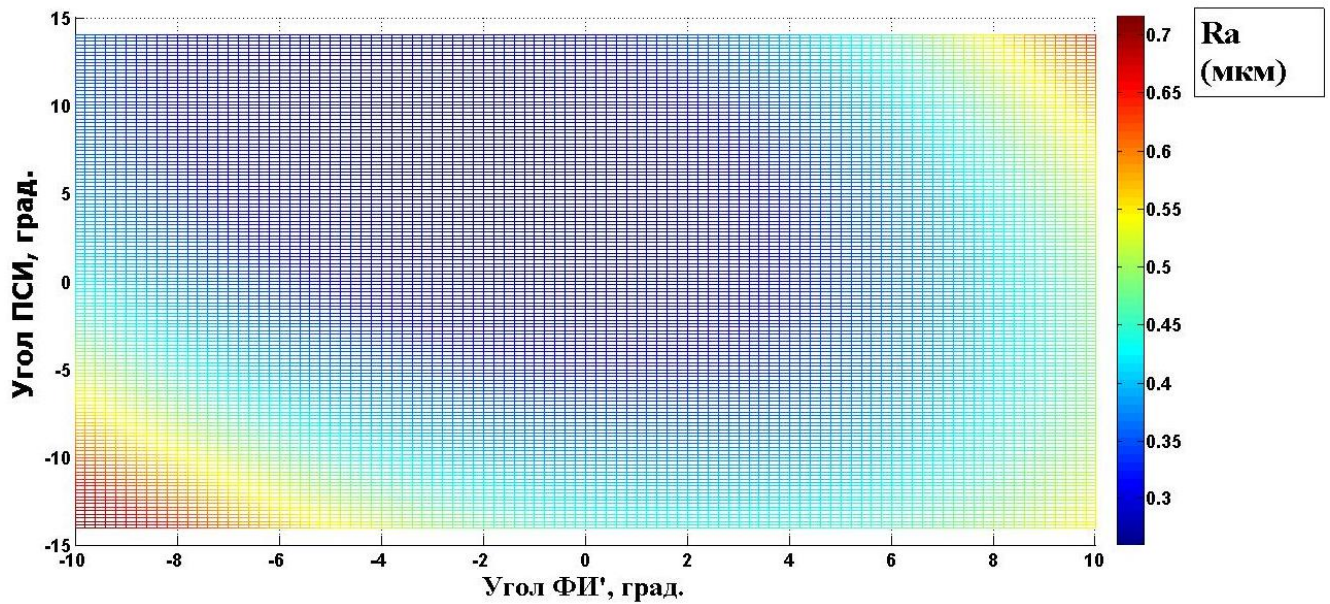


Рисунок 4.15 - Зависимость среднего арифметического отклонения профиля Ra от направления углов поворота СМП, технологический натяг $i = 40$ мкм. Сталь 75ХГСФ.

контакта, a достигает значительной величины (до 0,8 мм), что ведет к увеличению цикличности нагружения до $N = 9 \dots 11$ раз. При данных схемах установки СМП процесс выглаживания протекает с большой интенсивностью деформации и значительными силой и давлением в контактной области. Для обработки легированных и высокоуглеродистых сталей с большой твердостью и упругостью, данные силовые параметры процесса позволяют достичь минимальной высоты микронеровностей обработанной поверхности.

Увеличение углов установки СМП свыше обозначенных пределов, при технологическом натяге $i = 40$ мкм, приводит к значительному увеличению силы выглаживания (свыше 1100 Н). Как следствие, возрастает вероятность возникновения вибраций из-за отжатий технологической системы, и ухудшение качества обработанной поверхности. В частности, это влечет за собой увеличение среднего арифметического отклонения профиля Ra .

После проведения анализа графических зависимостей относительной опорной длины профиля tp (рисунок 4.16) и коэффициента улучшения шероховатости K (рисунок 4.17) от величины и направлений углов поворота СМП, построенных в программе *MatLab*, были выявлены области рациональных углов установки СМП. По параметру tp : угол φ' в интервале $[-8^\circ; 8^\circ]$, угол ψ в интервале $[-5^\circ; 14^\circ]$.

По параметру K : угол φ' в интервале $[-10^\circ; 5^\circ]$, угол ψ в интервале $[-3^\circ; 14^\circ]$. В случае оценки качества обработки выглаживанием образцов из стали 75ХГСФ по параметру относительной опорной длины профиля tp , так же, как и в случае с обработкой образцов из стали 45, можно сделать вывод, что все схемы установки СМП, которые обеспечивают стабильное протекание процесса ППД, позволяют достигать удовлетворительного качества поверхности по параметру tp .

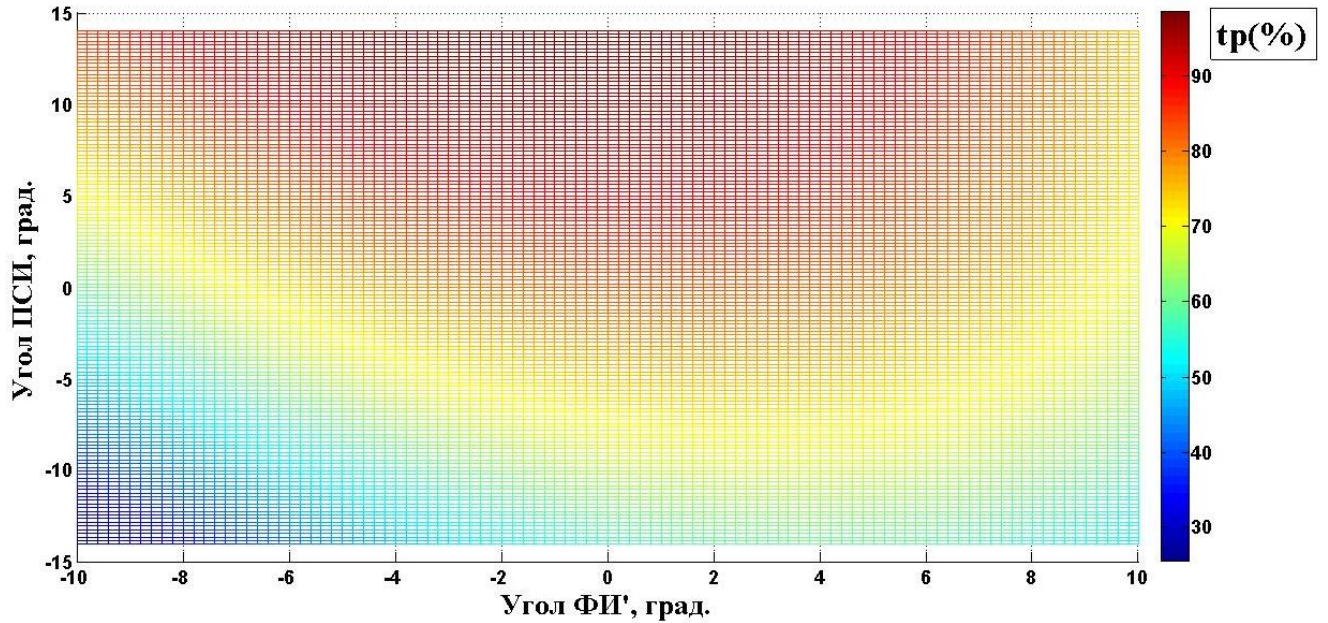


Рисунок 4.16 - Зависимость относительной опорной длины профиля tp от направления углов поворота СМП, технологический натяг $i = 40$ мкм. Сталь 75ХГСФ.

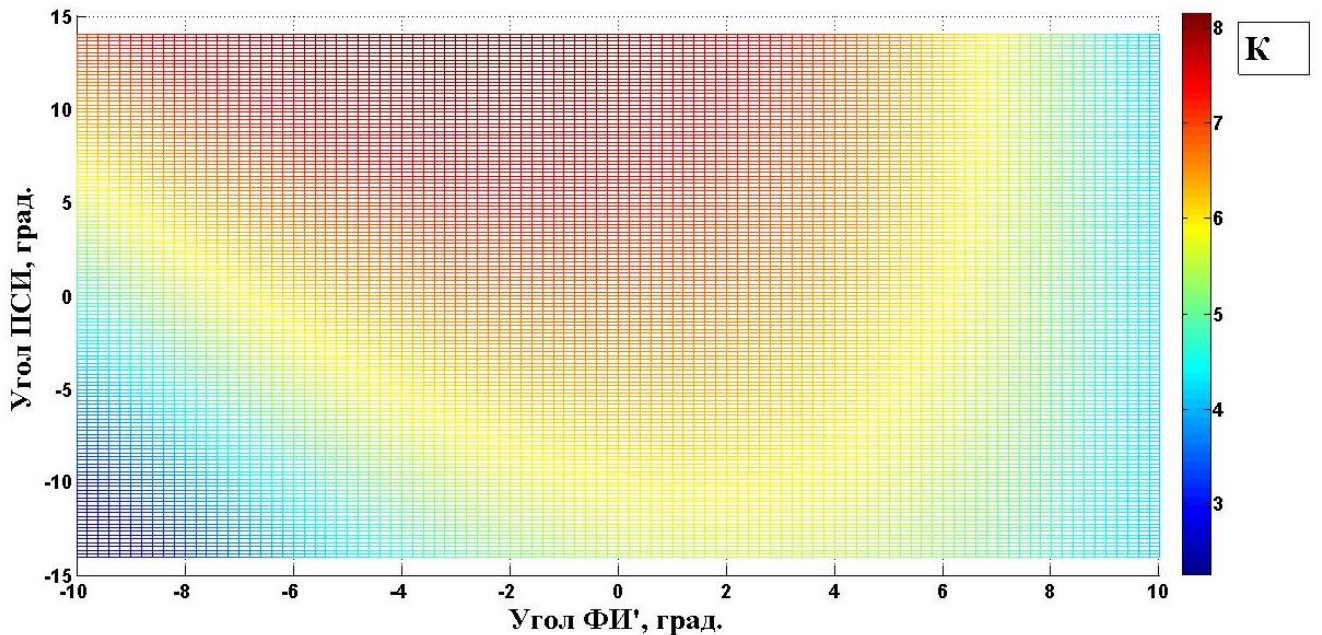


Рисунок 4.17 - Зависимость значения коэффициента изменения шероховатости K от направления углов поворота СМП, технологический натяг $i = 40$ мкм. Сталь 75ХГСФ.

Зависимости шаговых параметров шероховатости S_m и S от направления и величины углов поворота φ' и ψ при выглаживании образцов из стали 75ХГСФ (рисунки 4.18 и 4.19), имеют схожий характер, и, вместе с тем, несколько отличаются от аналогичных зависимостей, выявленных при выглаживании образцов из стали 45.

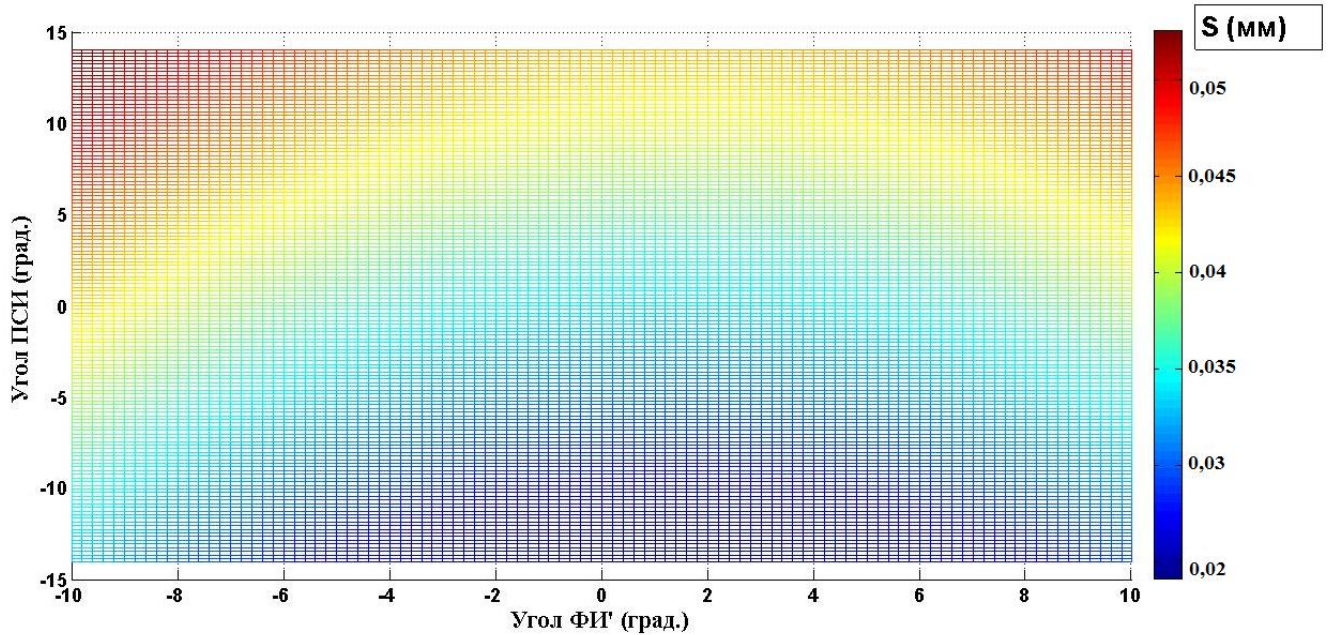


Рисунок 4.18 - Зависимость среднего шага местных выступов профиля S от направления углов поворота СМП, технологический натяг $i = 40$ мкм. Сталь 75ХГСФ.

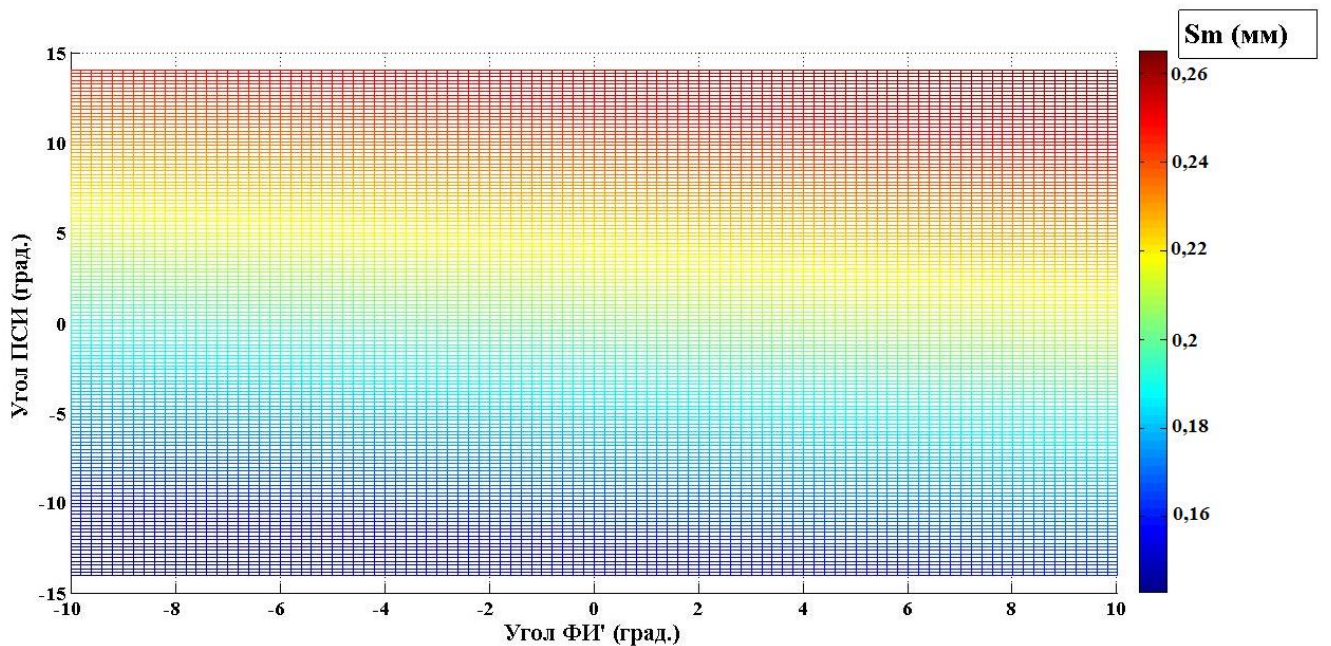


Рисунок 4.19 - Зависимость среднего шага неровностей профиля S_m от направления углов поворота СМП, технологический натяг $i = 40$ мкм. Сталь 75ХГСФ.

