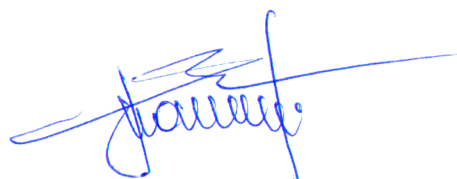


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Люшня Дмитрий Андреевич



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПНЕВМОДРОБЕСТРУЙНОГО УПРОЧНЕНИЯ  
ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ  
ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ  
И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ**

Специальность: 2.5.6 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Носов Николай Васильевич  
доктор технических наук, профессор

Самара – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1. Характеристика процессов упрочнения поверхностей деталей из титановых сплавов.....	11
1.2. Общий анализ пневмодробеструйного упрочнения.....	16
1.3. Моделирование процесса ПДУ и пути его совершенствования.....	22
1.4. Исследование остаточных напряжений и микротвердости поверхности.....	24
1.5. Исследование шероховатости поверхности.....	26
1.6. Выводы по главе 1.....	28
ГЛАВА 2. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	30
2.1. Модель ударного взаимодействия дроби с упрочняемой поверхностью.....	30
2.2. Описание программного комплекса конечно-элементного моделирования...	33
2.3. Численное моделирование исследуемого процесса.....	35
2.4. Выводы по главе 2.....	61
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПДУ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ.....	62
3.1. Анализ результатов имитационного моделирования.....	62
3.2. Разработка регрессионных моделей.....	88
3.3. Выводы по главе 3.....	101
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОВЕРХ- НОСТИ ПОСЛЕ ПНЕВМОДРОБЕСТРУЙНОГО УПРОЧНЕНИЯ.....	103
4.1. Исследование деформации образцов после ПДУ.....	103
4.2. Экспериментальное определение остаточных напряжений.....	107
4.3. Исследование микротвердости.....	110
4.4. Выводы по главе 4.....	113
ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ.....	114
5.1. Анализ шероховатости поверхности.....	115
5.2. Исследование структуры поверхности опико-электронным методом.....	118

5.3. Исследование влияние режимов ПДУ на шероховатость поверхности.....	122
5.4. Выводы по главе 5.....	129
ГЛАВА 6. ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОН- НЫЕ СВОЙСТВА. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ..	131
6.1. Опытно-промышленная проверка.....	131
6.2. Расчет себестоимости ПДУ.....	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	136
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	138
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	143
Приложение А.....	159
Приложение Б.....	160

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность и степень разработанности темы.**

В современном авиастроении основным направлением повышения надежности и долговечности деталей является применение титановых сплавов. Титановые сплавы обладают высокой прочностью и пластичностью по сравнению с ранее применяемыми материалами.

В практике используются различные методы для повышения прочностных характеристик титановых сплавов, такие как легирование, закалка, старение и поверхностное упрочнение. Последнее в основном связано с применением разных методов поверхностно-пластического деформирования деталей из титановых сплавов, при этом наибольший потенциал демонстрирует процесс дробеструйного упрочнения (ДУ).

Процесс дробеструйного упрочнения позволяет обрабатывать поверхности деталей сложной формы, предотвращая появление концентраций напряжений и стабилизируя шероховатость обработанных поверхностей. Кроме того, он способствует созданию в поверхностном слое необходимых сжимающих остаточных напряжений (ОН) и уровней пластической деформации.

Для производства крупногабаритных деталей шасси предпочтительным выбором является титановый сплав ВТ22, который составляет 35 – 40 % от массы конструкции шасси самолетов. Этот материал выделяется высокой прочностью и достаточной пластичностью, что делает его подходящим в качестве базового материала для исследования процессов упрочнения.

При изготовлении деталей шасси сложной формы из титановых сплавов применяется пневмодробеструйное упрочнение (ПДУ), которое не допускает формирования высоких остаточных напряжений и «перенаклепа» поверхностного слоя. Процесс ПДУ крупногабаритных деталей осуществляется на пневмодробеструйной установке с ЧПУ, которая имеет 4 главных движения и позволяет перемещаться соплу так, чтобы упрочнять наружные поверхности при стабильном положении угла наклона сопла 60 – 90°.

Процесс ПДУ осуществляется при скорости дроби 60 м/с и небольших подачах дроби, поэтому трудоемкость процесса упрочнения достаточно высокая. Повышение производительности возможно двумя способами: это изменение режимов упрочнения и увеличение количества обрабатываемых сопел. В производственных условиях количество работающих сопел – не более двух, поэтому повышение производительности процесса целесообразно осуществлять путем изменения режимных параметров, в частности скорости дроби. Опыт эксплуатации таких установок показал, что повышение скорости стальной дроби более 90 м/с приводит к расколу дроби на более мелкие фрагменты, при этом эффект упрочнения при таких скоростях на титановых сплавах не исследовался. В то же время увеличение скорости дроби повышает энергетическую составляющую процесса, и требуется проведение комплексного исследования по влиянию режимов упрочнения на качество поверхностного слоя.

Изучением процессов дробеструйной обработки занимались российские, советские и зарубежные учёные, такие как А. П. Бабичев, В. Ф. Безъязычный, Н. Д. Кузнецов, В. В. Петросов, М. А. Тамаркин, Ли Юганг, А. Р. Явари, Х. Ю. Миао, Г. Чен, Ч. Вонг и др., которые разработали физические основы процессов пластического деформирования поверхностей деталей и исследовали влияние режимов обработки на качество поверхности и надежность деталей.

Таким образом, применение методов поверхностного пластического деформирования для упрочнения деталей из титановых сплавов требует разработки научно-обоснованных рекомендаций по управлению эффективности ПДУ крупногабаритных деталей из титановых сплавов за счет определения рациональных режимов упрочнения и повышения скорости дроби.

Для решения данной задачи целесообразно разработать имитационные модели ПДУ, устанавливающие влияние режимов обработки на условия взаимодействия потока дроби на обрабатываемую поверхность и их влияния на качество поверхности (остаточные напряжения, степень пластической деформации и шероховатость) деталей из титановых сплавов, поэтому повышение эффективности процесса ПДУ крупногабаритных деталей является **актуальной задачей**.

**Целью диссертационной работы** является повышение производительности процесса ПДУ и обеспечение требуемых параметров качества поверхности деталей из титановых сплавов на основе определения рациональных режимов поверхностного пластического деформирования материала.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие **задачи**:

- разработана имитационная модель ПДУ для оценки площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учетом образования застойных зон;

- разработаны имитационные модели ПДУ для оценки напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки при точечном воздействии дроби и с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации;

- проведено численное моделирование влияния процесса ПДУ на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя заготовки;

- на основе результатов численного моделирования разработаны регрессионные модели влияния режимов ПДУ на параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки;

- проведены экспериментальные исследования влияния ПДУ на напряженно-деформированное состояние и микротвердость поверхностного слоя заготовки;

- разработана методика и проведены исследования шероховатости на поверхностях крупногабаритных деталей сложных пространственных форм;

- проведена опытно-промышленная проверка процесса ПДУ в условиях действующего производства.

**Объект исследований.** Процесс пневмодробеструйного упрочнения поверхности крупногабаритных деталей из титановых сплавов.

**Предмет исследований.** Исследование закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали из титановых сплавов при пневмодробеструйном упрочнении.

### **Научную новизну имеют следующие разработки:**

1. Имитационная модель процесса ПДУ для определения площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учетом образования застойных зон.

2. Имитационная модель процесса ПДУ для определения остаточных напряжений и накопленной деформации в поверхностном слое заготовки при точечном воздействии дроби.

3. Имитационная модель процесса ПДУ для определения напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации.

4. Результаты численного моделирования влияния процесса ПДУ на напряженно-деформационное состояние поверхностного слоя заготовки.

5. Регрессионные модели влияния режимов ПДУ на параметры напряженно-деформационного состояния поверхностного слоя заготовки в зависимости от условий ПДУ.

6. Методика исследования шероховатости поверхности крупногабаритных деталей сложных пространственных форм с помощью оптико-электронного комплекса на рабочем месте и идентификации параметров структуры с параметрами шероховатости.

**Теоретическая значимость диссертационного исследования** заключается в разработке имитационных моделей, учитывающих влияние условий и режимов ПДУ на формирование параметров качества поверхностей деталей и производительность процесса.

В том числе разработаны:

- имитационная модель процесса ПДУ для определения площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учетом образования застойных зон;

- имитационная модель процесса ПДУ для определения остаточных напряжений и накопленной деформации в поверхностном слое заготовки при точечном воздействии дроби;

- имитационная модель процесса ПДУ для определения напряжённо-

деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации;

**Практическую ценность имеют следующие разработки:**

1. Рекомендации для определения рациональных условий упрочнения поверхностного слоя деталей из титановых сплавов при ПДУ, режимы и условия ПДУ, обеспечивающие требуемые параметры качества поверхности деталей.

2. Рекомендации по измерению шероховатости на поверхностях крупногабаритных деталей сложных пространственных форм на рабочем месте.

Опытно-промышленная проверка разработанной технологии, выполненная в производственных условиях ОАО «Авиаагрегат» (г. Самара), подтвердила повышение производительности ПДУ деталей из титановых сплавов в 1,2 – 1,4 раза по сравнению с заводской технологией. Результаты исследований включены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

**Методология и методы исследований.**

Достижение цели и решение поставленных в работе задач обеспечены применением методов конечно-элементного моделирования и оптико-электронного исследования параметров поверхности. По результатам численного моделирования процесса ПДУ получены регрессионные модели. Для построения электронных 3D-моделей заготовок и деталей использовалась САПР КОМПАС-3D. Моделирование процесса производилось в программных комплексах RockyDEM и ANSYS. Экспериментальные исследования проводились с использованием современных стандартных измерительных приборов: автоматизированного профилографа-профилометра «Абрис ПМ7», прибора для измерения микротвёрдости Виккерс, современного цифрового измерительного микроскопа серии Smart Vision, автоматизированной установки АСБ-1, разработанной профессором С. А. Букатым.



### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Имитационная модель процесса ПДУ для определения площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учетом образования застойных зон.

2. Имитационная модель процесса ПДУ для определения остаточных напряжений и накопленной деформации в поверхностном слое заготовки при точечном воздействии дроби.

3. Имитационная модель процесса ПДУ для определения напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации.

4. Результаты численного моделирования влияния процесса ПДУ на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя заготовки.

5. Регрессионные модели, описывающие влияние параметров процесса ПДУ (скорость дроби, скорость движения сопла, угол наклона сопла и т. д.) на остаточные напряжения, значения упругих и остаточных деформаций и глубину их залегания.

6. Методика исследования шероховатости поверхности крупногабаритных деталей сложных пространственных форм с помощью оптико-электронного комплекса на рабочем месте и идентификации параметров структуры с параметрами шероховатости.

7. Результаты опытно-промышленной апробации разработанных режимов ПДУ с оценкой качества поверхности заготовок из титановых сплавов.

### **Степень достоверности результатов исследований.**

Достоверность результатов работы обеспечивается тщательным анализом достаточного объема научной литературы, корректным определением задач и целесообразным применением методик. Это подтверждается согласованностью теоретических выводов и данных моделирования с результатами экспериментов, обоснованностью принятых допущений и ограничений в компьютерных моделях, использованием известных расчетных методов и сертифицированного программного комплекса ANSYS. Также важна адекватность полученных

эмпирических зависимостей, проверенных по критерию Фишера, хорошая сходимость численных и экспериментальных результатов друг с другом и с данными других исследователей. Все выводы диссертационного исследования имеют экспериментальное подтверждение.

**Личный вклад автора** заключается в разработке и практическом применении метода пневмодробеструйного упрочнения, планировании, постановке и проведении экспериментов, обработке, обобщении и анализе полученных результатов. Автором сформулированы основные положения и выводы, выносимые на защиту. Совместно с руководителем подготовлены публикации по тематике данной работы.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты работы прошли опытно-промышленную проверку на ОАО «Авиаагрегат» при пневмодробеструйном упрочнении детали «Траверса» №47601.4122.300.001, что позволило повысить производительность процесса ПДУ в 1,2 – 1,4 раза при обеспечении требуемых параметров качества поверхностного слоя, предусмотренных техническими требованиями на изготовление детали. Получен акт опытно-промышленной проверки.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на всероссийских и международных научно-технических конференциях ICMSSTE 2021, ICMSSTE 2022, ICMSSTE 2023, Высокие технологии в машиностроении 2021-2024 годах.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, из них 1 статья в изданиях, индексируемых в базе SCOPUS, 2 – рекомендованных ВАК РФ, 5 – рекомендованных РИНЦ РФ. Доклады на конференциях ICMSSTE 2021, ICMSSTE 2022, ICMSSTE 2023.

#### **Структура и объём диссертационного исследования.**

Работа состоит из введения, 6 глав, заключения и 2 приложений. Основное содержание диссертации изложено на 135 страницах машинописного текста, содержит 20 таблиц и 93 рисунка. Список литературы включает 150 наименований.

# ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1. Характеристика процессов упрочнения поверхностей деталей из титановых сплавов

Известно, что в процессе эксплуатации взлетно-посадочных устройств детали сборочного узла испытывают различные нагрузки: растяжение, сжатие, кручение, повторно-переменные изгибающие напряжения, трение и другие воздействия.

В процессе взлета и посадки узлы шасси подвергаются воздействию знакопеременных нагрузок, а также перепадам температур [17, 58].

В современном авиастроении основным направлением повышения надежности и долговечности деталей является применение титановых сплавов. Титановые сплавы обладают высокой прочностью и пластичностью по сравнению с ранее применяемыми материалами.

Увеличение прочностных характеристик титановых сплавов, работающих при высоких температурах 550 – 600 °С является актуальной задачей. На практике применяется ряд способов, повышающих прочностные характеристики титановых сплавов: легирование, закалка, старение и поверхностное упрочнение. Поверхностное упрочнение в основном связано с применением различных методов поверхностно-пластического деформирования поверхности деталей из титановых сплавов, при этом наибольшими технологическими возможностями обладает процесс дробеструйного упрочнения. Процесс дробеструйного упрочнения позволяет обрабатывать поверхности деталей сложной формы, исключить появление концентраторов напряжений на поверхности деталей за счет стабилизации шероховатости обработанных поверхностей, создавать в поверхностном слое необходимые сжимающие остаточные напряжения и степень пластической деформации. По данным В. Н. Моисеева, свойства высокопрочных титановых сплавов оцениваются через коэффициент стабилизации  $\beta$ -фазы ( $K_\beta$ ),

который имеет следующие значения: ВТ16 –  $K_{\beta} = 0,8$ , ВТ23 –  $K_{\beta} = 0,9$ , ВТ22 –  $K_{\beta} = 1,2$ , ВТ35 –  $K_{\beta} = 1,45$ .

В табл. 1.1 показаны основные механические свойства, применяемых в авиастроении высокопрочных титановых сплавов.

Таблица 1.1

**Механические свойства титановых сплавов**

Марка титанового сплава	$K_{\beta}$	Механические свойства		
		$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
ВТ16	0,8	1050	12	40
ВТ22	1,2	1150	8	18
ВТ22И	1,2	1100	10	16
ВТ23	0,9	1100	8	18
ВТ35	1,5	1150	7	14

Здесь  $\delta$  – относительное удлинение при разрыве, %;  $\Psi$  – относительное сужение, %.

На рис. 1.1 показана амортизационная стойка передней опоры пневмогидравлического типа с однокамерным пневмогидравлическим амортизатором шасси самолета ИЛ 476, которая включает в себя следующие детали: рычаг, шпиг-шарнир, рычаг разворота, амортизатор главного шасси и ось, а также крупногабаритные детали узлов шасси, балок тележек и траверс. Именно стойка поглощает основную нагрузку при посадке, воспринимает нагрузки при разбеге, пробеге, рулении и буксировке самолета и тем самым снижает усилия, передающиеся на остальные части самолета [15, 58]. Конструкция амортизационной стойки имеет концентраторы напряжений в виде радиусов перехода, галтелей. Кроме того, это полая конструкция, поэтому, как правило, на заключительном этапе обработки применяются методы поверхностно-пластического деформирования [7, 29].

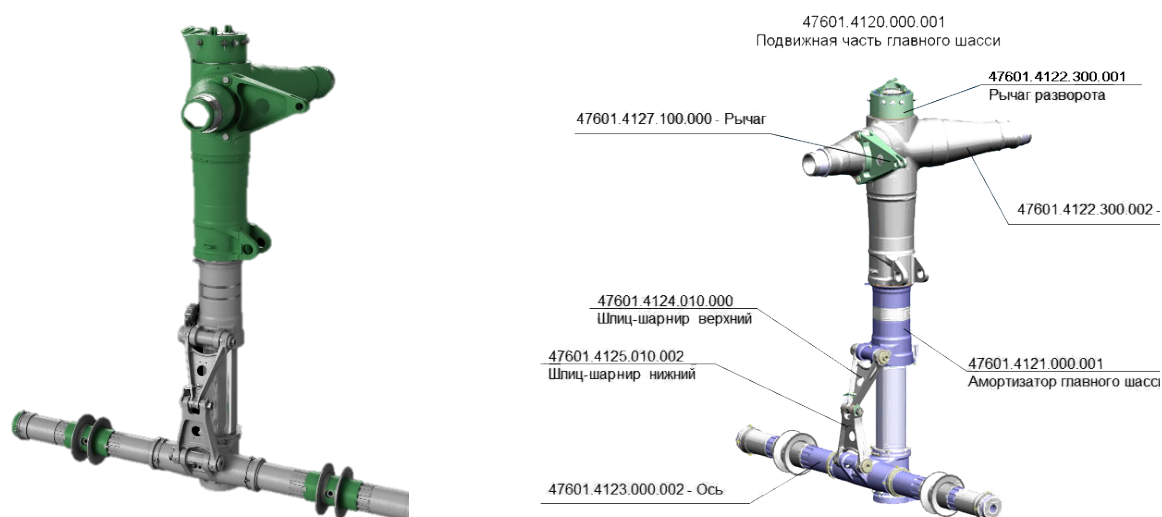


Рис. 1.1. Амортизационная стойка передней опоры пневмогидравлического типа

В современных конструкциях взлетно-посадочных устройств предъявляются высокие требования к качеству поверхностей, которые влияют на надежность авиационных деталей и обеспечиваются правильным построением операций упрочнения. Данными проблемами занимались отечественные ученые, такие как А. А. Маталин, И. В. Кудрявцев, А. П. Бабичев, Э. В. Рыжов, В. В. Петросов, В. М. Смелянский, А. Г. Суслов, Д. Д. Папшев и многие другие, которые исследовали природу поверхностного упрочнения и ее роль при разработке технологии упрочнения, влияющую на эксплуатационную надежность деталей.

В работах [45, 46, 52, 58, 62, 69] рассматриваются различные методы упрочнения деталей из титановых сплавов: гидро- и пневмодробеструйная обработка, алмазное выглаживание, обкатывание и раскатывание поверхностей шариками и роликами, дорнование и др.

Анализ процессов упрочнения показывает, что наиболее перспективным методом упрочнения крупногабаритных деталей из титановых сплавов, которые имеют сложные пространственные формы, являются процессы пневмодробеструйного упрочнения.

Необходимо иметь в виду, что технологический процесс изготовления данных деталей достаточно сложен, так как они изготавливаются из титановых сплавов в условиях единичного и мелкосерийного производства.

В работах [21, 30, 68, 71, 73, 75] исследованы усталостные свойства деталей из титановых сплавов и влияние концентраторов напряжений на эксплуатационную долговечность. Показано, что область применения деталей из титановых сплавов снижается, так как титановые сплавы очень чувствительны к знакопеременным нагрузкам, связанным с разрушениями деталей, поэтому к качеству поверхностного слоя предъявляются повышенные требования [12].

Анализ литературных источников по технологии упрочнения деталей из титановых сплавов показал разнообразие методов поверхностного пластического деформирования (ППД): гидродробеструйная и пневмодробеструйная обработка [7,8, 15-19, 25,34, 61, 96, 101], вибро- и гидрогалтовка [6, 68, 62, 118, 119], алмазное выглаживание, обкатывание [11, 30, 41, 80, 95, 108, 122], упрочнение механическими щётками [132], дорнование [91], упрочнение ультразвуком [47, 53, 69, 126] и т. д.

Деталь «Траверса» (рис. 1.2) упрочняется по наружной поверхности с помощью пневмодробеструйной обработки, внутренние цилиндрические отверстия раскатываются. В этом случае, доля пневмодробеструйной обработки составляет 90 % от трудоемкости упрочняющих операций.



Рис. 1.2. 3D-модель детали «Траверса»

На рис. 3.1 зеленым цветом показаны поверхности диаметром от 200 до 400 мм, которые подвергаются ПДУ.



Рис. 1.3. Обрабатываемые поверхности детали «Траверса»

В производственных условиях АО «Авиаагрегат» пневмодробеструйное упрочнение указанных деталей из титановых сплавов BT22 осуществлялось на установке с ЧПУ АKN-O-330-30 A5-N на следующих режимах:

1. Скорость дроби – 60 м/с.
2. Угол наклона сопла – 60 – 90°.
3. Расстояние от сопла до поверхности – 150 – 200 мм.
4. Диаметр дроби – 0,3 мм.
5. Скорость движения сопла – 0,5 – 0,6 мм/с.
6. Материал заготовки – титановый сплав BT22.
7. Материал дроби – ASh-230 (55 – 62 HRC).
8. Давление воздуха –  $1,8 \pm 0,2$  бар.
9. Количество сопел – 2.
10. Расход дроби на каждое сопло –  $2,5 \pm 0,25$  кг/мин.

Допустимые технологические параметры поверхности для данной группы деталей из титановых сплавов после пневмодробеструйного упрочнения следующие:

1. Допустимая деформация образцов-свидетелей (С) – 0,1 – 0,2 мм.

2. Микротвердость –  $HV$  810 МПа.
3. Глубина упрочнения – 100 мкм.
4. Максимальное значение остаточных напряжений – 800 МПа.
5. Глубина залегания остаточных напряжений – 100 мкм.
6. Допустимая шероховатость поверхности  $Ra = 1,6 - 3,0$  мкм.

Разработка процесса пневмодробеструйного упрочнения является ответственной операцией, которая требует анализа возможностей повышения производительности и обеспечения качества поверхности деталей.

Пути повышения производительности ПДУ:

1. Обоснованный выбор режимов процесса упрочнения, которые позволят достичь требуемого уровня и степени пластической деформации.
2. Нахождение рациональных условий взаимодействия дроби с обрабатываемой поверхностью (площадь контакта, диаметр дроби, количество сопел расход дроби, расстояние от сопла до поверхности детали, угол наклона сопла к поверхности) при обеспечении требуемого качества поверхности.
3. Проектирование оптимальной траектории движения сопла, которая обеспечивает требуемое перекрытия зон пластической деформации и создает требуемый уровень и глубину остаточных напряжений.
4. Обоснование правильного выбора скорости движения сопла для создания требуемой микрогеометрии с точки зрения упрочнения поверхности с концентраторами напряжений.

## **1.2. Общий анализ пневмодробеструйного упрочнения**

Сущность метода дробеструйного упрочнения заключается в том, что деталь подвергается воздействию потока дроби. Дробинки, увлекаемые воздушной струей, производят поверхностную обработку (упрочнение) детали, при этом меняются физические свойства поверхностного слоя металла.

Одними из первых исследователей упрочнения дробью были М. М. Саверин,



И. В. Кудрявцев и др. [53, 54, 101, 61, 62, 96]. Процесс механического наклепывания путем ударов стальной дробью изучен в 1965 году М. И. Кузьминым, который связывал повышение усталостной прочности и других эксплуатационных свойств деталей с особенностями дробеструйной обработки. М. М. Саверин [96] описывал сущность процесса дробеструйной обработки и процессы, происходящие в металле при пластической деформации. Он выдвинул теорию упрочнения поверхности пластической деформацией как результат образования плоскостей скольжения в кристалле и образования дислокации.

Известно, что пневмодробеструйное упрочнение выполняется двумя методами: эжекторный (сжатый воздух) и дробеметный (лопатки) [53, 103, 126, 134]. Основным методом при обработке сложных поверхностей потоком дроби на станках с ЧПУ является эжекторный. В качестве рабочего инструмента используется эжектор (рис. 1.4) – устройство, в котором происходит смешивание воздуха, движущегося с большей скоростью с дробью. Подготовленная смесь выстреливает через отверстие  $d_0 = 1 - 8$  мм. Сопло имеет угол раскрытия  $8 - 10^\circ$  на выходе, в результате динамическое давление преобразуется в статическое [47].

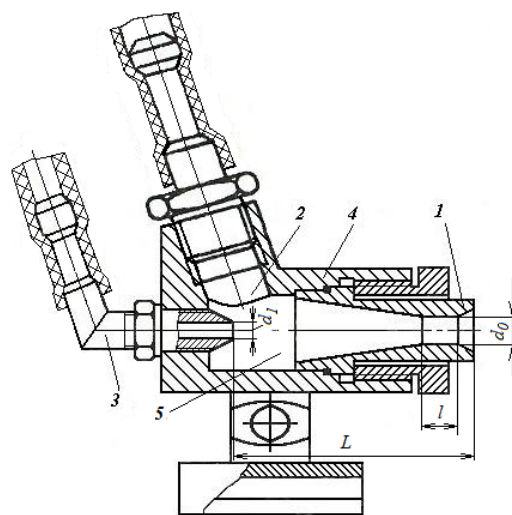


Рис. 1.4. Конструкция эжектора: 1 – сменное сопло с отверстием Вентури;  
2 – канал подачи дроби; 3 – канал подачи высокого давления; 4 – дробеструйное сопло;  
5 – камера низкого давления для смешения воздуха и дроби

Смесь воздуха с дробью при выходе из сопла перемещается в продольном и поперечном направлениях, поэтому поперечное сечение струи увеличивается по

мере приближения к поверхности детали, изменяя скорость движения струи. В практических расчетах для круглого сечения струи угол одностороннего расширения струи колеблется от  $\alpha_1 \approx 7^\circ$  до  $\alpha_1 \approx 15^\circ$  (рис. 1.5) [7].

На начальном участке (см. рис. 1.5) скорость движения  $v_m$  воздуха и смеси на аэродинамической оси равна скорости истечения  $v_0$  из отверстия сопла. На основном участке скорость  $v_m$  снижается, а характер её распределения по сечениям описывается безразмерным уравнением Шлихтинга:

$$\frac{v}{v_m} = \left[ 1 - \left( \frac{y}{R_{гр}} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^2, \quad (1.1)$$

где  $v$  – скорость какой-либо выбранной точки сечения, находящейся на удалении  $y$  от оси;

$R_{гр}$  – радиус внешней границы струи в том же сечении, вычисляемый по формуле

$$\frac{R_{гр}}{r_0} = \left( 3.4 \frac{aS}{r_0} + 1 \right). \quad (1.2)$$

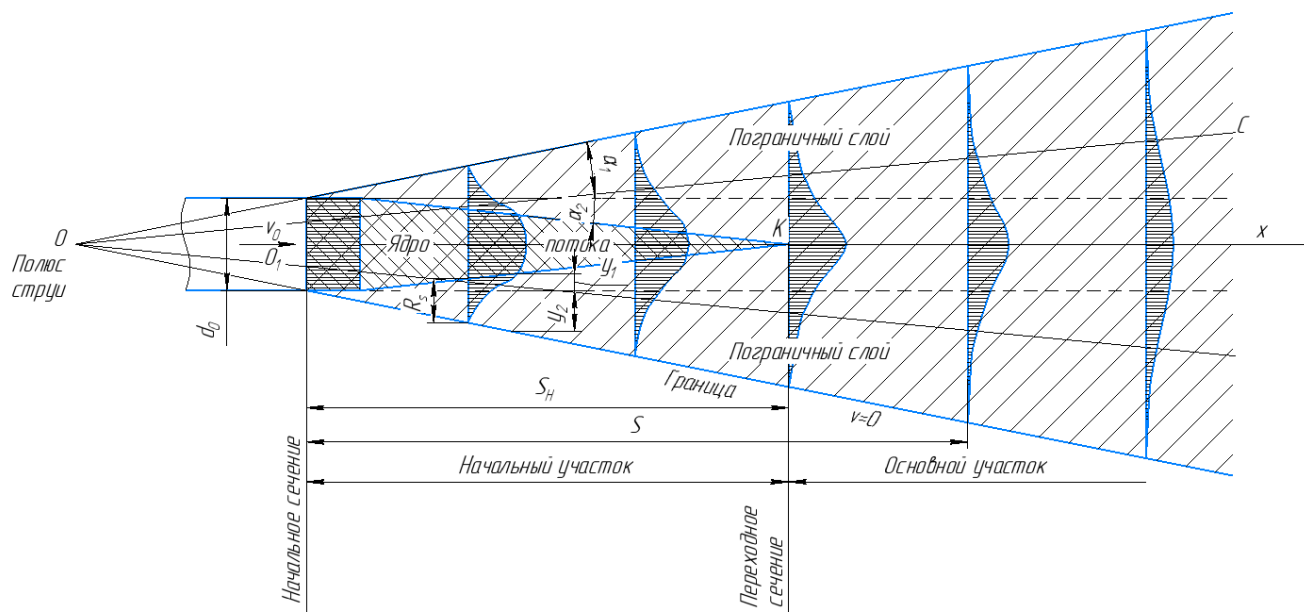


Рис. 1.5. Схема свободной струи

Уменьшение массы дроби снижает скорость (в горизонтальном направлении). Расчёты проведены при неподвижном сопле, без учета диаметра дроби, угла наклона потока дроби, изменения скорости и направления движения дроби при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью, однако они подтверждают, что в пределах используемых расстояний от сопла до обрабатываемых поверхностей в пределах 100 – 200 мм сила сопротивления воздуха мала и можно говорить о равномерном прямолинейном движении микрочастиц в горизонтальном направлении [61].

В. М. Смелянский [99] рассматривает механизм формирования поверхностного слоя в процессе ППД с позиции механики сплошных сред. Им предложена модель процесса накопления поврежденности в металле и разработана методика определения предельной пластичности при статическом нагружении, что не учитывает динамические процессы взаимодействия потока дроби с поверхностью.

В динамических процессах глубину деформации определяют через геометрические параметры отпечатка. При многократных ударах, И. В. Кудрявцев [53] предлагает формулу (1.3), связывающую глубину деформации с диаметром дроби и физико-механическими характеристиками материала

$$h_H = K_{пл}d, \quad (1.3)$$

где  $K_{пл}$  – коэффициент, для стали равный 1,5;

$d$  – диаметр дроби, мм.

При динамическом контакте дроби с обрабатываемой поверхностью деформации вызывают в зоне контакта интенсивное смятие металла в радиальном направлении [18]. Как видим (рис. 1.6), в процессе динамического удара (скорость дроби 50 м/с) наблюдается стабилизация диаметра отпечатка ( $d$ ) материала после 10 ударов.

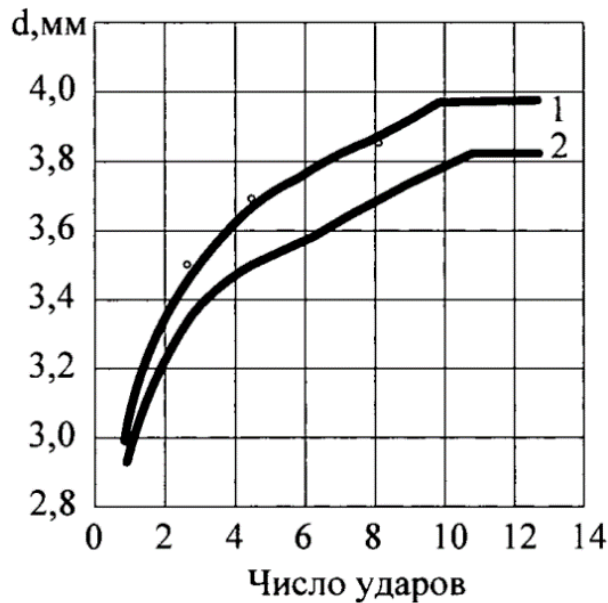


Рис. 1.6. Изменения диаметра отпечатка при диаметре дроби: 1 – 10 мм, 2 – 8 мм

При динамическом взаимодействии дроби увеличение числа ударов с 5 до 12 увеличивает размер отпечатка в 1,25 – 1,55 раза.

В литературных источниках отсутствуют сведения о взаимодействии дроби с титановым сплавом ВТ22; кроме того, в исследовании не учитывается изменение физических свойств материала после каждого удара.

В работе М. М. Саверина [96] приводится следующая формула, которая характеризует степень поверхностной деформации  $\psi$  как отношение диаметра отпечатка  $d_1$  к диаметру дроби  $d$  :

$$\psi = d_1/d, \quad (1.4)$$

где  $d_1 = A \cdot d^B$ ,  $A$  и  $B$  – эмпирические коэффициенты, по данным И. В. Кузнецова, для титановых сплавов  $A = 0,34$ ,  $B = 0,9$ .

В работе [7] степень поверхностной деформации  $\psi$  связывается со скоростью дроби и с твердостью обрабатываемого материала (рис. 1.7).

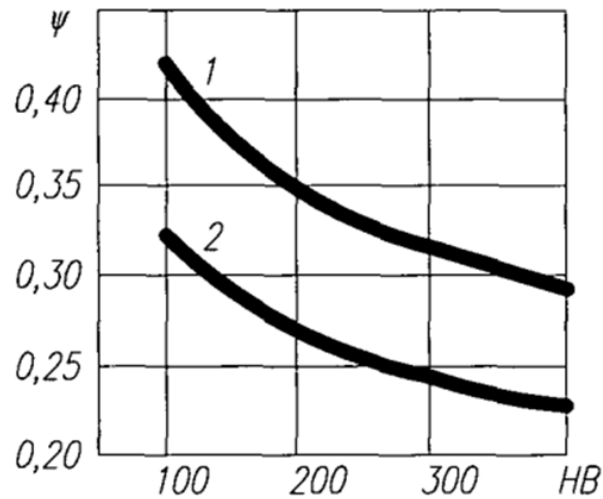


Рис. 1.7. Влияние твердости на степень поверхностной деформации при  $d = 1$  мм [10]:  
 1 – скорость  $V = 50$  м/с; 2 – скорость  $V = 30$  м/с

Автором установлено, что увеличение скорости дроби на 40 – 50 % повышает степень поверхностной деформации  $\psi$  в 1.3 раза. В исследованиях не изучено взаимодействие с высокопрочными титановыми сплавами.

Известно [57], что площадь отпечатка зависит от диаметра дроби, расстояния от сопла до поверхности и углов наклона сопла в продольном и поперечном направлениях.

Автор обращает внимание, что на формирование структуры струи оказывают влияние показатели процесса упрочнения. Опираясь на схему, приведенную на рис. 1.8, можно рассчитать размер контактного отпечатка по формуле (1.5).

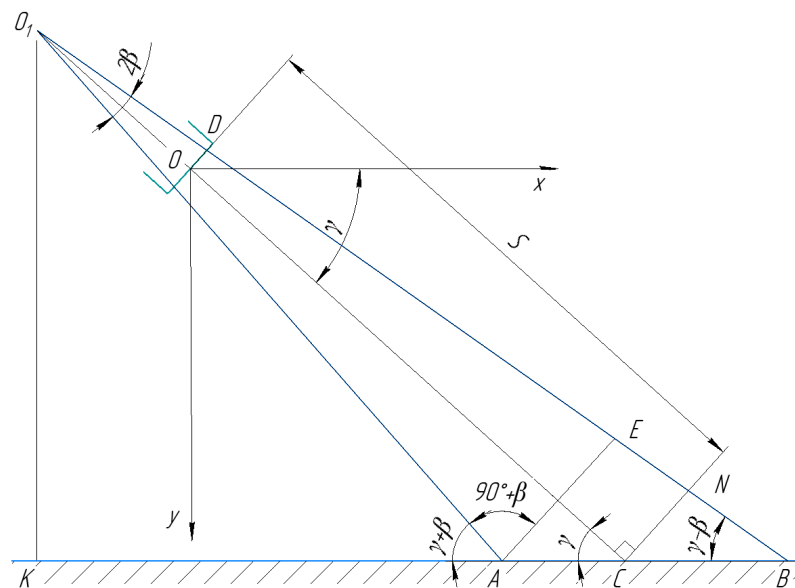


Рис. 1.8. Структурная схема свободной струи

Таким образом, площадь контакта струи с поверхностью рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{отп}} = \frac{\pi}{2} \left( \frac{d_0}{2 \operatorname{tg} \beta} + S \right)^2 \sin \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta \left[ \frac{1}{\operatorname{tg}(\gamma - \beta)} - \frac{1}{\operatorname{tg}(\gamma + \beta)} \right], \quad (1.5)$$

где  $d_0$  – диаметр сопла, мм;  $S$  – расстояние от сопла до поверхности детали, мм;  
 $2\beta$  – угол расширения потока;  $\gamma$  – угол наклона сопла.

Проведенное исследование не учитывает форму поверхности, скорость движения сопла, диаметр дроби, изменение скорости и направление движения дроби при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью.

### **1.3. Моделирование процесса ПДУ и пути его совершенствования**

В настоящее время эффективность процесса упрочнения зависит от многих факторов, поэтому, чтобы разобраться во влиянии этих факторов на качество поверхности деталей, применяют различные компьютерные программы, в том числе имитационное моделирование. Процесс ПДУ играет ключевую роль в повышении эффективности обработки и обеспечении стабильного качества поверхностного слоя деталей из титановых сплавов. Для его реализации необходимо разработать математические модели, которые помогут определить оптимальные параметры обработки.

Управление процессами ПДУ может быть представлено в виде детерминированных моделей [39, 40, 42, 43, 52], когда ряд параметров процесса считаются постоянными, но при этом один из параметров (скорость дроби) изменяется в широких пределах. В этом случае математическая модель ПДУ относится к моделям нелинейного программирования.

Наиболее часто в работах регрессионные модели и эмпирические зависимости используются при упругопластическом деформировании [9, 32], при ППД труднообрабатываемых материалов [13,44], определении микротвёрдости поверхности [11, 23, 46], скорости дроби [19, 36], угле атаки и диаметре дроби [37,

40, 54], максимальном напряжении в зоне контакта [10, 68], шероховатости поверхности [22, 26, 61]. Авторы исследований [4, 44, 61] разработали регрессионные модели, учитывающие воздействие режимов ПДО на шероховатость поверхности.

При обкатывании стальных поверхностей шариками ученые Д. А. Галин, Н. И. Мухелишвили, В. Прагер, В. В. Петросов, М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат, предложили методики определения пластических и упругих деформаций для решения контактных задач теории упругости при различных условиях взаимодействия в статической постановке.

В исследованиях активно использовались программные продукты на основе метода конечно-элементного анализа, такие как ANSYS, LS-Dyna, Deform и др. Это дало возможность Д. Л. Скуратову разработать в ANSYS модель процесса дробеструйной обработки в квазистатической постановке, в рамках которой единичная дробь взаимодействует с поверхностью. Например, В. П. Кузнецов [56] смоделировал данный процесс упрочнения в динамической постановке, используя программу LS-Dyna, учитывая режимы упрочнения и определил пластические деформации материала и сдвиговые напряжения при дробеструйной обработке, но это не касалось высокопрочных титановых сплавов. Эти модели были разработаны авторами в двухмерной постановке, т. е. ни один из них не учитывал движение сопла при создании конечно-элементных моделей, что, безусловно, влияет на выходные параметры процесса упрочнения.

Моделирование процесса наклепа поверхности рассматривалось в работе В. М. Пашкевича, А. В. Тюриной. При моделировании варьируется скорость движения единичного деформирующего шара в момент нанесения удара по обрабатываемой поверхности, без повторных воздействий.

Р. Геличи и Д. Криспиатико разработали модель множественных ударов для оценки влияния серии наклонных ударов на остаточные напряжения и пластическую эквивалентную деформацию, однако они не учитывали скорость движения сопла и изменение скорости дроби по мере контакта с обрабатываемой поверхностью.

С. А. Букатый и А. Н. Швецов предложили модель упрочнения тонкостенного вала с выделением поверхностного слоя толщиной 0,17 мм из материала ВТ22 и ЭП517-Ш. Были получены деформации образца, на основе которых был выбран режим упрочнения, но в их исследовании не рассматривалась скорость дробы выше 60 м/с.

Обзор литературных источников показал, что в большинстве работ представлены математические зависимости (модели), которые связывают такие параметры, как точность размеров, шероховатость поверхности, микротвёрдость и остаточные напряжения, описывающие качество обработки после операций ПДУ с режимами обработки (скоростью выглаживания, подачей и т. п.), характеризующими условия пластического деформирования взаимодействия единичной дробы с поверхностью.

Несмотря на большой опыт практического применения методов поверхностного пластического деформирования для упрочнения деталей и исследований в области поверхностного пластического деформирования, до сих пор не разработано научно-обоснованных рекомендаций управления эффективностью упрочнения крупногабаритных деталей из титановых сплавов с помощью имитационного моделирования.

#### **1.4. Исследование остаточных напряжений и микротвердости поверхности**

Определением остаточных напряжений после дробеструйной обработки занимались многие исследователи [54, 71]. По данным А. Г. Илларионова [39] титановый сплав ВТ22 сохраняет пластичность и прочность при достаточно высоких температурах 400 – 550 °С, при ПДУ деталей из титановых сплавов температура процесса не превосходит 100 – 110 °С [8], поэтому температура не может оказать существенное влияние на формирование остаточных напряжений.

В работах [19, 25, 34, 61, 79, 101, 104 и др.] показано, что на формирование остаточных напряжений оказывают влияние пластические деформации, которые



зависят от режимов обработки. Установлено, что величина и глубина распространения остаточных напряжений зависят от физико-механических свойств титанового сплава, площади контакта, скорости дроби, диаметра дроби и других факторов.

Большое значение в этой области исследования имели работы И. В. Кудрявцева, Е. Г. Коновалова, Д. Д. Папшева, М. М. Саверина и др., которые предложили математические зависимости на основе теории упругости и пластичности. При разработке технологии ПДУ важно знать глубину наклепанного слоя  $h_n$  и степень поверхностной деформации  $\psi$  [49].

И. В. Кудрявцев [53] разработал формулы определения глубины наклепанного слоя и степени упрочнения в зависимости от скорости дроби. Установлено, что с повышением скорости дроби глубина упрочненного слоя увеличивается, испытания проводились при скорости дроби 60 м/с.

В работе [103] показан механизм формирования остаточных напряжений после ПДУ, установлено, что максимум остаточных напряжений сжатия смещен вглубь поверхностного слоя в результате действия пластических деформаций, что свидетельствует о чрезмерном нагружении поверхности.

В работах С. А. Букатого, В. И. Волкова, Г. Л. Колмогорова, М. А. Корионова, М. Левескю, Т. В. Майоровой, Ф. Пиона, З. Ремигиза, К. Томаса, К. Тьерри представлены математические модели, связывающие процесс дробеструйной обработки с прочностными параметрами поверхности: величиной и глубиной остаточных напряжений, микротвердостью поверхностного слоя, влиянием концентраторов напряжений на эксплуатационную долговечность деталей.

В настоящее время появилось значительное количество исследований с целью определения глубины пластически деформированного слоя при упрочнении поверхностного слоя дробью. Однако в работах этих авторов процесс упрочнения различных деталей основан на эмпирическом опыте обработки подобных деталей и материалов. Исследование влияния режимов упрочнения на качество поверхности крупногабаритных деталей проводилось на опытных образцах, что

снижает, в какой-то степени, достоверность проводимых исследований и не дает реального обоснования выбора режимов упрочнения.

### 1.5. Исследование шероховатости поверхности

На поверхностях деталей в результате ПДУ образуются микронеровности, которые в известной степени являются концентраторами напряжений, при этом расчеты показывают, что коэффициент концентрации напряжений колеблется от 2,0 до 3,5 и зависит от режимов упрочнения и диаметра дроби [86, 90, 114]. Большое значение приобретают вопросы теоретического определения параметров шероховатости поверхностного слоя [49, 61, 120].

Вопросам формирования микропрофиля поверхности детали при ПДУ посвящено большое количество работ, авторы которых предложили схему пластического смятия микрорельефа [7, 40, 45, 61]. На рис. 1.9 показано взаимодействие единичной дроби с обрабатываемой поверхностью.

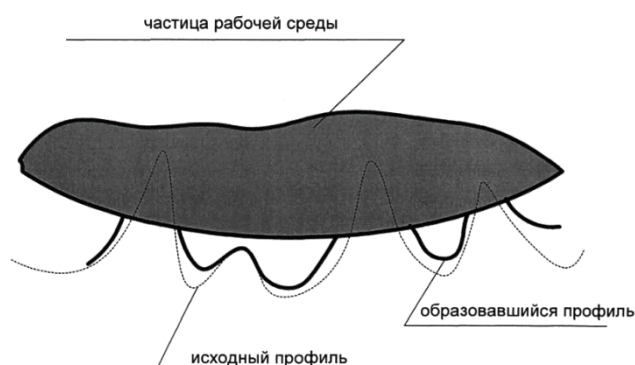


Рис. 1.9. Схема деформации микрорельефа поверхности обрабатываемого материала в зоне контакта с рабочей средой (дробью)

На основании проведенных исследований авторы сделали выводы по глубине проникновения дроби:

1. При увеличении динамического давления размеры отпечатка увеличиваются.
2. При увеличении диаметра и массы дроби размеры отпечатка увеличиваются.

3. При увеличении предела текучести материала детали размеры отпечатка уменьшаются.

4. На размеры отпечатка также оказывает влияние плотность пульпы, которая в свою очередь зависит от концентрации в ней дроби. При увеличении концентрации дроби скорость дроби снижается, что приводит к уменьшению размеров отпечатков.

5. Размеры пластического отпечатка, а следовательно, эффективность обработки при использовании ПДУ зависит от динамического состояния массива технологической дроби, действующей на обрабатываемую поверхность.

На шероховатость поверхности после ПДУ оказывает влияние шероховатость, полученная на предыдущей технологической операции [37, 44]. Исследованиями установлено, что под ударом дроби вершины микронеровностей сминаются, при этом происходит образование новой микронеровности, особенно на чистовых операциях. Очень важно, чтобы параметры шероховатости до и после обработки совпадали. Этого можно достичь регулированием режимов обработки и диаметра дроби (рис. 1.10) [84].

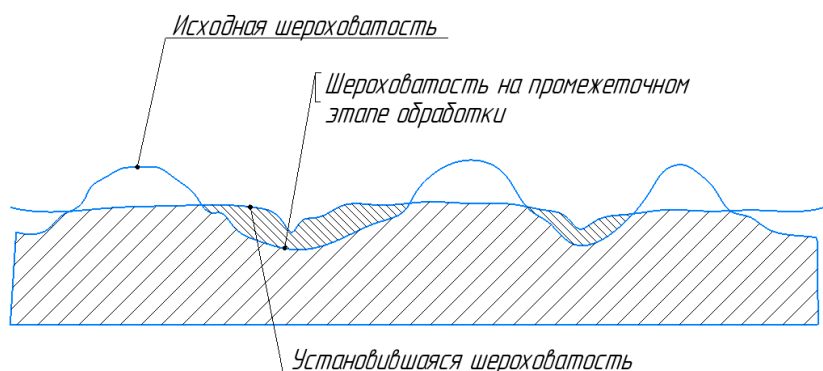


Рис. 1.10. Схема деформирования поверхности после ПДУ

Управляя режимами ПДУ, можно повысить эффективность процесса при соблюдении требуемых технических условий по качеству поверхности. Нахождение рациональных режимов ПДУ позволяет установить количественные связи между технологическими факторами и шероховатостью поверхности [75].

Особенности формирования микронеровностей при обработке ПДУ следующие:

- равномерность шероховатости в продольном и поперечном направлениях;
- увеличение радиуса закругления во впадинах микронеровностей и снижения коэффициента концентрации напряжений на дне обработанных рисок;
- связь между скоростью движения сопла, диаметром дроби и средним шагом микронеровностей при ПДУ.

В работе И. Т. Семенова [56] исследовано влияние давления воздуха 0,5 МПа на высоту микронеровностей и показано, что с увеличением диаметра дроби высотные параметры повышаются.

В работе [118] приводятся исследования шероховатости при ПДУ деталей из титанового и алюминиевого сплавов. Показано, что шероховатость для деталей из титановых сплавов находится в пределах  $R_a = 1,25 - 5,0$  мкм, из алюминиевых – до  $R_a = 2,5 - 10,0$  мкм.

Несмотря на значительное количество исследований в данной области не разработана методика исследования шероховатости на крупногабаритных деталях сложной формы.

## **1.6. Выводы по главе 1**

Литературный обзор показал, что наиболее полно изучены процессы поверхностно пластического деформирования деталей простой формы из стальных и титановых сплавов с применением статического и динамического нагружения поверхности шариком или роликом. Основное количество исследований посвящено влиянию режимов упрочнения на качество поверхности (остаточные напряжения, микротвердость и шероховатость поверхности). В тоже время методы повышения прочности деталей из высокопрочных титановых сплавов недостаточно изучены. Это связано с тем, что на поверхности деталей из титановых сплавов при ПДУ наблюдается наличие концентраторов напряжений, образование высоких как растягивающих, так и сжимающих остаточных напряжений,

недопустимых пластических деформаций. Кроме того, данные детали крупногабаритные, имеют сложную пространственную форму, поэтому основным процессом упрочнения является пневмодробеструйная обработка.

Анализ технической литературы показал большое количество регрессионных моделей по оценке влияния режимов и условий ПДУ деталей из титановых сплавов на производительность процесса, формирование требуемых остаточных напряжений, микротвердости и параметров шероховатости поверхности.

В работах приведены аналитические и эмпирические зависимости, связывающие качество поверхности с режимами ПДУ и кинематическими возможностями дробеметной установки, но не до конца раскрывающие технологические возможности оборудования.

Выбор режимов ПДУ предусматривает построение имитационных моделей процесса взаимодействия дроби с обрабатываемой поверхностью. Однако в существующих моделях не учитываются особенности взаимодействия единичной дроби, структура факела струи и роль распыляющего сопла при высоких скоростях упрочнения на степень пластической деформации и шероховатость поверхности детали. Разработка имитационных моделей ПДУ не учитывает предельно допустимую деформацию и глубину деформационного упрочнения в зоне обработки, которые заданы техническими требованиями на изготовление. Кроме того, не разработаны конечно-элементные и имитационные модели в динамической постановке, позволяющие изучить влияние режимов ПДУ на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей из высокопрочных титановых сплавов.

Таким образом, исследования влияния режимов и условий ПДУ на основные параметры качества поверхности деталей из высокопрочных титановых сплавов разрознены и не подкреплены адекватными математическими моделями. Кроме того, не приведены научно-обоснованные методики оценки эффективности упрочнения и выбора рациональных режимов обработки, базирующихся на физических процессах, сопровождающих движение дроби, и контактом взаимодействия пятна контакта дроби с обрабатываемой поверхностью.

## ГЛАВА 2. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПДУ

### 2.1. Модель ударного взаимодействия дроби с упрочняемой поверхностью

Принципы дробеструйной обработки хорошо известны: воздействие большого количества ударов, обычно сферических тел, по поверхности металлического компонента, которые вызывают локальную пластичность; это приводит к формированию сжимающих остаточных напряжений на поверхности компонента, которые уменьшают вероятность образования и роста усталостных трещин.

В качестве ключевых параметров при описании процесса ПДУ используются такие параметры, как материал и его твердость, размер единичной дроби, скорость дроби и др. Опираясь на то, что финишное дробеструйное упрочнение является ответственной операцией, полезно иметь возможность анализировать имитационную модель процесса ПДУ по нескольким причинам:

- уметь прогнозировать состояние материала после упрочнения без проведения крупномасштабных физических испытаний;
- уметь разрабатывать процессы обработки, упрочнения и декорирования, которые позволят достичь желаемого уровня остаточных напряжений;
- изучить последствия ПДУ материала, к которому предъявляются особые технические ограничения по качеству поверхностного слоя.

В настоящей работе процесс движения потока дроби в скоростной воздушной струе и их динамическое воздействие на обрабатываемую поверхность имитируются в параметрическом виде с помощью программ, основанных на использовании метода конечных элементов.

Данный метод даёт возможность рассмотреть подробную хронологию напряжений во время воздействия удара, развитие полей пластической деформации в обрабатываемом материале и, следовательно, оценку поля остаточных напряжений, созданного единичным взаимодействием. Однако следует отметить,

что экстраполяция этого единичного воздействия на практический процесс ПДУ довольно сложна. Даже с использованием методов аппроксимации для «размазывания» событий, происходящих в момент контактного взаимодействия, анализ процесса 100 %-го покрытия поверхности отпечатками исследователи [77, 88] считают нецелесообразным из-за размера модели и времени анализа.

Эффективность вычислительных методов может быть улучшена путем использования дискретных элементов массы для моделирования каждого отдельного удара. Целевая структура может быть смоделирована с использованием сплошных или оболочечных элементов (тело разбито на конечные элементы равномерно или же с локальным сгущением), а воздействие каждого удара по модели преобразуется в поверхностные деформации с помощью программного алгоритма вычисления контактных напряжений.

Этот метод привлекателен по своей эффективности и в применении к реальным процессам упрочнения, но его точность в значительной степени зависит от уточнения сетки в структуре модели и формы вычислительного алгоритма контактных напряжений, который по определению является приближенным.

Основная проблема с использованием численных методов, независимо от способа, используемого для моделирования ПДУ, заключается в том, что анализ действительно динамичен. Единственными диссипативными механизмами в модели являются пластическая деформация и фрикционные эффекты. Как только ударная дробь покинула поверхность и пластическая деформация больше не осуществляется, симуляция просто покажет динамическое, упругое движение поверхностей. Если цель состоит в том, чтобы предсказать величину и форму профиля остаточных напряжений, полученную в результате деформацию структуры, тогда необходимо статическое решение.

Если основной целью анализа является прогнозирование статической деформации ударного компонента, следовательно, эффективный подход заключается в распределении остаточных напряжений во всех точках модели и в некотором роде в инициализации структуры с этим шаблоном остаточного напряжения. Статический анализ затем обнаружит деформацию структуры,

которая определит поле равновесного остаточного напряжения. Две основные проблемы, связанные с этим подходом, заключаются в идентификации профиля остаточных напряжений и добавлении этого профиля в модель конечных элементов.

Получив профиль остаточных напряжений для заданного набора параметров обработки, профиль необходимо наложить на модель конечных элементов. Можно ввести набор начальных напряжений в сетку конечных элементов, поэтому, когда анализ начинается, элементы сразу же подвергаются остаточному неравновесному полю напряжений, которое вызывает деформацию. Однако это мгновенное приложение остаточного напряжения может быть сложным для успешного анализа, особенно если структуры очень гибкие и, следовательно, могут претерпевать большие искажения [22, 47].

При исследовании технологических параметров ПДУ важную роль играет взаимодействие дроби с поверхностью обрабатываемой детали. Данный процесс исследовался в работах [25, 37], где показано, что при обработке дробь взаимодействует с пространственными поверхностями детали сложной формы, поэтому в процессе ПДУ направление движения дроби колеблется от 30 до 90°, что в общем случае приводит к решению задачи единичного взаимодействия в виде косоугольного соударения стальной дроби с поверхностью.

Исходные данные для построения модели:

- рабочим элементом процесса является стальная дробь в виде шара;
- размер дроби одинаковый;
- скольжение дроби по поверхности исключает возможность перекатывания.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная модель взаимодействия дроби с поверхностью детали отражает физическую сущность происходящих явлений, не противоречит установившимся представлениям в области отделочной обработки и позволяет перейти к построению модели формирования физико-механических и микрогеометрических параметров поверхностного слоя деталей при ПДУ.

Изменение скорости соударения деформирующих тел с поверхностью



обрабатываемой детали и их массы изменяет кинетическую энергию удара, следовательно, и степень производимой поверхностной деформации. Время обработки влияет на степень покрытия поверхности отпечатками, а также на изменение деформированного состояния поверхностных слоев при повторных ударах [53, 72].

## **2.2. Описание программного комплекса конечно-элементного моделирования**

Для моделирования процесса обработки применены программные комплексы ANSYS и RockyDEM. ANSYS — это программный комплекс, основанный на методе конечных элементов и предназначенный для автоматизированного инженерного анализа во многих отраслях техники (строительство, машиностроение, транспорт, авиация, космонавтика), а также в таких областях, как механика жидкости и газа, механика деформируемого твердого тела, теплопередача и электромагнетизм [151].

Данная программа задает перечень расчетных средств, которые учитывают разнообразные конструктивные нелинейности, дают возможность решить общий случай контактной задачи для поверхностей, могут допустить образование конечных деформаций и углов поворота, а также позволяют выполнить анализ влияния электромагнитных полей и решить задачу гидроаэродинамики и многое другое.

Для геометрического моделирования в эту платформу встроен модуль Design Modeler, реализованный на базе ядра Parasolid. Модуль симуляции Mechanical обеспечивает пользователя необходимыми инструментами моделирования. CAE-системы, приобретенные фирмой ANSYS, Inc. за последние годы, такие как CFX, FLUENT AUTODYN и др., удобно интегрированы в Workbench и могут использоваться для решения связанных задач. С помощью Workbench практически весь комплекс программных продуктов ANSYS может

быть объединен с мощными CAD-системами, такими как SolidWorks, Unigraphics, Inventor и др., в единую расчетно-проектировочную среду. На базе Workbench реализованы инструменты для обмена и эффективного управления расчетными данными пользователей (ANSYS EKM).

Программа ANSYS сочетает в себе решения различных краевых задач и предполагает знания в области метода конечно-элементного моделирования [151].

Rocky DEM — это эффективный инструмент для моделирования динамики сыпучих сред со сложной геометрией частиц методом дискретных элементов (DEM) от компании ESSS. Данное программное обеспечение выделяется на фоне аналогичных программных продуктов рядом полезных функций: несферическая форма дроби, мульти-GPU вычисления, расчет разрушения дроби без потери массы или объема и визуализация поверхностного износа. За счет интеграции Rocky DEM и Ansys Workbench расчет поведения дроби можно выполнять с учетом аспектов механики деформируемого твердого тела, вычислительной гидрогазодинамики и теплообмена. Также при использовании Ansys Workbench есть возможность выполнять многофазные эксперименты [151].

С помощью программного комплекса Ansys [151] были смоделированы две постановки задачи: струйная постановка для симуляции потока и определения ситуативных процессов, протекающих в нем, и модель единичного воздействия дроби с поверхностью. В обоих случаях варьировались параметры скорости дроби  $V$ , угла наклона сопла  $\alpha$ , диаметра дроби  $d$  и др. В визуализации потока наблюдается наличие застойной зоны у поверхности, что вызвано отскоком ударяющейся дроби и столкновением с прибывающим материалом.

## 2.3. Численное моделирование исследуемого процесса

### *Построение имитационной модели №1*

Для определения площади контакта потока дробы с поверхностью заготовки с учетом образования застойных зон, в зависимости от скорости и диаметра дробы, физических свойства материала, расстояния до обрабатываемой поверхности в системе анализа Fluid Flow (Fluent) для расчета жидкостных и воздушных сред, моделируется процесс потоковой обработки дробью в воздушной среде. Процесс построения показан в табл. 2.1.

Таблица 2.1

#### Процесс построения имитационной модели

№ п/п	Действие	Рисунок
1	Построение 2D-модели заготовки в модуле Design Modeler в виде пространства, в котором отображено расположение обрабатывающего сопла и обрабатываемая поверхность	2.1
2	Установка параметров конечно-элементной сетки в модуле Mesh и разбивка модели на конечные элементы с размером ячейки 1,5x1,5 мм и сгущением у поверхности и у сопла 1,0 мм.	2.2
3	Указание зон входа и рассеивания частиц, направляющие и целевая стены. Зона входа – место генерации расчетного потока дробы. Зона рассеивания частиц – места выхода дробы за расчетные пределы. Направляющая и целевая преграда – жесткие ограничения, задающие направление потока и обрабатываемую поверхность	2.3
4	Задание параметров решателя в модуле Fluid flow (Fluent)	2.4, 2.5
5	Решение задачи	2.6
6	Выбираются результирующие данные расчета	2.7 – 2.9

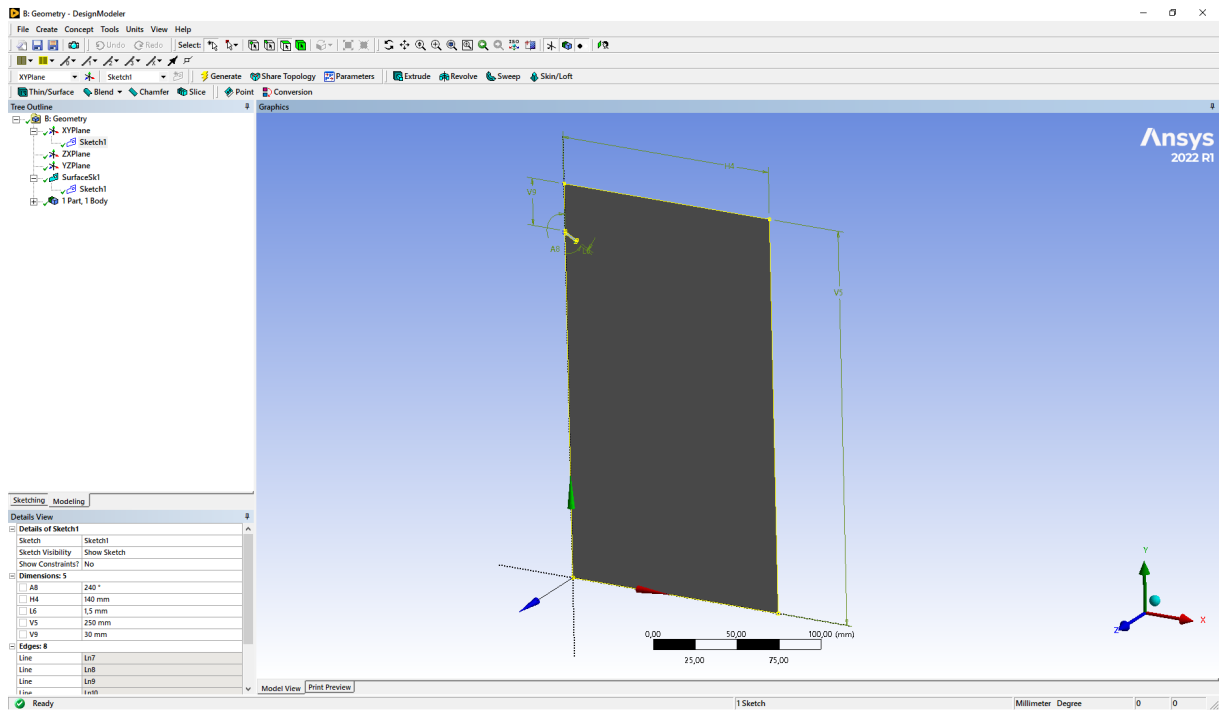


Рис. 2.1. Ansys. Design Modeler – Процесс построения модели воздушного пространства

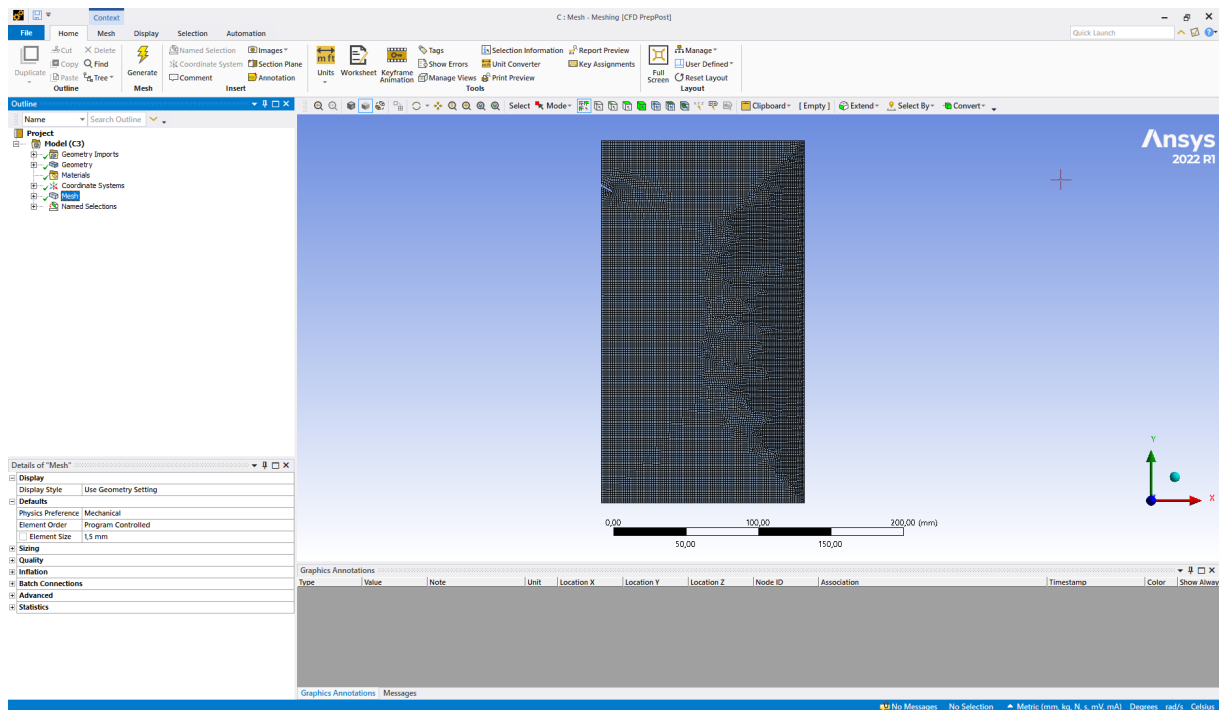


Рис. 2.2. Ansys Workbench. Meshing – Модель воздушного пространства, разбитая на конечные элементы с сеточным уплотнением в зонах входа и контакта дробы

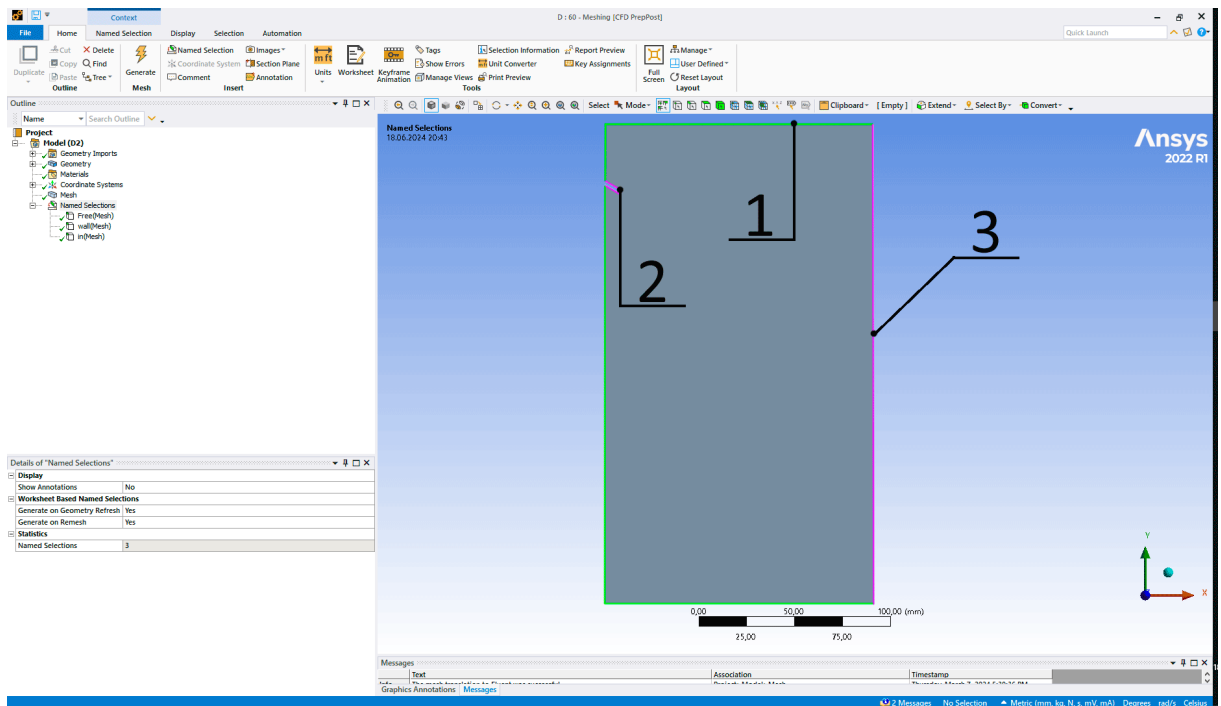


Рис. 2.3. Ansys Workbench. Meshing – Обозначение контактных зон:

1 – зона рассеивания дроби; 2 – зона генерации потока дроби;