Установка СМП с углами поворота φ' во всем интервале варьирования $[-10^\circ; 10^\circ]$ и ψ в интервале $[5^\circ; 14^\circ]$ при выглаживании заготовок из стали 75ХГСФ с технологическим натягом $i = 40$ мкм, позволяет достигнуть обработанной поверхности с пологим микропрофилем без резких выступов и впадин.

4.3.3 Анализ результатов экспериментальных исследований зависимости шероховатости обработанной поверхности от величины и направления углов установки СМП.

В результате статистического анализа экспериментальных данных были определены области рациональных значений углов установки СМП и уравнения регрессии, описывающие аналитически зависимости параметров шероховатости от технологического натяга и углов установки СМП. Анализ графических зависимостей и профилограмм поверхностей экспериментальных образцов показал, что различные сочетания величин и направлений углов установки СМП обеспечивают большое количество разнообразных сочетаний достигаемых параметров качества поверхности.

При обработке наружных цилиндрических поверхностей выглаживанием с различными схемами установки СМП, характер микропрофиля поверхностного слоя значительно варьируется. Например, достижение минимума по величине среднего арифметического отклонения профиля Ra не значит одновременное достижение максимальной величины шаговых параметров шероховатости (S и Sm) и опорной длины профиля tr (рисунок 4.20). Поэтому, в некоторых случаях, невозможно корректно оценивать качество обработанной поверхности по какому-либо одному параметру шероховатости.

Для практического применения рассматриваемого метода обработки очень важно иметь возможность управления достигаемыми параметрами качества поверхностей получаемых изделий с помощью назначения рациональных режимов обработки и способов установки инструмента. Полученные, в данной

работе, аналитические зависимости параметров шероховатости обработанной поверхности от параметров установки СМП (углов φ' и ψ) и технологического натяга i , а также области рациональных значений параметров качества, были использованы при разработке методики расчета и назначения рациональных режимов выглаживания с СМП и способов установки инструмента.

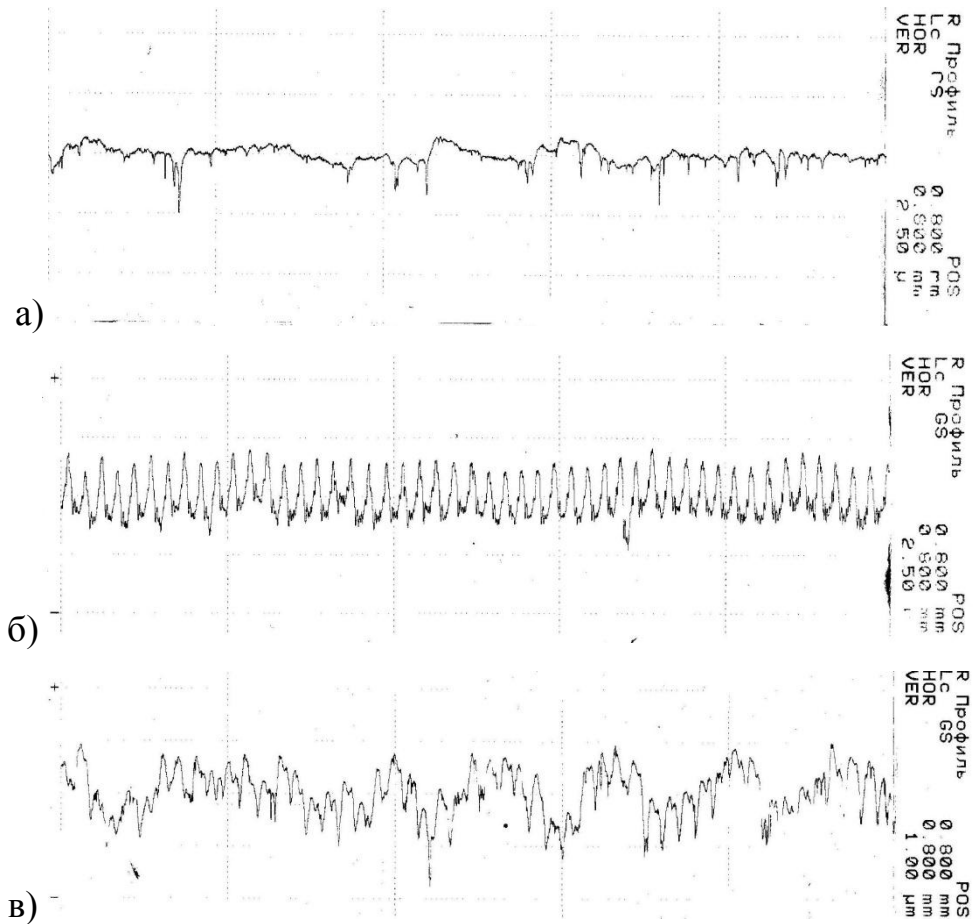


Рисунок 4.20 - Профилограммы образцов из стали 75ХГСФ, обработанных выглаживанием с различными схемами установки СМП: а) углы $\varphi'=10^\circ$, $\psi=14^\circ$, натяг 40 мкм. $Ra=0,266$ (мкм), $tp = 91\%$, $S = 0,074$ (мм), $Sm = 0,331$ (мм); б) углы $\varphi' = -10^\circ$, $\psi = -14^\circ$, натяг 40 мкм. $Ra=0,711$ (мкм), $tp = 29\%$, $S = 0,031$ (мм), $Sm = 0,082$ (мм); в) углы $\varphi'=0^\circ$, $\psi=0^\circ$, натяг 40 мкм. $Ra=0,376$ (мкм), $tp = 76\%$, $S = 0,058$ (мм), $Sm = 0,173$ (мм).

4.4 Экспериментальное исследование упрочнения поверхностного слоя заготовок, обработанных выглаживанием СМП.

Для определения упрочнения поверхностного слоя заготовок, обработанных выглаживанием при установке СМП с определенными экспериментально рациональными углами и технологическим натягом, были выполнены измерения микротвердости HV шлифов, изготовленных из выглаженных образцов. По результатам измерений построены графические зависимости, отображающие распределение микротвердости HV по глубине поверхностного слоя обработанных образцов из стали 45 (рисунок 4. 21).

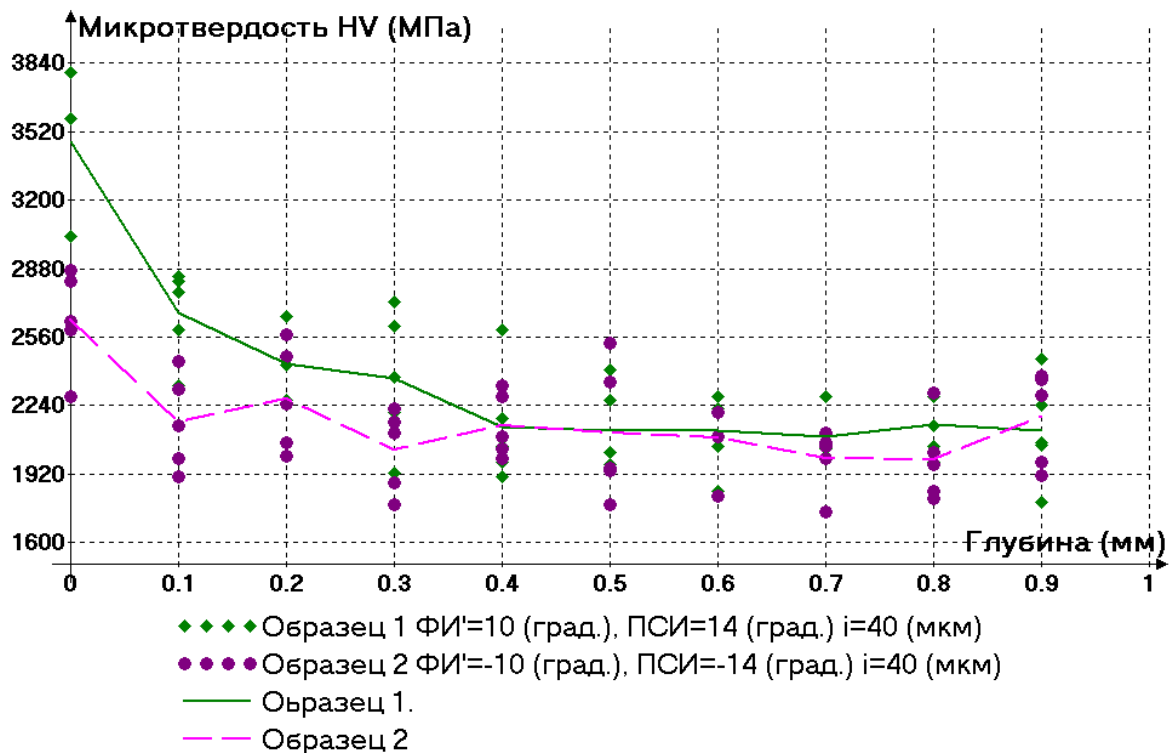


Рисунок 4.21 – Распределение микротвердости по глубине выглаженных образцов из стали 45.

Натяг $i = 40$ (мкм), подача $s = 0,08$ (мм/об), скорость $V = 100$ (м/мин).

Степень деформационного упрочнения (наклеп) u_i выглаженной поверхности определялась по формуле [46]:

$$u_i = \frac{HV_{\max} - HV_0}{HV_0} \times 100\% \quad (4.48)$$

где HV_{\max} , HV_0 – максимальная и исходная микротвердость поверхностного слоя (МПа). Наклеп u_i обработанных выглаживанием поверхностей заготовок из стали

45 составил 60...80 %. Это позволяет сделать вывод, о том, что выглаживание СМП при рациональных режимах (технологический натяг, подача) и углах установки инструмента не приводит к перенаклепу поверхностного слоя обработанных заготовок.

4.5 Экспериментальное исследование влияния износа СМП на шероховатость выглаженных поверхностей.

Было выполнено экспериментальное исследование влияния износа СМП на шероховатость поверхности выглаженных заготовок. Образцы из стали 45 с шероховатостью $Ra = 1,8...2,0$ (мкм) выглаживались СМП из керамики марки ВОК-63 (по маркировке фирмы-производителя *Sandvik Coromant* – 650), установленной по схеме X0Y0Z0 (углы установки $\phi'=\psi=0^\circ$). Режимы обработки: натяг $i = 40$ (мкм), подача $s = 0,08$ (мм/об), скорость $V = 90...100$ (м/мин), технологическая среда – синтетическая СОТС ТНК Универсал S. Максимально допустимый износ СМП определялся по увеличению шероховатости обработанной поверхности свыше $Ra = 0,8$ (мкм). Катастрофический износ рабочей цилиндрической поверхности СМП, площадью $1,3$ (мм²) был зафиксирован после прохождения СМП пути выглаживания более 3800 метров (рис. 4.22), что составило 0,55 часов машинного времени обработки (рис. 4.23).

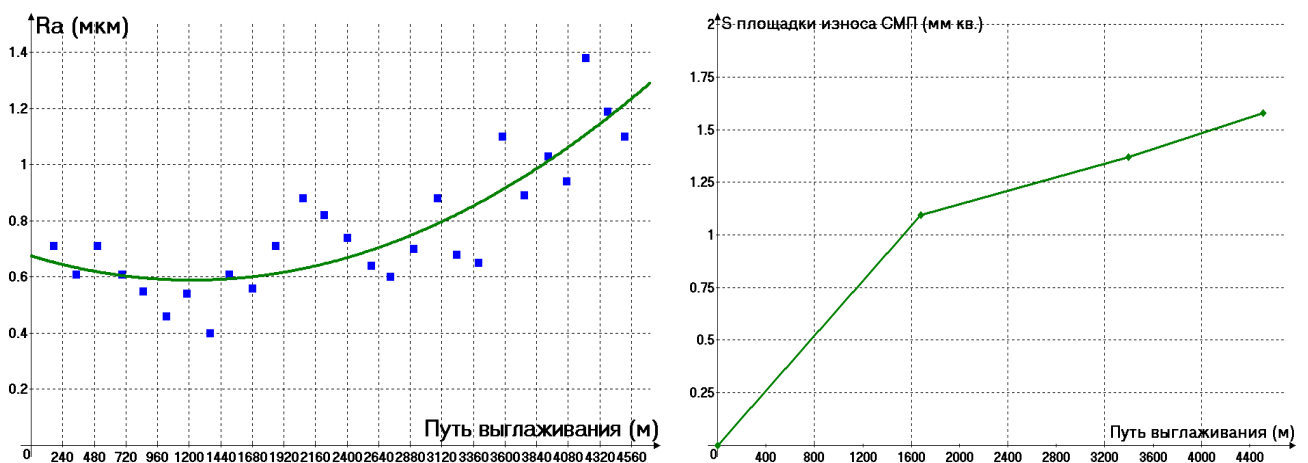


Рисунок 4.22 – Влияние пути выглаживания СМП на шероховатость и зависимость величины износа от пути выглаживания.



Рисунок 4.23 – Зависимость шероховатости выглаженной поверхности от времени работы СМП.

Экспериментальные данные по износу СМП подробно изложены в Приложении Г.

4.6 Технологические рекомендации по обеспечению параметров шероховатости обработанной выглаживанием поверхности.

На основе анализа массива экспериментальных данных, полученных в данной работе, а также теоретических исследований, можно предложить некоторые технологические рекомендации для чистовой отделочной обработки выглаживанием СМП и изменением способа установки инструмента. Использование данных рекомендаций (таблица 4.7) позволяет достигать требуемых параметров качества обработанной поверхности:

- среднего арифметического отклонения профиля R_a ;
- относительной опорной длины профиля t_p ;
- среднего шага неровностей профиля S_m ;
- среднего шага местных выступов профиля S ;
- коэффициента изменения шероховатости $K = Ra_{исх}/Ra$.

Данные рекомендации основаны на экспериментальных исследованиях метода выглаживания с жестким закреплением инструмента. Но также применимы и к

обработке по упругой схеме. Для использования данных рекомендаций при выглаживании с упругим закреплением СМП необходимо дополнительно рассчитать силу выглаживания P по методике, изложенной в главе 5 настоящей работы.

Таблица 4.7 - Технологические рекомендации.

Параметр шероховатости.	Технологические режимы	Углы установки СМП	
		φ'	ψ
Углеродистые конструкционные стали ($HV \leq 2000$ МПа).			
$Ra < 0,25$ мкм	Движение подачи $s = 0,08 \dots 0,1$ мм/об; скорость $V = 50 \dots 120$ м/мин; заданный натяг $i = 40 \dots 60$ мкм; (сила $P = 400 \dots 1000$ Н). СОТС обязательны. Исходная шероховатость $Ra = 1.2 \dots 2,0$ мкм.	$5^\circ \dots 10^\circ$	$-14^\circ \dots -5^\circ$
$tp > 70\%$		$-5^\circ \dots 10^\circ$	$-14^\circ \dots -5^\circ$
$Sm = 0,25 \dots 0,3$ мм		$-10^\circ \dots 0^\circ$	$5^\circ \dots 14^\circ$
$S > 0,06$ мм		$-10^\circ \dots 0^\circ$	$5^\circ \dots 14^\circ$
$K > 6$		$2^\circ \dots 10^\circ$	$-14^\circ \dots 2^\circ$
Легированные конструкционные стали ($HV > 2000$ МПа).			
$Ra < 0,25$ мкм	Движение подачи $s = 0,08 \dots 0,1$ мм/об; скорость $V = 50 \dots 120$ м/мин; заданный натяг $i = 40 \dots 60$ мкм; (сила $P = 600 \dots 1100$ Н). СОТС обязательны. Исходная шероховатость $Ra = 1.2 \dots 2,0$ мкм.	$-10^\circ \dots 4^\circ$	$-7^\circ \dots 14^\circ$
$tp > 70\%$		$-8^\circ \dots 8^\circ$	$-5^\circ \dots 14^\circ$
$Sm = 0,2 \dots 0,3$ мм		$-10^\circ \dots 10^\circ$	$5^\circ \dots 14^\circ$
$S > 0,05$ мм		$-10^\circ \dots 10^\circ$	$5^\circ \dots 14^\circ$
$K > 6$		$-10^\circ \dots 5^\circ$	$-3^\circ \dots 14^\circ$

ГЛАВА 5. МЕТОДИКА НАЗНАЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УГЛОВ УСТАНОВКИ СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАТЯГА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ВЫГЛАЖЕННЫХ НАРУЖНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.