3 – обрабатываемая поверхность

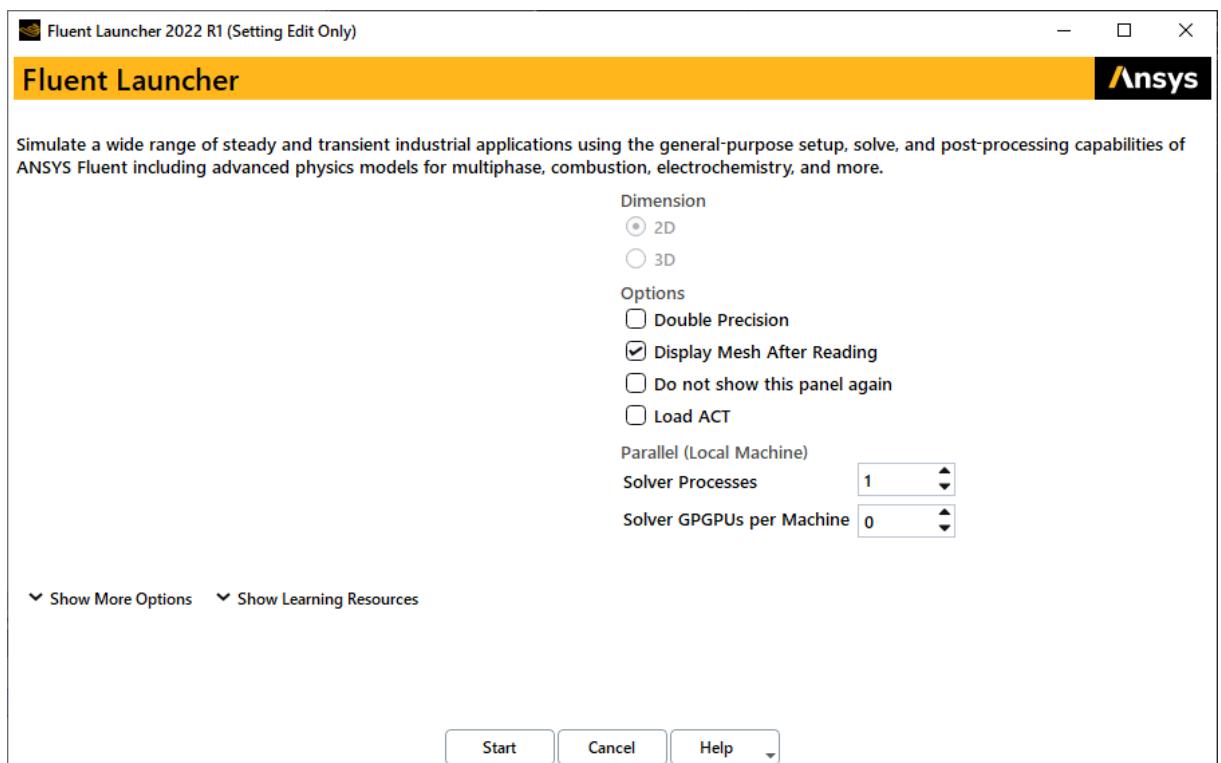


Рис. 2.4. Ansys Workbench. Fluid flow – Базовые настройки решателя

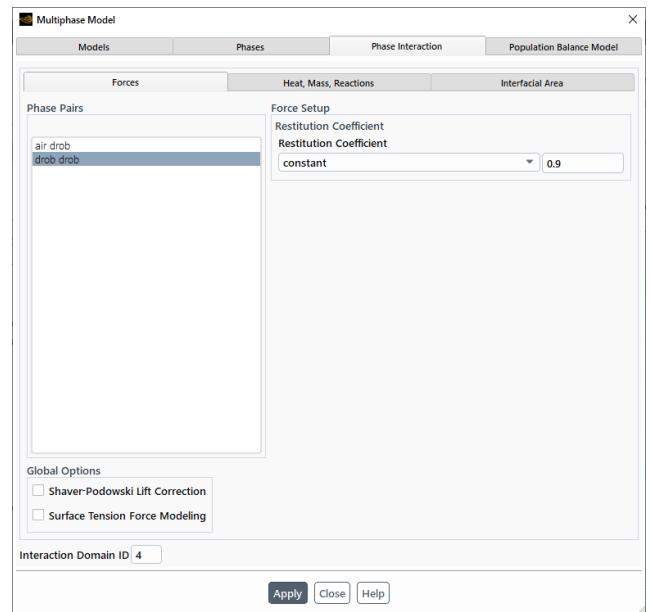
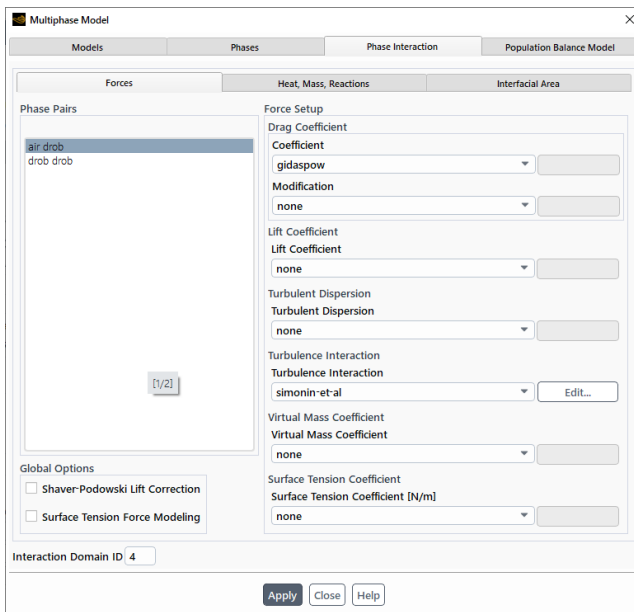
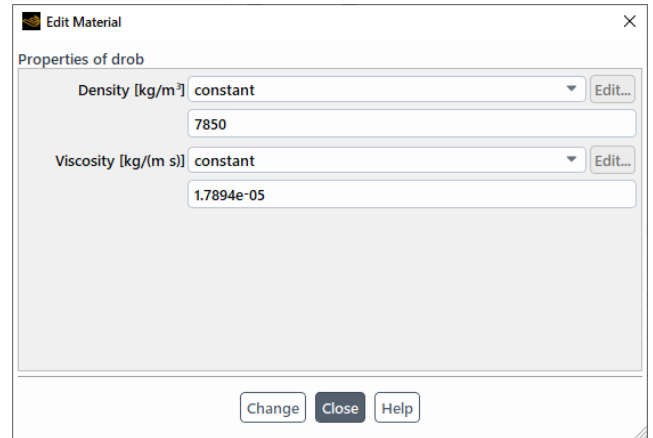
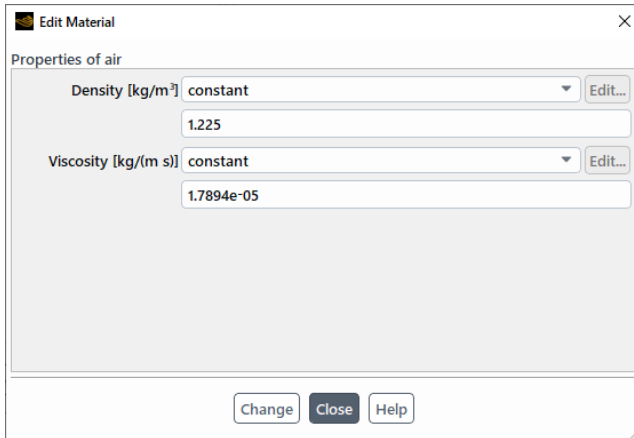
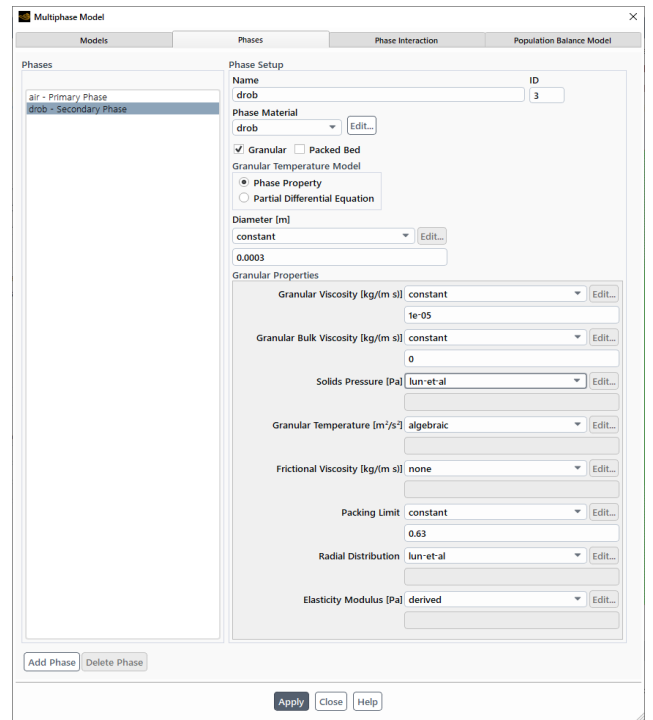
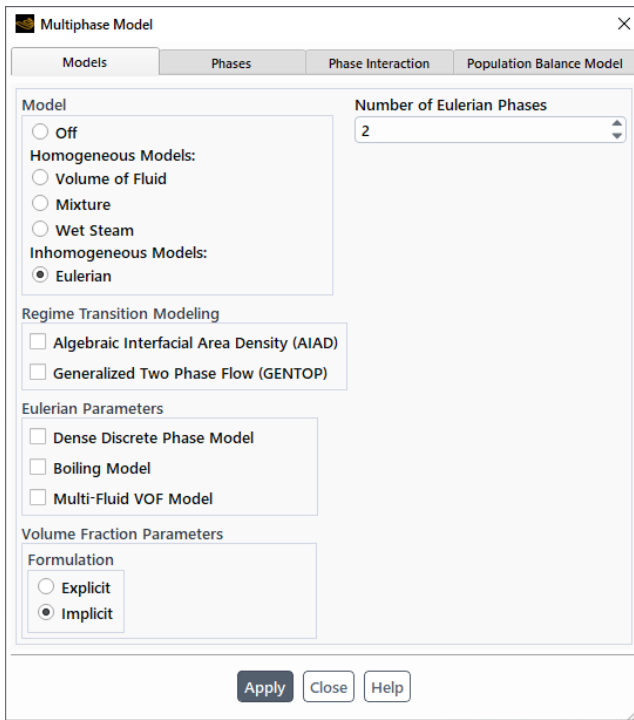


Рис. 2.5. Ansys Workbench. Fluid flow – Параметры решателя

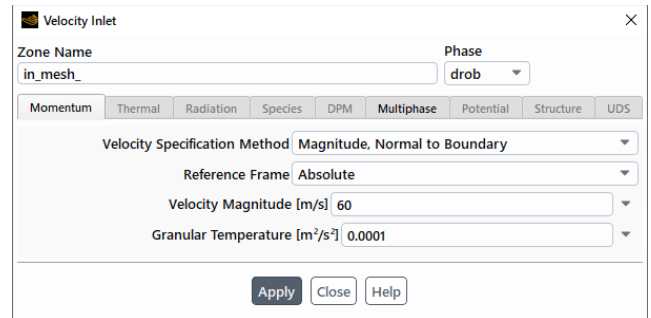
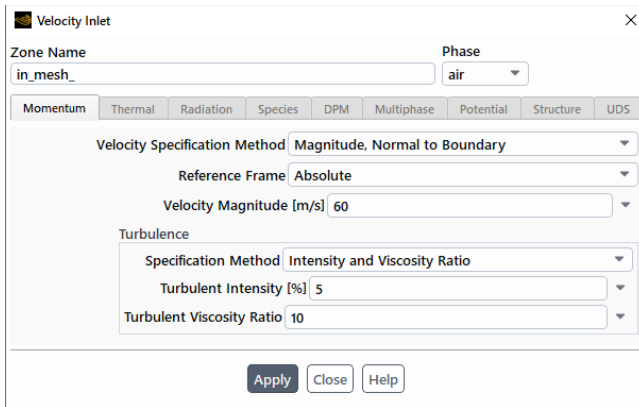
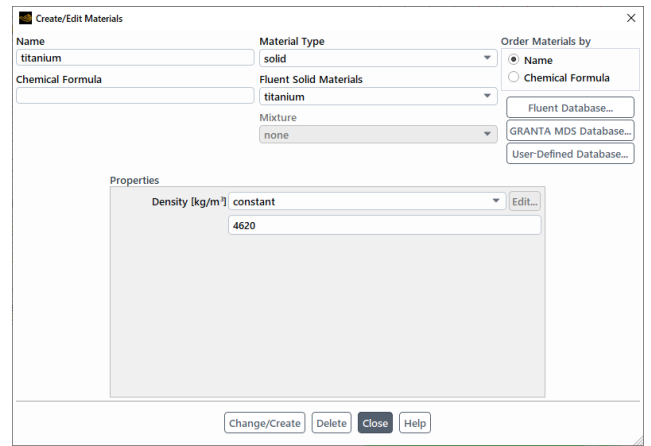
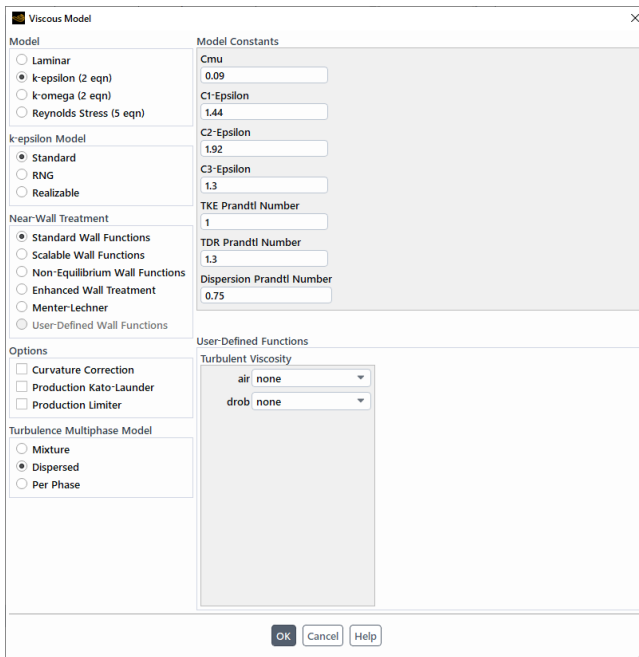


Рис. 2.5 (Окончание)

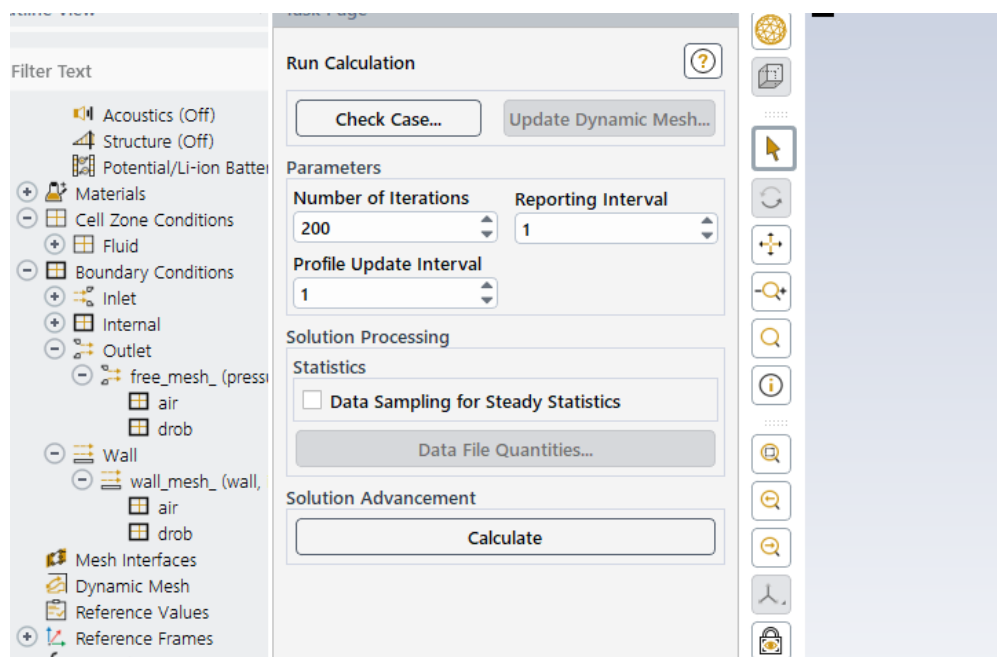


Рис. 2.6. Ansys Workbench. Fluid flow – Параметры расчета

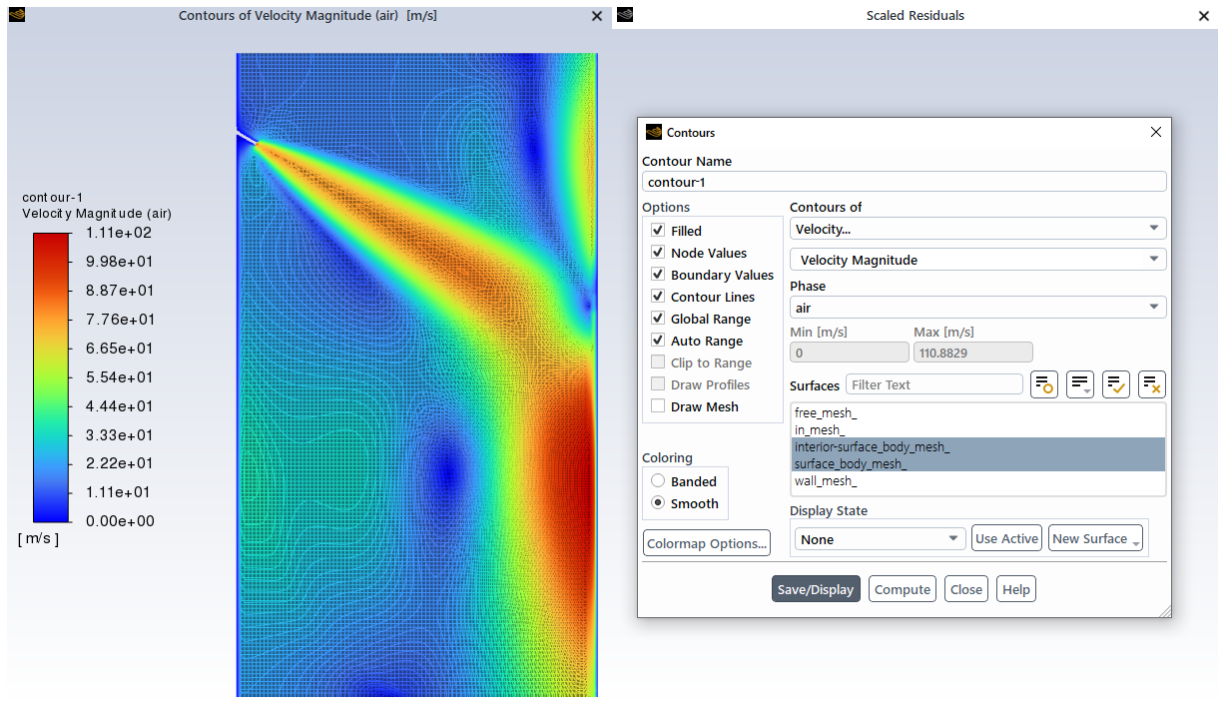


Рис. 2.7. Ansys Workbench. Fluid flow – Результат расчета скорости дробы, визуализированный цветовыми векторами (фаза дробы):  $L = 150$  мм,  $d = 0,3$  мм,  $V = 60$  м/с

Результат расчета скорости дробы визуализированный цветовыми векторами показан на рис. 2.8.

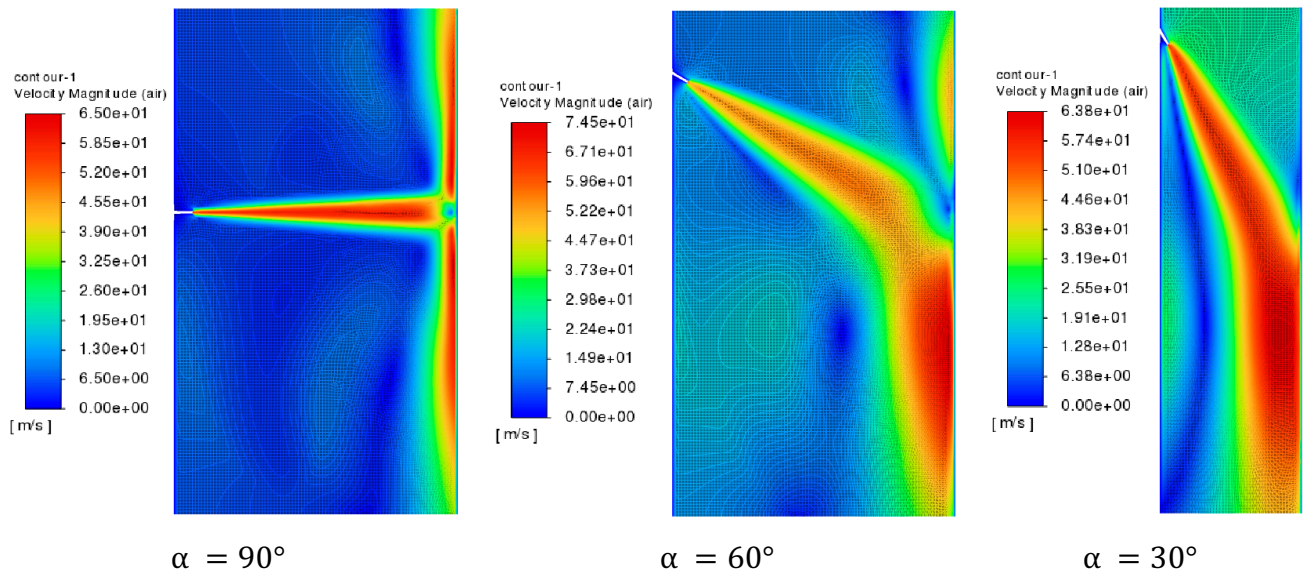


Рис. 2.8. Спектр скоростей в потоке на обрабатываемую поверхность в зависимости от угла наклона сопла:  $L = 150$  мм,  $d = 0,3$  мм,  $V = 60$  м/с

Разработана модель установившегося движения струи, которая выбрасывается в пространство и ограничивается экранирующей поверхностью,



отстоящей от сопла на определенном расстоянии  $L_{cp} \leq 180$  мм, поэтому уже на начальном участке движения, не говоря об основном участке, её нельзя считать свободной.

На рис. 2.9 изображена построенная в модуле AnsysFluent модель истечения дробы из отверстия диаметром  $d_0 = 1,2$  мм со скоростью  $V = 90$  м/с воздуха, направленного под прямым углом ( $\alpha = 90^\circ$ ) на плоскую поверхность, расположенную от сопла на расстоянии 150 мм. По данным [96] диаметр сопла не может быть меньше трех диаметров дробы.

Аналогичную по структуре струю получают при впрыске расплывленного топлива в цилиндр дизельного двигателя внутреннего сгорания на стадии сжатия смеси [7].

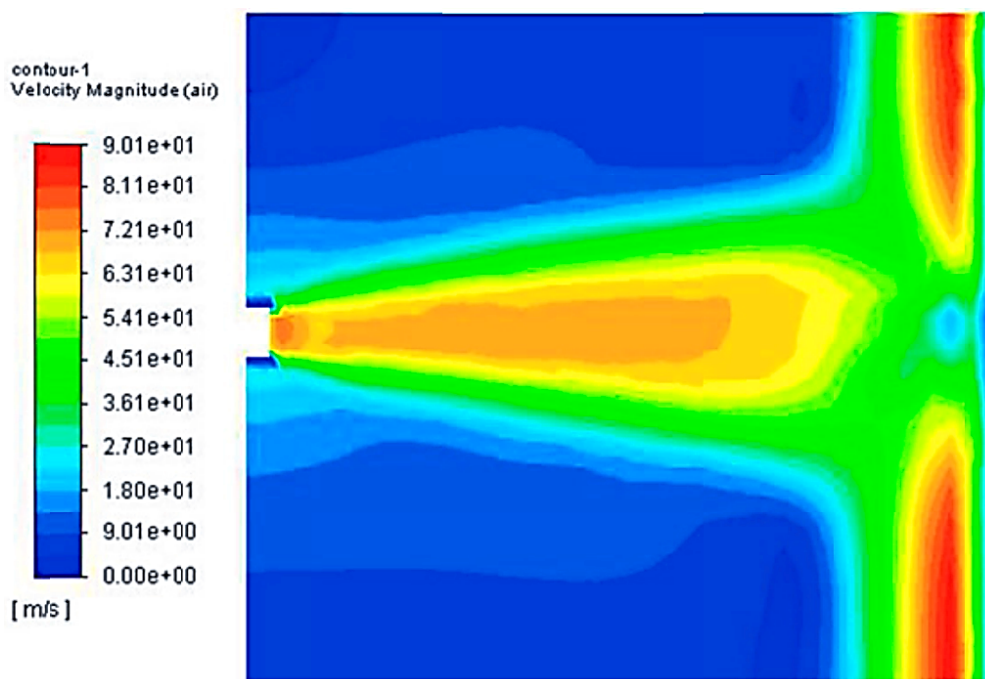


Рис. 2.9. Скоростная модель движения воздуха в зоне обработки

Условная внешняя граница струи размыта, и только за её пределами прослеживается чётко выраженный раздел с окружающим воздухом, где скорость равна нулю. Такую струю даже при отсутствии в ней дробы следует считать незатопленной. Длина участка, где начальная скорость практически сохраняется неизменной, увеличивается с 33,5 до 52,5 мм, т. е. в 1,5 раза. При дальнейшем движении вследствие возрастания сопротивления, исходящего от экрана,

продольная скорость воздушной струи падает, появляется составляющая скорости, параллельная поверхности экрана, и струя растекается по поверхности.

В центре аэродинамической оси на расстоянии 7 мм от места падения образуется застойная зона. У растекающегося потока, как и у падающего потока, имеется не касающаяся поверхности центральная часть с турбулентным слоем, где воздух движется с высокой скоростью. А около поверхности отмечается ламинарный слой, в котором скорость воздуха из-за возникших сил трения в 3 – 4 раза ниже начальной скорости. Застойная зона отмечается также при исследуемом угле сопла  $\alpha = 60^\circ$ . В этом случае данная зона чуть смещена от оси струи в сторону острого угла, куда течение воздуха затруднено, но она исчезает при перемещении сопла относительно экрана. Расходящийся поток устремлён в более открытую сторону, в сторону меньшего сопротивления.

Учитывая то, что в задаче моделируется обработка плоской поверхности, а Траверса состоит из цилиндрических поверхностей, необходимо удостовериться, что подобный подход к рассматриваемой в вычислениях преграде допустим. Для этого построена схема с наименьшим и наибольшим диаметрами детали – 200 и 400 мм соответственно (рис. 2.10). По схеме видно, что при проецировании потока на диаметральной поверхности детали схематическая длина дуги контакта составляет:  $L = 22,274$  мм для  $\varnothing 200$  мм,  $L = 22,206$  мм для  $\varnothing 400$  мм и  $L = 22,206$  мм для плоскости. Вычислив процентное соотношение между наибольшей длиной контакта, получим:  $(22,206/22,274) \cdot 100 \% = 99,69$  , следовательно, разность не превышает 0,5 %, чем в условиях реальной обработки можно пренебречь.

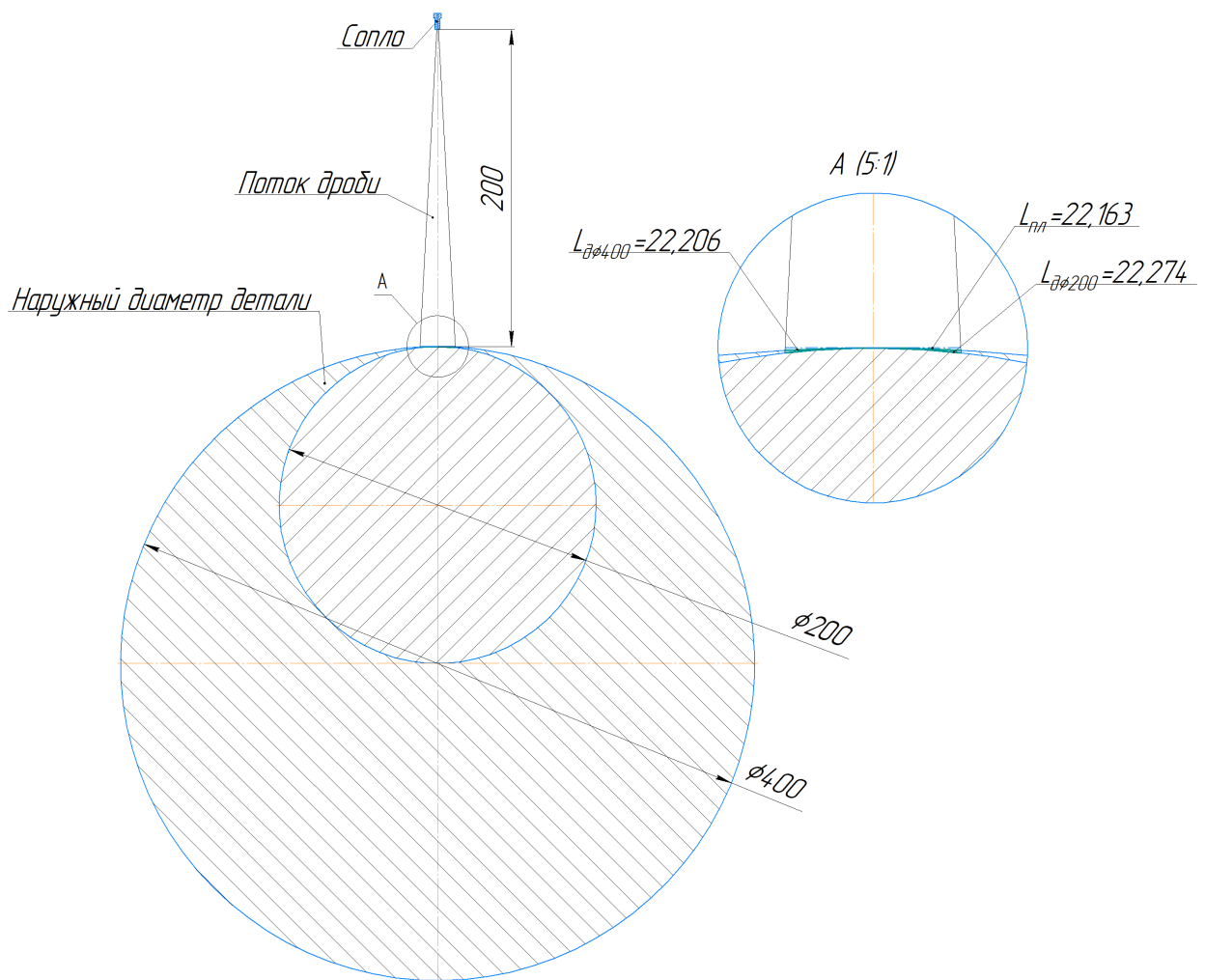


Рис. 2.10. Схема контакта потока с обрабатываемой поверхностью

### ***Построение имитационной модели №2***

Для определения остаточных напряжений, упругих и остаточных деформаций, а также глубины их залегания моделируется процесс точечного контакта потока дроби с поверхностью заготовки и с учетом накопленной пластической деформации. Процесс моделирования осуществляется в модуле Ansys Workbench. Для расчета единичного взаимодействия дроби с обрабатываемой поверхностью применяется система анализа Explicit Dynamic (явная динамика). Процесс построения показан в табл. 2.2.