Методика назначения рациональных режимов механической обработки является важным фактором, от которого во многом зависит достигаемое качество продукции машиностроительных и металлообрабатывающих производственных предприятий. В данной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния силовых параметров выглаживания (силы и технологического натяга) и углов установки СМП на достигаемые параметры качества обработанной поверхности. Получены соответствующие аналитические и графические зависимости. Однако, для практического применения полученных данных, необходимо решить обратную задачу – а именно: разработать алгоритм расчета и выбора способов установки СМП и силовых параметров в зависимости от требуемой шероховатости обработанной поверхности.

5.1 Методика расчета и назначения рациональных режимов выглаживания и параметров установки СМП по заданным параметрам шероховатости.

Методика расчета и назначения рациональных углов установки СМП и заданного натяга (силы выглаживания), обеспечивающих требуемые параметры шероховатости, основана на решении уравнений (4.28) – (4.32) и (4.43) – (4.47) для нахождения значений углов установки φ' и ψ , соответствующих заданным параметрам качества обработанной поверхности. Если оценка проводится только по одному параметру, то решается соответствующее уравнение с двумя неизвестными, если параметров шероховатости два и более – решается система соответствующих уравнений.

После нахождения величин и направления углов поворота СМП φ' и ψ , удовлетворяющих заданным значениям отдельных параметров качества, необходимо вычислить соответствующее им значение силы выглаживания. Для

этого требуется найти значение площади пятна контакта F заготовки и СМП, которая соответствует схеме установки инструмента, определенной двумя углами поворота СМП φ' и ψ . Для этого использовалось выражение, полученное регрессионным анализом экспериментальных данных (рисунок 2.12):

$$F = 0.00187\varphi'^2 - 0.00746\varphi' + 0.00074\psi^2 + 0.00148\psi + 0.179 \quad ,(5.1)$$

Вычислив площадь пятна контакта, соответствующую углам установки СМП, можно рассчитать силу выглаживания при учете комплекса исходных факторов: радиуса при вершине СМП, диаметра обрабатываемой заготовки, твердости и физико-механических характеристик обрабатываемого материала. Сила выглаживания P определяется из уравнения, полученного путем преобразования формулы (2.1):

$$\frac{F}{0,75} - \frac{P}{HV} = 2,32 \times \left(\frac{1-\mu}{E} R^* P \right)^{2/3} \quad ,(5.2)$$

где F - площадь контакта (мм^2), P - сила выглаживания (Н), R^* - приведенный радиус (мм), HV - твердость материала заготовки (МПа), E и μ - модуль Юнга и коэффициент Пуассона обрабатываемого материала.

Уравнение (5.2) является трансцендентным и его решение можно найти графическим методом, т.е. решением уравнения будут координаты пересечения графиков двух функций:

$$f(P) = \frac{F}{0,75} - \frac{P}{HV}; g(P) = 2,32 \times \left(\frac{1-\mu}{E} R^* P \right)^{2/3} \quad ,(5.3)$$

Для "жесткого" выглаживания после определения силы необходимо рассчитать величину заданного технологического натяга i , обеспечивающего требуемые силовые параметры процесса обработки. Для этого была использована формула (5.4), связывающая величину задаваемого технологического натяга с силой выглаживания, жесткостью технологической системы и глубиной внедрения СМП в металл заготовки [57]. Жесткость технологической системы необходимо определить опытным путем.

$$i = P \left(\frac{1}{J} \right) + h \quad ,(5.4)$$

где i – технологический натяг (мм), h – глубина внедрения СМП (мм), J – жесткость технологической системы (Н/мм).

Глубина внедрения h , соответствующая способу установки инструмента определенному углами поворота СМП φ' и ψ , вычисляется по выражению, полученному посредством регрессионного анализа эмпирической зависимости (рисунок 2.11):

$$h = 0.043277\varphi'^2 - 0.18758\varphi' - 0.013\psi^2 - 0.0078\psi + 3.35 \quad ,(5.5)$$

Таким образом, воспользовавшись приведенными выше выражениями, можно рассчитать значения силовых технологических параметров и углов установки СМП, необходимые для достижения заданных параметров шероховатости при обработке выглаживанием наружных цилиндрических и конических поверхностей заготовок, выполненных из стали 45, 35, 40Х, 40Г, 50, 50Г2; а также из подшипниковой стали 75ХГСФ. Последовательность действий по решению данной задачи можно представить в виде алгоритма, изображенного на рисунке 5.1.

5.2 Производственные испытания метода выглаживания с изменением способа установки СМП.

Производственные испытания проводились на заводе приборных подшипников ОАО "ОК-ЛОЗА". Для проведения испытаний была выбрана деталь из комплекта сменных частей технологической оснастки для шлифования - втулка рабочего приспособления станка Штудер 500 для обработки колец подшипников (рисунок 5.2).

Как видно из чертежа, ранее эта деталь изготавливалась из закаленной стали ШХ 15. В связи с тем, что на заводе в качестве основной подшипниковой стали внедрена новая марка стали 75ХГСФ - было принято решение использовать этот материал для производства деталей технологической оснастки и специального инструмента, требованиям к которым, удовлетворяет физико-химические и механические свойства стали 75ХГСФ.

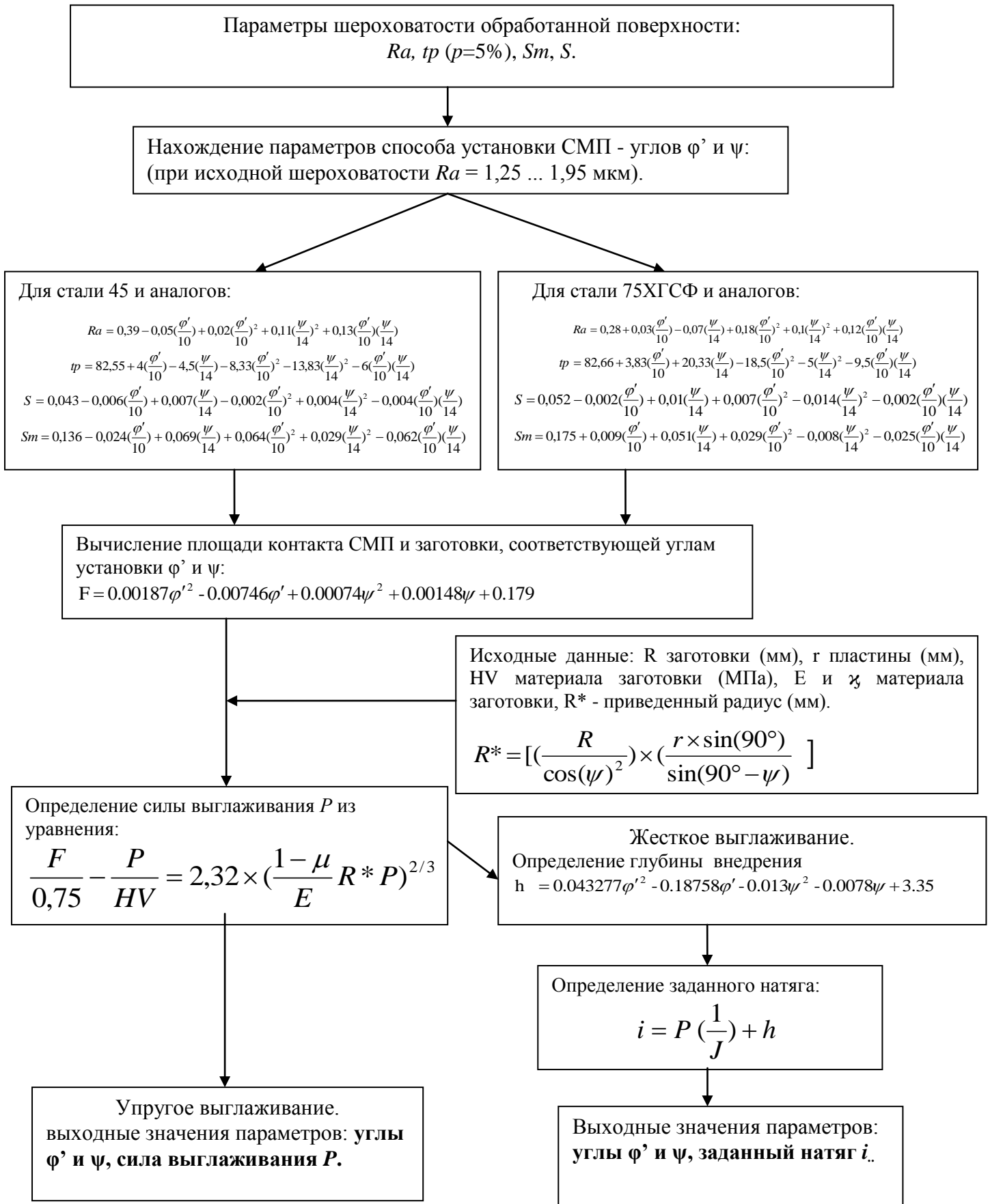


Рисунок 5.1 - Алгоритм расчета и выбора рациональных углов установки СМП и силы (заданного натяга) выглаживания заготовок из стали 45 и 75ХГСФ.

В технологическом процессе изготовления данной втулки выглаживание с применением СМП было предложено для окончательной обработки базовой поверхности A (см. рисунок 5.2), которая является конусом Морзе №3. Кроме требований по точности формы, к данной поверхности предъявлено требование к шероховатости поверхности по параметру среднего арифметического отклонения профиля $Ra \leq 0,4$ мкм. В существующем технологическом процессе изготовления данной втулки для окончательной обработки базовой поверхности A применялось шлифование. Было предложено заменить шлифование отделочно-упрочняющей обработкой выглаживанием за один установ с токарной обработкой. Это повышает концентрацию операций и сокращает количество оборудования, используемого в производстве детали. Применяемое оборудование - универсальный токарно-винторезный станок 16К20, технологическая оснастка: оправка диаметров 12,2 (мм) для обработки деталей типа втулка, специальное станочное приспособление для реализации обработки выглаживанием на универсальных токарных станках (пункт 3.1.3). Технологическая среда - синтетическая смазочно-охлаждающая жидкость ТНК Универсал S.

Для достижения требуемого качества поверхности по параметру Ra необходимо назначить рациональные технологические режимы обработки и рассчитать параметры установки инструмента (углы поворота СМП) пользуясь разработанной методикой (пункт 5.1).

Так как оценка качества обработанной поверхности проводится только по одному параметру Ra (показатели точности формы поверхности достигаются на предшествующих токарных операциях) - данную задачу поиска рациональных углов установки СМП и технологического натяга можно представить следующим образом:

$$R_a = f(\varphi', \psi, i) \quad , (5.6)$$

Предельное значение показателя качества $Ra_{\text{предельное}}$ принимаем равным 0,4 мкм по требованию чертежа детали (рисунок 5.2). Задаваемое значение

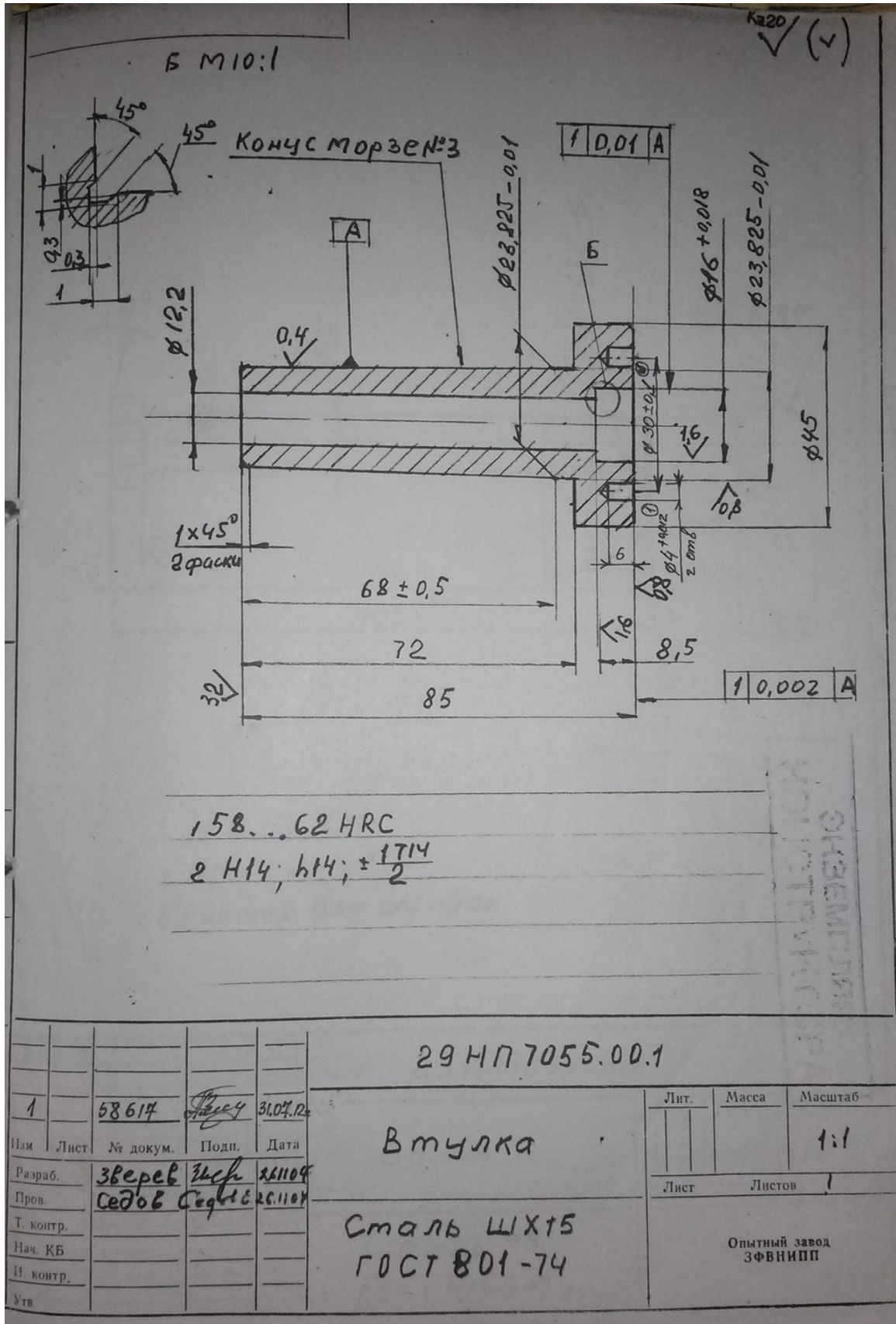


Рисунок 5.2 - Чертеж детали, использованной для производственных испытаний.

показателя $Ra_{\text{заданное}}$ назначим равным 0,35 мкм (из условия $Ra_{\text{заданное}} \leq Ra_{\text{предельное}}$).

Величина движения подачи и скорости главного движения обработки были назначены исходя из опытных данных и технологических рекомендаций других авторов [6, 25, 45, 68]: движение подачи $s=0,08$ (мм/об), скорость $V \approx 100$ м/мин.

Были рассчитаны рациональные углы установки СМП φ' и ψ для достижения заданного значения $Ra = 0,35$ мкм (которое меньше предельного $Ra = 0,4$ мкм). Так как обрабатываемая заготовка изготовлена из легированной стали твердостью свыше 2000 HV (Мпа), расчет проведем с помощью выражения (4.43):

$$Ra = 0,28 + 0,03\left(\frac{\varphi'}{10}\right) - 0,07\left(\frac{\psi}{14}\right) + 0,18\left(\frac{\varphi'}{10}\right)^2 + 0,1\left(\frac{\psi}{14}\right)^2 + 0,12\left(\frac{\varphi'}{10}\right)\left(\frac{\psi}{14}\right) = 0,35(\text{мкм})$$

Решив данное уравнение находим: угол $\varphi' = 5^\circ$, угол $\psi = -3^\circ$.

Далее, с помощью выражения (5.1), была найдена величина площади пятна контакта инструмента и обрабатываемой заготовки, которая соответствует схеме обработки при найденных углах установки СМП.

$$F = 0.00187 \times 5^2 - 0.00746 \times 5 + 0.00074 \times (-3)^2 + 0.00148 \times (-3) + 0.179 = 0.191(\text{мм}^2)$$

Сила выглаживания, соответствующая данной схеме установки СМП, была вычислена путем решения уравнения (5.3). Подставим величину площади контакта $F = 0,191(\text{мм}^2)$, твердость материала заготовки $HV = 6530$, модуль Юнга для стали 75ХГСФ $E = 2,08 \times 10^5$ (МПа), коэффициент Пуассона для стали 75ХГСФ $\mu = 0,297$; радиус заготовки $R = 11,9$ (мм); радиус вершины СМП $r = 1,2$ (мм). Приведенный радиус $R^* = (R \times r)^{1/2} = 3,8$ (мм) Получим:

$$f(P) = \frac{0.191}{0,75} - \frac{P}{6530}; g(P) = 2,32 \times \left(\frac{1 - 0.297}{2.08 \times 10^5} \times 3.8 \times P\right)^{2/3}$$

Решив уравнение относительно P [1,2] графически (рисунок 5.3), получим величину силы выглаживания $P = 893$ (Н). Так как при производственных испытаниях было предложено применить схему выглаживания с жестким закреплением инструмента, необходимо найти величину заданного технологического натяга, которая обеспечит обработку с найденной силой выглаживания при установке СМП с углами поворота $\varphi' = 5^\circ$, угол $\psi = -3^\circ$.

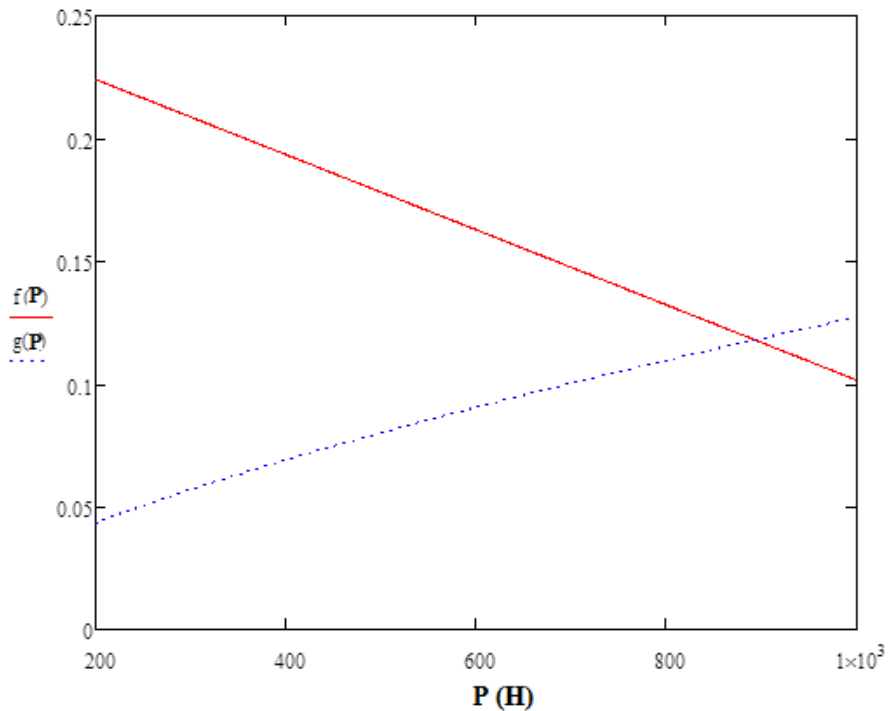


Рисунок 5.3 - Решение уравнения для нахождения силы выглаживания.

Для нахождения величины i технологического натяга необходимо предварительно вычислить величину действительного внедрения инструмента в металл заготовки, которая соответствует рассматриваемой схеме установки СМП (углы поворота), физико-механическим характеристикам обрабатываемого материала и диаметру заготовки. Величину действительного внедрения рассчитаем с помощью выражения (5.5). В данном случае имеем:

$$h = 0.043277 \times 5^2 - 0.18758 \times 5 - 0.013 \times (-3)^2 - 0.0078 \times (-3) + 3.35 = 3.4 (\text{мкм})$$

Теперь вычислим величину технологического натяга, для чего воспользуемся формулой (5.4). Данное выражение связывает величину технологического натяга i с силой выглаживания P , величиной глубины внедрения h , жесткостью технологической системы J . Жесткость технологической системы была измерена с помощью динамометра сжатия и микрометрического индикатора перемещений, средняя жесткость $J = 22,62$ (Н/мкм. После подстановки всех значений известных величин в выражение (5.4), получим искомую величину заданного технологического натяга:

$$i = 893 \times \left(\frac{1}{22,62} \right) + 3.4 = 42,88 \approx 43 (\text{мкм})$$

Таким образом, были вычислены необходимые углы установки СМП $\varphi' = 5^\circ$, угол $\psi = -3^\circ$, и требуемый технологический натяг $i = 43$ мкм.

После обработки выглаживанием базовой поверхности A втулки с определенными выше технологическими параметрами была достигнута требуемая величина параметра шероховатости $Ra=0,356 \leq Ra_{предельное}$. Погрешности формы базовой поверхности A (конус Морзе №3) не вышли за пределы поля допуска.

Применение в качестве окончательной обработки выглаживания, при изготовлении рассматриваемой детали, позволило исключить из технологического процесса операцию шлифования. Это уменьшило машинное время, требуемое на изготовление данной втулки, увеличило коэффициент концентрации операции, уменьшило суммарную погрешность базирования (так как окончательная обработка выглаживанием выполнялась за один установ с предшествующими токарными операциями), уменьшило загрузку шлифовального станка (на ОАО "ОК-ЛОЗА" шлифовальные станки сильно загружены в основном производстве подшипников).

В результате проведенных испытаний установлено, что точность и шероховатость обработанной выглаживанием поверхности соответствуют требованиям чертежа детали, что позволяет применять разработанный процесс для обработки наружных конических и цилиндрических поверхностей деталей, изготовленных из стали марки 75ХГСФ. Акт о проведении производственных испытаний представлен в Приложении Д.

Выводы.

- 1) Разработана методика расчета и назначения рациональных углов установки СМП и силовых параметров выглаживания. Исходными данными для расчета являются параметры шероховатости, которые необходимо достичь в процессе обработки.
- 2) Производственные испытания были проведены на заводе приборных подшипников ОАО "ОК-ЛОЗА". Для проведения испытаний была выбрана

деталь из комплекта сменных частей технологической оснастки для шлифования - втулка рабочего приспособления станка Штудер 500 для обработки колец подшипников.

- 3) Результаты производственных испытаний позволили установить, что применение разработанной методики для назначения рациональных углов установки СМП и технологического натяга позволяет обрабатывать наружные конические и цилиндрические поверхности заготовок, изготовленных из стали марки 75ХГСФ, с шероховатостью поверхности, соответствующей требованиям чертежа.
- 4) Применение в качестве окончательной обработки выглаживания с СМП, при изготовлении рассматриваемой детали, позволило исключить из технологического процесса операцию шлифования, что уменьшило штучное время, требуемое на изготовление данной втулки, и сократило загрузку шлифовального станка.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

В работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в обеспечении качества и снижении себестоимости обработки наружных цилиндрических и конических поверхностей выглаживанием за счет изменения способа установки деформирующего инструмента, в качестве которого применяются стандартные СМП для токарной обработки.

В процессе выполнения теоретических и экспериментальных исследований получены следующие научные результаты и выводы:

1. В результате комплексных теоретических и экспериментальных исследований выявлены связи, определяющие влияние способа установки СМП на параметры шероховатости обработанных выглаживанием поверхностей.
2. Разработан метод моделирования контактного взаимодействия заготовки и инструмента (метод реализован в программе КОМПАС 3D), позволяющий определять параметры площади и конфигурации пятна пластического контакта при изменении способа установки инструмента. Данный метод может применяться при проведении теоретических исследований различных методов ППД.
3. Установлены закономерности изменения площади и ширины пятна контакта и глубины внедрения инструмента от углов поворота СМП и технологических факторов процесса выглаживания. Это позволяет функционально связать способ установки инструмента с величинами силы выглаживания, среднего давления в контакте, а также цикличностью нагружения, и использовать данные зависимости в расчетах режимов обработки и углов установки СМП как с жестким закреплением инструмента, так и с упругим.
4. Доказано, что изменение углов установки φ' и ψ оказывает значительное влияние на глубину внедрения инструмента h , площадь F и ширину a контактной области, при неизменной величине технологического натяга i . При установке СМП с увеличением угла поворота φ' от 0° до $\pm 14^\circ$ глубина

внедрения h увеличивается в 1,5-2 раза, площадь контакта увеличивается от 0,2 до 0,8 мм². Угол поворота пластины ψ приводит к уменьшению глубины внедрения и площади контакта независимо от направления поворота. При увеличении углов поворота СМП φ' и ψ в обоих направлениях, ширина контактной области a увеличивается.

5. Установлено, что сила выглаживания P и среднее давление в контакте p интенсивно изменяются при смене способа установки СМП. Наибольших значений сила достигает при установке пластины с поворотом вокруг вертикальной оси на угол $\varphi' = -14^\circ \dots -10^\circ$: 1000 - 1400 (Н). Прямо пропорционально растет и площадь контакта - поэтому среднее давление в контакте p увеличивается менее интенсивно с 1500 до 1800 (МПа). С увеличением угла поворота ψ сила возрастает менее интенсивно (в сравнении с поворотом на угол φ'), примерно в 2 раза на интервалах изменения угла ψ $[-14^\circ; 0^\circ]$ и $[0^\circ; 14^\circ]$. При повороте СМП на углы φ' и ψ совместно, сила выглаживания уменьшается весьма значительно (примерно с 1100 до 500 (Н) при $\varphi' = 10^\circ$), но из-за пропорционального уменьшения площади контакта давление остается практически неизменным (1600-1700 МПа). Величина цикличности нагружения N увеличивается в интервале 4 - 10 раз при повороте СМП как на угол φ' , так и на угол ψ , соответственно. Данные силовые параметры процесса позволяют назначать величину подачи инструмента $s = 0,08 \dots 0,16$ мм/об. Это увеличивает производительность выглаживания в 1,5 - 2 раза по сравнению с алмазным выглаживанием при неизменном достижении требуемого качества обработанных поверхностей.
6. В результате экспериментальных исследований получены математические зависимости параметров шероховатости обработанной выглаживанием поверхности: Ra , tr , S , Sm и коэффициент изменения шероховатости K от углов установки СМП и технологического натяга, что позволило определить области рационального изменения углов установки СМП.

7. Разработана методика назначения рациональных режимов выглаживания наружных цилиндрических и конических поверхностей и углов установки СМП для технологического проектирования и обеспечения заданной шероховатости обработанных поверхностей.
8. При обработке заготовок из стали 45 с исходной шероховатостью поверхности $Ra = 1,2 \dots 1,95$ мкм рациональное сочетание параметров качества обработанной выглаживанием поверхности ($Ra < 0,25$ мкм; $tp > 70\%$ ($p = 5\%$); $Sm = 0,25 \dots 0,3$ мм; $S > 0,06$ мм; $K > 6$) достигается при установке СМП с углами поворота φ' в интервале $[0^\circ; 10^\circ]$, угол ψ в интервале $[-14^\circ; -5^\circ]$. При обработке заготовок, выполненных из легированной подшипниковой стали 75ХГСФ, с исходной шероховатостью поверхности $Ra = 1,2 \dots 1,95$ мкм, вышеуказанное рациональное сочетание параметров качества достигается при установке пластины с интервалами изменения углов поворота φ' $[-10^\circ; 0^\circ]$, угол ψ $[5^\circ; 14^\circ]$.
9. Разработаны технологические рекомендации для обеспечения заданной шероховатости наружных цилиндрических поверхностей деталей при выглаживании с изменением способа установки СМП.
10. Проведены производственные испытания на базе завода ОАО «ОК-ЛОЗА» при изготовлении втулок рабочего приспособления шлифовального станка. Применение в качестве окончательной обработки выглаживания с изменением установки СМП позволило исключить из технологического процесса операцию шлифования и снизить трудоемкость в 1,5 раза.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Результаты измерения геометрических параметров пятна контакта и расчета силовых параметров процесса выглаживания, соответствующих рассматриваем способам установки СМП.

$\varphi' = 0, \psi = 0$															
l (мкм)	h	F пласт	P (Н)	F (мм ²)	h / i	P конт (Мпа)	α упруг	α пласт	R^* (мм)	Ra	Rz	tp	S	Sm	N
40	3,35	0,144	259,2	0,179	0,1	1445	0,34	0,2848	6,8	0,402	2,8	84	81	164	4,2
60	3,95	0,167	300,6	0,203	0,079	1480	0,34	0,2853	6,7	0,655	3,7	60	90	190	4,2
80	4,3	0,182	327,6	0,219	0,0645	1496	0,36	0,3048	6,7	0,7	4,2	71	88	139	4,5
100	10,46	0,549	989,6 4	0,588	0,12552	1682	0,41	0,3462	6,9						5,1
120	6,8	0,297	534,6	0,339	0,068	1575	0,35	0,2934	6,9						4,4

HV = 1800

E = 200000

$\mu = 0,26$

$\varphi' = 10, \psi = 0$											
l (мкм)	h пласт	F пласт	P (Н)	F (мм ²)	h / i	P конт (Мпа)	α пласт	R^* (мм)	R (мм)	r (мм)	
40	13,27	0,715	1287,1	0,748	0,3981	1718	0,39	7,1	42,25	1,2	
80	15,61	0,792	1425,9	0,812	0,23415	1754	0,423	6,70	37,5	1,2	
100	9,98	0,525	945,9	0,564	0,11976	1675	0,339	6,94	40,25	1,2	

$\varphi' = 0, \psi = 14$										
l (мкм)	h пласт	F пласт	P (Н)	F (мм ²)	h / i	P конт (Мпа)	α пласт	R^* (мм)	R (мм)	r (мм)
40	4,25	0,195	351	0,238	0,25	1564,74	0,461	7,45	42,25	1,2
80	7	0,362	652,32	0,4050	0,105	1610,280	0,393	6,97	37	1,2

$\varphi'=-10, \psi = 0$										
l (мм)	h пласт	F пласт	P (Н)	F (мм ²)	h / i	P конт (Мпа)	α пласт	R^* (мм)	R (мм)	r (мм)
40	8,37	0,45	810	0,493	0,2511	1640,76	0,31	7,12	42,25	1,2
80	13,5	0,683	1230	0,711	0,2025	1730,55	0,393	6,71	37,5	1,2