## Процесс построения имитационной модели

№ п/п	Действие	Рисунок
1	Указание физических свойств для материалов расчетной модели (титановый сплав и сталь) осуществляется в пункте Engineering Data. Из набора базовых материалов выбирается Titanium и Steel. Для соответствия расчетных данных титанового сплава его физическим свойствам корректируются Density (Плотность) и Poisson`s Ratio (коэффициент Пуассона)	2.11, 2.12
2	Построение 3D-модели заготовки в модуле Design Modeler в виде параллелепипеда и сфер, направленных под углом к обрабатываемой поверхности, после чего половина модели отсекается	2.13
3	Указание плоскости симметрии модели в модуле Mechanical	2.14
4	Указание типа взаимодействия дроби с обрабатываемой поверхностью Frictional (с трением) и Friction coefficient (Коэффициент трения) 0,3	2.15
5	Установка параметров конечно-элементной сетки и разбивка модели на треугольные конечные элементы с размерами сетки 0,1 мм для дроби и 0,03 мм для заготовки	2.16
6	Задание скорости движения дроби	2.17
7	Указание ограничений модели на перемещение (все плоскости блока, кроме обрабатываемой и плоскости симметрии)	2.18
8	Указание времени расчета взаимодействия дроби и обрабатываемой поверхности – 0,000035 с	2.19

№ п/п	Действие	Рисунок
9	Выбор результирующих данных расчета: Total Deformation Equivalent Elastic Strain Equivalent Stress	-
10	Решение задачи	-

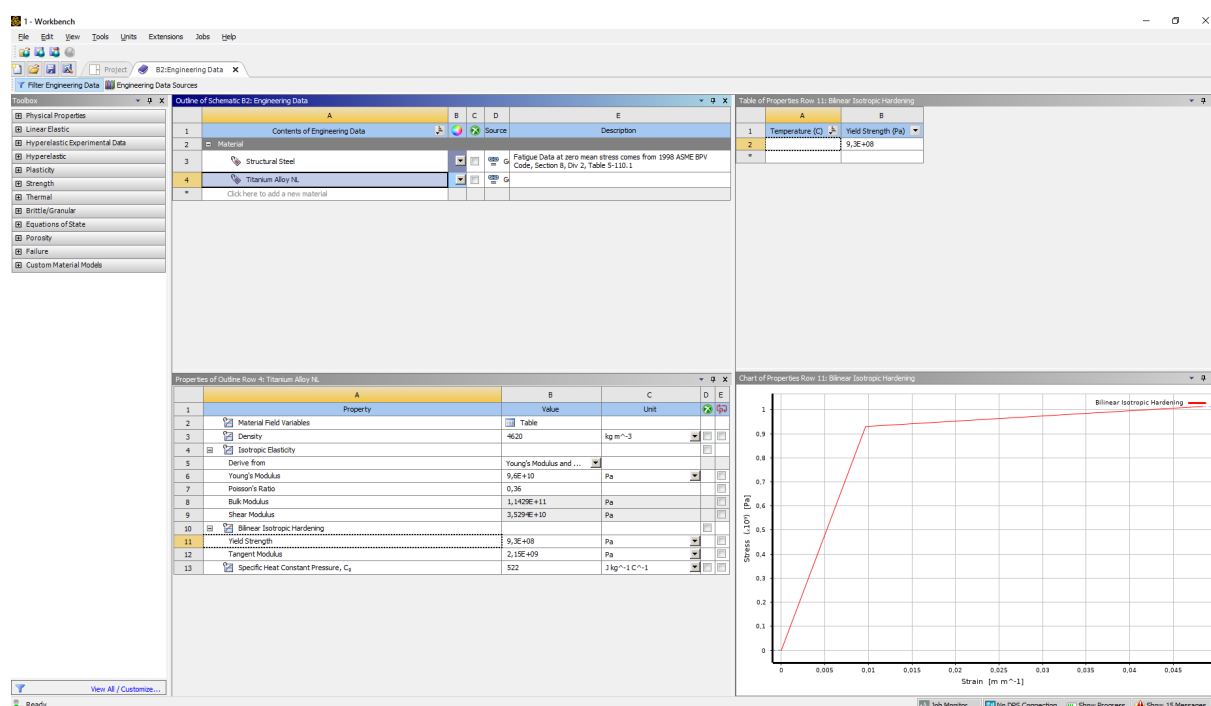


Рис 2.11. Ansys Workbench. Engineering Data - Свойства материала ВТ-22

Таблица 2.3

### Физические свойства титанового сплава

Property / Свойство	Value, Unit / Величина, размерность
Density / Плотность	4620 кг/м <sup>3</sup>
Young's Modulus / Модуль Юнга / Модуль упругости	96000 МПа
Poisson's Ratio / Коэффициент Пуассона	0,36

Property / Свойство	Value, Unit / Величина, размерность
Bulk Modulus / Объемный модуль упругости	1,1429E+11 Па
Shear Modulus / Модуль сдвига	3,5294E+10 Па
Yield Strength / Предел текучести	930 МПа
Tangent Modulus / Модуль касательной	2150 МПа
Specific Heat Constant Pressure / Удельная теплоемкость при постоянном давлении	522 Дж / (кг · К)

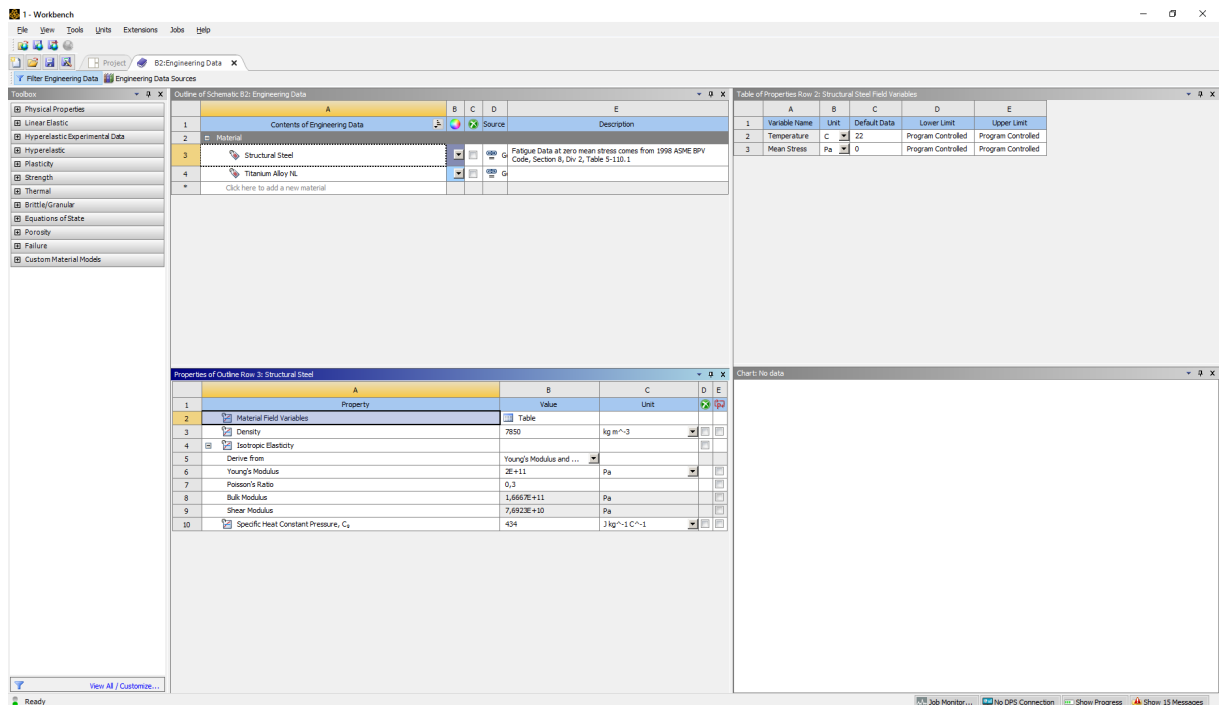


Рис. 2.12. Ansys Workbench. Engineering Data - Свойства материала Сталь (Дробь стальная литая)

## Физические свойства стального материала (дробь)

Property / Свойство	Value, Unit / Величина, размерность
Density / Плотность	7850 кг/м <sup>3</sup>
Young's Modulus / Модуль Юнга / Модуль упругости	2E+0,5 МПа
Poisson's Ratio / Коэффициент Пуассона	0,3
Bulk Modulus / Объемный модуль упругости	1,6667E+11 Па
Shear Modulus / Модуль сдвига	7,6923E+10 Па
Specific Heat Constant Pressure / Удельная теплоемкость при постоянном давлении	434 Дж / (кг · К)

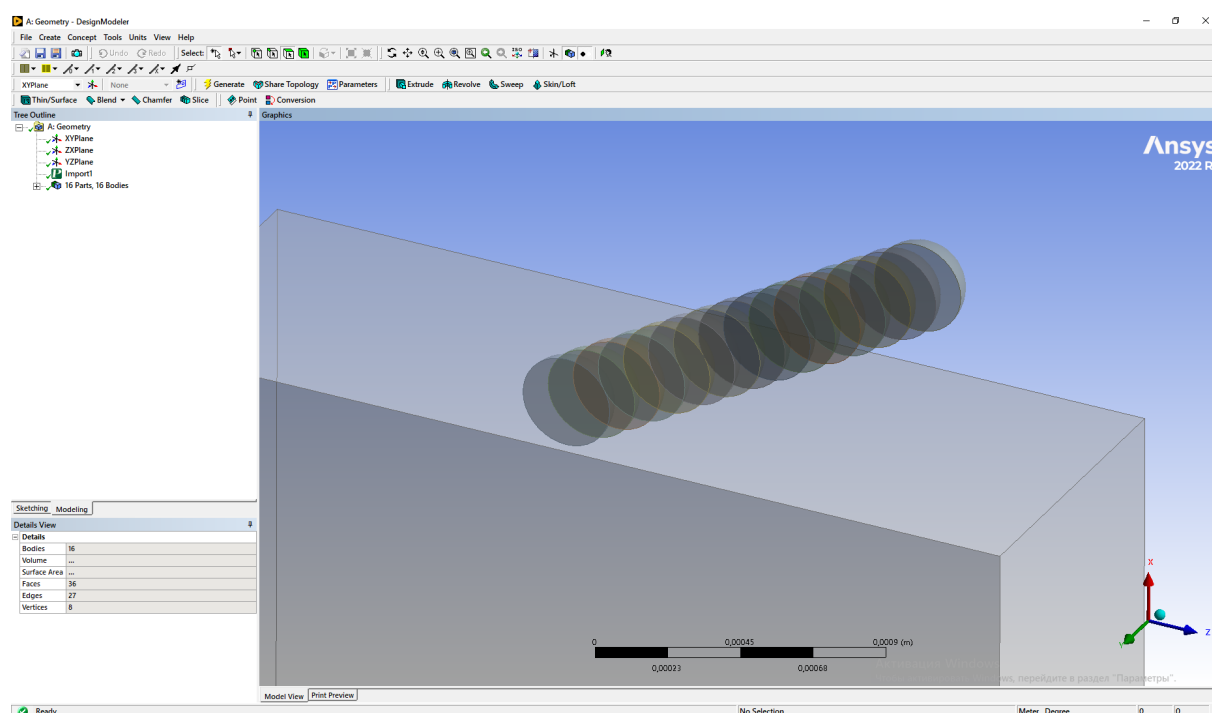


Рис. 2.13. Ansys Workbench. Design modeler – Расчетная 3D-модель точечного контакта

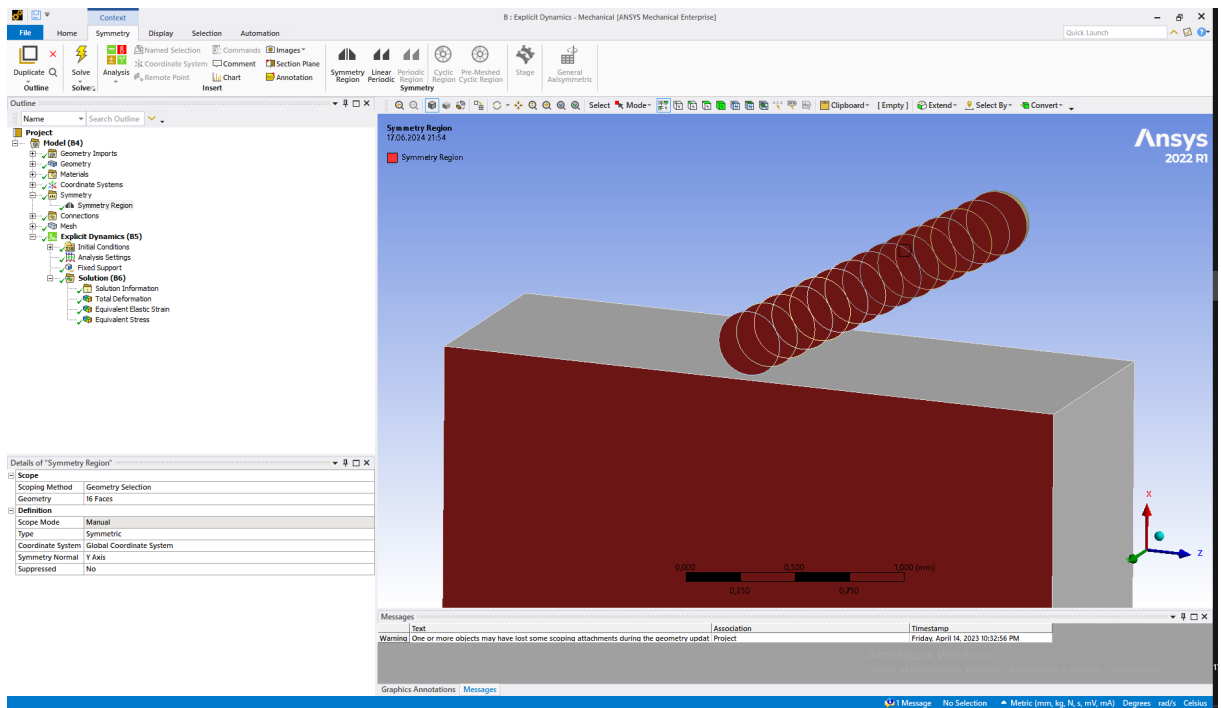


Рис. 2.14. Ansys Workbench. Mechanical – Указание плоскости симметрии

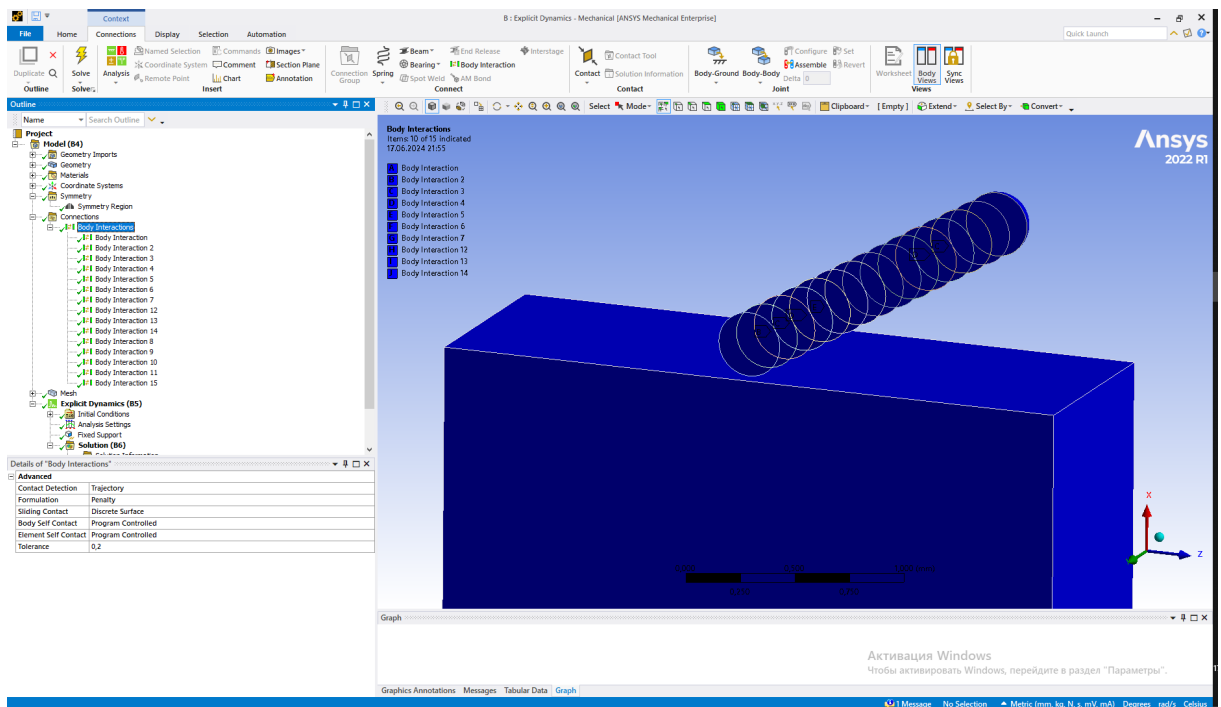


Рис. 2.15. Ansys Workbench. Mechanical – Указание контактного взаимодействия



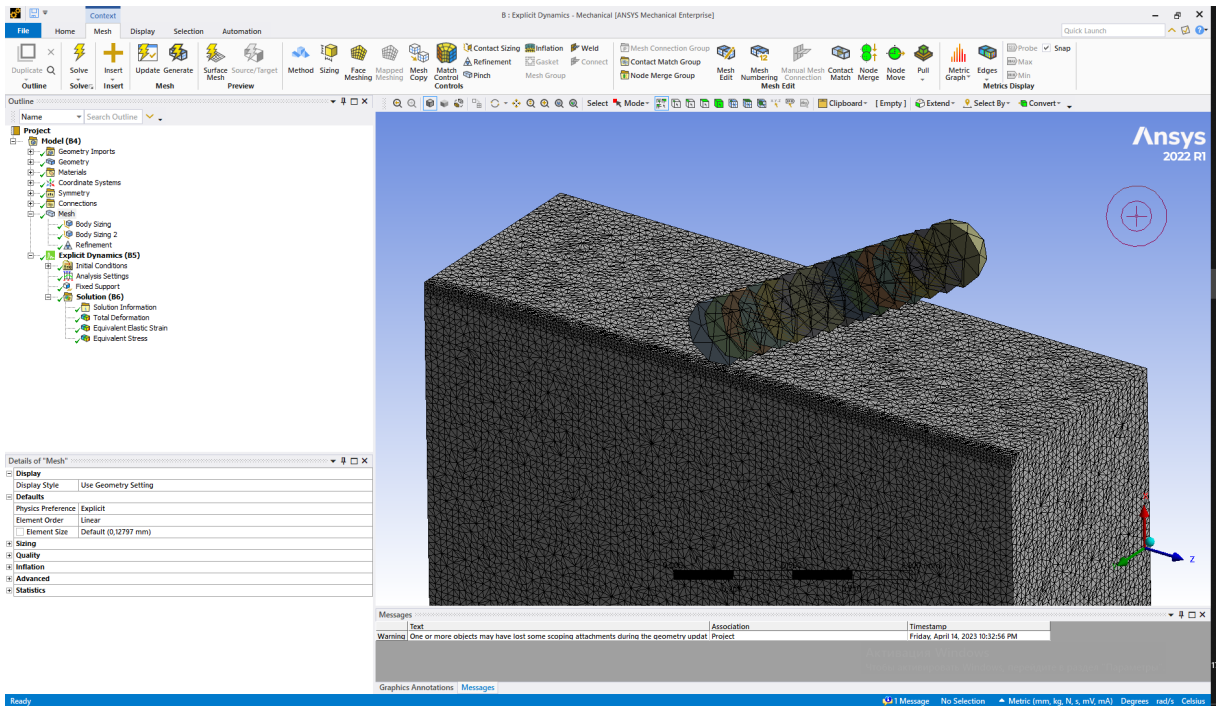


Рис. 2.16. Ansys Workbench. Mechanical – Установка параметров конечно-элементной сетки

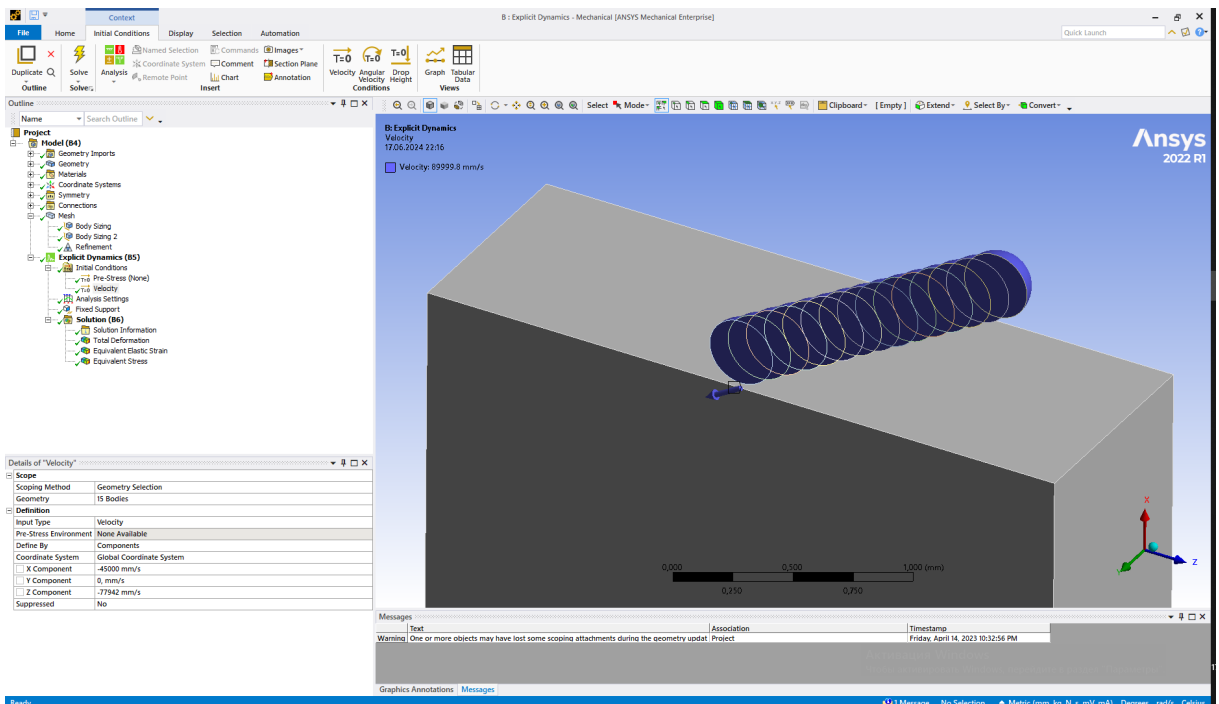


Рис. 2.17. Ansys Workbench. Mechanical – Установка параметров скорости движения дроби и угла атаки дроби

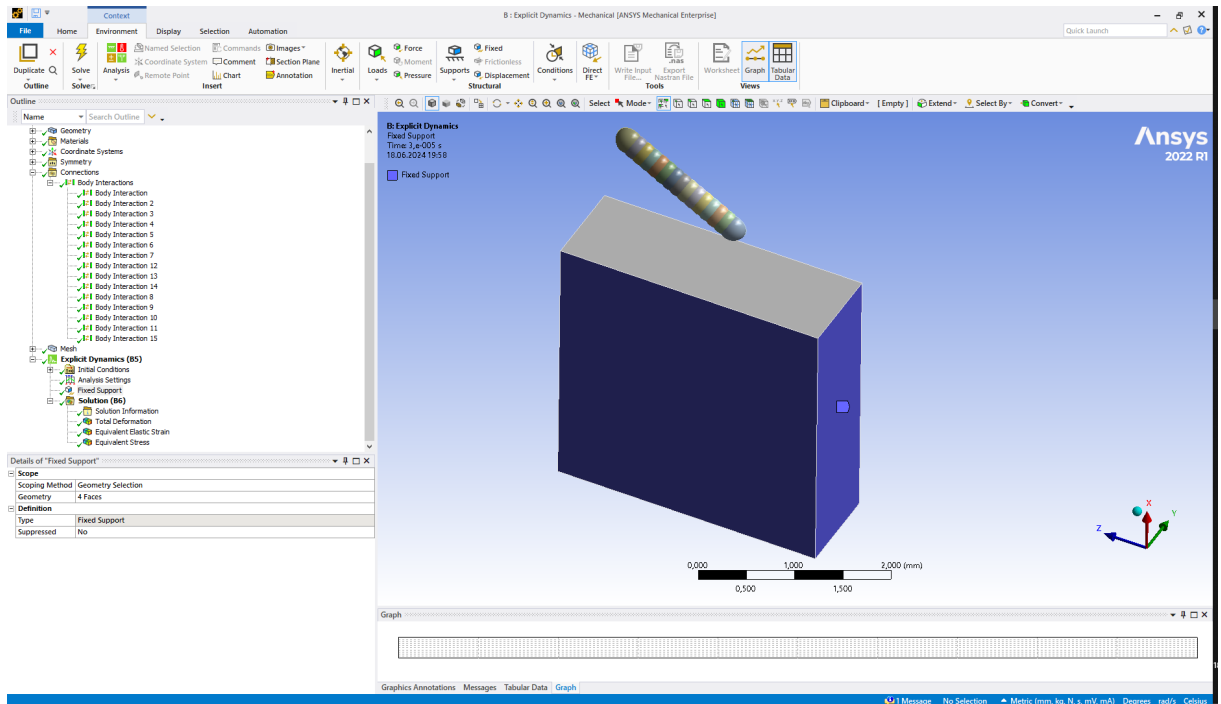


Рис. 2.18. Ansys Workbench. Mechanical – Указание ограничений степеней свободы заготовки

[-] Analysis Settings Preference	
Type	Program Controlled
[-] Step Controls	
Number Of Steps	1
Current Step Number	1
Load Step Type	Explicit Time Integration
End Time	3,e-005
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No
[-] Solver Controls	
Solve Units	mm, mg, ms

Рис. 2.19. Ansys Workbench. Mechanical – Параметры решателя

В табл. 2.5 приведены настройки решателя.

Таблица 2.5

**Исходные данные при моделировании**

<b>Symmetry</b>		
<b>Symmetry Region</b>	Symmetry normal	Y axis
<b>Connections</b>		
<b>Body Interactions</b>	Type	Frictional
	Friction coefficient	0,3
<b>Mesh</b>		
-	Physics Preference	Explicit
	Element Order	Linear
	Element Size	Default (0.12797 mm)
	Use adaptive size	No
	Smoothing	High
<b>Body Sizing</b>	Element Size	0,07mm (sphere)
	Element Size	0,025mm (box)
	Behavior	Soft
<b>Explicit Dynamics</b>		
<b>Initial Conditions</b>	<b>Pre-stress</b>	None
	<b>Velocity</b>	-
	Define By	Components
<b>Analysis Settings</b>	Type	Program Controlled
	Load Step Type	Explicit Time Integration
	End Time	0,000035
	Fixed support	Side and down faces

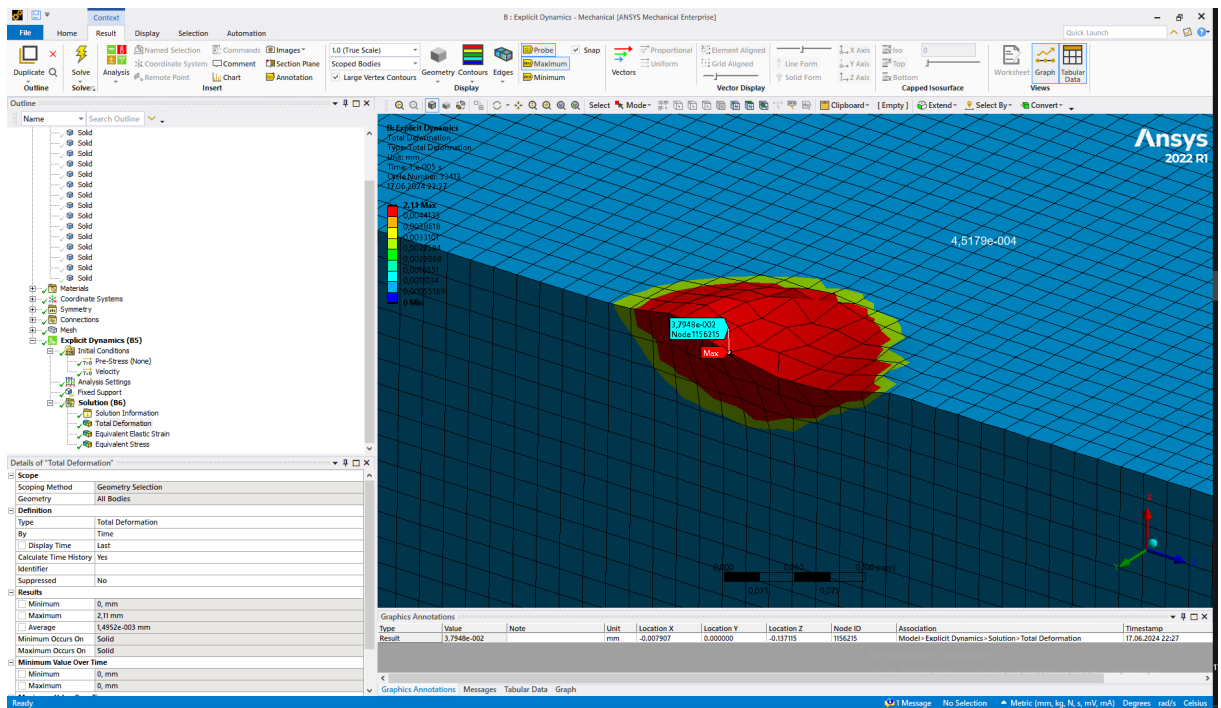


Рис. 2.20. Ansys Workbench. Mechanical – Результат расчета остаточных деформаций

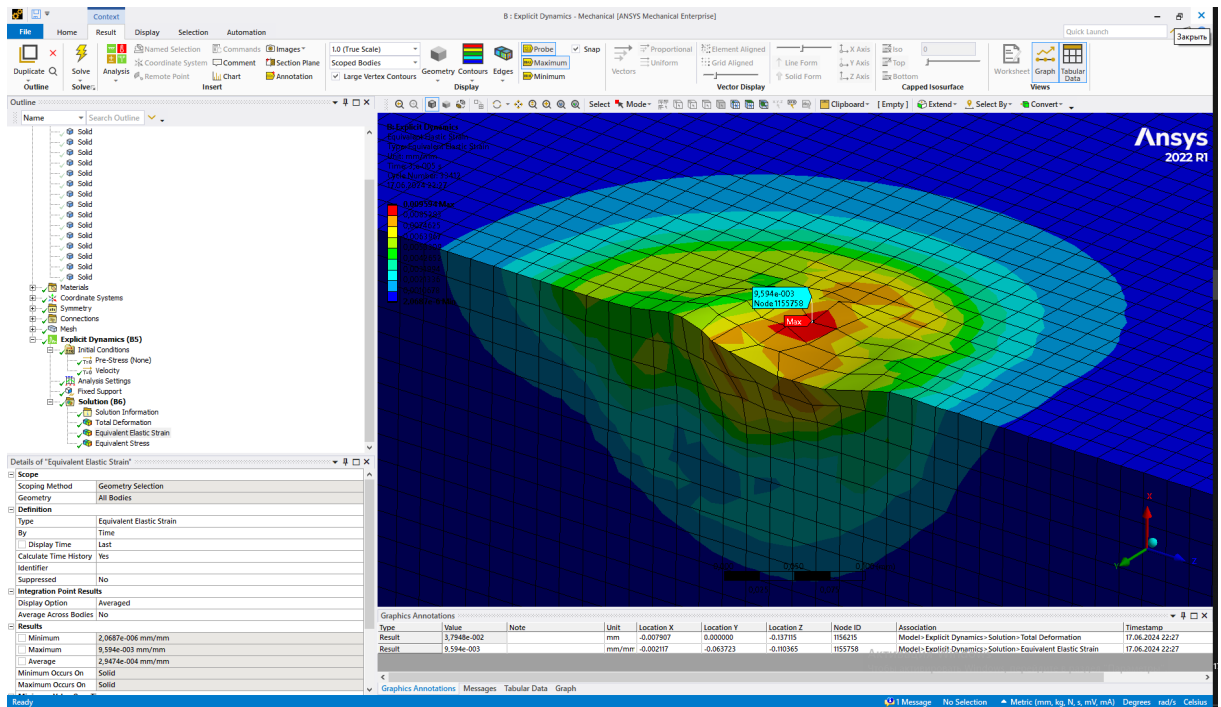


Рис. 2.21. Ansys Workbench. Mechanical – Результат расчета упругих деформаций

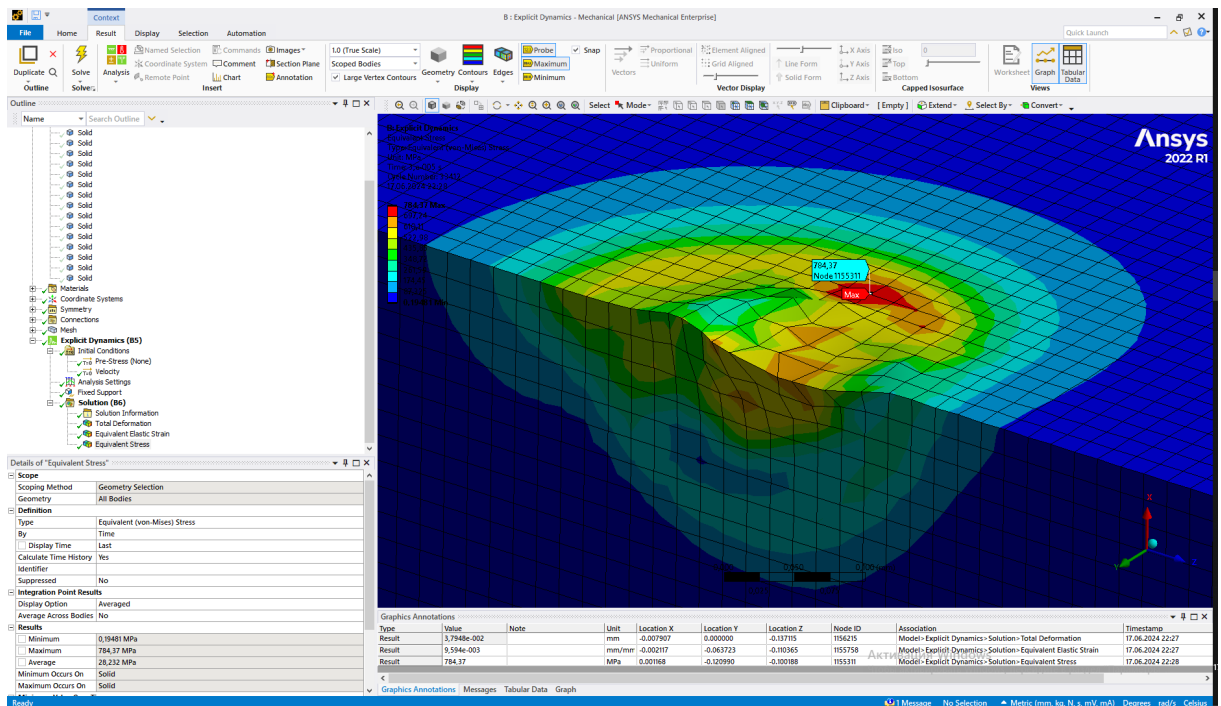


Рис. 2.22. Ansys Workbench. Mechanical – Результат расчета остаточных напряжений

### **Построение имитационной модели №3**

Для определения напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации моделируется ситуация массивованного влияния ударного воздействия на целевую поверхность, основываясь на результатах первых двух имитационных моделей. Для построения 3D-модели заготовки применяется ПО Компас-3D. Готовые модели передаются в сторонний модуль RockyDEM, синхронизированный с программным комплексом Ansys. Процесс построения приведен в табл. 2.6.