$\varphi'=0, \psi = - 14$										
l (мм)	h пласт	F пласт	P (Н)	F (мм ²)	h / i	P конт (Мпа)	α пласт	R^* (мм)	R (мм)	r (мм)
40	4,8	0,262	472,32	0,309	0,144	1527	0,409	7,45	42,25	1,2
80	8,64	0,447	805,14	0,488	0,1296	1647	0,543	6,972	37	1,2

$\varphi'=10, i = 40$															
ψ (град)	h пласт	F пласт	P (Н)	F (мм ²)	h / i	P конт (Мпа)	α пласт	R^* (мм)	R (мм)	Ra	Rz	tp	S	Sm	N
-14	6,95	0,372	669,96	0,420	0,2085	1605	0,4943	7,158	39	0,479	2,756	57	72	189	7,4
-10	6,7	0,346	624,06	0,39133	0,201	1607	0,3947	6,864	37,5	0,335	2,168	72	21	117	5,9
0	13,27	0,715	1287,1	0,766	0,3981	1718	0,39	7,120	42,25	0,676	2,88	47, 5	38,5	48,5	5,8
10	9,46	0,491	885,06	0,535	0,2838	1666	0,4769	6,91	38	0,282	2,062	89	37	142	7,1
14	7,68	0,416	749,16	0,466	0,2304	1620	0,527	7,249	40	0,242	1,755	92	40	268	7,9

$\varphi' = -10, i = 40$		F	P	F	h/i	P конт	α	R^*	R	Ra	Rz	tp	S	Sm	N
ψ (град)	h пласт	пласт	(Н)	(мм ²)		(Мпа)	пласт	(мм)	(мм)						
-10	7,57	0,394	709,2	0,439	0,2271	1628	0,4177	6,91	38	0,192	1,615	97	34	156	6,2
-14	7,14	0,382	688,14	0,43	0,2142	1610	0,5062	7,158	39	0,426	2,622	50	68	150	7,5
0	8,37	0,45	810	0,506	0,2511	1640	0,31	7,12	42,25	0,43	2,486	54	56	176,5	4,6
10	13,75	0,713	1284,6	0,749	0,4125	1727	0,5703	6,91	38	0,392	2,045	67	69	497	8,5
14	11,2	0,590	1062,9	0,631	0,336	1689	0,6207	7,065	38	0,177	0,963	100	38	154	9,3

$\psi = 14, i = 40$		F	P	F	h/i	P конт	α	R^*	R	Ra	Rz	tp	S	Sm	N
φ' (град)	h пласт	пласт	(Н)	(мм ²)		(Мпа)	пласт	(мм)	(мм)						
-10	11,2	0,590	1062,7	0,628	0,336	1689	0,6178	7,065	38	0,177	0,963	100	38	154	9,2
-7,5	8,9	0,464	835,92	0,505	0,2682	1652	0,5538	6,995	37,25	0,187	1,63	98	24	145	8,3
0	5,8	0,320	577,62	0,369	0,174	1564	0,461	7,45	42,25	0,312	2,03	84	71	237	6,9
7,5	7,1	0,373	672,48	0,417	0,2136	1610	0,5001	7,065	38	0,18	0,98	100	34	335	7,5
10	7,6	0,416	749,16	0,462	0,2304	1620	0,5337	7,249	40	0,242	1,755	92	40	268	8,0

$\psi = -14, i = 40$

φ' (град)	h пласт	F	P	F	h/i	P конт	α	R^*	R	Ra	Rz	tp	S	Sm	N
		пласт	(Н)	(мм ²)		(Мпа)	пласт	(мм)	(мм)						
-10	7,1	0,379	683,46	0,424	0,2142	1609	0,5064	7,158	39	0,426	2,622	50	68	150	7,5
-7,5	9,96	0,517	931,5	0,557	0,2988	1670	0,5826	6,995	37,25	0,173	1,267	100	24	243	8,7
0	4,8	0,262	472,32	0,308	0,144	1532	0,4088	7,361	41,25	0,284	2,132	91,5	69	169	6,1
7,5	6,3	0,329	593,46	0,372	0,18975	1591	0,4587	7,019	37,5						6,8
10	6,9	0,369	665,28	0,414	0,2085	1604	0,4974	7,158	39	0,479	2,756	57	72	189	7,4

Профилограммы переходной области между выглаженными и проточенными поверхностями.

Проставленный размер соответствует глубине внедрения СМП h (мкм).

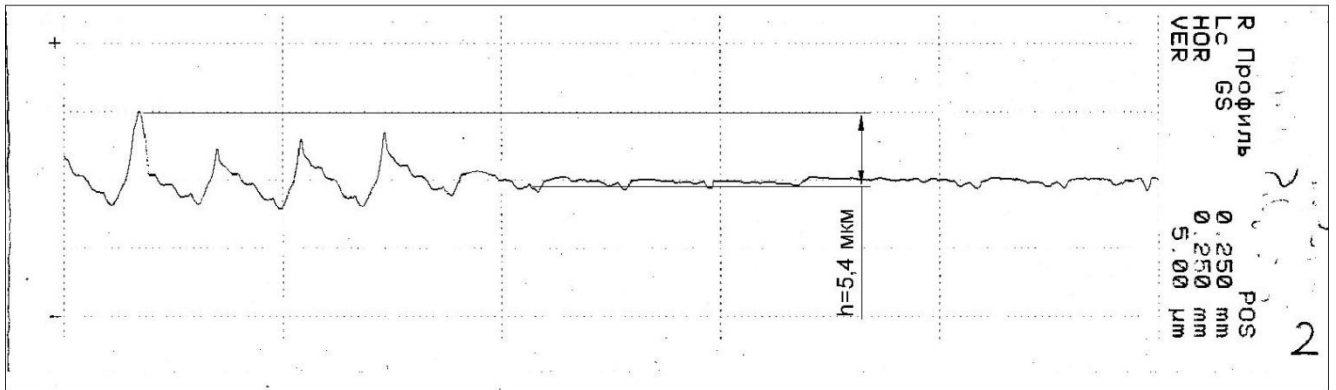


Схема установки СМП: $\varphi'=0^\circ$; $\psi=0^\circ$; $i=120$ (мкм).

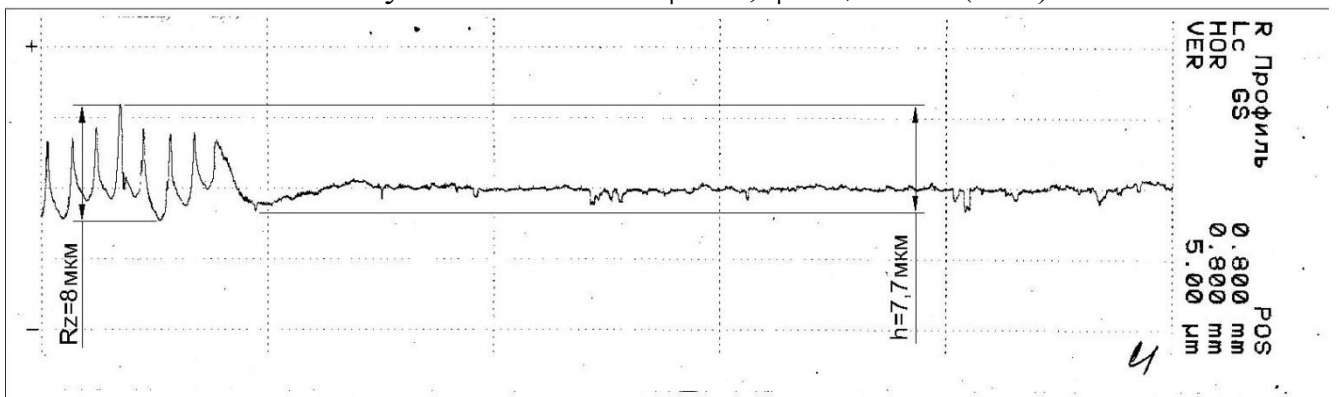


Схема установки СМП: $\varphi'=0^\circ$; $\psi=0^\circ$; $i=80$ (мкм).

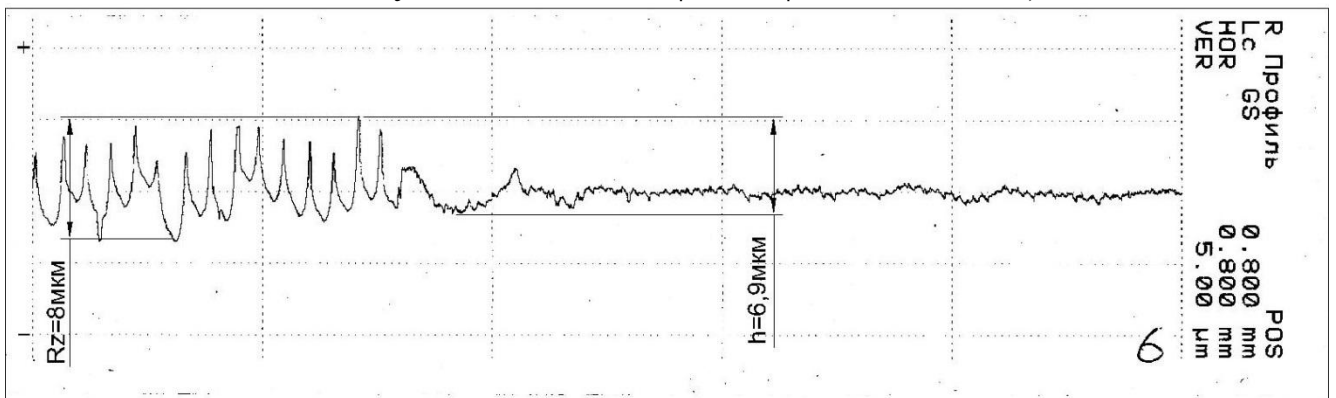


Схема установки СМП: $\varphi'=0^\circ$; $\psi=0^\circ$; $i=60$ (мкм).

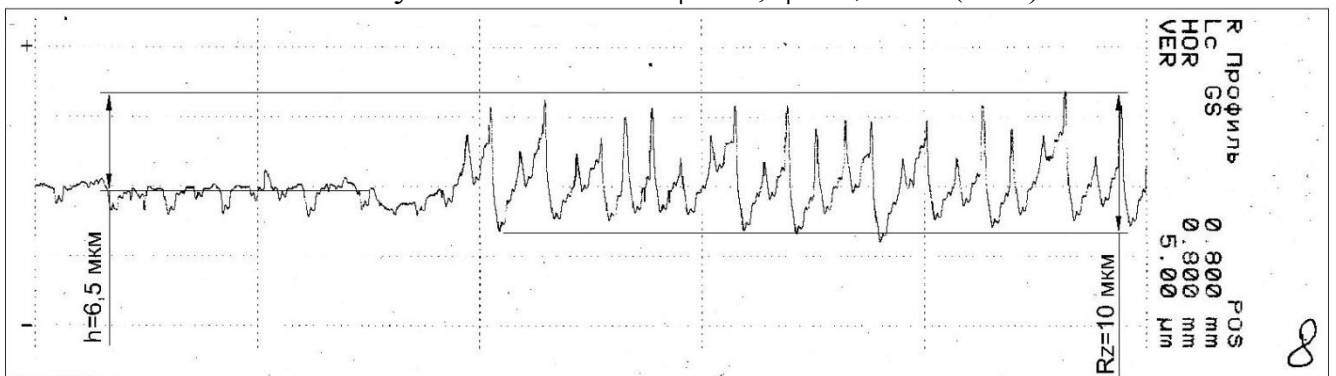


Схема установки СМП: $\varphi'=0^\circ$; $\psi=0^\circ$; $i=40$ (мкм).

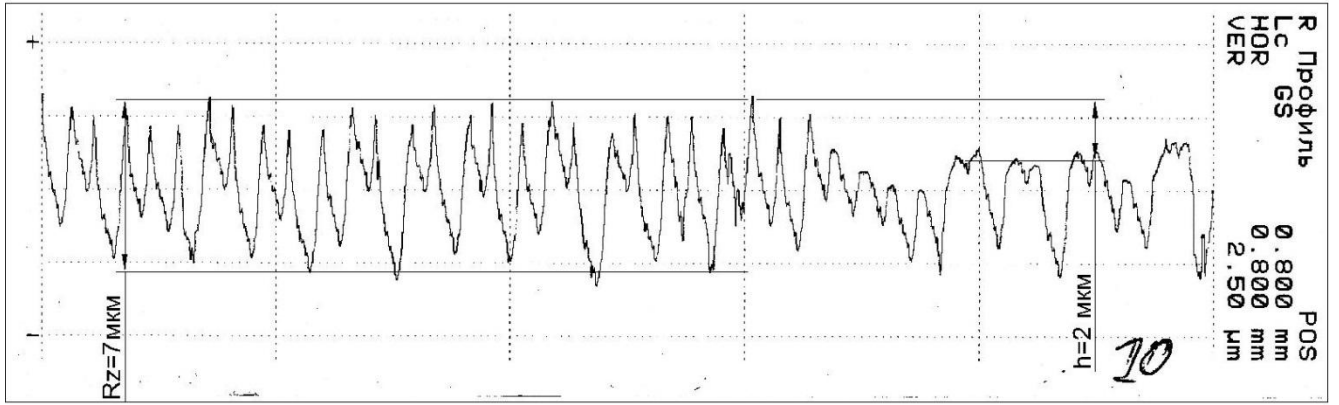


Схема установки СМП: $\varphi'=0^\circ$; $\psi=0^\circ$; $i=20$ (мкм).

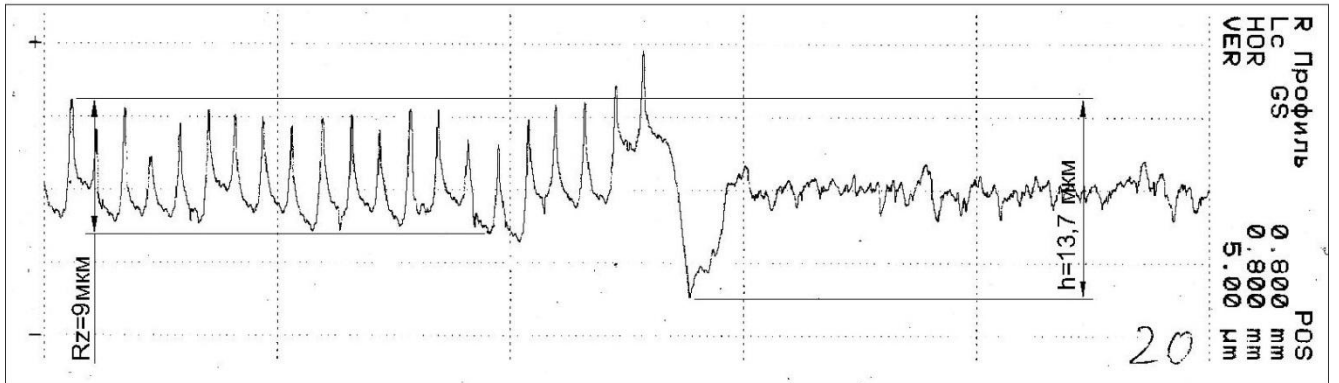


Схема установки СМП: $\varphi'=10^\circ$; $\psi=0^\circ$; $i=80$ (мкм).