Таблица 2.6

### **Процесс построения имитационной модели**

№ п/п	Действие	Рисунок
1	Построение 3D-моделей обрабатывающего сопла и обрабатываемой поверхности в ПО Компас-3D и экспорт в формат .stl	2.23, 2.24

№ п/п	Действие	Рисунок
2	Выбор расчетного модуля	2.25
3	Экспорт .stl моделей в модуль RockyDEM, их позиционирование, разбивка на конечные элементы с размерами сетки 5 мм для сопла и 0,5 мм для заготовки	2.26, 2.27
4	Указание физических свойств материалов для сопла, дроби и обрабатываемой заготовки	2.28
5	Указание параметров дроби, таких как размеры и форма	2.29
6	Указание типа взаимодействия дроби с обрабатываемой поверхностью и тип повреждения поверхности	2.30
7	Указание точки генерации дроби	2.31
8	Указание параметров потока дроби, таких как плотность потока и его скорость	2.32
9	Указание траектории движения сопла относительно заготовки	2.33
10	Установка расчетных параметров имитационной модели	2.34
11	Решение задачи	-

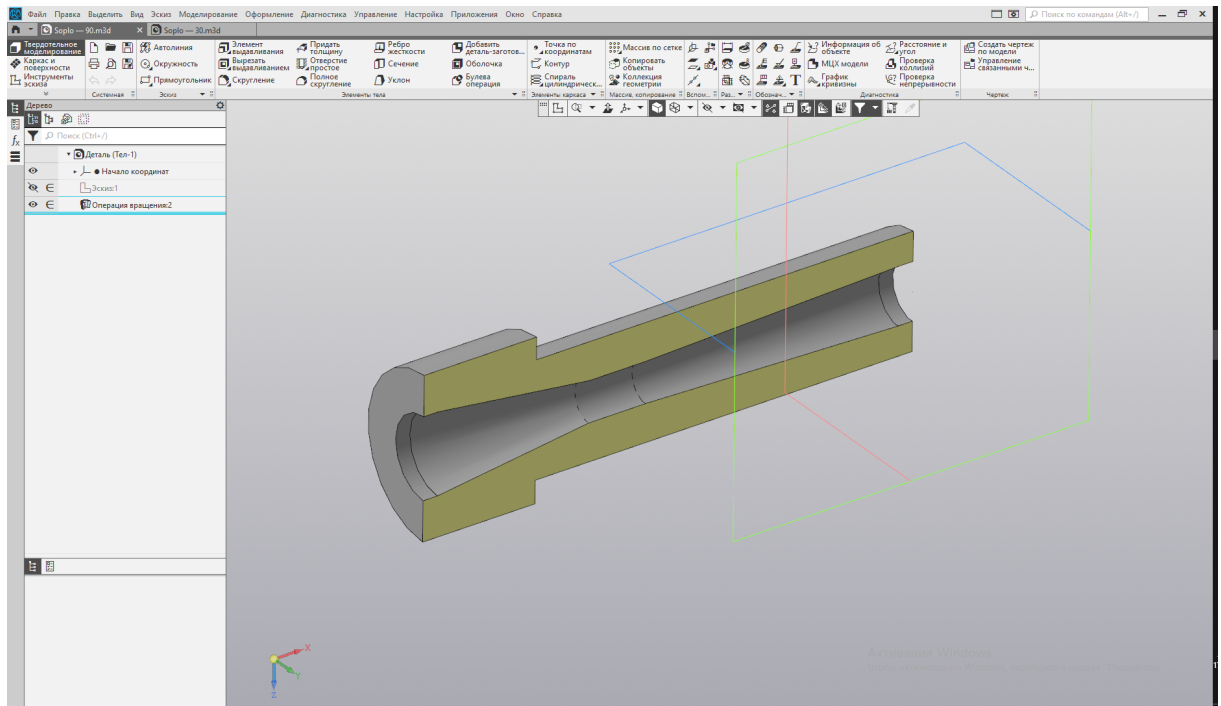


Рис. 2.23. Компас 3D – 3D-модель обрабатывающего сопла

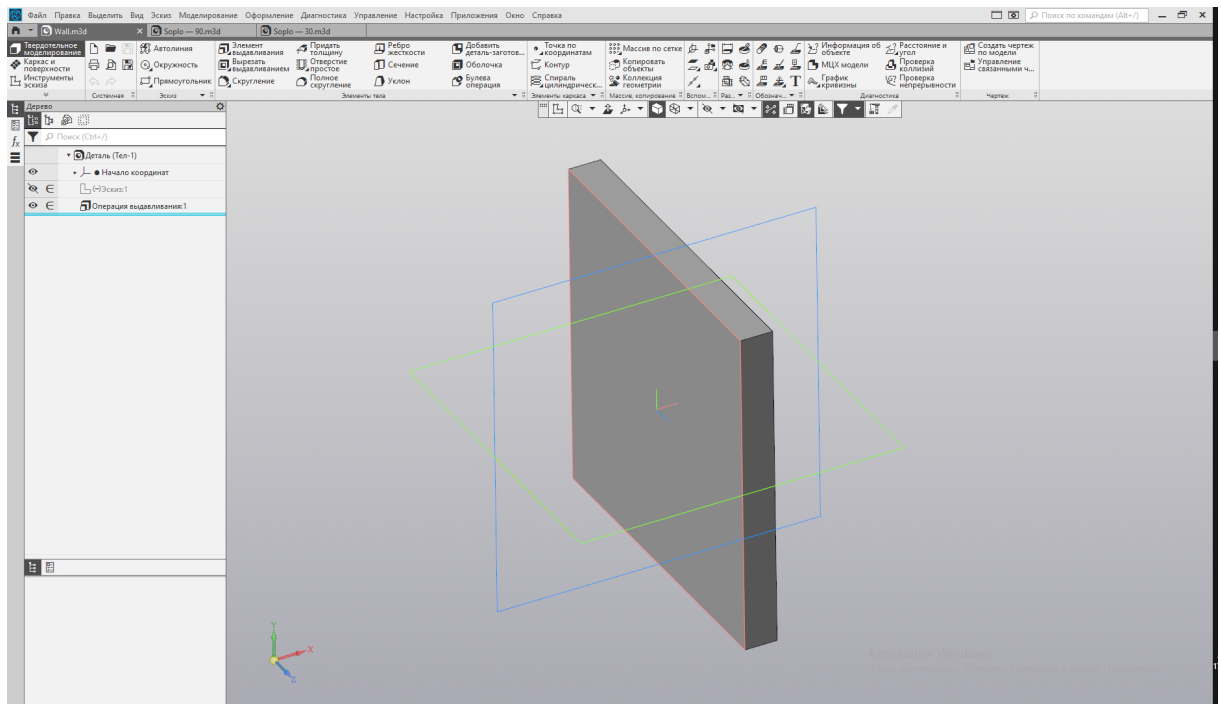


Рис. 2.24. Компас 3D – 3D-модель обрабатываемой поверхности

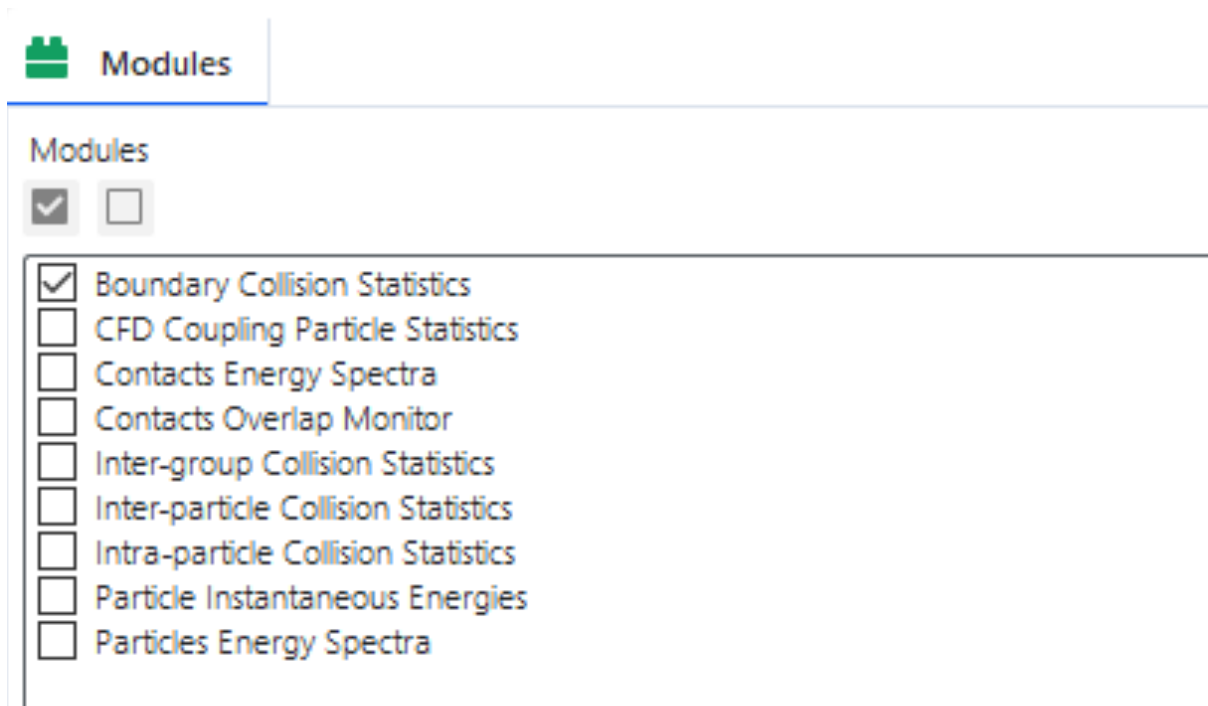


Рис. 2.25. RockyDEM – Выбор модуля расчета

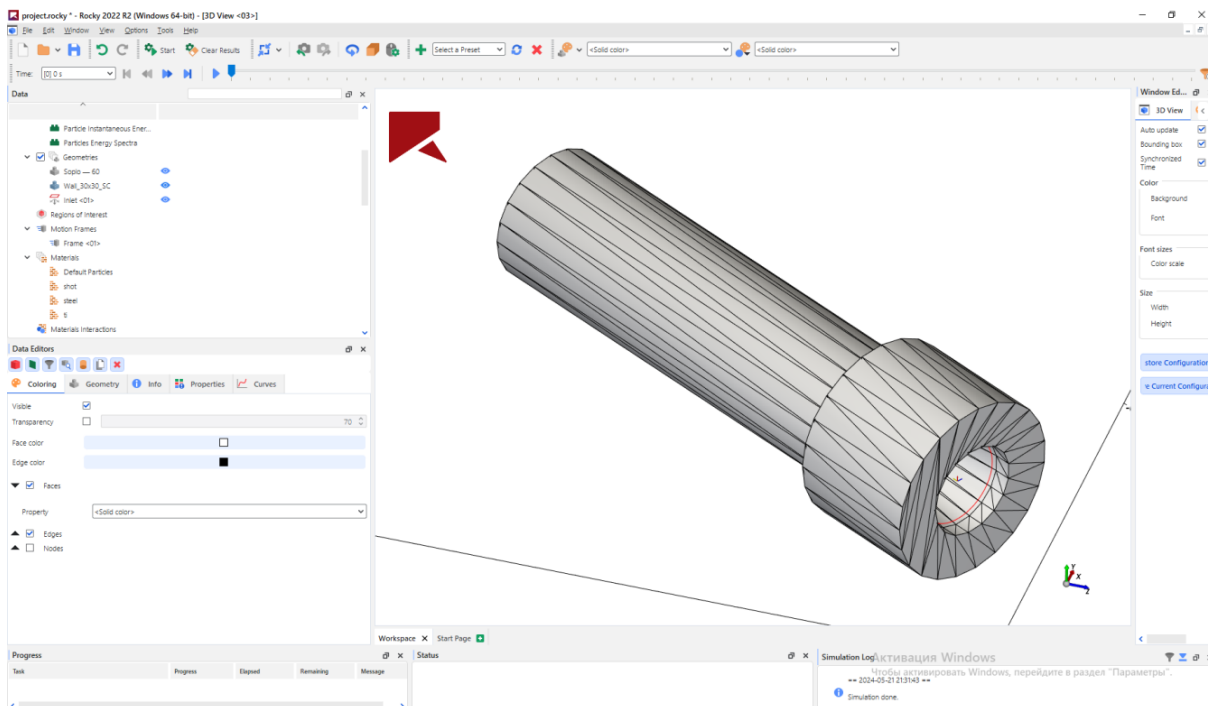


Рис. 2.26. RockyDEM – Модель сопла, разбитая на КЭ



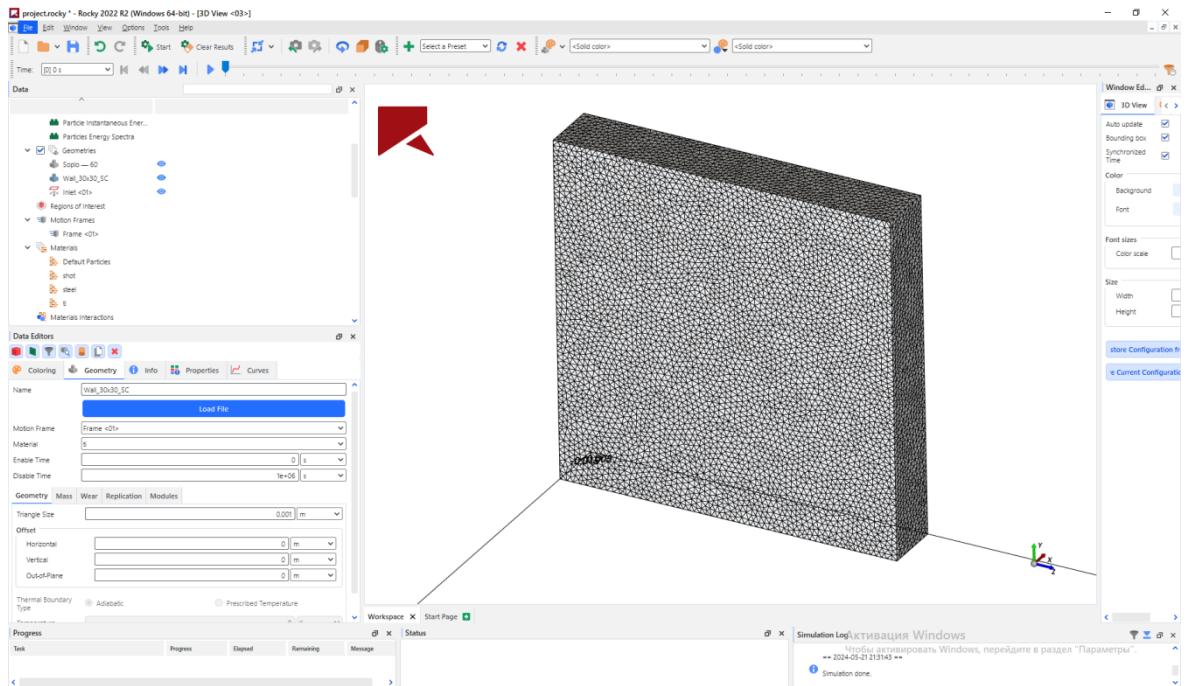


Рис. 2.27. RockyDEM – Модель заготовки, разбитая на КЭ

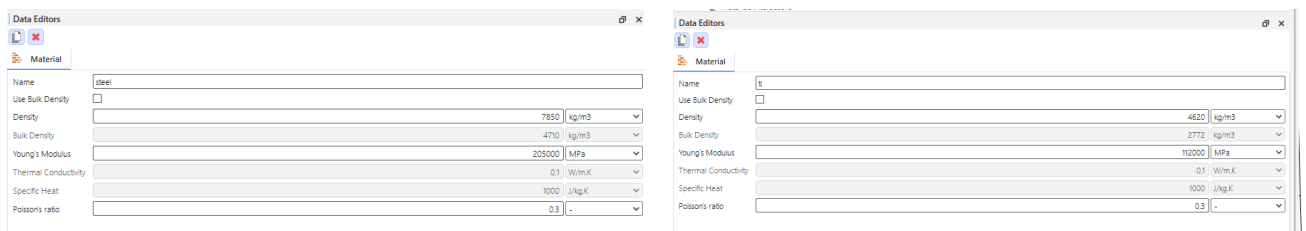


Рис. 2.28. RockyDEM – Указание физических свойств материалов

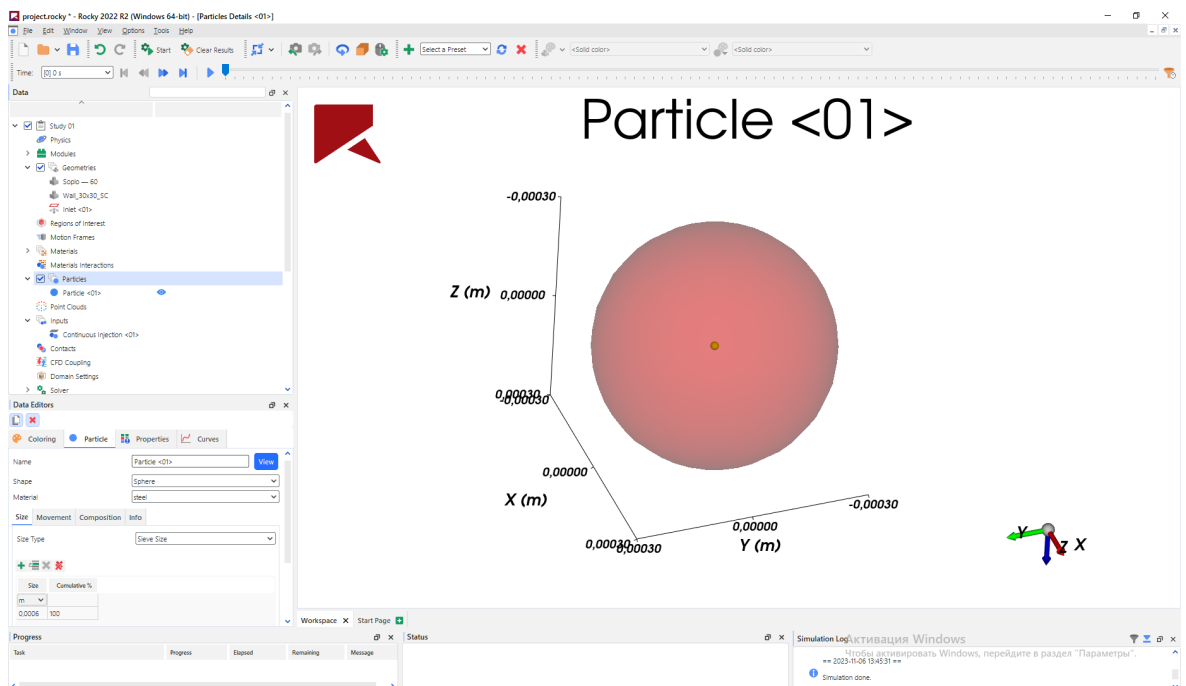


Рис. 2.29. RockyDEM – Указание параметров дроби

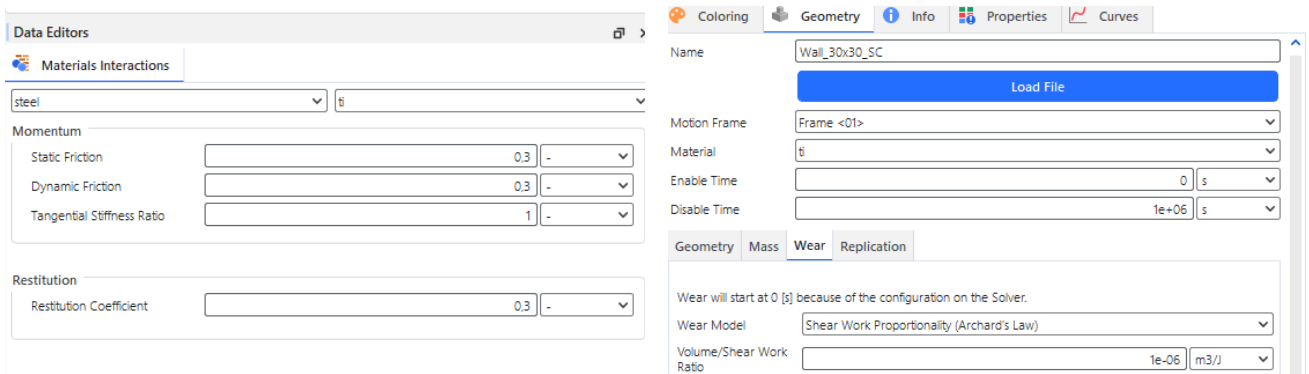


Рис. 2.30. RockyDEM – Указание параметров взаимодействия дроби и обрабатываемой поверхности

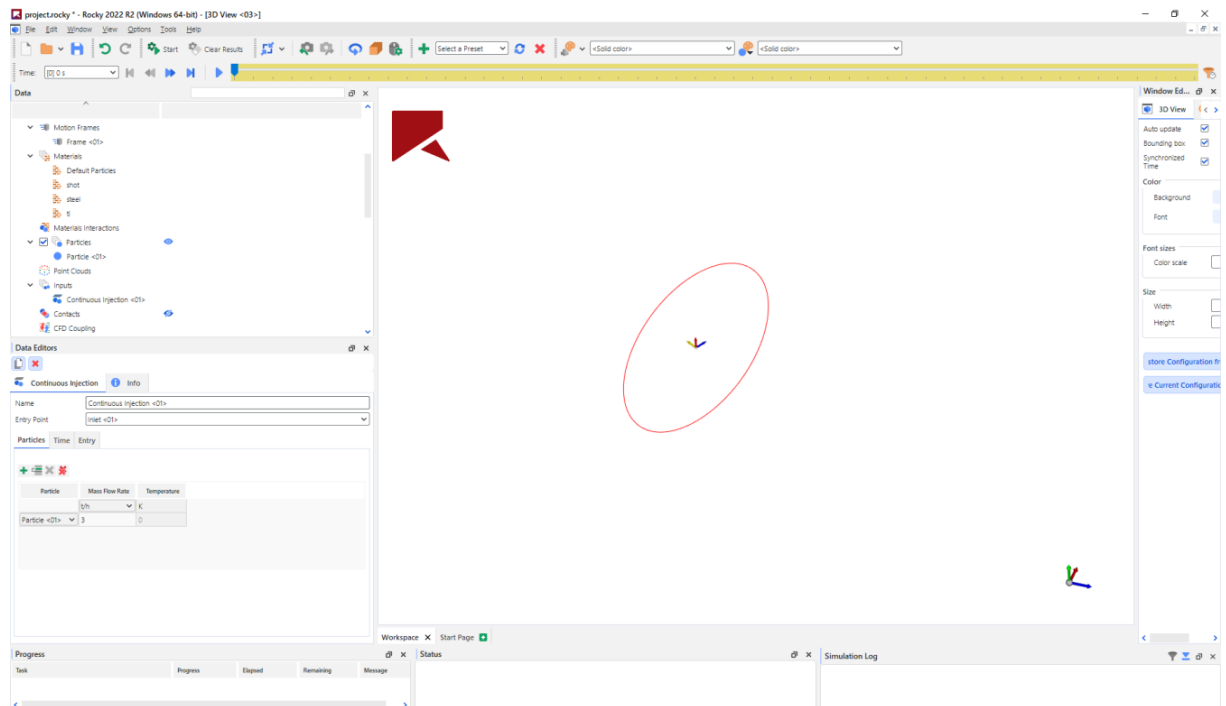


Рис. 2.31. RockyDEM – Установка области генерации дроби

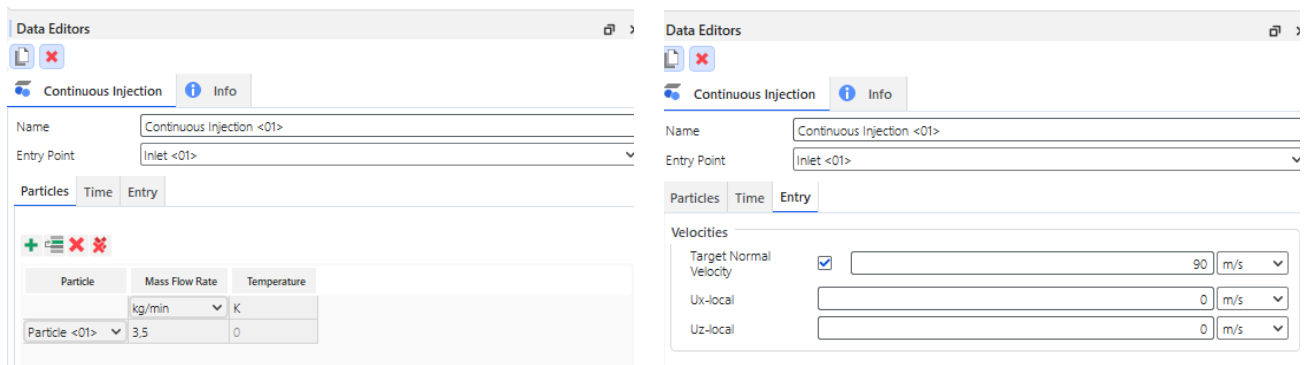


Рис. 2.32. RockyDEM – Указание параметров потока (плотность дроби и скорость)

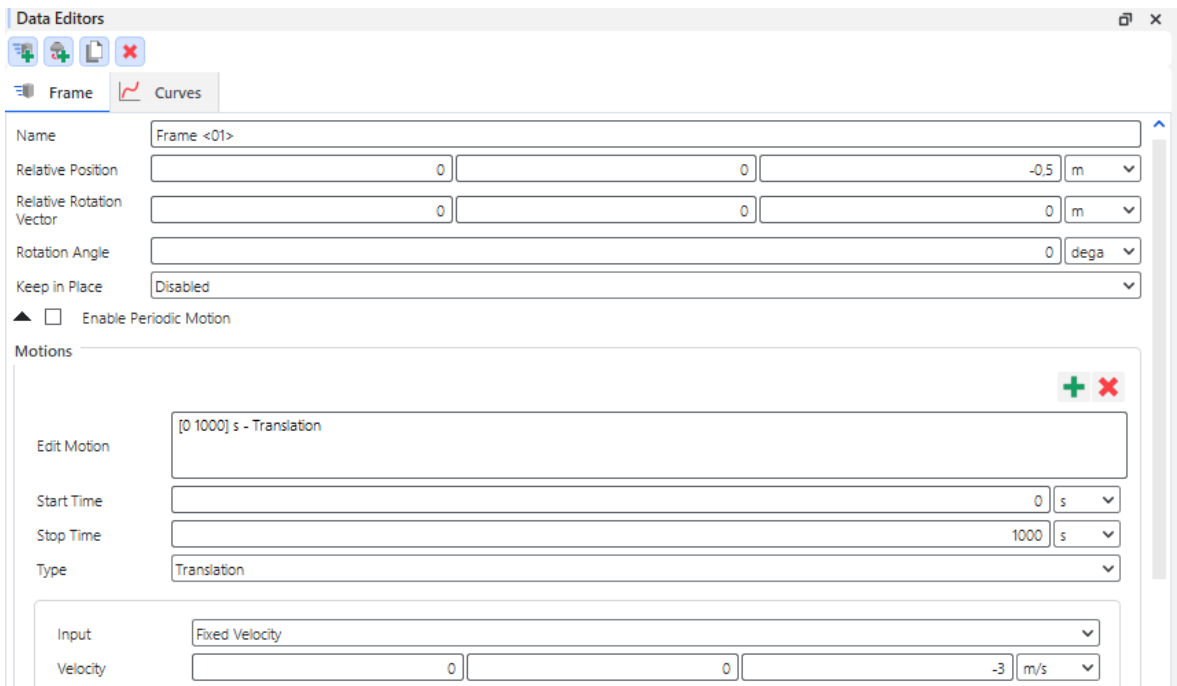


Рис. 2.33. RockyDEM – Указание параметров движения заготовки

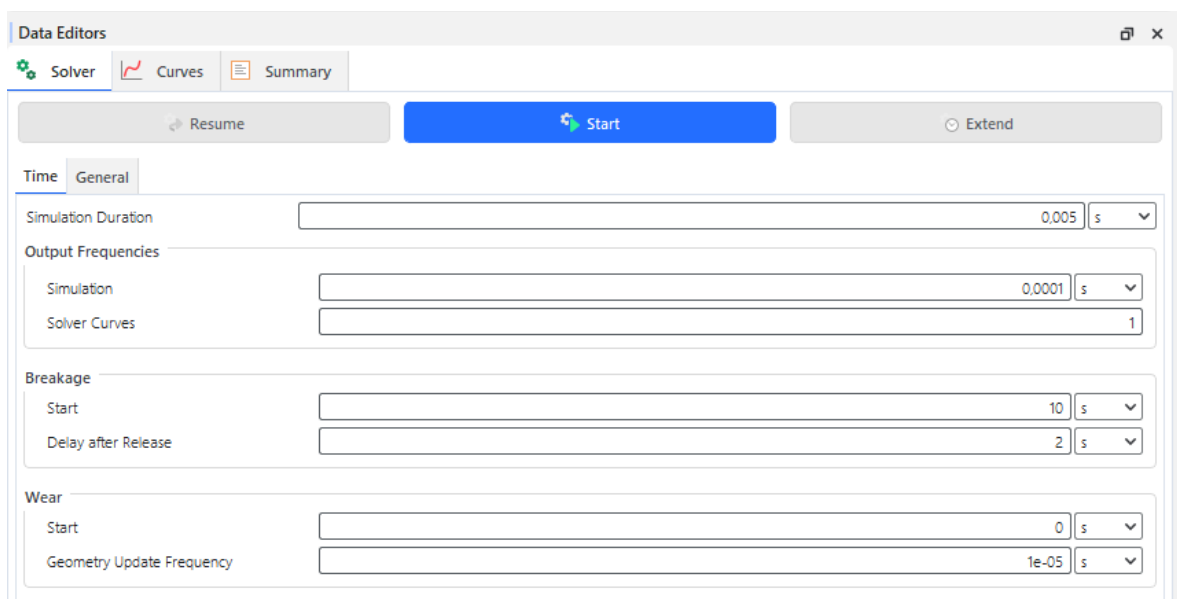


Рис. 2.34. RockyDEM – Установка параметров решателя

Для построения процесса были заданы следующие параметры:

- расход дробы – 3,5 кг/мин;
- скорость дробы – 90 м/с;
- ударная вязкость группы-дробь (при ударе по титановой преграде) –  $1,2 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>.

По окончании симуляции был получено изображение потока, которое представлено на рис. 2.35 в виде спектра скоростей.

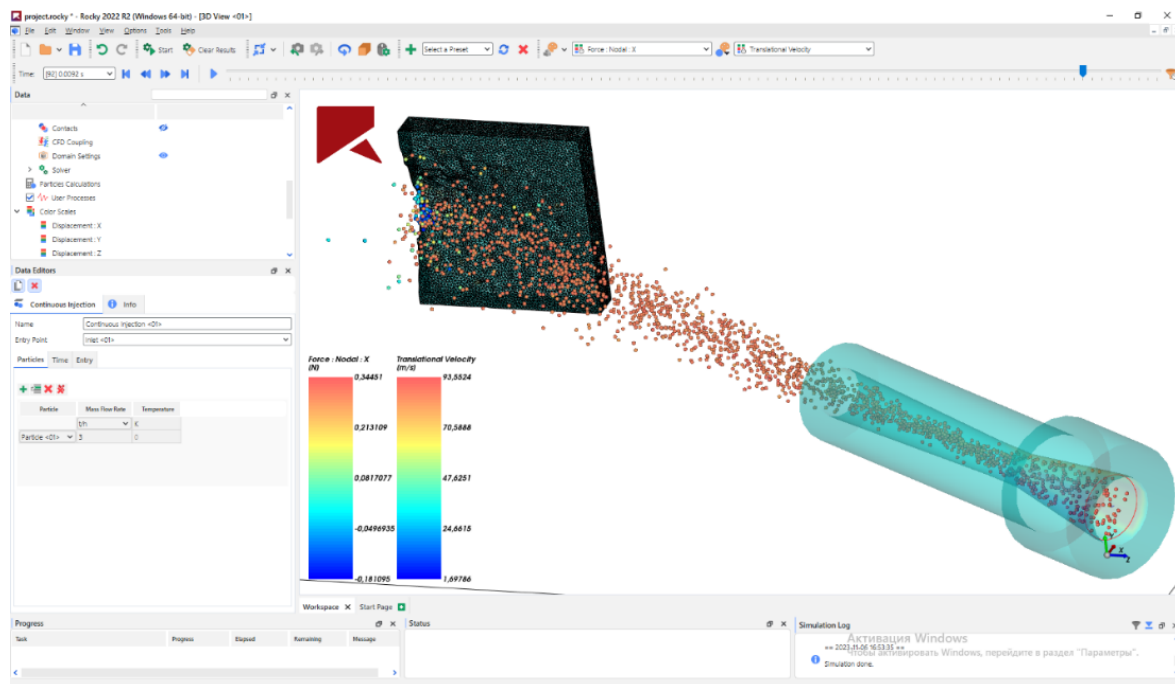


Рис. 2.35. RockyDEM – Визуализация обрабатывающего процесса и скоростной спектр струи дроби

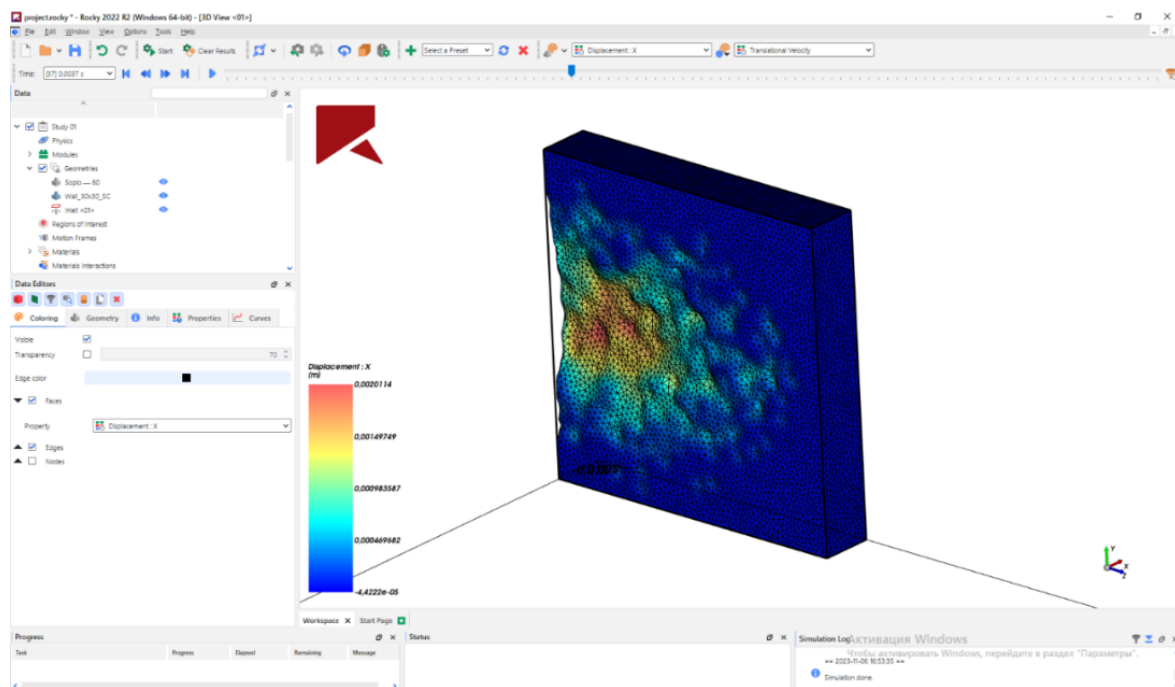


Рис. 2.36. RockyDEM – Результат расчета конечно-элементной модели

Модель истечения дроби построена с помощью программы RockyDEM, имитирующей и анализирующей поведение сыпучих материалов.

Смесь поступает в трубку Вентури и выбрасывается из неё под углом  $\alpha = 90^\circ$  к обрабатываемой поверхности со скоростью 64 м/с. При подходе к экрану, размещённому от сопла на расстоянии 150 мм, скорость практически сохраняется (снижается не более чем на 2 м/с). Далее на оси потока, непосредственно около поверхности, набегающий поток частиц сталкивается с отражёнными частицами, которые разносятся симметрично во все стороны. Такой симметрии не наблюдается при острых углах атаки. Благодаря естественному рассеиванию, характерному для выстрела из пневматического ствола, каждая микрочастица движется по своей траектории. Все вместе они образуют компактный участок струи со снопом траекторий, присущих ядру потока, и с двусторонним углом расширения границы ядра, равным  $6 - 8^\circ$ . В этой модели также отмечается чёткая внешняя, раздробленная граница струи с окружающим пространством. Представленная имитационная модель, с точки зрения адекватности и с целью определения размера эффективного пятна контакта от ядра струи, сопоставлена с экспериментальными результатами, полученными на автоматизированной, оснащённой роботом струйно-абразивной установке [76].

#### **2.4. Выводы по главе 2**

1. Разработана имитационная модель процесса ПДУ для определения площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учетом образования застойных зон, в зависимости от угла наклона сопла, скорости дроби, расстояния до обрабатываемой поверхности.

2. Разработана имитационная модель процесса ПДУ для определения напряженно-деформированного состояния поверхности заготовки при точечном взаимодействии дроби с обрабатываемой поверхностью, в зависимости от скорости дроби, угла наклона сопла, диаметра дроби.

3. Разработана имитационная модель процесса ПДУ для определения напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла, в зависимости от режимов упрочнения.

## ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПДУ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ

### 3.1. Анализ результатов имитационного моделирования

#### *Имитационная модель №1*

Были определены динамические параметры дробы в потоке воздуха в диапазоне угла наклона сопла ( $60 - 90^\circ$ ), к которым относится угол одностороннего расширения внешней границы струи  $\alpha_1$ , описывающий расширение обрабатываемого потока дробы и угол внутренней границы  $\alpha_2$ , который характеризует размер наиболее активной зоны влияния обрабатываемого потока на поверхность – ядро потока. Знание параметров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  позволяет определить площадь контакта потока дробы с поверхностью заготовки и площадь застойной зоны  $S$ .

На рис. 3.1 представлена имитационная модель потока дробы с геометрической интерпретацией динамических параметров потока дробы при режимах обработки:  $V = 60$  м/с,  $L = 150$  мм,  $d = 0,3$  мм,  $\alpha = 60^\circ$  и площади застойной зоны. В результате расчета получены:  $\alpha_1 = 7,5^\circ 13'$ ,  $\alpha_2 = 3,5^\circ 26'$  и  $S = 84$  мм<sup>2</sup>.

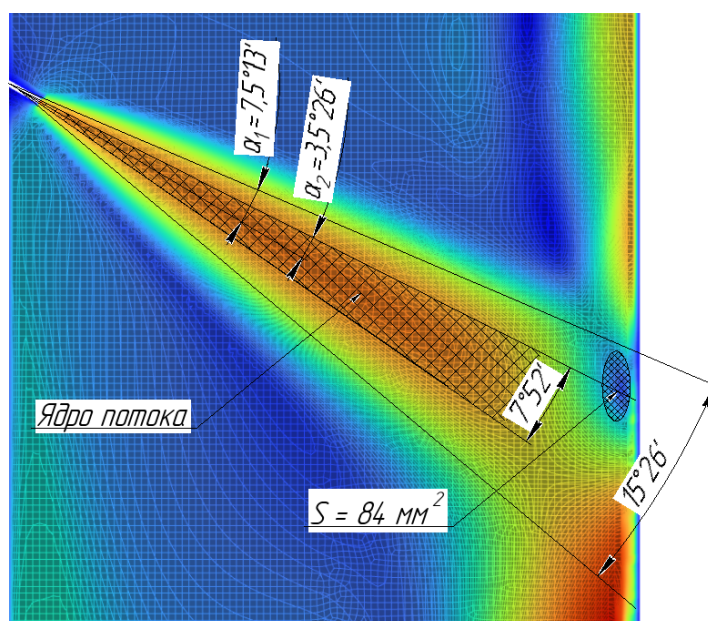


Рис. 3.1. Результаты расчета динамических параметров потока дробы  
( $S$  – площадь застойной зоны)

На рис. 3.2 показано влияние режимов ПДУ на площадь застойной зоны. Исследованиями установлено, что с повышением скорости дроби с 60 до 90 м/с величина  $S$  уменьшается при  $L = 150$  мм на 10 – 15 %, а при  $L = 200$  мм на 15 – 20 %. С увеличением диаметра дроби площадь застойной зоны увеличивается при  $V = 60$  м/с на 5 – 20 %, а при  $V = 90$  м/с – на 20 – 80 %. Изменение расстояния от сопла до поверхности заготовки в диапазоне от 150 до 200 мм способствует увеличению застойных зон у поверхности в 1,2 – 1,7 раз.

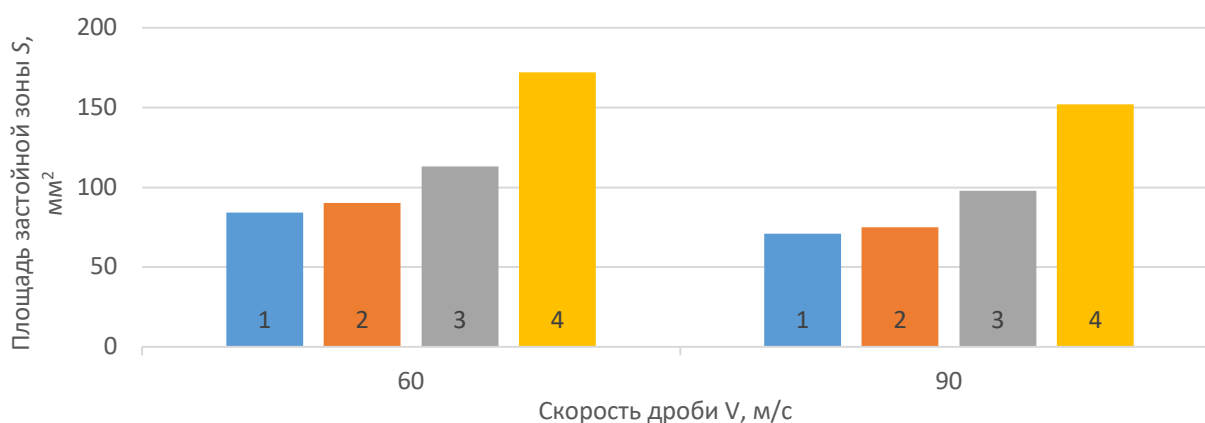


Рис. 3.2. Влияние скорости дроби на площадь застойной зоны: 1 –  $L = 150$  мм,  $d = 0,3$  мм; 2 –  $L = 200$  мм,  $d = 0,3$  мм; 3 –  $L = 150$  мм,  $d = 1,4$  мм; 4 –  $L = 200$  мм,  $d = 1,4$  мм

Исследования показали (табл. 3.1 – 3.3), что большую роль в формировании динамических параметров потока дроби играет угол наклона сопла. Увеличение угла  $\alpha$  с 30 до 90° приводит при всех значениях  $L$  к уменьшению значений динамических параметров: величины  $\alpha_1$  в 2 раза, величины  $\alpha_2$  в 4 раза, величины  $S$  в 2,5 раза. Повышение скорости дроби до  $V = 90$  м/с снижает площадь застойной зоны на 10 – 20 %, это связано с повышением плотности потока дроби, который характеризуется величиной угла  $\alpha_2$ . Имитационная модель №1 через динамические параметры ПДУ позволила определить площадь контакта потока дроби с поверхностью  $F$ . Исследования показали, что площадь контакта увеличивается с повышением величины  $L$  и уменьшением угла наклона потока дроби. Изменение угла наклона дроби с 30 до 90° уменьшает величину  $F$  в 2 – 2,4 раза. Увеличение скорости дроби до  $V = 90$  м/с приводит к снижению величины  $F$  на 20 – 50 %.

Таблица 3.1

**Результаты расчета динамических параметров потока  
дросли при  $d = 0,3$  мм и  $\alpha = 30^\circ$**

Динамические параметры	Режимы ПДУ			
	$V = 60$ м/с		$V = 90$ м/с	
	$L = 150$ мм	$L = 200$ мм	$L = 150$ мм	$L = 200$ мм
$\alpha_1$ , град	7,5° 13'	8° 19'	7° 13'	7,5° 17'
$\alpha_2$ , град	3,5° 26'	4,5° 13	3° 6,5'	4° 8'
$S$ , мм <sup>2</sup>	<b>79</b>	<b>85</b>	<b>56</b>	<b>60</b>
$F$ , мм <sup>2</sup>	<b>127</b>	<b>135</b>	<b>112</b>	<b>120</b>
$(F-S)$ , мм <sup>2</sup>	<b>48</b>	<b>50</b>	<b>56</b>	<b>60</b>

Таблица 3.2

**Результаты расчета динамических параметров потока  
дросли при  $d = 0,3$  мм и  $\alpha = 60^\circ$**

Динамические параметры	Режимы ПДУ			
	$V = 60$ м/с		$V = 90$ м/с	
	$L = 150$ мм	$L = 200$ мм	$L = 150$ мм	$L = 200$ мм
$\alpha_1$ , град	7° 26'	6,5° 29'	6,5° 5'	6° 28'
$\alpha_2$ , град	6,0° 28'	5,5° 23'	3,0° 6'	3,5° 30'
$S$ , мм <sup>2</sup>	<b>53</b>	<b>58</b>	<b>35</b>	<b>37</b>
$F$ , мм <sup>2</sup>	<b>95</b>	<b>102</b>	<b>82</b>	<b>89</b>
$(F-S)$ , мм <sup>2</sup>	<b>42</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>52</b>



**Результаты расчета динамических параметров потока  
дроби при  $d = 0,3$  мм и  $\alpha = 90^\circ$**

Динамические параметры	Режимы ПДУ			
	$V = 60$ м/с		$V = 90$ м/с	
	$L = 150$ мм	$L = 200$ мм	$L = 150$ мм	$L = 200$ мм
$\alpha_1$ , град	$3^\circ 25'$	$3,5^\circ 22'$	$2^\circ 1'$	$2,5^\circ 19'$
$\alpha_2$ , град	$2,2^\circ 9'$	$2,4^\circ 7'$	$1^\circ 5'$	$1,1^\circ 3'$
$S$ , мм <sup>2</sup>	<b>30</b>	<b>36</b>	<b>20</b>	<b>24</b>
$F$ , мм <sup>2</sup>	<b>64</b>	<b>72</b>	<b>60</b>	<b>68</b>
$(F-S)$ , мм <sup>2</sup>	<b>34</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>44</b>

На рис. 3.3 приведена графическая интерпретация образования эффективной площади контакта в качественной форме на плоской поверхности. При угле потока дроби  $\alpha = 90^\circ$  пятно контакта будет представлять круг, в центре которого расположена застойная зона меньшего диаметра. Расчеты показывают, что с увеличением скорости дроби до  $V = 90$  м/с площадь контакта дроби уменьшается, но, что более важно, уменьшается площадь застойной зоны, а это увеличивает эффективную площадь  $F-S$ . При уменьшении угла  $\alpha$  до  $60^\circ$  площадь контакта приобретает форму эллипса, при этом площадь контакта и застойная зона увеличиваются, а застойная зона смещается к границе зоны контакта.

В имитационной модели №1 эффективная площадь рассчитывалась для плоских поверхностей. Однако в реальных условиях на крупногабаритных деталях чаще всего встречаются цилиндрические и конические поверхности различных геометрических размеров. На рис. 3.3 построена трехмерная графическая модель детали с цилиндрическими и коническими поверхностями диаметрами от 200 до 300 мм, на которую спроектировано пятно контакта потока дроби при следующих режимах:  $V = 90$  м/с,  $L = 180$  мм,  $d = 0,3$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ (а) и  $\alpha = 60^\circ$ (б).

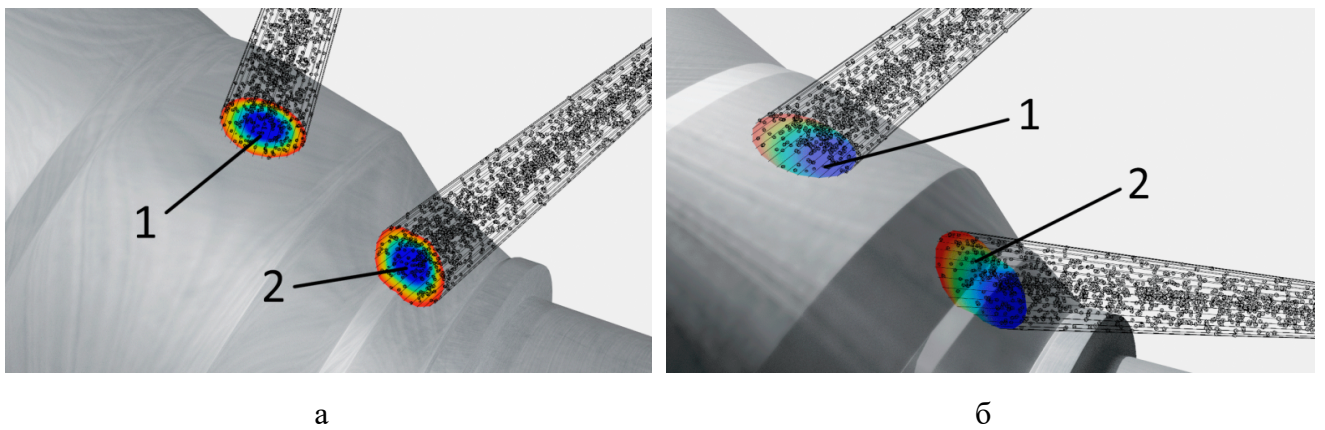


Рис. 3.3. Трехмерная модель процесса ПДУ при взаимодействии потока дроби с поверхностью детали

Исследования показали, что площадь контакта потока дроби на цилиндрической поверхности несколько больше и что разница площади контакта на плоскости и на цилиндрической поверхности при  $\alpha = 90^\circ$  (а) не превышала 1,5 – 2 %. Изменение угла наклона до  $\alpha = 60^\circ$  (б) увеличивает площадь контакта на 8 – 10 %.

Из приведенных данных видно, что площадь контакта дроби с увеличением скорости дроби снижается. Этот факт может отрицательно влиять на производительность процесса. Однако важно знать эффективную площадь контакта дроби с поверхностью с учетом площади застойной зоны, т. е. в нашем случае нужно определить разность  $F-S$ . В табл 3.1 – 3.3. приведена эффективная площадь контакта ( $F-S$ ). Расчеты показывают, что с увеличением  $\alpha$  с  $30$  до  $90^\circ$  эффективная площадь уменьшается на 50 – 70 %, при этом повышение величины  $L$  влияет менее значительно (5 – 7 %).

Анализ угла наклона сопла показал, что эффективная площадь контакта дроби с поверхностью заготовки зависит от соотношения площади застойной зоны и площади контакта.

При угле наклона сопла  $90^\circ$  площадь контакта минимальна, так как дробь ударяет перпендикулярно поверхности, распределяя силу удара равномерно по всей площади. Площадь застойной зоны также минимальная, поскольку частицы дроби имеют минимальное боковое отклонение. Эффективная площадь ( $F-S$ ) максимальная.

При угле наклона сопла  $60^\circ$  площадь контакта увеличивается по сравнению с углом в  $90^\circ$ , так как дробь ударяет под косым углом, создавая вытянутую эллиптическую область контакта. Площадь застойной зоны также увеличивается, поскольку дробь при этом угле имеет большее боковое перемещение, которое характеризуется разностью динамических параметров  $\alpha_1 - \alpha_2 = 4,0^\circ$ , в то же время при  $90^\circ - \alpha_1 - \alpha_2 = 1,5^\circ$ .

При угле наклона сопла  $30^\circ$  площадь контакта еще более увеличивается, при этом более направленное движение дроби формирует на поверхности удлиненную эллиптическую область контакта, создавая однонаправленную шероховатость поверхности. Площадь застойной зоны также увеличивается, поскольку дробь при угле  $30^\circ$  имеет более низкую скорость дроби.

Установлено, что повышение скорости дроби до  $V = 90$  м/с снижает площадь контакта, но увеличивает площадь фактического контакта за счет уменьшения застойной зоны  $S$ .

Таким образом, повышение скорости дроби при ПДУ с  $V = 60$  м/с до  $V = 90$  м/с увеличило фактическую площадь контакта в 2 – 2,5 раза.

На основании этих зависимостей можно вычислять и моделировать площади контакта и застойной зоны, что позволяет оптимизировать процессы дробеструйной обработки для различных задач и условий.

Установлено, что повышение скорости дроби (диаметр дроби  $d = 0,3$  мм) с 60 до 90 м/с вызывает уменьшение площади застойной зоны у поверхности заготовки на 10 – 15 % при  $L = 150$  мм и на 15 – 20 % при  $L = 200$  мм. Повышение размера диаметра дроби с 0,3 до 1,4 мм приводит к увеличению площади застойной зоны на 5 – 20 % при  $V = 60$  м/с и на 20 – 80 % при  $V = 90$  м/с. Изменение расстояния от сопла до поверхности заготовки в диапазоне от 150 до 200 мм способствует увеличению застойных зон у поверхности в 1,2 – 1,7 раз. Исследования показали, что застойная зона существует при любых режимах ПДУ. Минимальные ее значения получены при  $V = 90$  м/с,  $L = 150$  мм и  $\alpha = 60^\circ$ . В то же время уменьшение расстояния влечет за собой уменьшение пятна контакта, поэтому в дальнейших расчетах принято среднее значение  $L = 180$  мм.

## *Имитационная модель №2*

При дробеструйной обработке поверхность материала обрабатывается струей дроби, которая направляется на него с высокой скоростью. Однако это может привести к разрушению материала из-за перенаклепа — чрезмерного упрочнения поверхности, что может вызвать образование трещин или отслоение материала [95].

Чтобы избежать таких негативных последствий, необходимо определить степень насыщения деформациями материала при определенных условиях обработки. В данном случае это означает, что нужно установить, при каких значениях скорости дроби титановый сплав достигает своей максимальной пластической деформации, не подвергаясь разрушению.

Для этого следует провести расчет при двух крайних значениях скорости дроби: минимальной 60 м/с – используется на производстве и максимальной 90 м/с – не применялась при обработке титановых сплавов.

1. Минимальная скорость дроби 60 м/с. На этом этапе проверяется, насколько эффективно воздействие дроби на материал при минимальном уровне энергии. Это поможет определить, насколько титановый сплав поддается упрочнению и каковы его пределы при данном воздействии.

2. Максимальная скорость дроби 90 м/с. Здесь тестируется, насколько титановый сплав выдерживает повышенную энергию удара дроби. Этот этап позволяет оценить риск перенаклепа и разрушения при наиболее интенсивном воздействии.

Проводя испытания в указанном диапазоне скоростей, можно выявить оптимальное количество воздействий потока дроби на единицу площади, при которой титановый сплав достигает требуемой степени упрочнения без риска разрушения. Это обеспечит высокую эффективность и безопасность процесса дробеструйной обработки, позволяя избежать нежелательных пластических деформаций и связанных с ними повреждений. На рис. 3.4 приведена модель последовательного взаимодействия дроби с поверхностью, с учетом изменением свойств титанового сплава после каждого удара.

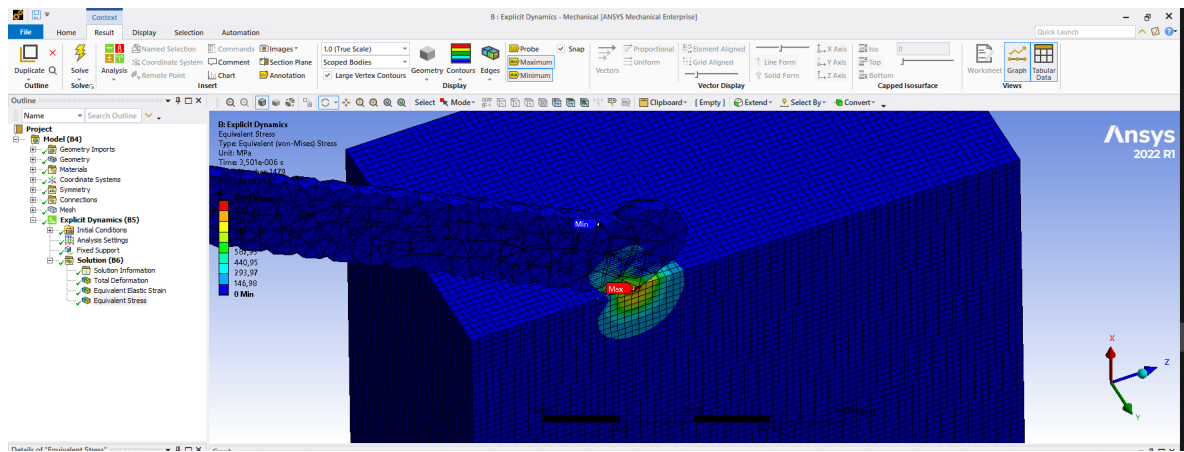


Рис. 3.4. Модель насыщения поверхностного слоя

В результате моделирования определялись следующие параметры напряженно-деформированного состояния поверхности: остаточные напряжения  $\sigma$ , МПа, глубина залегания остаточных напряжений  $h_{\sigma}$ , мм, пластические деформации  $\varepsilon_{пл}$ , мм, глубина залегания пластических деформаций  $h_{\varepsilon_{пл}}$ , мм, упругая деформация  $\varepsilon_y$ , мм, глубина залегания упругих деформаций  $h_{\varepsilon_y}$ , мм.

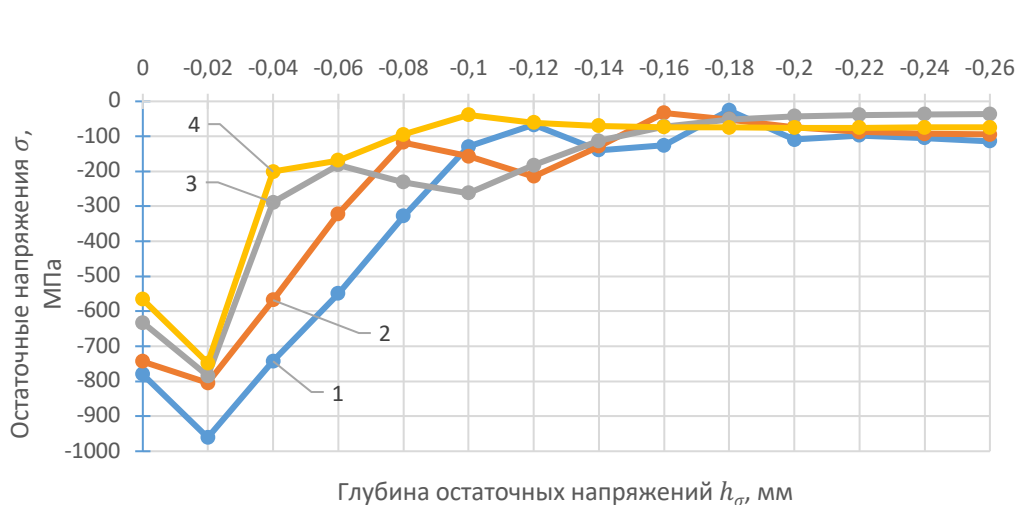


Рис. 3.5. Глубина залегания максимума остаточных напряжений  $h_{\sigma}$  в зависимости от крайних режимов обработки: 1 – 90°, 90 м/с; 2 – 90°, 60 м/с; 3 – 30°, 90 м/с; 4 – 30°, 60 м/с

Для определения глубины залегания максимального значения остаточных напряжений построен график, приведенный на рис. 3.5, из которого видно, что максимальные значения достигаются на глубине 20 мкм. Все дальнейшие значения остаточных напряжений, приведенные на графиках, определяются для глубины 20 мкм.

Данные параметры имеют свои пределы насыщения, которые зависят от марки материала и количества единичных ударов дроби в одно место. На практике при упрочнении титанового сплава BT22 предел насыщения остаточными напряжениями составляет  $\sigma_0 = 790 - 800$  МПа. В литературе степень насыщения поверхности остаточными напряжениями определяется параметром  $\psi$  [95, 97]. Данный параметр зависит от свойств материала и позволяет определить предельное число ударов дроби в единичную лунку и степени перекрытия ударов дробью в пределах площади пятна контакта потока дробь-воздух с обрабатываемой поверхностью. Проведены исследования влияния количества ударов дроби в единичную лунку для достижения принятого уровня остаточных напряжений с учетом изменения свойств материала после каждого удара (рис. 3.6 и 3.7). В качестве регулируемых режимов были скорость дроби и расстояние от сопла до поверхности. Установлено, что при скорости дроби  $V = 60$  м/с насыщение поверхности пластическими деформациями (до момента постоянства напряжений 800 МПа) наступает после 10 – 15 ударов дроби, а при скорости  $V = 90$  м/с – после 6 – 8 ударов при том же уровне насыщения.

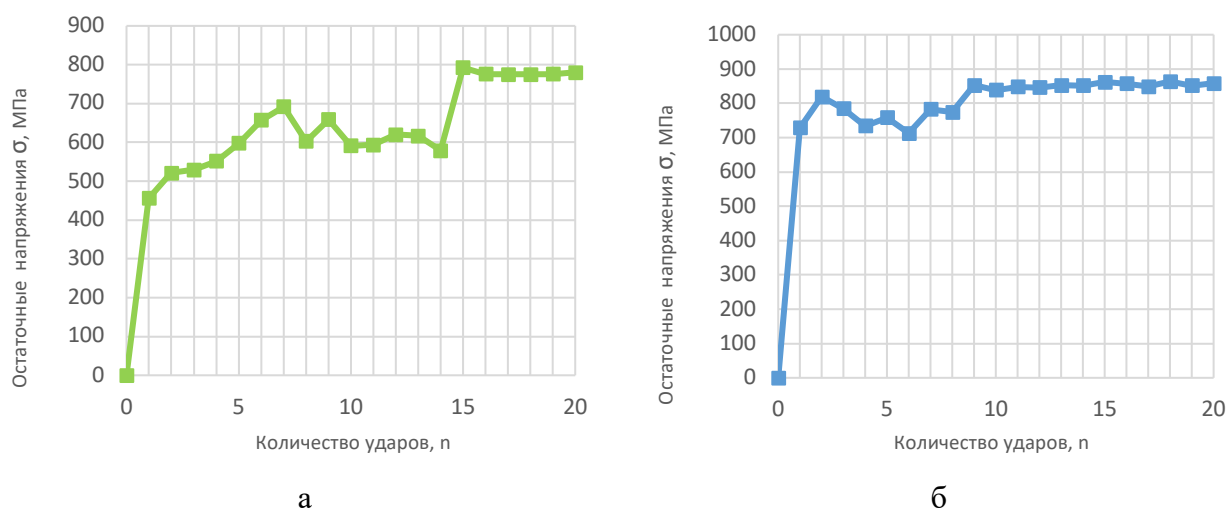


Рис. 3.6. Влияние количества единичных ударов дроби: на величину остаточных напряжений при  $\alpha = 90^\circ$ ;  $d = 0,3$  мм и  $L = 150$  мм: а –  $V = 60$  м/с; б –  $V = 90$  м/с

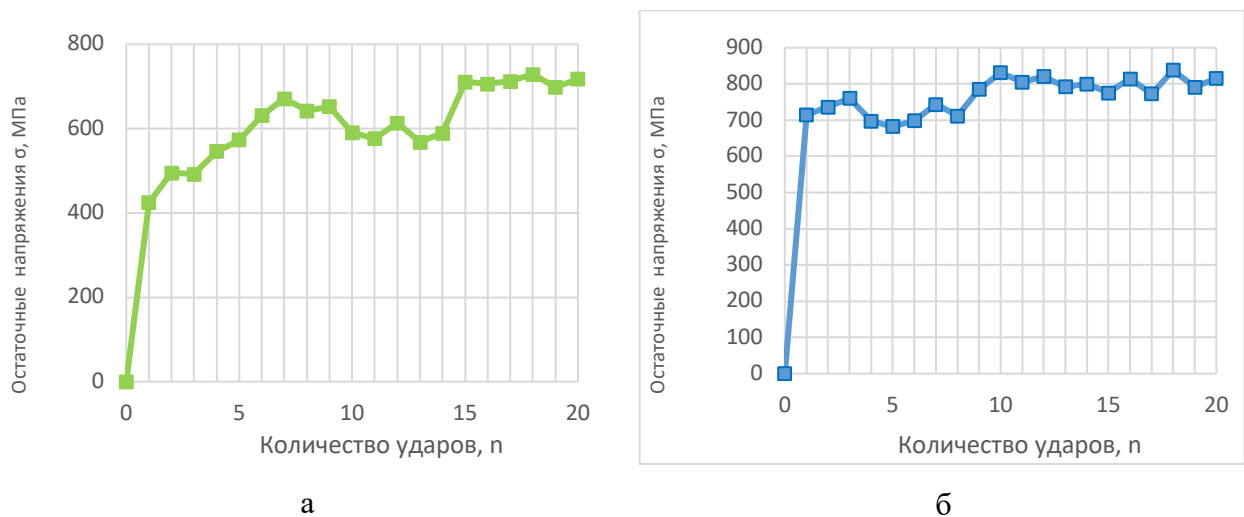


Рис. 3.7. Влияние количества единичных ударов дроби: на величину остаточных напряжений при  $\alpha = 90^\circ$ ;  $d = 0,3$  мм и  $L = 200$  мм: а –  $V = 60$  м/с; б –  $V = 90$  м/с

Установлено, что повышение скорости дроби до 90 м/с приводит к снижению количества ударов дроби, необходимых для насыщения поверхностного слоя пластическими деформациями. При изменении расстояния между соплом и поверхностью заготовки со 150 до 200 мм количество ударов практически не изменяется.

Имитационная модель №2 позволяет рассчитать параметры напряженно-деформированного состояния в зависимости от условий и режимов упрочнения: скорости дроби  $V$ , угла наклона сопла  $\alpha$ , диаметра дроби  $d$ , расстояния от сопла до поверхности  $L$ , при этом скорость движения сопла равна 0.

Таблица 3.4

**Результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния по имитационной модели №2**

Режимы ПДУ				Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{пл}$ , мм	$h_{\varepsilon_{пл}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	30	0,3	150	809,35	0,0412	0,0113	0,0518	0,0092	0,079
70	30	0,3	150	821,3	0,0621	0,0158	0,0801	0,0091	0,0867
80	30	0,3	150	837,55	0,1095	0,0262	0,1082	0,0092	0,1233
90	30	0,3	150	881,05	0,1705	0,0416	0,1153	0,0091	0,1705

Режимы ПДУ				Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$\sigma$ , МПа	$h_{\sigma}$ , мм	$\varepsilon_{пл}$ , мм	$h_{\varepsilon_{пл}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	60	0,3	150	821,24	0,1373	0,0128	0,1069	0,0092	0,1395
70	60	0,3	150	827,98	0,1898	0,0186	0,1415	0,0095	0,1344
80	60	0,3	150	847,07	0,2254	0,0236	0,1591	0,0095	0,2294
90	60	0,3	150	886,02	0,2707	0,0367	0,227	0,0096	0,2796
60	90	0,3	150	831,89	0,2278	0,0172	0,228	0,0098	0,2278
70	90	0,3	150	852,66	0,2437	0,028	0,2569	0,0095	0,2703
80	90	0,3	150	880,32	0,2753	0,0337	0,2997	0,0096	0,2864
90	90	0,3	150	901,65	0,3463	0,0499	0,3603	0,0101	0,3243
60	30	0,7	150	849,77	0,0452	0,0139	0,1775	0,0091	0,1382
70	30	0,7	150	865,89	0,072	0,0206	0,2631	0,0106	0,2611
80	30	0,7	150	891,74	0,1567	0,0417	0,3026	0,0108	0,2997
90	30	0,7	150	900,77	0,2246	0,0509	0,3608	0,0109	0,3282
60	60	0,7	150	867,79	0,1913	0,0554	0,2526	0,0092	0,1993
70	60	0,7	150	881,23	0,2984	0,0939	0,3751	0,0104	0,277
80	60	0,7	150	906,64	0,395	0,0996	0,5224	0,0106	0,3554
90	60	0,7	150	925,62	0,5674	0,1206	0,7281	0,0114	0,4479
60	90	0,7	150	875,25	0,2991	0,0899	0,372	0,0099	0,3367
70	90	0,7	150	895,34	0,3702	0,1002	0,6631	0,0104	0,4697
80	90	0,7	150	924,53	0,4987	0,1203	0,8062	0,011	0,5192
90	90	0,7	150	942,19	0,603	0,1281	0,8681	0,0115	0,581



Режимы ПДУ				Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{пл}$ , мм	$h_{\varepsilon_{пл}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	30	1,4	150	885,61	0,33	0,0936	0,4534	0,0095	0,3195
70	30	1,4	150	902,07	0,374	0,0991	0,4935	0,0101	0,3472
80	30	1,4	150	924,86	0,4006	0,1211	0,5271	0,0109	0,375
90	30	1,4	150	957,28	0,4689	0,1418	0,5635	0,0122	0,4119
60	60	1,4	150	894,46	0,453	0,0942	0,6037	0,0092	0,3464
70	60	1,4	150	908,63	0,5196	0,1091	0,7048	0,01	0,3947
80	60	1,4	150	937,97	0,581	0,1206	0,7852	0,0119	0,4528
90	60	1,4	150	968,56	0,6786	0,1342	0,831	0,0125	0,5478
60	90	1,4	150	902,06	0,5553	0,1001	0,7425	0,0101	0,518
70	90	1,4	150	923,84	0,6387	0,122	0,776	0,0109	0,5261
80	90	1,4	150	941,76	0,6623	0,1318	0,8499	0,0123	0,5461
90	90	1,4	150	973,48	0,7036	0,1581	0,9356	0,0126	0,5993
60	30	0,3	200	808,67	0,0393	0,0168	0,0508	0,0082	0,0935
70	30	0,3	200	832,36	0,0899	0,0234	0,0752	0,0084	0,1125
80	30	0,3	200	849,76	0,1187	0,0357	0,1089	0,0087	0,1424
90	30	0,3	200	881,57	0,1652	0,0411	0,1228	0,0089	0,1646
60	60	0,3	200	820,03	0,1205	0,0176	0,0676	0,0087	0,1821
70	60	0,3	200	846,92	0,1419	0,0256	0,1088	0,0093	0,2152
80	60	0,3	200	871,72	0,2134	0,036	0,1631	0,0123	0,2836
90	60	0,3	200	891,71	0,2817	0,0533	0,2804	0,0134	0,2999

Режимы ПДУ				Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$\sigma$ , МПа	$h_{\sigma}$ , мм	$\varepsilon_{пл}$ , мм	$h_{\varepsilon_{пл}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	90	0,3	200	828,72	0,2198	0,0185	0,2442	0,0099	0,2208
70	90	0,3	200	852,31	0,2748	0,0341	0,2838	0,0128	0,2654
80	90	0,3	200	867,89	0,3009	0,0395	0,3086	0,0139	0,3007
90	90	0,3	200	899,52	0,3423	0,052	0,3497	0,0163	0,3148
60	30	0,7	200	840,27	0,1784	0,0548	0,2485	0,0085	0,2207
70	30	0,7	200	871,77	0,2375	0,0645	0,3026	0,009	0,2503
80	30	0,7	200	920,53	0,28	0,0843	0,3282	0,0094	0,2752
90	30	0,7	200	930,66	0,3088	0,0959	0,3442	0,0104	0,2856
60	60	0,7	200	864,15	0,2972	0,0574	0,3576	0,0091	0,3256
70	60	0,7	200	887,88	0,372	0,0813	0,372	0,0097	0,3657
80	60	0,7	200	920,94	0,4424	0,0911	0,4419	0,0108	0,3957
90	60	0,7	200	932,32	0,4658	0,1009	0,5542	0,013	0,4329
60	90	0,7	200	871,76	0,3659	0,0689	0,4963	0,0099	0,3665
70	90	0,7	200	896,5	0,4104	0,0938	0,534	0,0123	0,3988
80	90	0,7	200	924,97	0,4739	0,0945	0,5858	0,014	0,4294
90	90	0,7	200	934,29	0,5131	0,1048	0,6107	0,0139	0,4559
60	30	1,4	200	885,28	0,3174	0,0911	0,4461	0,0095	0,3478
70	30	1,4	200	905,93	0,3604	0,1205	0,4717	0,0103	0,3655
80	30	1,4	200	936,81	0,3987	0,1316	0,4959	0,0107	0,377
90	30	1,4	200	954,63	0,4525	0,1398	0,5656	0,0114	0,4067

Режимы ПДУ				Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{пл}$ , мм	$h_{\varepsilon_{пл}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	60	1,4	200	901,22	0,4739	0,0979	0,6475	0,0099	0,4692
70	60	1,4	200	918,81	0,5195	0,1202	0,7521	0,0104	0,4938
80	60	1,4	200	939,7	0,5851	0,1325	0,7995	0,011	0,5369
90	60	1,4	200	966,77	0,65	0,1607	0,828	0,0115	0,5659
60	90	1,4	200	903,86	0,5119	0,1203	0,7484	0,0098	0,5123
70	90	1,4	200	925,63	0,6155	0,1299	0,8039	0,0113	0,5339
80	90	1,4	200	947,77	0,6529	0,1506	0,8514	0,0116	0,5888
90	90	1,4	200	973,1	0,6838	0,1563	0,8717	0,012	0,5971

На рис. 3.8 приведены результаты исследования влияния скорости дроби и угла наклона сопла на остаточные напряжения. Моделирование показало, что с увеличением скорости дроби с  $V = 60$  м/с до  $V = 90$  м/с остаточные напряжения повышаются на 9 – 11 % (с 870 до 940 МПа), изменение угла  $\alpha$  с  $30^\circ$  до  $90^\circ$  увеличивает  $\sigma$  на 2 – 5 %.