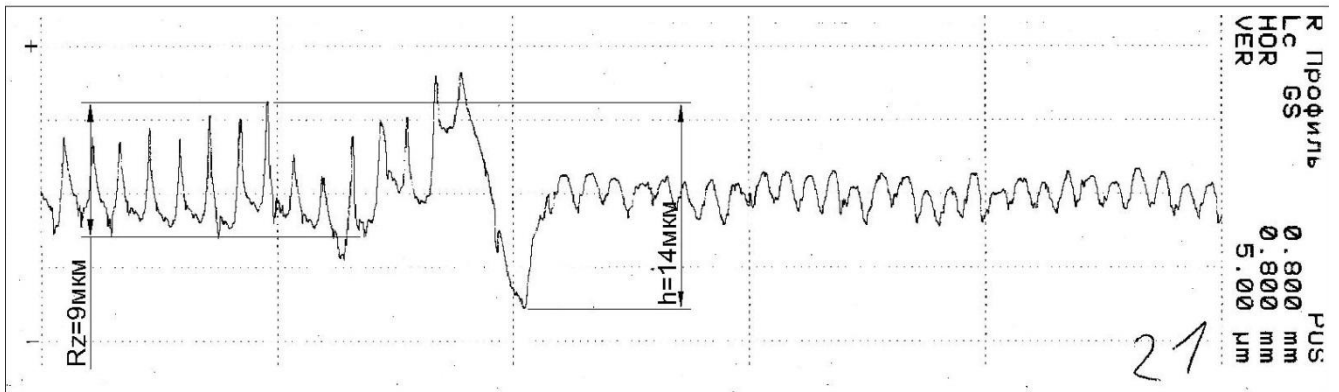


Схема установки СМП: $\varphi'=-10^\circ$; $\psi=0^\circ$; $i=80$ (мкм).

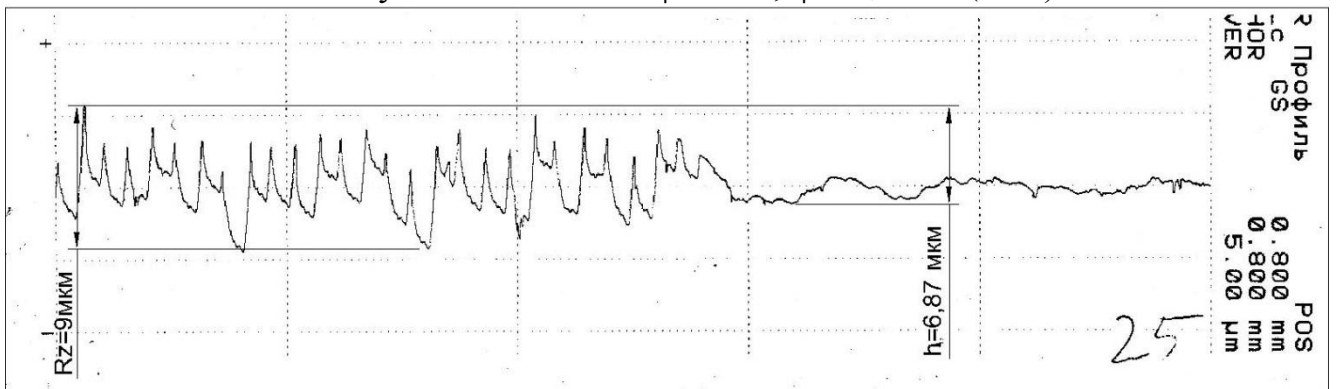


Схема установки СМП: $\varphi'=0^\circ$; $\psi=14^\circ$; $i=80$ (мкм).

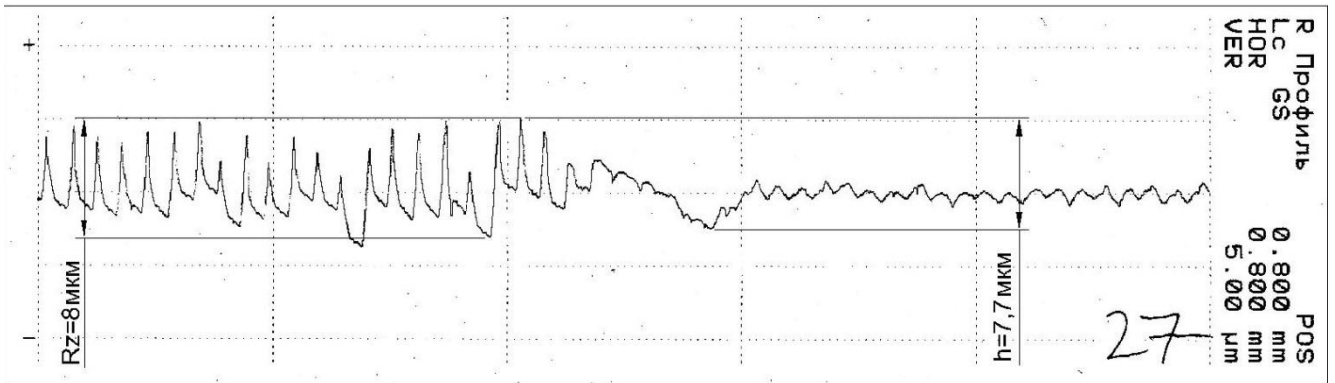


Схема установки СМП: $\varphi' = 0^\circ$; $\psi = -14^\circ$; $i = 80$ (мкм).

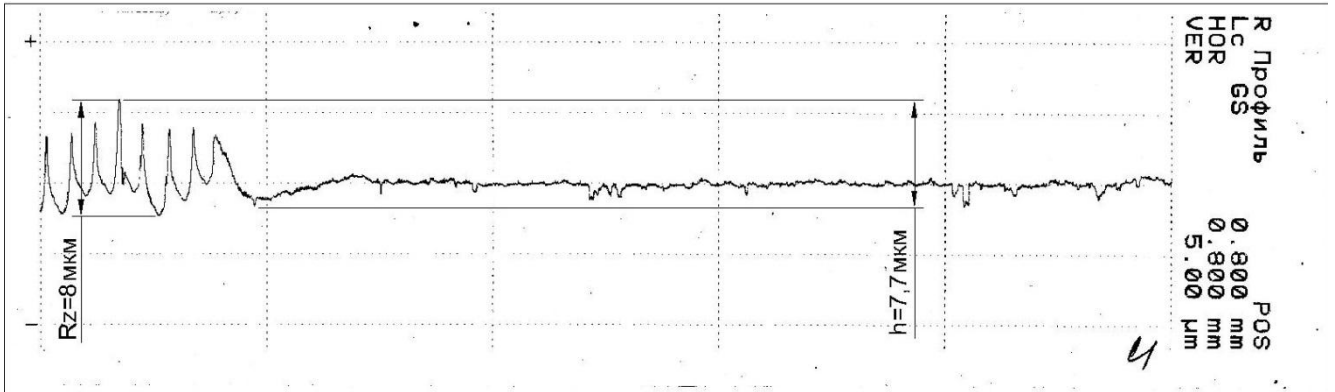


Схема установки СМП: $\varphi' = 10^\circ$; $\psi = 14^\circ$; $i = 40$ (мкм).

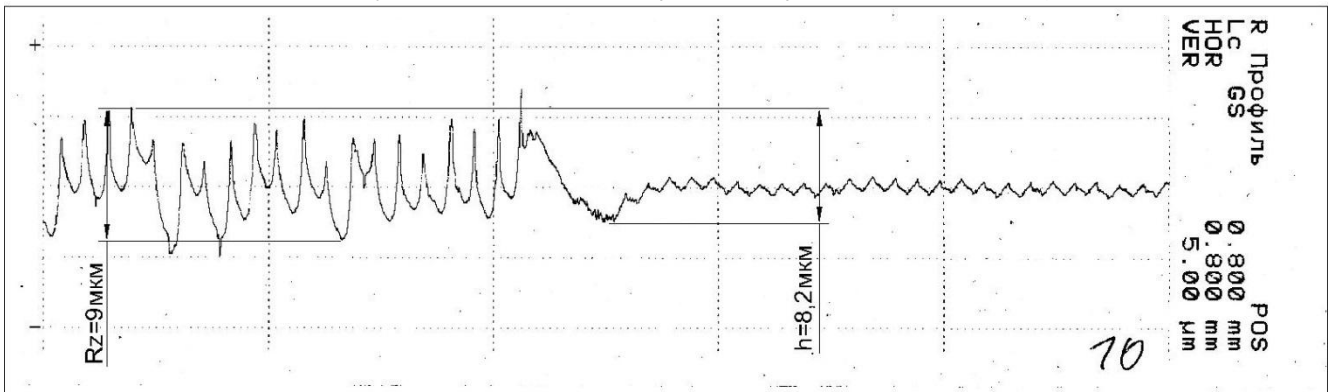


Схема установки СМП: $\varphi' = -10^\circ$; $\psi = 14^\circ$; $i = 40$ (мкм).

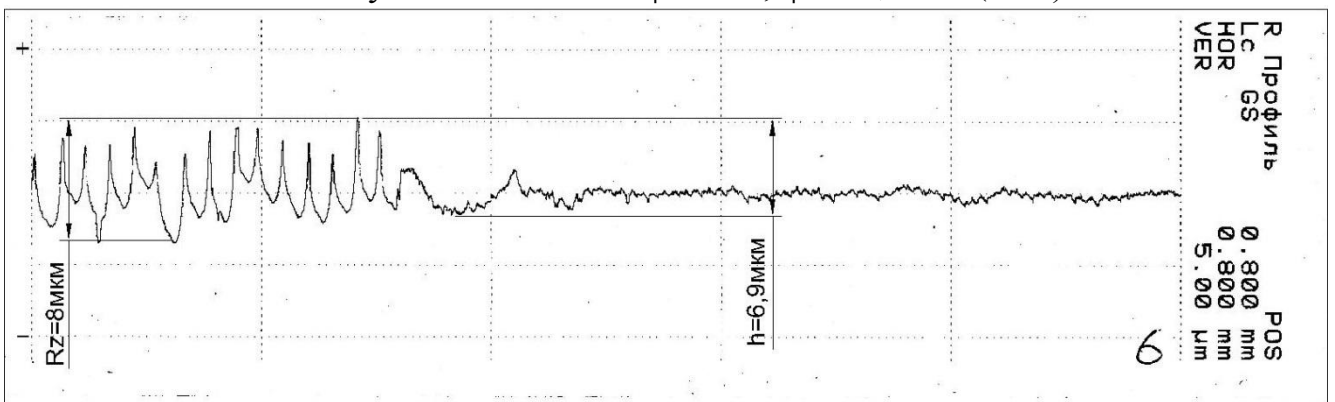


Схема установки СМП: $\varphi' = 10^\circ$; $\psi = -14^\circ$; $i = 40$ (мкм).

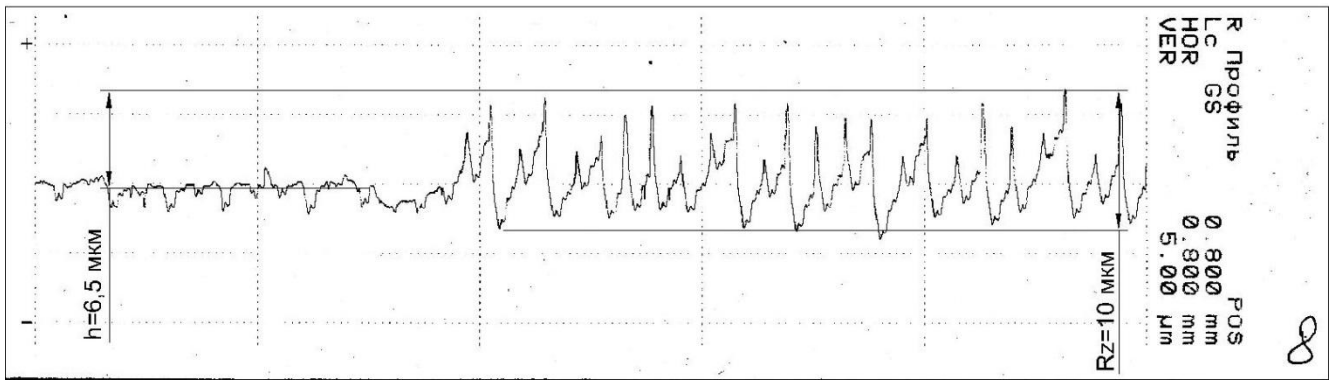


Схема установки СМП: $\varphi' = -10^\circ$; $\psi = -14^\circ$; $i = 40$ (мкм)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

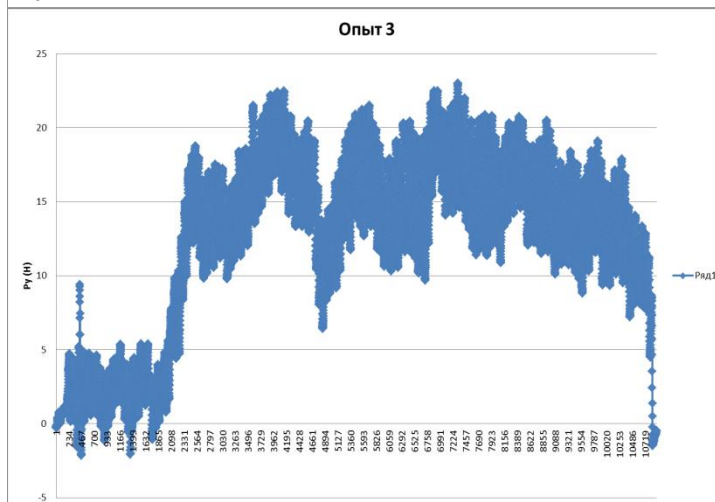
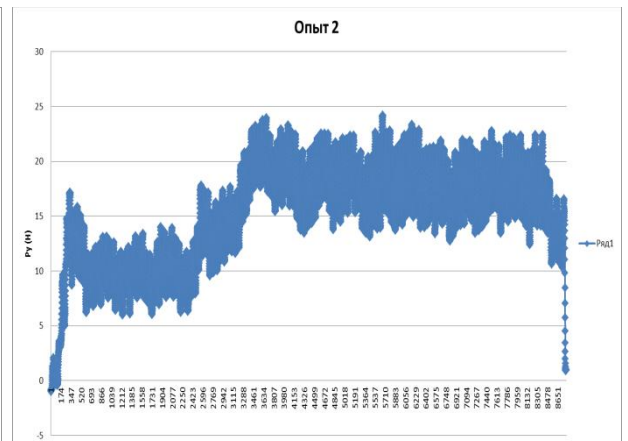
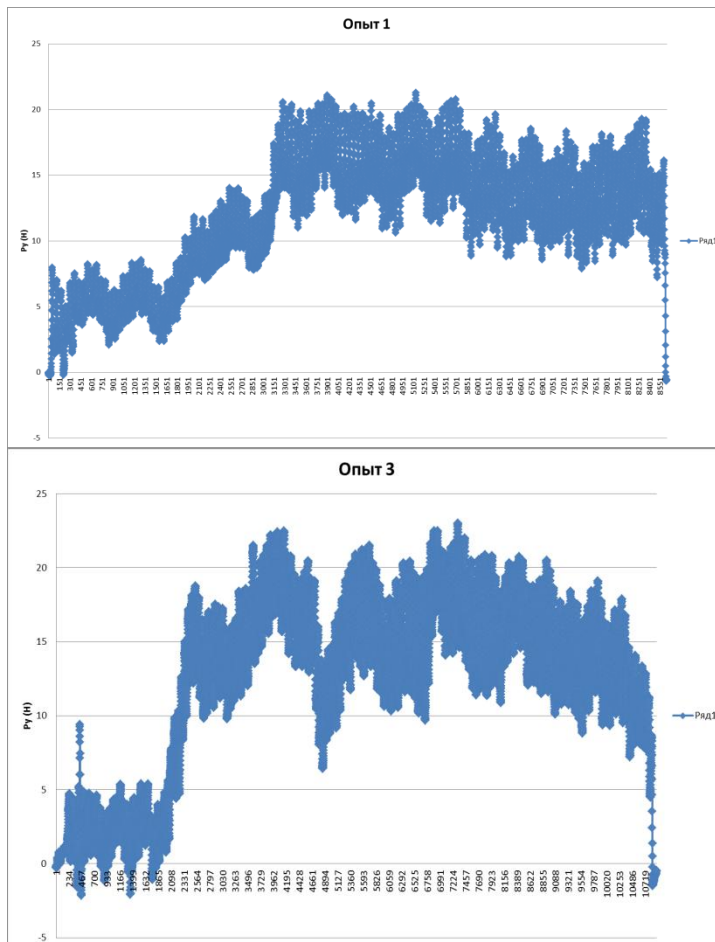
Экспериментальное измерение силы выглаживания P (P_y).

Условия эксперимента:

- заготовка диаметром 220 мм;
- материал заготовки сталь 09Г2С ($HV = 1150$ МПа, $E = 72000$ Па, $\mu = 0,34$);
- СМП из керамики марки ВОК-63 с радиусом вершины $r = 1,2$ мм;
- схема установки СМП с углами $\varphi' = \psi = 0^\circ$;
- технологический натяг $i = 10$ мкм, скорость $V = 100$ м/об., подача $s = 0,1$ мм/об.;
- технологическая среда – синтетическая СОТС ТНК Универсал S.

Измерения производились универсальным динамометром УДМ-600.

№ опыта.	P_{max} (Н) экспериментальное	P (Н) расчетное	Расхождение (%)
1	200	183	8,6
2	230	245	8,5
3	220	309	34



ПРИЛОЖЕНИЕ В.

Поисковые эксперименты.
Определение инструментального материала СМП.

Образец № 1		d ≈ 85 мм		Материал СМП 650			
Шейка (справа на лево)	S (мм/об)	V (м/мин)	N (мин ⁻¹)	Натяг (мкм)	φ' (град.)	ψ (град.)	Ra (мкм)
1	0,08		185	50	0	0	0,26
2	0,08		185	50	0	0	0,34
3	0,08		185	25	0	30	0,51
Образец № 2		d ≈ 85 мм		Материал СМП 650			
Шейка (справа на лево)	S (мм/об)	V (м/мин)	N (мин ⁻¹)	Натяг (мкм)	φ' (град.)	ψ (град.)	Ra (мкм)
1	0,08		96	25	0	15	0,37
2	0,08		96	20	0	15	0,33
3	0,08		96	20	0	7,5	0,35
Образец № 3		d ≈ 87 мм		Материал СМП 650			
Шейка (справа на лево)	S (мм/об)	V (м/мин)	N (мин ⁻¹)	Натяг (мкм)	φ' (град.)	ψ (град.)	Ra (мкм)
1	0,08		96	20	0	11,5	0,50
2	0,08		96	10	0	11,5	0,35
3	0,08		120	10	0	11,5	0,45
Образец № 4		d ≈ 85 мм		Материал СМП 650			
Шейка (справа на лево)	S (мм/об)	V (м/мин)	N (мин ⁻¹)	Натяг (мкм)	φ' (град.)	ψ (град.)	Ra (мкм)
1	0,08		96	10	0	11,5	0,75
2	0,08		96	10	0	5	0,37
3	0,08		96	10	0	0	1,22
Образец № 5		d ≈ 85 мм		Материал СМП 670			
Шейка (справа на лево)	S (мм/об)	V (м/мин)	N (мин ⁻¹)	Натяг (мкм)	φ' (град.)	ψ (град.)	Ra (мкм)
1	0,08		96	10	0	0	0,45
2	0,08		96	20	0	5	0,25
3	0,08		96	10	0	10	0,25
Образец № 6		d ≈ 86 мм		Материал СМП 670			
Шейка (справа на лево)	S (мм/об)	V (м/мин)	N (мин ⁻¹)	Натяг (мкм)	φ' (град.)	ψ (град.)	Ra (мкм)
1	0,08		96	10	0	15	0,25
2	0,08		96	10	0	11,5	0,33
3	0,08		96	20	0	7,5	0,23

Образец № 7		d ≈ 77 мм		Материал СМП 6090			
Шейка (справа на лево)	S (мм/об)	V (м/мин)	N (мин ⁻¹)	Натяг (мкм)	φ' (град.)	ψ (град.)	Ra (мкм)
1	0,08		96	10	0	0	0,47
2	0,08		96	10	0	5	0,65
3	0,08		96	15	0	10	0,38
Образец № 8		d ≈ 83 мм		Материал СМП 6090			
Шейка (справа на лево)	S (мм/об)	V (м/мин)	N (мин ⁻¹)	Натяг (мкм)	φ' (град.)	ψ (град.)	Ra (мкм)
1	0,08		96	10	0	15	1,05
2	0,08		96	10	0	11,5	0,45
3	0,08		96	10	0	7,5	0,57
Образец № 9		d ≈ 85 мм		Материал СМП 1690			
Шейка (справа на лево)	S (мм/об)	V (м/мин)	N (мин ⁻¹)	Натяг (мкм)	φ' (град.)	ψ (град.)	Ra (мкм)
1	0,08		96	10	0	0	0,50
2	0,08		96	10	0	5	0,47
3	0,08		96	10	0	10	0,33
Образец № 10		d ≈ 87 мм		Материал СМП 1690			
Шейка (справа на лево)	S (мм/об)	V (м/мин)	N (мин ⁻¹)	Натяг (мкм)	φ' (град.)	ψ (град.)	Ra (мкм)
1	0,08		96	10	0	15	0,28
2	0,08		96	10	0	11,5	0,25
3	0,08		96	10	0	7,5	0,22

Поисковые эксперименты.

Определение технологических режимов выглаживания и способа установки СМП для достижения наименьшей шероховатости поверхности при обработке выглаживанием стали 45.

1) Зависимость шероховатости от скорости выглаживания.

№п/п	Скорость выглаживания (м/мин)	Шероховатость Ra (мкм)
1	50	0,642
2	75	0,581
3	100	0,830
4	125	0,524
5	150	0,933
Заданный натяг 40 мкм, подача 0,08 мм/об.		

2) Зависимость шероховатости от заданного натяга.

№п/п	Заданный натяг i (мкм)	Шероховатость Ra (мкм)
1	10	2,471
2	20	2,378
3	40	2,225
4	60	1,328
5	80	1,062
6	100	1,498
7	120	1,703
Скорость 100 м/мин, подача 0,08 мм/об.		

3) Зависимость шероховатости от угла φ' .

№п/п	Угол φ' (град)	Шероховатость Ra (мкм)
1	5	0,881
2	10	0,596
3	12,5	0,652
4	15	0,675
5	17,5	0,920
6	20	1,122
Заданный натяг 100 мкм, угол ψ 15 (град.).		

4) Зависимость шероховатости от угла ψ .

№п/п	Угол ψ (град)	Шероховатость Ra (мкм)
1	5	1,103
2	10	0,598
3	12,5	0,577
4	15	0,678
5	17,5	0,883
6	20	1,280
Заданный натяг 100 мкм, угол φ' 12,5 (град.).		

Определение технологических режимов выглаживания и способа установки СМП для достижения наименьшей шероховатости поверхности при обработке выглаживанием стали 75ХГСФ.

1) Зависимость шероховатости от скорости выглаживания.

№п/п	Скорость выглаживания (м/мин)	Шероховатость Ra (мкм)
1	50	0,576
2	75	0,511
3	100	0,528
4	125	0,470
5	150	0,532
Заданный натяг 40 мкм, подача 0,08 мм/об.		

2) Зависимость шероховатости от заданного натяга.

№п/п	Заданный натяг i (мкм)	Шероховатость Ra (мкм)
1	10	1,978
2	20	1,651
3	40	0,946
4	60	1,532
5	80	1,887
6	100	2,210
7	120	2,228
Скорость 100 м/мин, подача 0,08 мм/об.		

3) Зависимость шероховатости от угла φ' .

№п/п	Угол φ' (град)	Шероховатость Ra (мкм)
1	5	1,497
2	10	0,689
3	12,5	0,575
4	15	0,769
5	17,5	0,794
6	20	0,899
Заданный натяг 100 мкм, угол ψ 15 (град.).		

4) Зависимость шероховатости от угла ψ .

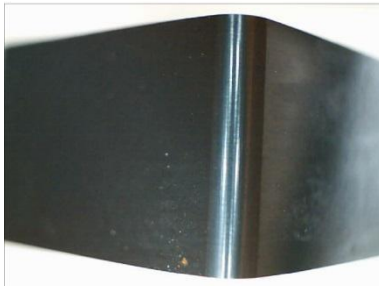
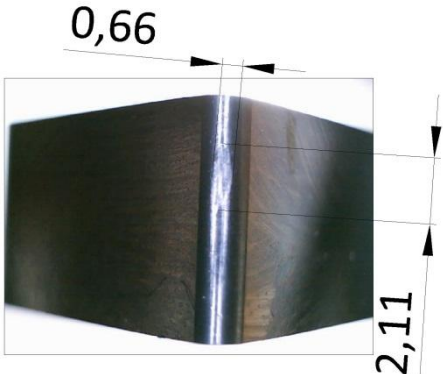
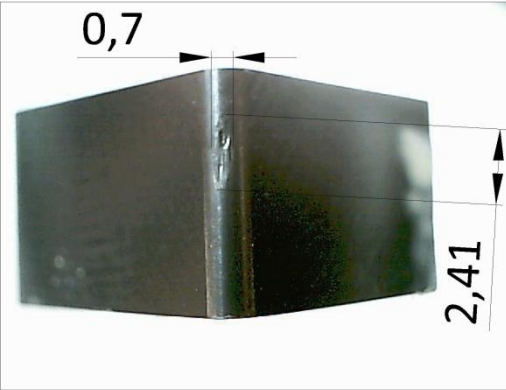
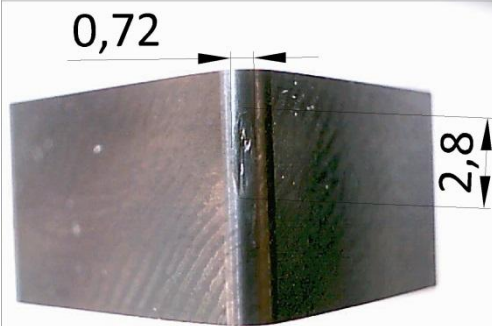
№п/п	Угол ψ (град)	Шероховатость Ra (мкм)
1	5	0,899
2	10	0,794
3	12,5	0,764
4	15	0,581
5	17,5	0,753
6	20	0,887
Заданный натяг 100 мкм, угол φ' 12,5 (град.).		

ПРИЛОЖЕНИЕ Г.

Образцы из стали 45 с шероховатостью $Ra = 1,8...2,0$ (мкм) выглаживались СМП из керамики марки ВОК-63 (по маркировке фирмы-производителя *Sandvik Coromant* – 650), установленной по схеме X0Y0Z0 (углы установки $\phi'=\psi=0^\circ$). Режимы обработки: натяг $i = 40$ (мкм), подача $s = 0,08$ (мм/об), скорость $V = 90...100$ (м/мин), технологическая среда – синтетическая СОТС ТНК Универсал S.

№ п/п.	d (мм)	t (м)	L (мм)	V (м/мин)	Путь (м)	Ra исх. (мкм)	Ra об. (мкм)	Износ S (мм ²)	Путь суммированный (м)	t маш суммированное (мин)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	73	0:02:26	57	69,9121	169,886403	1,96	0,71	1,093	169,87	02:26
2	73	0:02:27	62	69,9121	171,284645	1,19	0,61		341,15	04:53
3	72	0:02:23	57	68,9544	164,111472	1,2	0,71		505,26	07:16
4	72	0:02:41	62	68,9544	184,797792	1,16	0,61		690,06	09:57
5	70	0:02:25	58	67,039	162,23438	1,59	0,55		852,29	12:22
6	70	0:02:38	65	67,039	176,31257	1,2	0,46		1028,6	15:00
7	68	0:02:24	58	65,1236	156,29664	1,46	0,54		1184,9	17:24
8	68	0:02:39	65	65,1236	172,57754	1,37	0,4		1357,48	20:03
9	67	0:02:20	59	64,1659	149,506547	1,6	0,61		1506,99	22:23
10	67	0:02:41	68	64,1659	171,964612	1,6	0,56		1678,95	25:04
11	77	0:02:27	62	73,7429	180,670105	1,85	0,71	1,37	1859,62	27:31
12	77	0:02:47	69	73,7429	205,005262	1,45	0,88		2064,62	30:18
13	77	0:02:07	42	73,7429	158,547235	1,54	0,82		2223,16	32:25
14	75	0:02:28	62	71,8275	177,413925	1,57	0,74		2400,57	34:53
15	75	0:02:35	65	71,8275	185,31495	1,49	0,64		2585,88	37:28
16	75	0:02:01	50	71,8275	145,09155	1,47	0,6		2730,98	39:29
17	73	0:02:29	62	69,9121	173,382008	1,82	0,7		2904,36	41:58
18	73	0:02:37	65	69,9121	183,169702	1,38	0,88		3087,53	44:35

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
19	73	0:02:03	51	69,9121	143,319805	1,47	0,68	1,58	3230,85	46:38
20	72	0:02:26	61	68,9544	167,559192	1,76	0,65		3398,41	49:04
21	72	0:02:39	65	68,9544	182,72916	1,49	1,1		3581,14	51:43
22	70	0:02:26	63	67,039	162,90477	1,35	0,89		3744,04	54:09
23	70	0:02:43	68	67,039	182,34608	1,29	1,03		3926,39	56:52
24	70	0:02:05	52	67,039	139,44112	1,33	0,94		4065,83	58:57
25	65	0:02:19	58	62,2505	144,42116	1,93	1,38		4210,25	01:16
26	65	0:02:41	68	62,2505	166,83134	1,39	1,19		4377,08	1:03:57
27	65	0:02:08	54	62,2505	132,593565	1,46	1,1		4509,68	1:06:05
Всего:		1:06:05			4509,71353					

			
СМП без износа.	Износ после обработки 10 шеек. Путь 1678,95 (м), время 25:04.	Износ после обработки 20 шеек. Путь 3398,41 (м), время 49:04.	Износ после обработки 27 шеек. Путь 4509,68 (м), время 1:06:05.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алейников И.А. Практическое использование пакета *Mathcad* при решении задач: учебное пособие / И.А. Алейников. - М.: РГОТУ Путей сообщения МПС РФ, 2002. - 114 с.
2. Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В. Решение задач вычислительной математики в пакетах *Mathcad 12*, *MATLAB 7*, *Maple 9*/ Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова. - М.: НТ Пресс, 2006 г. - 496 с.
3. Андреев Г.Н., Новиков В.Ю., Схиртладзе А.Г. Проектирование технологической оснастки машиностроительного производства / Под ред. Ю.М. Соломенцова. - 2-е изд., испр. - М.: Высшая школа., 1999 г. - 415 с.
4. Афанасьева Н.Ю. Вычислительные и экспериментальные методы научного эксперимента: учебное пособие / Н.Ю. Афанасьева. - М.: КНОРУС, 2013. - 330 с.
5. Барац Я.И. Исследование процесса алмазного выглаживания сталей: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08/ Барац Яков Иосифович. - Тольятти, 1968. - 201 с.
6. Башков Г.П. Выглаживание восстановленных деталей: монография / Г.П. Башков. - М.: Машиностроение, 1979. - 77 с.
7. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел: монография / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. - М. Машиностроение, 1968. - 543 с.
8. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами. 2-е издание / В.М. Браславский. - М.: Машиностроение, 1975. - 160 с.
9. Бобровский И.Н. Повышение эксплуатационной надежности деталей автомобилей и экологичности их изготовления за счет освоения новой технологии широкого выглаживания: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08/ Бобровский Игорь Николаевич. - М., 2011 г. 187 с.
10. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. - Киев: Техника, 1975. - 168 с.