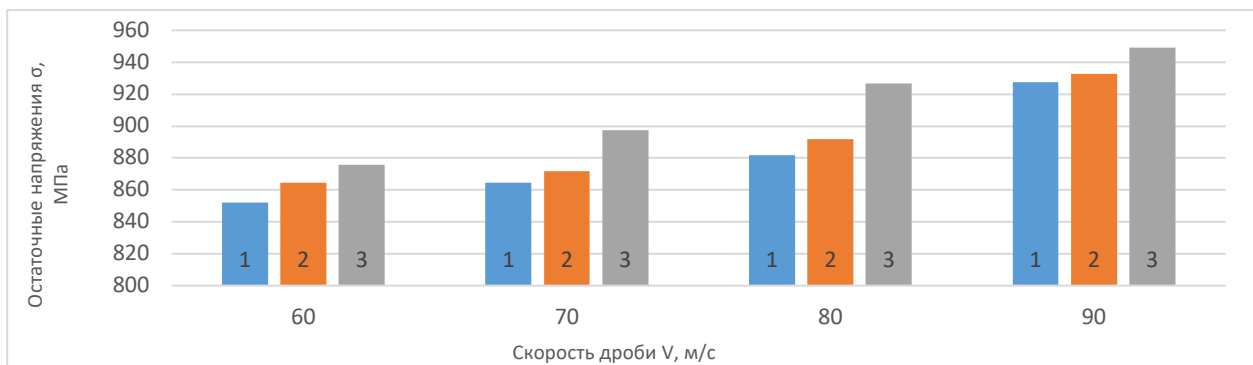


Рис. 3.8.– Влияние скорости дроби  $V$  на величину остаточных напряжений  $\sigma$  при различных углах наклона потока дроби  $\alpha$ : 1 –  $\alpha = 30^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 60^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 90^\circ$ ;  $L = 150$  мм,  $d = 0,3$  мм

На рис. 3.9 показаны результаты моделирования глубины залегания остаточных напряжений в зависимости от скорости дроби и угла наклона потока дроби. Из приведенных данных видно, что с повышением скорости дроби с  $V = 60$  м/с до  $V = 90$  м/с глубина их залегания увеличивается на 40 – 60 %, особенно это наблюдается при изменении угла потока дроби. При увеличении угла наклона сопла с  $30^\circ$  до  $90^\circ$  – повышается в 2 – 4 раза.

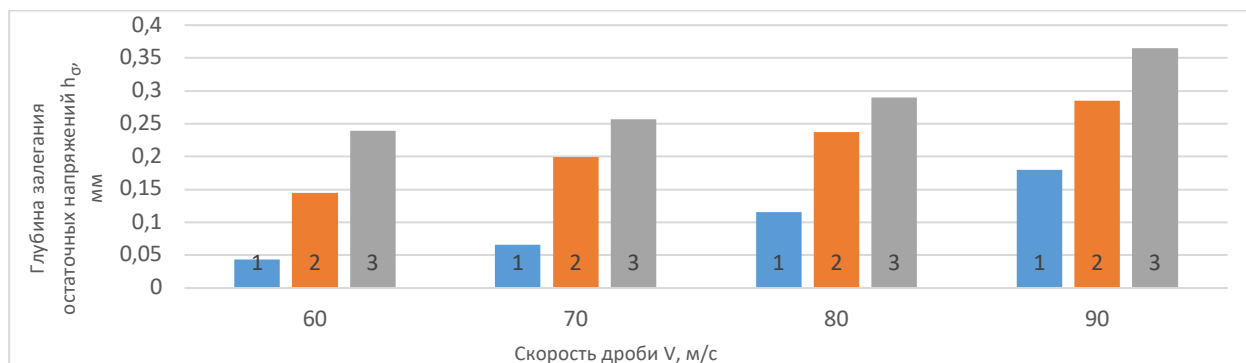


Рис. 3.9. Влияние скорости дроби  $V$  на глубину залегания остаточных напряжений  $h_\sigma$  при различных углах потока дроби  $\alpha$ : 1 –  $\alpha = 30^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 60^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 90^\circ$ ;  $L = 150$  мм,  $d = 0,3$  мм

На рис. 3.10 приведены результаты расчетов пластических деформаций при ПДУ с различной скоростью дроби. При повышении скорости дроби с  $V = 60$  м/с до  $V = 90$  м/с пластические деформации увеличиваются в 3,5 – 4,0 раза, в то же время повышение угла потока дроби с  $30^\circ$  до  $90^\circ$  повышает величину  $\epsilon_{пл}$ , в пределах 30 – 50 %.

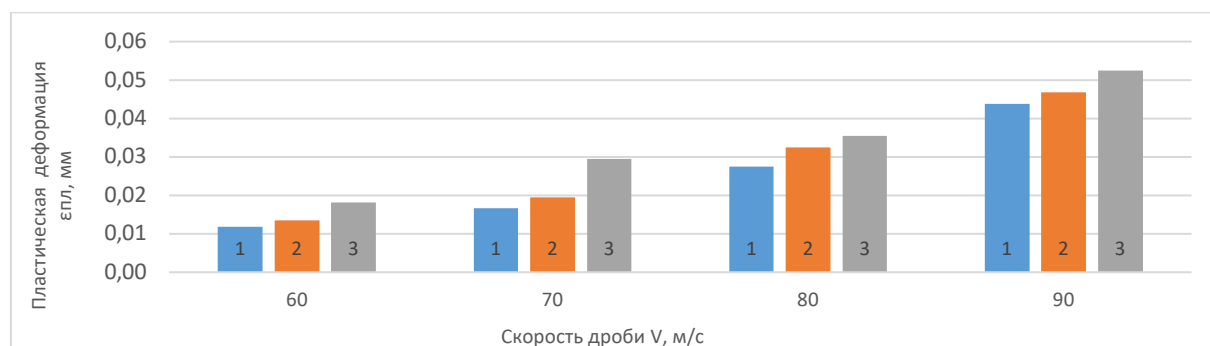


Рис. 3.10. Влияние скорости дроби  $V$  на величину пластических деформаций  $\epsilon_{пл}$  при различных углах потока дроби  $\alpha$ : 1 –  $\alpha = 30^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 60^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 90^\circ$ ;  $L = 150$  мм,  $d = 0,3$  мм

Исследованиями установлено, что увеличение диаметра дроби с 0,3 до 1,4 мм повышает параметры  $\sigma$ ,  $h_\sigma$ ,  $\varepsilon_{пл}$ ,  $h_{эпл}$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $h_{эy}$  на 4 – 6 %, что говорит о постоянной степени насыщения поверхности.

Анализ полученных результатов позволяет отметить следующее:

1. При изменении угла наклона сопла от 30 до 90° значение остаточных напряжений и глубина их залегания увеличиваются на 2 – 5 % и в 2 – 4 раза соответственно.

2. При постоянном угле наклона сопла, но при увеличении скорости дроби  $V$  с 60 до 90 м/с, значение остаточных напряжений и глубина их залегания повышается на 7 – 9 % и 40 – 60 % соответственно.

3. При изменении угла наклона сопла от 30 до 90° величина пластических деформаций повышается в пределах 30 – 50 %.

4. При постоянном угле наклона сопла, но при увеличении скорости дроби до  $V = 90$  м/с, величина пластических деформаций повышается в 3,5 – 4,0 раза.

Таким образом, увеличение скорости дроби до 90 м/с повышает интенсивность насыщения поверхности пластической деформацией и позволяет добиться требуемого напряженно-деформированного состояния, при этом рекомендуемые режимы обработки следующие:  $\alpha = 60 - 90^\circ$ ,  $d = 0,3$  мм,  $L = 150$  мм.

*Имитационная модель №3* позволила определить напряженно-деформированное состояние поверхности с учетом движения сопла и воздействия потока дроби с обрабатываемой поверхностью заготовки.

Расчет скорости движения сопла проводился исходя из требований обеспечения предельной пластической деформации поверхности (имитационная модель №2), учитывающей предельное насыщение пластической деформацией (см. рис. 3.6 – 3.7).

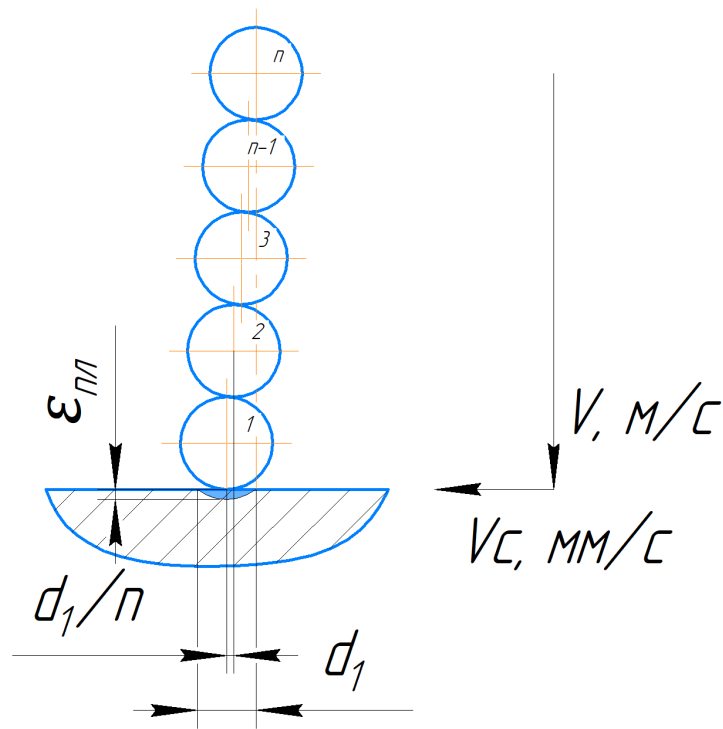


Рис. 3.11. Схема взаимодействия потока дроби с обрабатываемой поверхностью

Расчет скорости движения сопла согласно приведенной схеме на рис. 3.11 производится по формуле

$$V_c = \frac{d_1}{n \cdot t},$$

где  $n$  – число предельных ударов дроби, в зависимости от предельной степени насыщения (см. рис. 3.6 – 3.7);

$d_1$  – диаметр отпечатка при единичном ударе;

$t$  – время движения шарика от сопла до обрабатываемой поверхности.

Величина  $t$  рассчитывается по формуле

$$t = L / V,$$

где  $V$  – скорость дроби, м/с;

$L$  – расстояние между соплом и обрабатываемой поверхностью, мм.

Величина  $d_1$  рассчитывается по формуле

$$d_1 = \sqrt{d^2 - (d - 2 \cdot \varepsilon_{пл})^2},$$

где  $\varepsilon_{пл}$  – пластическая деформация.

Рассчитаем предельные значения скорости движения сопла при ПДУ со скоростью дроби  $V = 60$  м /с, угле наклона сопла  $\alpha = 60 - 90^\circ$ , диаметр дроби  $d = 0,3$  мм, расстояние до поверхности заготовки  $L = 180$  мм,  $n = 12 - 15$  ударов,  $\varepsilon_{пл}$  – в соответствии с рис. 3.9, расчетная максимальная скорость  $F = 0,4 - 0,8$  мм /с (заводской режим), при  $V = 90$  м /с, угле наклона сопла  $\alpha = 60 - 90^\circ$ , диаметр дроби  $d = 0,3$  мм, расстояние до поверхности заготовки  $L = 180$  мм,  $n = 8 - 10$  ударов,  $\varepsilon_{пл}$  – в соответствии с рис. 3.12, максимальная величина  $F = 0,70 - 1,30$  мм/с.

Проведен анализ влияния режимов ПДУ на параметры напряженно-деформированного состояния поверхности заготовки при минимальной  $F_{min} = 0,015$  мм /с (число единичных ударов – 20 – 25) и максимальной скорости движения сопла  $F_{max} = 1,3$  мм/с ( число единичных ударов 3 – 5 ). Результаты показаны в табл. 3.5 и 3.6.

Таблица 3.5

**Результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния по имитационной модели №3 при минимальной скорости движения сопла**

Режимы ПДУ					Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$V_c$ , мм/с	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{ост}$ , мм	$h_{\varepsilon_{ост}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	30	0,3	150	0,015	851,952	0,0434	0,0119	0,0546	0,0097	0,0832
70	30	0,3	150	0,015	864,523	0,0654	0,0165	0,08435	0,0095	0,0912
80	30	0,3	150	0,015	881,635	0,1153	0,0275	0,1139	0,0096	0,1298
90	30	0,3	150	0,015	927,42	0,1795	0,0438	0,1214	0,0096	0,1795
60	60	0,3	150	0,015	864,465	0,1445	0,0134	0,1125	0,0096	0,1468
70	60	0,3	150	0,015	871,561	0,1998	0,0195	0,1489	0,0099	0,1415
80	60	0,3	150	0,015	891,654	0,2373	0,0247	0,1675	0,0100	0,2415
90	60	0,3	150	0,015	932,656	0,2849	0,0386	0,2389	0,0101	0,2943

Режимы ПДУ					Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$V_c$ , мм/с	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{ост}$ , мм	$h_{\varepsilon_{ост}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	90	0,3	150	0,015	875,67	0,2397	0,0181	0,2401	0,0103	0,2397
70	90	0,3	150	0,015	897,54	0,2565	0,0294	0,2704	0,0099	0,2845
80	90	0,3	150	0,015	926,65	0,2898	0,0354	0,31544	0,0101	0,3014
90	90	0,3	150	0,015	949,11	0,3646	0,0525	0,3792	0,0106	0,3413
60	30	0,7	150	0,015	894,49	0,0476	0,0146	0,18689	0,0096	0,1454
70	30	0,7	150	0,015	911,46	0,0758	0,0216	0,27694	0,0111	0,2748
80	30	0,7	150	0,015	938,67	0,1649	0,0438	0,31854	0,0113	0,3154
90	30	0,7	150	0,015	948,18	0,2364	0,0535	0,37977	0,0114	0,3454
60	60	0,7	150	0,015	913,46	0,2014	0,0583	0,26591	0,0096	0,2097
70	60	0,7	150	0,015	927,61	0,3141	0,0988	0,39485	0,0109	0,2915
80	60	0,7	150	0,015	954,358	0,4158	0,1048	0,54987	0,0111	0,3741
90	60	0,7	150	0,015	974,34	0,5973	0,1269	0,76646	0,0119	0,4714
60	90	0,7	150	0,015	921,32	0,3148	0,0945	0,39157	0,0103	0,3544
70	90	0,7	150	0,015	942,46	0,3897	0,1054	0,69798	0,0109	0,4944
80	90	0,7	120	0,015	973,19	0,5249	0,1265	0,84866	0,0115	0,5465
90	90	0,7	120	0,015	991,78	0,6347	0,1348	0,91384	0,0121	0,6115
60	30	1,4	120	0,015	932,22	0,3474	0,0985	0,4772	0,0099	0,3363
70	30	1,4	120	0,015	949,543	0,3937	0,1043	0,5194	0,0106	0,3654
80	30	1,4	120	0,015	973,54	0,4217	0,1274	0,5548	0,0114	0,3947
90	30	1,4	120	0,015	1007,66	0,4936	0,1492	0,5931	0,0127	0,4335



Режимы ПДУ					Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$V_c$ , мм/с	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{ост}$ , мм	$h_{\varepsilon_{ост}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	60	1,4	120	0,015	941,54	0,4768	0,0991	0,6354	0,0096	0,3646
70	60	1,4	120	0,015	956,45	0,5469	0,1148	0,7419	0,0105	0,4154
80	60	1,4	120	0,015	987,34	0,6116	0,1269	0,8265	0,0124	0,4766
90	60	1,4	120	0,015	1019,54	0,7143	0,1412	0,8747	0,0131	0,5765
60	90	1,4	120	0,015	949,54	0,5845	0,1054	0,7816	0,0106	0,5452
70	90	1,4	120	0,015	972,46	0,6723	0,1284	0,8168	0,0114	0,5537
80	90	1,4	120	0,015	991,33	0,6972	0,1387	0,8946	0,0129	0,5748
90	90	1,4	120	0,015	1024,72	0,7407	0,1665	0,9848	0,0132	0,6308
60	30	0,3	200	0,015	851,233	0,0413	0,0177	0,0535	0,0085	0,0984
70	30	0,3	200	0,015	876,165	0,0946	0,0246	0,0791	0,0087	0,1184
80	30	0,3	200	0,015	894,489	0,1249	0,0375	0,1146	0,0091	0,1498
90	30	0,3	200	0,015	927,97	0,1739	0,0433	0,1293	0,0093	0,1732
60	60	0,3	200	0,015	863,189	0,1268	0,0185	0,0711	0,0091	0,1916
70	60	0,3	200	0,015	891,496	0,1494	0,0269	0,1145	0,0097	0,2265
80	60	0,3	200	0,015	917,604	0,2246	0,0378	0,1716	0,0129	0,2984
90	60	0,3	200	0,015	938,64	0,2965	0,0561	0,2951	0,0141	0,3156
60	90	0,3	200	0,015	872,34	0,2314	0,0195	0,2571	0,0104	0,2323
70	90	0,3	200	0,015	897,165	0,2893	0,0359	0,2987	0,0134	0,2794
80	90	0,3	200	0,015	913,569	0,3167	0,0415	0,3248	0,0146	0,3164
90	90	0,3	200	0,015	946,86	0,3603	0,0548	0,3681	0,0171	0,3313

Режимы ПДУ					Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$V_c$ , мм/с	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{ост}$ , мм	$h_{\varepsilon_{ост}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	30	0,7	200	0,015	884,494	0,1877	0,0576	0,2615	0,0089	0,2323
70	30	0,7	200	0,015	917,648	0,2499	0,0678	0,3184	0,0094	0,2634
80	30	0,7	200	0,015	968,984	0,2947	0,0887	0,3454	0,0099	0,2896
90	30	0,7	200	0,015	979,647	0,3250	0,1009	0,3623	0,0109	0,3006
60	60	0,7	200	0,015	909,634	0,3128	0,0603	0,3763	0,0095	0,3427
70	60	0,7	200	0,015	934,613	0,3915	0,0856	0,3915	0,0101	0,3849
80	60	0,7	200	0,015	969,414	0,4656	0,0958	0,4651	0,0113	0,4164
90	60	0,7	200	0,015	981,389	0,4903	0,1062	0,5833	0,0137	0,4556
60	90	0,7	200	0,015	917,644	0,3851	0,0725	0,5224	0,0104	0,3857
70	90	0,7	200	0,015	943,684	0,4319	0,0987	0,5621	0,0129	0,4197
80	90	0,7	200	0,015	973,655	0,4988	0,0994	0,6166	0,0147	0,4519
90	90	0,7	200	0,015	983,459	0,5400	0,1103	0,6428	0,0146	0,4799
60	30	1,4	200	0,015	931,87	0,3342	0,0958	0,4696	0,0100	0,3661
70	30	1,4	200	0,015	953,614	0,3794	0,1268	0,4965	0,0108	0,3847
80	30	1,4	200	0,015	986,119	0,4197	0,1384	0,5219	0,0112	0,3968
90	30	1,4	200	0,015	1004,87	0,4763	0,1471	0,5954	0,0120	0,4280
60	60	1,4	200	0,015	948,651	0,4988	0,1030	0,6815	0,0104	0,4938
70	60	1,4	200	0,015	967,165	0,5468	0,1265	0,7916	0,0109	0,5197
80	60	1,4	200	0,015	989,154	0,6159	0,1394	0,8415	0,0115	0,5651
90	60	1,4	200	0,015	1017,649	0,6842	0,1691	0,8715	0,0120	0,5956

Режимы ПДУ					Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$V_c$ , мм/с	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{ост}$ , мм	$h_{\varepsilon_{ост}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	90	1,4	200	0,015	951,43	0,5388	0,1266	0,7878	0,0103	0,5392
70	90	1,4	200	0,015	974,346	0,6479	0,1367	0,8461	0,0119	0,5619
80	90	1,4	200	0,015	997,649	0,6873	0,1585	0,8962	0,0121	0,6198
90	90	1,4	200	0,015	1024,32	0,7198	0,1645	0,9176	0,0126	0,6285

Таблица 3.6

**Результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния по имитационной модели №3 при максимальной скорости движения сопла**

Режимы ПДУ					Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$V_c$ , мм/с	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{ост}$ , мм	$h_{\varepsilon_{ост}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	30	0,3	150	1,3	780,654	0,0712	0,0056	0,0448	0,00730	0,13040
70	30	0,3	150	1,3	807,649	0,0948	0,0067	0,04761	0,00792	0,12981
80	30	0,3	150	1,3	839,498	0,1114	0,0148	0,03847	0,00805	0,12717
90	30	0,3	150	1,3	858,67	0,1294	0,0272	0,0325	0,00812	0,12609
60	60	0,3	150	1,3	784,156	0,13956	0,0119	0,10443	0,0087	0,16313
70	60	0,3	150	1,3	824,566	0,18561	0,0211	0,12489	0,01011	0,18564
80	60	0,3	150	1,3	851,561	0,21566	0,02656	0,15899	0,00956	0,19122
90	60	0,3	150	1,3	871,544	0,24489	0,02886	0,16879	0,00934	0,19636
60	90	0,3	150	1,3	801,03	0,2050	0,0155	0,1446	0,00922	0,19585
70	90	0,3	150	1,3	837,149	0,23498	0,02147	0,21879	0,01097	0,23541
80	90	0,3	150	1,3	859,654	0,2814	0,02814	0,24658	0,01369	0,25498
90	90	0,3	150	1,3	877,55	0,3383	0,0309	0,2827	0,01381	0,26662

Режимы ПДУ					Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$V_c$ , мм/с	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{ост}$ , мм	$h_{\varepsilon_{ост}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	30	0,7	150	1,3	849,156	0,1659	0,02013	0,21561	0,00753	0,17163
70	30	0,7	150	1,3	859,327	0,2191	0,02721	0,31156	0,00816	0,19564
80	30	0,7	150	1,3	881,156	0,28561	0,03646	0,39934	0,00913	0,22466
90	30	0,7	150	1,3	903,165	0,3416	0,10512	0,44165	0,00933	0,24213
60	60	0,7	150	1,3	843,563	0,27416	0,05545	0,31546	0,00943	0,21654
70	60	0,7	150	1,3	869,513	0,33589	0,07561	0,38133	0,00956	0,27131
80	60	0,7	150	1,3	895,164	0,39321	0,08151	0,47131	0,00977	0,32215
90	60	0,7	150	1,3	913,465	0,43156	0,0994	0,53153	0,00993	0,39356
60	90	0,7	150	1,3	864,516	0,3756	0,05354	0,49778	0,00917	0,31461
70	90	0,7	150	1,3	881,156	0,41654	0,08111	0,51156	0,00984	0,33546
80	90	0,7	150	1,3	911,579	0,52151	0,09931	0,55321	0,01056	0,37482
90	90	0,7	150	1,3	921,156	0,5953	0,11656	0,57156	0,01133	0,39153
60	30	1,4	150	1,3	861,71	0,2996	0,0808	0,3764	0,00788	0,26305
70	30	1,4	150	1,3	891,464	0,3658	0,10699	0,41856	0,00982	0,31681
80	30	1,4	150	1,3	924,198	0,3947	0,11369	0,45166	0,01009	0,33153
90	30	1,4	150	1,3	933,364	0,4273	0,1219	0,484	0,01120	0,35154
60	60	1,4	150	1,3	879,566	0,3952	0,09749	0,55891	0,00883	0,31156
70	60	1,4	150	1,3	892,065	0,41156	0,10441	0,61311	0,00944	0,42111
80	60	1,4	150	1,3	921,514	0,49153	0,12163	0,68156	0,01056	0,48983
90	60	1,4	150	1,3	948,156	0,5446	0,14477	0,73215	0,01112	0,54566
60	90	1,4	150	1,3	883,52	0,5614	0,0921	0,6695	0,00907	0,46359
70	90	1,4	150	1,3	926,655	0,6154	0,11515	0,71786	0,01093	0,49872
80	90	1,4	150	1,3	942,149	0,6632	0,13522	0,77211	0,01114	0,54549
90	90	1,4	150	1,3	956,58	0,6883	0,1546	0,8347	0,01314	0,56219

Режимы ПДУ					Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$V_c$ , мм/с	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{ост}$ , мм	$h_{\varepsilon_{ост}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	30	0,3	200	1,3	779,354	0,1061	0,0071	0,0441	0,00770	0,10728
70	30	0,3	200	1,3	812,646	0,1149	0,009183	0,041664	0,007811	0,11353
80	30	0,3	200	1,3	842,198	0,12113	0,021819	0,038821	0,00921	0,13787
90	30	0,3	200	1,3	858,59	0,1347	0,0275	0,0378	0,00797	0,14493
60	60	0,3	200	1,3	793,147	0,1456	0,00963	0,09673	0,00825	0,16546
70	60	0,3	200	1,3	829,584	0,1877	0,01065	0,12737	0,00916	0,18643
80	60	0,3	200	1,3	844,487	0,2219	0,02416	0,14387	0,01156	0,19941
90	60	0,3	200	1,3	862,1697	0,2756	0,02912	0,17543	0,01348	0,21346
60	90	0,3	200	1,3	801,52	0,1972	0,0143	0,1647	0,00913	0,19654
70	90	0,3	200	1,3	827,561	0,2364	0,01953	0,19132	0,01015	0,24233
80	90	0,3	200	1,3	862,7322	0,2847	0,02666	0,24651	0,01198	0,25597
90	90	0,3	200	1,3	874,44	0,3205	0,0293	0,2872	0,01406	0,27476
60	30	0,7	200	1,3	819,516	0,21263	0,04961	0,23563	0,00812	0,19432
70	30	0,7	200	1,3	846,9451	0,2661	0,05161	0,25796	0,00863	0,21559
80	30	0,7	200	1,3	883,879	0,3199	0,06365	0,27153	0,00895	0,24645
90	30	0,7	200	1,3	902,6142	0,34564	0,07456	0,29531	0,00931	0,26123
60	60	0,7	200	1,3	824,165	0,23185	0,04838	0,32856	0,00865	0,27313
70	60	0,7	200	1,3	859,563	0,3185	0,0655	0,36342	0,00922	0,29127
80	60	0,7	200	1,3	888,1465	0,4110	0,07346	0,39167	0,00913	0,30122
90	60	0,7	200	1,3	897,156	0,43487	0,08756	0,41313	0,00897	0,31837
60	90	0,7	200	1,3	843,165	0,37987	0,05017	0,40195	0,01083	0,31169
70	90	0,7	200	1,3	867,651	0,4242	0,06914	0,43942	0,00964	0,34513
80	90	0,7	200	1,3	899,789	0,5198	0,08798	0,49264	0,01119	0,36150
90	90	0,7	200	1,3	927,1196	0,59163	0,09756	0,55489	0,01265	0,39561

Режимы ПДУ					Параметры напряжений и деформаций					
$V$ , м/с	$\alpha$ , град	$d$ , мм	$L$ , мм	$V_c$ , мм/с	$\sigma$ , МПа	$h_\sigma$ , мм	$\varepsilon_{\text{ост}}$ , мм	$h_{\varepsilon_{\text{ост}}}$ , мм	$\varepsilon_y$ , мм	$h_{\varepsilon_y}$ , мм
60	30	1,4	200	1,3	860,41	0,2963	0,0849	0,3962	0,00793	0,28900
70	30	1,4	200	1,3	888,188	0,3515	0,09131	0,43189	0,00813	0,31982
80	30	1,4	200	1,3	909,179	0,4188	0,10981	0,49655	0,00924	0,33489
90	30	1,4	200	1,3	931,533	0,4452	0,1198	0,5234	0,00982	0,35521
60	60	1,4	200	1,3	869,168	0,3565	0,09123	0,52519	0,00783	0,36153
70	60	1,4	200	1,3	893,56	0,4613	0,10156	0,54653	0,00819	0,41321
80	60	1,4	200	1,3	927,167	0,4915	0,11913	0,58132	0,00987	0,43456
90	60	1,4	200	1,3	943,561	0,5365	0,13654	0,59651	0,01037	0,46520
60	90	1,4	200	1,3	876,1	0,4908	0,0923	0,6342	0,00842	0,44698
70	90	1,4	200	1,3	917,564	0,5348	0,1189	0,72649	0,00894	0,49562
80	90	1,4	200	1,3	932,486	0,5981	0,13489	0,79154	0,01010	0,52159
90	90	1,4	200	1,3	954,31	0,6833	0,1506	0,8108	0,01095	0,58223

На рис. 3.12 показаны расчетные значения, полученные в результате воздействия потока дроби  $d = 0,3$  мм под углом  $\alpha = 60^\circ$  на поверхность заготовки при различных скоростях движения сопла и дроби.

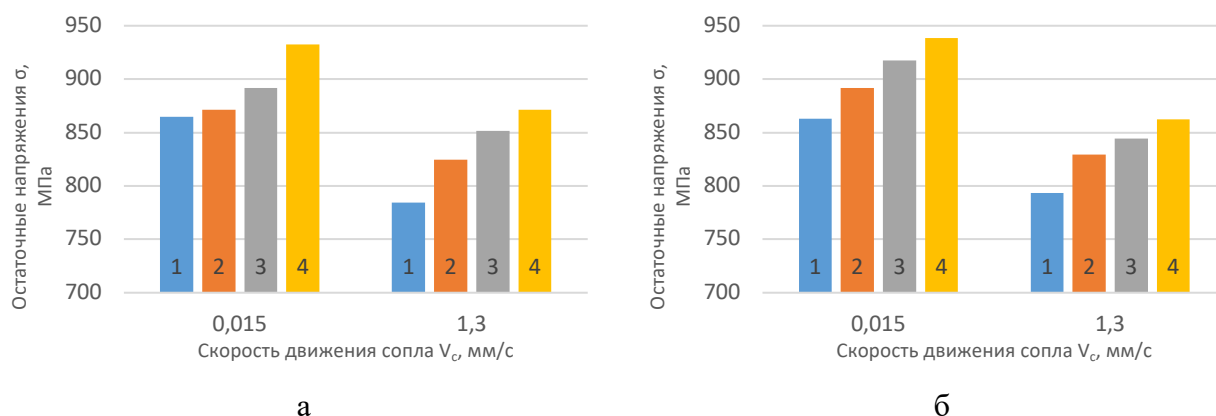


Рис. 3.12. Влияние скорости движения сопла  $V_c$  на величину остаточных напряжений  $\sigma$  при различных скоростях дроби  $V$ : а –  $L = 150$  мм; б –  $L = 200$  мм;  
1 –  $V = 60$  м/с; 2 –  $V = 70$  м/с; 3 –  $V = 80$  м/с; 4 –  $V = 90$  м/с

Установлено, что при работе с минимальной скоростью движения сопла остаточные напряжения увеличиваются на 6 – 10 % относительно ПДУ с максимальной скоростью движения сопла. Изменение расстояния от сопла до поверхности практически не влияет на величину  $\sigma$ . Исследования показали, что при повышении скорости дроби с 60 до 90 м/с остаточные напряжения увеличиваются на 7 – 8 %, а с увеличением скорости движения сопла – уменьшаются на 10 – 11 %.

На рис. 3.13 показаны остаточные деформации, полученные в результате взаимодействия потока дроби с поверхностью заготовки при  $\alpha = 60^\circ$  и  $d = 0,3$  мм.

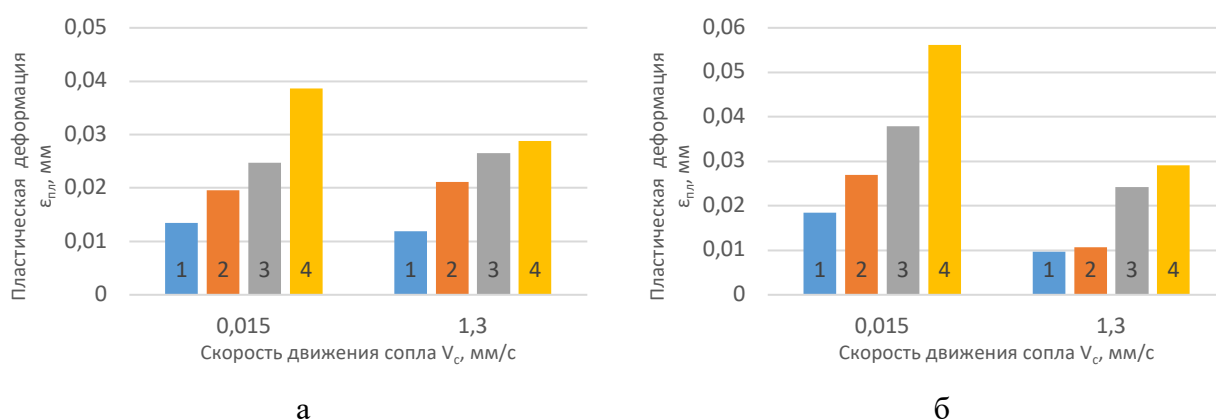


Рис. 3.13. Влияние скорости движения сопла  $V_c$  на величину пластических деформаций  $\epsilon_{пл}$  при различных скоростях дроби  $V$ : а –  $L = 150$  мм; б –  $L = 200$  мм;

1 –  $V = 60$  м/с; 2 –  $V = 70$  м/с; 3 –  $V = 80$  м/с; 4 –  $V = 90$  м/с;  $L = 150$  мм,  $d = 0,3$  мм

Результаты расчета показали, что остаточная деформация зависит от режимов ПДУ. С увеличением скорости движения сопла остаточные деформации уменьшаются и зависят от расстояния до поверхности только на 3 – 5 %. Большое влияние на параметр  $\epsilon_{пл}$  оказывают скорость и диаметр дроби. Повышение скорости дроби в 1,5 раза увеличивает  $\epsilon_{пл}$  в 3 раза, а повышение диаметра дроби с 0,3 до 1,4 мм увеличивает  $\epsilon_{пл}$  в 5 раз.