11. Гандер В., Гржебичек И. Решение задач в научных вычислениях с применением *Maple* и *MATLAB* / В. Гандер, И. Гржебичек. - М.: "Вассамедина" 2005г.
12. Грановский Э.Г. Чистовая обработка металлов методом алмазного выглаживания/ Э.Г. Грановский // Вестник машиностроения. 1967. - № 4. - С. 56-57.
13. Головань А.Я., Грановский Э.Г., Машков В.Н. Алмазное точение и выглаживание / А.Я. Головань, Э.Г. Грановский, В.Н. Машков. - М.: Машиностроение, 1976. - 32 с.
14. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. - М.: Издательство стандартов, 1974. - 6 с.
15. ГОСТ 27964-88 Измерение параметров шероховатости. Термины и определения. - М.: Издательство стандартов, 1988. - 14 с.
16. Губанов В.Ф. Обеспечение заданных параметров шероховатости поверхности и микротвердости в процессе выглаживания цилиндрических деталей: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01/ Губанов Виктор Федорович. - Тюмень, 2003 г. 160 с.
17. Гун Г.Я., Полухин П.И., Полухин В.П., Прудковский Б.А. Пластическое формоизменение металлов / Г.Я. Гун, П.И. Полухин, В.П. Полухин, Б.А. Прудковский. - М.: Metallurgia, 1968. - 416 с.
18. Гурин Ф.М., Смелянский В.М. Натяг и сила при алмазном выглаживании с жестким закреплением инструмента / Ф.М. Гурин, В.М. Смелянский // Сборник "Новые процессы обработки резанием". - М.: Машиностроение, 1968 г.
19. Гурин Ф.М., Смелянский В.М. Шероховатость и отклонение формы при алмазном выглаживании жестким инструментом / Ф.М. Гурин, В.М. Смелянский // Сборник "Размерно-чистовая и упрочняющая обработка поверхностным деформированием". - Минск, АН БССР, 1968 г.

20. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин: монография / А.М. Дальский. - М.: Машиностроение, 1975. - 223 с.
21. Данг Ванг Нгин. Повышение качества обкатывания деталей машин на основе многокритериальной параметрической оптимизации с применением комплексного критерия: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08/ Данг Ванг Нгин. - М., 1988. - 179 с.
22. Донсков А.С, Торбило В.М. О точности определения площади контакта при алмазном выглаживании / А.С Донсков, В.М. Торбило // Управление качеством в механосборочном производстве. - Пермь, 1979. - С. 27-28.
23. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология: монография/ Н.В. Дилигенский, Л.Г. Дымова, П.В. Севастьянов. - М.: Машиностроение, 2004 г. - 397 с.
24. Жасимов М.М. Исследование проблемы управления качеством деталей в процессе обработки методом ППД: дис. ... д-ра техн. наук; 05.02.08/ Жасимов М.М. - Павлодар, 1980.
25. Зубков Э.И. Повышение эффективности выглаживания наружных цилиндрических поверхностей инструментом из минералокерамики: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08/ Зубков Эдуард Игоревич - М., 1992.
26. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. Изд. 2-е, перераб. и доп./ П.Г. Кацев. - М.: Машиностроение, 1974 г. - 231 с.
27. Качество машин. Справочник/ под редакцией А.Г. Сулова. - М.: Машиностроение, 1998. Т1. - 256с.; Т2.-430с.
28. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений: учебник для ВУЗов / В.С. Корсаков. - М.: Машиностроение, 1983. - 227 с.
29. Крутов В.И., Попов В.В., Грушко И.М. и др. Основы научных исследований: учебник для ВУЗов / под ред. В.И. Крутова, В.В. Попова. - М.: Высшая школа, 1989. - 400 с.

30. Кузнецов А.М. Технологические основы создания методов обработки в машиностроении: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08/ Кузнецов Анатолий Михайлович. - М., 1975. - 298с.
31. Кузнецов В.А. Основы системного анализа методов механической обработки: монография / В.А. Кузнецов. - М.: изд-во Московского автомеханического ин-та, 1989.- 113 с.
32. Кузнецов В.А. Синтез и исследование технологических структур методов механической обработки поверхностей деталей машин: дис. ... д-ра техн. наук; 05.02.08, 05.03.01/ Кузнецов В.А. – Москва, 2000. – 421с.
33. Кузнецов В.А. Теоретические исследования зависимости геометрических параметров области контакта инструмента и заготовки от способа установки инструмента при обработке выглаживанием / В.А. Кузнецов, В.А. Васильев, Э.Н. Беженарь, И.В. Заболотная, Д.А. Сазонов, А.В. Смирнов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. - 2012. - Т. 2. - № 2. - С. 104-109.
34. Кузнецов В.А., Заболотная И.В., Смирнов А.В., Сазонов Д.А. Технологическое обеспечение параметров макро- и микрогеометрии при выглаживании наружных цилиндрических поверхностей деталей машин./ В.А. Кузнецов, И.В. Заболотная, А.В. Смирнов, Д.А. Сазонов // Грузовик. - 2013. - № 5. - С. 35-37.
35. Кузнецов В.А., Сазонов Д.А., Смирнов А.В. Моделирование контакта инструмента с деталью при обработке выглаживанием в программной среде Компас 3Д / В.А. Кузнецов, Д.А. Сазонов, А.В. Смирнов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. - 2011. - № 2. - С. 144-149.
36. Кузнецов В.А., Шестакин П.В., Смирнов А.В., Сазонов Д.А. Выглаживание деталей многогранными неперетачиваемыми пластинами./ В.А. Кузнецов, П.В. Шестакин, А.В. Смирнов, Д.А. Сазонов // Автомобильная промышленность. - 2010. - № 10. - С. 24.
37. Кузнецов В.А. Исследования качества поверхности при выглаживании деталей многогранными неперетачиваемыми пластинами [Электронный ресурс] / В.А.

Кузнецов, А.В. Смирнов, Д.А. Сазонов, И.В. Заболотная // Материалы 77-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовки кадров». – 2012 – Режим доступа:

http://www.mami.ru/science/aai77/scientific/article/s08/s08_10.pdf

38. Кузнецов В. Системный анализ и моделирование методов обработки: монография / В. Кузнецов. - Германия: LAP LAMBERT AP, 2013. - 294 с.
39. Кузнецов В.П. Экспериментальные и теоретические исследования формирования субмикрощероховатых поверхностей деталей выглаживанием на токарно-фрезерных центрах/ В.П. Кузнецов, О.В. Дмитриева, А.В. Макарова, А.Е. Киряков // Известия Томского политехнического университета. - 2011. - Т. 319. - №2 - С. 40-45.
40. Кузьменко А.Г. Пластический контакт тел двойкой кривизны – композиция методов: подобия (МП); приведенного радиуса кривизны (МПР); экспериментально-теоретического равновесия (МЭТР) / Кузьменко А.Г. // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). Хмельницкий национальный университет, Украина. – 2009. - №1 – С. 19.
41. Максимов Б.А., Наумова Л.И., Резниченко А.В. Технологические процессы машиностроительного производства: учебник для ВУЗов / Б.А. Максимов, Л.И. Наумова, А.В. Резниченко. - М.: Издательство МГИУ, 2006 г.
42. Мамаев И.И. Эффективность алмазного выглаживания круглых протяжек из сталей Р6М3 и ХВГ/ И.И. Мамаев // Станки и инструмент. - 1978.-№ 9. - С. 24-27
43. Маркус Л.И., Смелянский В.М. Алмазное выглаживание: монография / Л.И. Маркус, В.М. Смелянский. - М.: НИИАвтопром, 1971. - 117 с.
44. Маслов А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств: учебник / А.Р. Маслов. - М.: Машиностроение, 2006. - 336 с.
45. Мосталыгин А.Г. Повышение качества наружных цилиндрических поверхностей выглаживанием минералокерамическим инструментом: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08/ Мосталыгин А.Г. - Курган, 1984.

46. Овсеенко А.Н., Серебряков В.И., Гаек М.М. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения: монография / А.Н. Овсеенко, В.И. Серебряков, М.М. Гаек. - М.: Янус-К, 2003. - 296 с.
47. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л.Г. Одинцов. - М.: Машиностроение, 1987. - 328 с.
48. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхности пластическим деформированием / Д.Д. Папшев. - М.: Машиностроение, 1978. - 152с.
49. Папшев Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками: монография / Д.Д. Папшев. - М.: Машиностроение, 1968. - 130 с.
50. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания: монография / В.Н. Подураев. - М.: Машиностроение, 1977. - 304 с.
51. Проскураков Ю.Г., Сайко И.Б., Заикин В.А. Площадь контакта деформирующего элемента с обрабатываемой деталью при ППД./ Ю.Г. Проскураков, И.Б. Сайко, В.А. Заикин // Завод-ВТУЗ - производству: Сборник научн. трудов, Р-н-Д. - 1976. - № 6. - С. 53-88.
52. Путятин Л.И., Тимофеева Л.А., Федченко И.И. Управление качеством поверхности при алмазном выглаживании деталей из высокопрочного чугуна / Л.И. Путятин, Л.А.Тимофеева, И.И. Федченко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. - 2011. - №54 - С. 114-117.
53. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов: монография / А.Н. Резников. - М.: Машиностроение, 1981. - 279 с.
54. Резников А.Н., Барац Я.И. Применение алмазного выглаживания для отделочно-упрочняющей обработки / А.Н. Резников, Я.И. Барац // Вестник машиностроения. - 1970 г. - № 1. - С. 15-17.
55. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании / О.А. Розенберг. - Киев: Наук. думка, 1981 г. С. - 288.

56. Самойлов С.И., Горелов В.М., Браславский В.М., Кондрадов Ю.Н. Технология тяжелого машиностроения: учебное пособие / Под ред. Самойлова С.И. - М.: Машиностроение, 1967 г. С. - 595.
57. Смелянский В.М. Исследование процесса алмазного выглаживания жестким инструментом: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08/ Смелянский Вадим Михайлович. - М., 1969. - 228 с.
58. Смелянский В.М. Механика формирования поверхностного слоя деталей машин в технологических процессах поверхностного пластического деформирования: дис. ... д-ра техн. наук; 05.02.08/ Смелянский Вадим Михайлович - М., 1985.
59. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: монография / В.М. Смелянский - М.: Машиностроение, 2002. - 200 с.
60. Смелянский В.М., Данг Ван Нгин. Многокритериальная оптимизация режимов упрочнения обкатыванием на основе использования комплексного критерия / В.М. Смелянский, Данг Ван Нгин // Новая технология, оборудование, оснастка и инструмент для механической обработки и сборки. Материалы семинара МДНТП им. Дзержинского. - 1990 г. - С.56 - 63.
61. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов / Г.А. Смирнов-Аляев. - М.: Машиностроение, 1968 г. С. - 272.
62. Смирнов А.В. Влияние способа установки сменной многогранной пластины на силу, контактное давление и цикличность нагружения при обработке выглаживанием./ А.В. Смирнов. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. -№ 5. – с. 19-24.
63. Спектор А.Г., Зельберт Б.М., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей / А.Г. Спектор, Б.М. Зельберт, С.А. Киселева. - М.: Metallurgy, 1980 г. С. - 264.
64. Степчева З.В. Повышение эффективности алмазного выглаживания на основе рационального использования энергии модулированного ультразвукового

- поля: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08/Степчева Зоя Валерьевна. - Ульяновск, 2007 г. 232 с.
65. Сторожаев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для ВУЗов / М.В, Сторожаев, Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1971. - 424 с.
66. Тихонов Д.А. Повышение стойкости режущих инструментов с износостойким покрытием путем отделочно-упрочняющей обработки их рабочих поверхностей алмазным выглаживанием: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01/ Тихонов Денис Александрович. - Саратов, 2003 г. 149 с.
67. Торбило В.М. Алмазное выглаживание: монография/ В.М. Торбило. - М.: "Машиностроение", 1972. - 105 с.
68. Торбило В.М. Основы обеспечения качества и производительности при отделочно-упрочняющей обработке выглаживанием: дис. ... д-ра техн. наук; 05.02.08/ Торбило В.М. - Пермь, 1986. - 385 с.
69. Торбило В.М. Расчет оптимального усилия при алмазном выглаживании / В.М. Торбило // Станки и инструмент. - 1970 г.- №2.
70. Торбило В.М., Донсков А.С. Особенности геометрии контакта при выглаживании./ А.С Донсков, В.М. Торбило // Управление качеством в механосборочном производстве. - Пермь, 1973. -С. 83-88.
71. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро. - М.: Сов. радио, 1971.
72. Хворостухин Л.А. Обработка металлопокрытий выглаживанием: монография / Л.А. Хворостухин, В.Н. Машков, В.А. Горпачев и др. - М.: Машиностроение, 1980. - 62 с.
73. Хворостухин Л.А. Отделка и упрочнение поверхностей деталей машин выглаживанием сверхтвердыми материалами / Л.А. Хворостухин, Ю.И. Павлов, В.Н. Бибаев и др. - М.: ГОСИНТИ, 1971. - 52 с.
74. Чекин Г.И. Исследование процесса выглаживания поверхностей деталей машин алмазным инструментом: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08/ Чекин Г.И. - М., 1965. - 192 с.

75. Чепа П.А., Андрияшин В.А. Эксплуатационные свойства упроченных деталей / П.А. Чепа, В.А. Андрияшин. - Минск: Наука и техника, 1988 - 192 с.
76. Черненко О.С. Повышение производительности процесса и точности изделий при поверхностном пластическом деформировании на основе совершенствования технологических операций и инструмента: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08/ Черненко О.С. - Тольятти, 1987.
77. Чертов А.Г. Единицы физических величин: учебное пособие / А.Г. Чертов. - М.: Высшая школа, 1977. - 287 с.
78. Чистосердов П.С. Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П.С. Чистосердов. - Минск: Беларусь, 1977. - 127 с.
79. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. - М: Мир, 1972 г. С. - 381.
80. Шнейдер Ю.Г. Инструмент для чистовой обработки металлов давлением: монография/ Ю.Г. Шнейдер. - Л.: Машиностроение, 1971. - 247 с.
81. Шнейдер Ю.Г. Чистовая обработка металлов давлением: монография / Ю.Г. Шнейдер. - М.-Л.: Машиностроение, 1963 г.
82. Энтелис С.Г., Берлинер Э.М., Деришева Э.М. и др. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / Под ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. - М.: Машиностроение, 1986. - 352 с.
83. Яньков В.Ю., Попов А.А., Бобырь Г.А. Решение прикладных задач в пакете Mathcad. Книга 1: учебное пособие / В.Ю. Яньков, А.А. Попов, Г.А. Бобырь. - М.: Компания Спутник+, 2011 г.
84. Яценко В.К., Зайцев Г.З., Притченко В.Ф. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием: монография / В.К. Яценко, Г.З. Зайцев, В.Ф. Притченко и др. - М.: Машиностроение, 1985. - 232 с.
85. Лукьянец В.А. Физические эффекты в машиностроении: справочник / В.А. Лукьянец, З.И. Алмазова, Н.П. Бурмистрова и др. - М.: Машиностроение, 1993. - 224 с.
86. *Hongyun L., Jianying L., Lijiang W., Qunpeng Z. Study of the mechanism of the burnishing process with cylindrical polycrystalline diamond tools / L. Hongyun, L.*

- Jianying, W. Lijiang, Z. Qunpeng // Journal of Materials Processing Technology. - 2006. - №1 - C. 9-16.*
87. *Hongyun L., Jianying L., Lijiang W., Qunpeng Z. The effect of burnishing parameters on burnishing force and surface microhardness / L. Hongyun, L. Jianying, W. Lijiang, Z. Qunpeng // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2006. - №7/8 - C. 707-713.*
88. <http://www.lamina-tech.ch/eng/catalog/group/turning>
89. http://www.mirstan.ru/user_img/catalogues/Sandvik/Turning2012/Tochenie.pdf
90. http://www.mechindia.com/diamond_burnishing
91. <http://www.mahr.com/MarSurf-M300>
92. *Korzynski M., Pacana A., Cwanek J. Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing / M. Korzynski, A. Pacana, J. Cwanek // Surface & Coatings Technology. - 2009. - №12.*
93. *Korhonen H., Laakkonen J., Hakala J., Lappalainen R. IMPROVEMENTS IN THE SURFACE CHARACTERISTICS OF STAINLESS STEEL WORKPIECES BY BURNISHING WITH AN AMORPHOUS DIAMOND-COATED TIP / H. Korhonen, J. Laakkonen, J. Hakala, R. Lappalainen // Machining Science & Technology. - 2013. - №4. - C. 593-610.*
94. *Ogburn F. Burnishing For Improved Part Quality And Lower Costs / F. Ogburn // Production Machining. - 2004*