Анализ приведенных результатов позволяет отметить следующее:

1. Скорость движения сопла зависит от количества единичных ударов дроби, поэтому увеличение скорости дроби не только снижает количество ударов, но и повышает скорость движения сопла и производительность процесса ПДУ.

2. При увеличении скорости движения сопла до  $V_c = 1,3$  мм/с значения остаточных напряжений, независимо от расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности, снижается на 7 – 12 %, а величина остаточных деформаций – на 12 – 60 %.

3. При увеличении расстояния с  $L = 150$  мм до  $L = 200$  мм и неизменной скорости движения сопла остаточные напряжения повышаются на 2 – 5 %, а величина пластических деформаций практически не изменяется.

4. Наибольшее влияние на параметры напряженно-деформированного состояния оказывает диаметр дроби, однако увеличение диаметра дроби может превысить допустимый уровень остаточных напряжений.

Таким образом, исследования показали, что повышение скорости движения сопла способствует снижению интенсивности насыщения поверхности пластической деформацией, которое компенсируется повышением скорости дроби для обеспечения требуемого уровня остаточных напряжений и деформаций.

### 3.2. Разработка регрессионных моделей

Был выполнен комплекс исследований по определению влияния параметров процесса пневмодробеструйного упрочнения: скорость дроби  $V$  (60 – 90 м/с), угол наклона сопла  $\alpha$  (60 – 90°), диаметр дроби  $d$  (0,3 – 1,4 мм), расстояние до заготовки  $L$  (150 – 200 мм), скорость движения сопла  $V_c$  (0,015 – 1,3 мм/с) на остаточные напряжения. Данные плана эксперимента для расчета регрессионной модели указаны в табл. 3.7.

Таблица 3.7

#### Кодированные факторы регрессионной модели

Фактор воздействия	Скорость дроби $V$ , м/с	Угол наклона сопла $\alpha$ , град	Диаметр дроби $d$ , мм	Расстояние до заготовки $L$ , мм	Скорость движения сопла $V_c$ , мм/с
Кодированный фактор	X1	X2	X3	X4	X5



С помощью инструментов «Корреляция» и «Регрессия», встроенных в программу «Пакет анализа», используя функцию Мастера функций и метод наименьших квадратов, выполним численную оценку параметров линейной регрессионной модели, не учитывая взаимодействий между факторами и проверяя её качество по плану ПФЭ  $2^5$ .

На рис. 3.14 приведены уровни и интервалы варьирования факторов. На рис. 3.15 – матрица планирования полного факторного эксперимента ПФЭ  $2^5$  в кодированном виде и правило чередования знаков в строках матрицы. В столбце H10:H41 приведены вычисленные в ПО Ansys значения зависимой переменной  $\Delta\sigma = Y_{оп}$ .

С помощью встроенной функции «Корреляция» (рис. 3.16, табл. 3, 4) показана сравнительная оценка значимости и отсев части факторов путем анализа парных коэффициентов линейной корреляции  $r_{y,x}$ . Анализ таблиц показал, что факторы X1 – X5 между собой линейно независимы; наибольшее значимое прямое влияние на изменение вносимых напряжений  $\Delta\sigma$  в зоне контакта оказывают факторы X1, X3, X5 и чуть менее значимое влияние – фактор X2. Фактор X4 оказывает наименьшее влияние.

Для проверки нулевой гипотезы рассчитаем соответственно в ячейках G54 и G56 t-статистику Стьюдента по формуле [7]:

$$t_{набл} = \sqrt{\frac{r^2(n-2)}{1-r^2}}, \quad (3.6)$$

где  $n$  – число строк матрицы,  $n = 2^5 = 32$ .

Сравним полученное значение с критическим значением  $t_{кр}(v, \alpha)$  распределения Стьюдента с помощью встроенной функции СТЬЮДРАСПОБР ( $v, \alpha$ ) при числе степеней свободы  $v = n - 2 = 30$  и уровне значимости  $\alpha = 0,05$ :  $t_{кр}(0,05; 30) = 2,0422$ .

Так как  $t(x2y) = 0,844 < 2,042$  и  $t(x4y) = 0,06 < 2,042$ , то нет оснований отказываться от нулевой гипотезы  $rxu = 0$ , поэтому найденные коэффициенты корреляции незначимы, однако, учитывая значимость фактора  $t(x2y)$  в

регрессионном расчете, в расчете принимаем его значимым.

Для построения модели множественной линейной регрессии без учета взаимодействия факторов необходимо оценить коэффициенты уравнения. В Microsoft Excel наиболее распространенные способы поиска модели линейной регрессии включают в себя:

- Использование функции «ЛИНЕЙН» встроенной в программу Excel.
- Применение инструмента «Регрессия» в составе программного пакета анализа данных.
- Графический метод построения линии тренда на диаграмме с указанием уравнения регрессии и вычисленного значения коэффициента детерминации  $R^2$ .

Статистическая функция ЛИНЕЙН ( $Y$ ;  $X$ ; константа; статистика) возвращает линейное уравнение регрессии, позволяет оценить коэффициенты уравнения множественной линейной регрессии в виде  $y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i$  и получить данные для оценки достоверности. Синтаксис операций требует введения массивов матриц  $Y, X$ ; выделения диапазона ячеек для вывода результата операции, в котором всегда 5 строк, а число столбцов на единицу больше числа независимых аргументов  $X$ ; ввода формулы операции и нажатия комбинации клавиш CTRL+SHIFT+ENTER. В столбце H10:H32 (рис. 3.15, табл. 2) приведено уравнение для расчета параметра  $\Delta\sigma = Y_{\text{регр}}$ .

$$Y_{\text{регр}} = 903,7 + 37,419X_1 + 9,98X_2 + 39,05X_3 - 0,75X_4 - 35,62X_5 \quad (3.7)$$

В ячейках I42 и J42 (рис. 3.15) соответственно приведены результаты расчета регрессионной и остаточной суммы квадратов, которые совпадают со значениями в ячейках B55 и C55, полученными с помощью статистической функции ЛИНЕЙН. В ячейке B53 приведено расчетное значение коэффициента детерминации  $R^2$ , которое показывает долю вариации изменения напряжений в зоне контакта  $\Delta\sigma = Y_{\text{регр}}$ , находящейся под воздействием выбранных независимых факторов  $x_i$ . Значение  $R^2 = 0,99$  показывает, что примерно 99 % вариации  $\Delta\sigma$  определяется значениями факторов  $X_1, X_2, X_3, X_5$  на основании полученной множественной линейной функции регрессии. В качестве меры точности регрессии принимают

несмещенную оценку дисперсии остаточной компоненты, определяемую как отношение суммы квадратов уровней остаточной компоненты в ячейке I42 (рис. 3.15, табл. 2) к величине  $(n - k - 1)$ , где  $k$  – количество факторов, включенных в модель (ячейка J43). Корень квадратный из этой величины называется стандартной ошибкой оценки регрессии  $S_e = 1,87$  (ячейка J44, рис. 3.15). Аналогичный результат, полученный с помощью статистической функции ЛИНЕЙН, приведен в ячейке C53.

Оценим достоверность самой величины  $R^2$  с помощью  $F$  распределения, которое определяет  $\alpha$  – вероятность того, что зависимость  $y$  от  $x$  отсутствует. Статистическая функция Excel ФРАСП ( $F_{расч}; k; df$ ) возвращает величину  $\alpha$ ; следовательно,  $(1 - \alpha)$  – вероятность того, что такая зависимость существует. Значение числа степеней свободы  $df = n - (k + 1)$  приведено в ячейке C54. В ячейке B54 (рис. 3.16, табл. 5) приведено расчетное значение  $F$ -критерия, а в ячейке H59 (рис. 3.16, табл. 6) приведен результат оценки достоверности величины  $\alpha$ : близкое к единице значение  $(1 - \alpha)$  свидетельствует о достоверности полученного уравнения регрессии.

	A	B	C	D	E	F	G
1	<b>Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов</b>						
2	Уровни факторов		x1=V	x2=alpha	x3=d	x4=L	x5=Vc
3	Верхний	1	90	90	1,4	200	1,3
4	Нижний	-1	60	30	0,3	150	0,015
5	Основной	0	75	60	0,85	175	0,6575
6	Интервал варьирования $\Delta x_i$	$\Delta x_i$	15	30	0,55	25	0,6425

Рис. 3.14. Численная оценка параметров регрессионной модели с помощью функции ЛИНЕЙН

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
8	<b>Таблица 2. Матрица ПФЭ 2<sup>4</sup> (1), a, b, ab, c, ac, bc, abc, d, ad, bd, abd, cd, acd, bcd, abcd</b>										
9	№ опыта	X0	X1	X2	X3	X4	X5	Yоп	Yперп	(Yоп-Yперп) <sup>2</sup>	(Yпер.ср-Yперп) <sup>2</sup>
10	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	851,952	852,862563	0,83	2584,826
11	2	1	1	-1	-1	-1	-1	927,42	927,700938	0,08	575,865
12	3	1	-1	1	-1	-1	-1	875,67	872,835063	8,04	952,876
13	4	1	1	1	-1	-1	-1	949,11	947,673438	2,06	1933,333
14	5	1	-1	-1	1	-1	-1	932,22	930,974688	1,55	743,704
15	6	1	1	-1	1	-1	-1	1007,66	1005,81306	3,41	10426,312
16	7	1	-1	1	1	-1	-1	949,54	950,947188	1,98	2231,942
17	8	1	1	1	1	-1	-1	1024,72	1025,78556	1,14	14903,969
18	9	1	-1	-1	-1	1	-1	851,233	852,862563	2,66	2584,826
19	10	1	1	-1	-1	1	-1	927,97	927,700938	0,07	575,865
20	11	1	-1	1	-1	1	-1	872,34	872,835063	0,25	952,876
21	12	1	1	1	-1	1	-1	946,86	947,673438	0,66	1933,333
22	13	1	-1	-1	1	1	-1	931,87	930,974688	0,80	743,704
23	14	1	1	-1	1	1	-1	1004,87	1005,81306	0,89	10426,312
24	15	1	-1	1	1	1	-1	951,43	950,947188	0,23	2231,942
25	16	1	1	1	1	1	-1	1024,32	1025,78556	2,15	14903,969
26	17	1	-1	-1	-1	-1	1	780,654	781,621938	0,94	14903,969
27	18	1	1	-1	-1	-1	1	858,67	856,460313	4,88	2231,942
28	19	1	-1	1	-1	-1	1	801,03	801,594438	0,32	10426,312
29	20	1	1	1	-1	-1	1	877,55	876,432813	1,25	743,704
30	21	1	-1	-1	1	-1	1	861,71	859,734063	3,90	1933,333
31	22	1	1	-1	1	-1	1	933,364	934,572438	1,46	952,876
32	23	1	-1	1	1	-1	1	883,52	879,706563	14,54	575,865
33	24	1	1	1	1	-1	1	956,58	954,544938	4,14	2584,826
34	25	1	-1	-1	-1	1	1	779,354	781,621938	5,14	14903,969
35	26	1	1	-1	-1	1	1	858,59	856,460313	4,54	2231,942
36	27	1	-1	1	-1	1	1	801,52	801,594438	0,01	10426,312
37	28	1	1	1	-1	1	1	874,44	876,432813	3,97	743,704
38	29	1	-1	-1	1	1	1	860,41	859,734063	0,46	1933,333
39	30	1	1	-1	1	1	1	931,533	934,572438	9,24	952,876
40	31	1	-1	1	1	1	1	876,1	879,706563	13,01	575,865
41	32	1	1	1	1	1	1	954,31	954,544938	0,06	2584,826
42								Σ=	<b>28918,52</b>	<b>94,64104962</b>	<b>137411</b>
43								<b>Yпер.ср</b>	<b>903,70375</b>	<b>S<sup>2</sup>(y)=</b>	<b>3,640</b>
44										<b>S(y)=</b>	<b>1,907888983</b>

Рис. 3.15. Численная оценка параметров регрессионной модели с помощью функции ЛИНЕЙН

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
45	<b>Таблица 3. Определение значений коэффициентов парной линейной корреляции r<sub>xy</sub></b>										
46	x1 x2	x1 x3	x1 x4	x1 x5	x2 x3	x2 x4	x2 x5	x3 x4	x3 x5	x4 x5	
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
48	x1 y	x2 y	x3 y	x4 y	x5 y						
49	<b>0,570832</b>	<b>0,152340955</b>	<b>0,595803</b>	<b>-0,0115462</b>	<b>-0,5433904</b>						
50											
51	<b>Таблица 5. Определение уравнения линейной регрессии</b>						<b>Таблица 4. Проверка значимости коэф. корреляции</b>				
52	b1	-35,6203125	-0,756875	39,056063	9,98625	37,419188	903,70375	tнабп.	значение	вывод	Tкр(0,05; n-2)
53	σ	0,302850117	0,3028501	0,3028501	0,3028501	0,3028501	0,3028501	t <sub>(x1y)</sub>	3,80794636	значим	<b>2,042</b>
54	R <sup>2</sup>	0,999445046	1,713179	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	t <sub>(x2y)</sub>	0,84425998	незначим	
55	Fрасч	9364,938735	26	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	t <sub>(x3y)</sub>	4,06328374	значим	
56	SS	<b>137430</b>	<b>76,31</b>	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	t <sub>(x4y)</sub>	0,06324526	незначим	
57								t <sub>(x5y)</sub>	3,54537501	значим	
58	<b>Y=903,7+37,42X1+9,98X2+39,05X3-0,75X4-35,62X5</b>										
59	<b>Таблица 7. Оценка достоверности коэффициентов уравнения</b>						<b>Таблица 6. Оценка достоверности R<sup>2</sup> (Fрасч; k; df)</b>				
60	ti=bi/σ	117,6169677	2,4991735	128,96169	32,974232	123,55679	2983,9967	α	1-α	Вывод	
61	β расп	5,52701E-37	0,0190931	5,063E-38	9,632E-23	1,539E-37	1,738E-73	2E-41	<b>1E+00</b>	Уравнение достоверно	
62	1-β расп	1,000	0,981	1,000	1,000	1,000	1,000				

Рис. 3.16. Численная оценка параметров регрессионной модели с помощью функции ЛИНЕЙН

Проведенная оценка достоверности коэффициентов линейной регрессии с помощью распределения Стьюдента и статистической функции Excel СТЬЮДРАСП указывает на то, что достоверность коэффициента b4 (ячейка C52) вызывает сомнения и требует дополнительной проверки (рис. 3.18, табл. 5).

Проверка значимости факторов с использованием частных  $F$ -критериев Фишера подтвердила, что фактор  $X_4$ , равный  $-0,756875$ , является наименьшим и включать его в модель нецелесообразно.

Тогда уравнение множественной регрессии (1) примет вид:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_5X_5 + e_i, \quad (3.8)$$

где  $e_i$  – остатки регрессии.

С помощью инструмента «Регрессия» из пакета Анализа мы определим коэффициенты линейного уравнения регрессии (3.8). Для выбора факторов  $X_1, X_2, X_3$  и  $X_5$ , которые наиболее плотно связаны с результирующей переменной  $Y$ , будет использован этот же инструмент.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
8	<b>Таблица 2. Матрица ПФЭ <math>2^4</math> (1), a, b, ab, c, ac, bc, abc, d, ad, bd, abd, cd, acd, bcd, abcd</b>									
9	№ опыта	X0	X1	X2	X3	X5	Yоп	Yперп	(Yоп-Yперп) <sup>2</sup>	(Yпер.ср-Yперп) <sup>2</sup>
10	1	1	-1	-1	-1	-1	851,952	852,86256	0,83	2584,826
11	2	1	1	-1	-1	-1	927,42	927,70094	0,08	575,865
12	3	1	-1	1	-1	-1	875,67	872,83506	8,04	952,876
13	4	1	1	1	-1	-1	949,11	947,67344	2,06	1933,333
14	5	1	-1	-1	1	-1	932,22	930,97469	1,55	743,704
15	6	1	1	-1	1	-1	1007,66	1005,8131	3,41	10426,312
16	7	1	-1	1	1	-1	949,54	950,94719	1,98	2231,942
17	8	1	1	1	1	-1	1024,72	1025,7856	1,14	14903,969
18	9	1	-1	-1	-1	-1	851,233	852,86256	2,66	2584,826
19	10	1	1	-1	-1	-1	927,97	927,70094	0,07	575,865
20	11	1	-1	1	-1	-1	872,34	872,83506	0,25	952,876
21	12	1	1	1	-1	-1	946,86	947,67344	0,66	1933,333
22	13	1	-1	-1	1	-1	931,87	930,97469	0,80	743,704
23	14	1	1	-1	1	-1	1004,87	1005,8131	0,89	10426,312
24	15	1	-1	1	1	-1	951,43	950,94719	0,23	2231,942
25	16	1	1	1	1	-1	1024,32	1025,7856	2,15	14903,969
26	17	1	-1	-1	-1	1	780,654	781,62194	0,94	14903,969
27	18	1	1	-1	-1	1	858,67	856,46031	4,88	2231,942
28	19	1	-1	1	-1	1	801,03	801,59444	0,32	10426,312
29	20	1	1	1	-1	1	877,55	876,43281	1,25	743,704
30	21	1	-1	-1	1	1	861,71	859,73406	3,90	1933,333
31	22	1	1	-1	1	1	933,364	934,57244	1,46	952,876
32	23	1	-1	1	1	1	883,52	879,70656	14,54	575,865
33	24	1	1	1	1	1	956,58	954,54494	4,14	2584,826
34	25	1	-1	-1	-1	1	779,354	781,62194	5,14	14903,969
35	26	1	1	-1	-1	1	858,59	856,46031	4,54	2231,942
36	27	1	-1	1	-1	1	801,52	801,59444	0,01	10426,312
37	28	1	1	1	-1	1	874,44	876,43281	3,97	743,704
38	29	1	-1	-1	1	1	860,41	859,73406	0,46	1933,333
39	30	1	1	-1	1	1	931,533	934,57244	9,24	952,876
40	31	1	-1	1	1	1	876,1	879,70656	13,01	575,865
41	32	1	1	1	1	1	954,31	954,54494	0,06	2584,826
42							$\Sigma=$	<b>28918,52</b>	<b>94,64105</b>	<b>137411,31</b>
43							Yпер.ср	<b>903,70375</b>	$S^2(y)=$	<b>3,51</b>
44									$S(y)=$	<b>1,872224362</b>

Рис. 3.17. Пересчет оценки параметров регрессионной модели без незначимого коэффициента с помощью функции ЛИНЕЙН

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
46	<b>Таблица 3. Определение значений коэффициентов парной линейной корреляции <math>r_{xyi}</math></b>										
47	x1 x2	x1 x3	x1 x5	x2 x3	x2 x5	x3 x5	x1 y	x2 y	x3 y	x5 y	
48	0	0	0	0	0	0	0,5708324	0,152341	0,59580302	-0,54339041	
49											
50	<b>Таблица 5. Определение уравнения линейной регрессии</b>						<b>Таблица 4. Проверка значимости коэф. корреляции</b>				
51	bi	-35,6203125	39,056063	9,98625	37,419188	903,70375	#Н/Д	табл.	значение	вывод	Ткр(0,05; n-2) <b>2,042</b>
52	$\sigma$	0,330965635	0,3309656	0,3309656	0,3309656	0,3309656	#Н/Д	$t_{(x1y)}$	3,80794636	значим	
53	$R^2$	0,999311731	1,8722244	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	$t_{(x2y)}$	0,84425998	незначим	
54	Фрасч	9800,465566	27	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	$t_{(x3y)}$	4,06328374	значим	
55	SS	<b>137411,31</b>	<b>94,64105</b>	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	$t_{(x5y)}$	3,54537501	значим	
56	<b><math>Y=903,7+37,419X_1+9,98X_2+39,05X_3-35,62X_5</math></b>										
57	<b>Таблица 7. Оценка достоверности коэффициентов уравнения</b>						<b>Таблица 6. Оценка достоверности <math>R^2</math> (Фрасч; k; df)</b>				
58	$t_i=bi/\sigma$	107,6254109	118,0064	30,173072	113,06064	2730,5063	#Н/Д	$\alpha$	1- $\alpha$	Вывод	
59	$\beta$ расч	4,27335E-37	3,575E-38	2,457E-22	1,133E-37	5,334E-75	#Н/Д	4,3E-43	<b>1,0E+00</b>	Уравнение достоверно	
60	1- $\beta$ расч	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	#Н/Д				

Рис. 3.18. Пересчет оценки параметров регрессионной модели без незначимого коэффициента с помощью функции ЛИНЕЙН

На рис. 3.18 показаны результаты использования инструмента «Регрессия» и получено адекватное уравнение регрессии:

$$Y_{\text{регр}} = 903,7 + 37,419X_1 + 9,98X_2 + 39,05X_3 - 35,62X_5 + e_i. \quad (3.9)$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Регрессионная статистика		Дисперсионный анализ		<b><math>Y=903,7+37,419X_1+9,98X_2+39,05X_3-35,62X_5</math></b>				
2	Множественный R	0,999655806	Параметры	df	SS	MS	F	значимость F	
3	R-квадрат	0,9993	Регрессия	4	137411,3108	34352,8277	9800,46557	3E-42	
4	рмированный R-кв	0,9992	Остаток	27	94,64104962	3,50522406			
5	Стандартная ошибка	1,8722	Итого	31	137505,9519				
6	Наблюдения	32							
7									
8	Параметры	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%		
9	Y-пересечение	903,70375	0,330965635	2730,506292	5,33411E-75	903,0246646	904,382835		
10	Переменная X 1	37,4191875	0,330965635	113,0606428	1,13317E-37	36,74010211	38,0982729		
11	Переменная X 2	9,98625	0,330965635	30,17307215	2,4574E-22	9,307164609	10,6653354		
12	Переменная X 3	39,0560625	0,330965635	118,006398	3,57465E-38	38,37697711	39,7351479		
13	Переменная X 5	-35,6203125	0,330965635	-107,6254109	4,27335E-37	-36,2993979	-34,9412271		
14									
15	<b>Вывод ОСТАТКА</b>								
16									
17	Наблюдение	Предсказанное Y	Остатки e	$e^2$	<b>График остатков</b>				
18	1	852,8625625	-0,9105625	0,829124					
19	2	927,7009375	-0,2809375	0,078926					
20	3	872,8350625	2,8349375	8,036871					
21	4	947,6734375	1,4365625	2,063712					
22	5	930,9746875	1,2453125	1,550803					
23	6	1005,813063	1,8469375	3,411178					
24	7	950,9471875	-1,4071875	1,980177					
25	8	1025,785563	-1,0655625	1,135423					
26	9	852,8625625	-1,6296625	2,656474					
27	10	927,7009375	0,2690625	0,072395					
28	11	872,8350625	-0,4950625	0,245087					
29	12	947,6734375	-0,8134375	0,661681					
30	13	930,9746875	0,8953125	0,801584					
31	14	1005,813063	-0,9430625	0,889367					
32	15	950,9471875	0,4828125	0,233108					
33	16	1025,785563	-1,4655625	2,147873					
34	17	781,6219375	-0,9679375	0,936903					
35	18	856,4603125	2,2096875	4,882719					
36	19	801,5944375	-0,5644375	0,318590					
37	20	876,4328125	1,1171875	1,248108					
38	21	859,7340625	1,9759375	3,904329					
39	22	934,5724375	-1,2084375	1,460321					
40	23	879,7065625	3,8134375	14,542306					
41	24	954,5449375	2,0350625	4,141479					
42	25	781,6219375	-2,2679375	5,143541					
43	26	856,4603125	2,1296875	4,535669					
44	27	801,5944375	-0,0744375	0,005641					
45	28	876,4328125	-1,9928125	3,971302					
46	29	859,7340625	0,6759375	0,456892					
47	30	934,5724375	-3,0394375	9,238180					
48	31	879,7065625	-3,6065625	13,007293					
49	32	954,5449375	-0,2349375	0,055195629					
50			$\sum e$	94,64104962					

Рис. 3.19. Вывод итогов инструмента «Регрессия»

Сравнивая результаты регрессионной модели (3.9) с результатами, полученными с помощью статистической функции линейной модели (3.7), видим, что коэффициенты  $b_0$ , а также  $b_1, b_2, b_3$  и  $b_5$  при независимых переменных  $X_1, X_2, X_3, X_5$  полностью совпадают в обоих случаях.

Выполним оценку остатков регрессии (6). В Excel нет встроенных тестов на гетероскедастичность, но можно вручную провести тест Голдфелда–Куандта. Нулевая гипотеза теста – остатки модели гомоскедастичны, альтернативная – остатки гетероскедастичны. Характер графиков остатков (рис. 3.20) показывает, что остатки модели примерно одинаковы по модулю и распределены примерно симметрично.

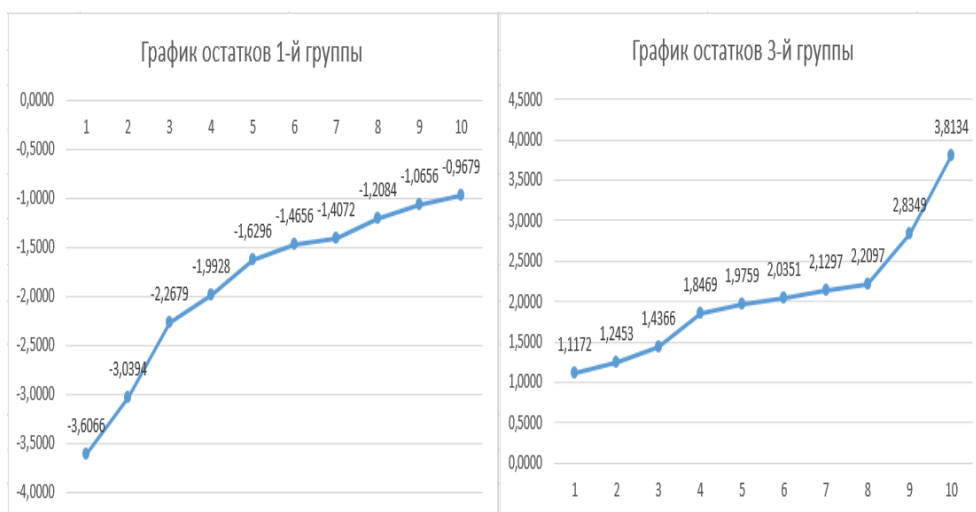


Рис. 3.20. Графики остатков регрессии по двум группам

Для численной оценки сначала все наблюдения упорядочим по возрастанию и разделим на три группы: в первой группе имеем  $n_1 = 6$  наименьших значений остатков, в третьей группе имеем  $n_2 = 6$  наибольших значений, наблюдениями средней группы пренебрегаем (рис. 3.19).

Расчетная статистика теста Голдфелда–Куандта имеет вид:

$$F_{(n_2-k; n_1-k)} = \frac{ESS_2 / (n_2 - k)}{ESS_1 / (n_1 - k)}, \quad (3.9)$$

где  $n_1, n_2$  – количество наблюдений в каждой группе;  $k$  – количество параметров, оцененных в регрессии; статистика имеет  $F$ -распределение со степенями свободы числителя  $(n_2 - k)$  и знаменателя  $(n_1 - k)$ .

## Проверка остатков модели регрессии на гомоскедастичность

Ранжированные остатки первой группы $e_i$	$e_i^2$	Ранжированные остатки третьей группы $e_i$	$e_i^2$
-3,6066	13,00729307	1,1172	1,24810791
-3,0394	9,238180316	1,2453	1,550803223
-2,2679	5,143540504	1,4366	2,063711816
-1,9928	3,97130166	1,8469	3,411178129
-1,6296	2,655473941	1,9759	3,904329004
-1,4656	2,147873441	2,0351	4,141479379
-1,4072	1,98017666	2,1297	4,535568848
-1,2084	1,460321191	2,2097	4,882718848
-1,0656	1,135423441	2,8349	8,036870629
-0,9679	0,936903004	3,8134	14,54230557
<b>ESS<sub>2</sub>=41,67648723</b>		<b>ESS<sub>1</sub>=48,31707335</b>	

Используя суммы квадратов остатков ( $ESS$ ) в оцененных регрессиях (табл. 3.8), рассчитываем тестовую статистику по формуле (3.9); при этом в числителе – наибольшая из двух дисперсий – «сумма квадратов остатков, деленная на степень свободы»  $ESS_1/(n_1 - k)$  или  $ESS_2/(n_2 - k)$ . Сравниваем полученное значение  $F_{расч}$  с критическим  $F_{кр}$  при выбранном уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Если значение  $F_{расч}$  превышает критическое  $F_{кр}$ , то нулевая гипотеза о гомоскедастичности отклоняется и в остатках модели присутствует гетероскедастичность. Иначе ( $F_{расч} < F_{кр}$ ) остатки модели признаются гомоскедастичными. Рассчитаем по формуле (3.9)  $F$ -статистику:

$$F_{(n_2-k; n_1-k)} = \frac{41,676/(10 - 5)}{48,317/(10 - 5)} = 0,862.$$



С помощью встроенной функции  $F_{\text{РАСПОБР}}(\alpha; n_1 - k; n_2 - k)$  имеем  $F_{\text{кр}}(0,05; 5; 5) = 5,05$ . Так как  $F_{\text{расч}} < F_{\text{кр}}$ , то нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу о гомоскедастичности остатков модели регрессии. Проведем анализ статистической эквивалентности построенных моделей (3.7) и (3.9) посредством сравнения их остаточных дисперсий. Для сравнения остаточных дисперсий  $S_{\text{ост1}}^2$  (рис. 3.19, ячейка E4) и  $S_{\text{ост1}}^2$  (рис. 3.18, ячейка C55) вычисляется статистика:

$$F = \frac{\max(94,641; 94,641)}{\min(94,641; 94,641)} = 1.$$

При  $\alpha = 0,05$ ,  $v_1 = n - k - 1 = 32 - 5 - 1 = 26$  и  $v_2 = n - k - 1 = 32 - 6 - 1 = 25$  с помощью встроенной функции  $F_{\text{РАСПОБР}}$  находим  $F_{\text{кр}}(0,05; 26; 25) = 1,947$ . Так как расчетное  $F < F_{\text{кр}}$ , предпочтение следует отдать модели с меньшей остаточной дисперсией.

Запись математической модели в реальных физических величинах:

$$X_1 = \frac{V - 75}{15}; X_2 = \frac{\alpha - 60}{30}; X_3 = \frac{d - 0.85}{0.55}; X_5 = \frac{vc - 40.5}{39.5}. \quad (3.11)$$

$$\Delta\sigma = 672.816 + 2.4946V + 0.332\alpha + 71d - 0.901V_c, \text{ МПа}. \quad (3.12)$$

Проверим, например, результаты регрессии модели (3.9) по 1-й и 32-й строкам предсказанных значений (рис. 3.17). После подстановок натуральных значений факторов с учетом (3.11) в уравнение (3.12) и преобразований получим:

$$\Delta\sigma_1 = 672.816 + 2.4946 \cdot 60 + 0.332 \cdot 30 + 71 \cdot 0,3 - 0.901 \cdot 1 = 852,85.$$

$$\Delta\sigma_{32} = 672.816 + 2.4946 \cdot 90 + 0.332 \cdot 90 + 71 \cdot 1,4 - 0.901 \cdot 80 = 954,53.$$

Указанные значения близки результатам моделирования (ячейки H18 и H41 на рис. 3.17).

Регрессионная модель показала, что доминирующее влияние на формирование остаточных напряжений при пневмодробеструйной обработке титановых сплавов оказывают три переменных, у которых наибольшие коэффициенты регрессии: скорость дроби, диаметр дроби и скорость движения сопла.

Анализ полученных регрессионных моделей показал, что доминирующее влияние на формирование максимальных остаточных напряжений при ПДУ титановых сплавов оказывают скорость дроби, диаметр дроби и скорость движения сопла.

Таблица 3.9

**Регрессионные модели параметров напряженно-деформационного состояния поверхностного слоя**

Параметр	Модель
Остаточные напряжения $\sigma$ , МПа	$\Delta\sigma = 672,816 + 2,4946V + 0,332\alpha + 71d - 0,901V_c$
Глубина залегания остаточных напряжений $h_\sigma$ , мм	$\Delta H_{\sigma\max} = 0,004673V + 0,00358\alpha + 0,3101d - 0,0008126V_c - 0,4489$
Пластические деформации $\varepsilon_{пл}$ , мм	$\Delta\varepsilon = 0,0013V - 0,00017\alpha + 0,0841d - 0,000173V_c - 0,07988$
Глубина залегания пластических деформаций $h_{\varepsilon_{пл}}$ , мм	$\Delta H_{\varepsilon\max} = 0,00372V + 0,00428\alpha + 0,437d - 0,0011V_c - 0,4557$
Упругая деформация $\varepsilon_y$ , мм	$\Delta i = 0,009175 + 7,17e^{-5}V + 2,58e^{-5}\alpha + 2,18e^{-4}d - 2,28e^{-5}V_c$
Глубина залегания упругих деформаций $h_{\varepsilon_y}$ , мм	$\Delta i_{\max} = 0,00265V + 0,00272\alpha + 0,23295d - 0,000657V_c - 0,2108$
Примечание: размерности – $V$ , м/с; $\alpha$ , град; $d$ , мм; $V_c$ , мм/с	

На основе анализа регрессионных моделей и результатов имитационного моделирования получены параметры ПДУ, обеспечивающие остаточные напряжения  $\sigma$ , глубину залегания остаточных напряжений  $h_\sigma$ , остаточные деформации  $\varepsilon_{пл}$ , глубину залегания остаточных деформаций  $h_{\varepsilon_{пл}}$ , упругую

деформацию  $\varepsilon_y$ , глубину залегания упругих деформаций  $h_{\varepsilon_y}$ , соответствующие техническим условиям на изготовление детали при повышении производительности процесса ПДУ (табл. 3.9).

После подстановки режимов ПДУ находим параметры напряженно-деформированного состояния при обработке титанового сплава BT22.

В табл. 3.10 приведены результаты расчета параметров в производственных условиях с режимами:  $V = 60$  м/с,  $\alpha = 60 - 90^\circ$ ,  $d = 0,3$  мм,  $L = 180$  мм в зависимости от скорости движения сопла.

Таблица 3.10

**Результаты расчета скорость движения сопла при ПДУ титанового сплава BT22 со скоростью дробы  $V = 60$  м/с**

Параметр напряженно-деформированного состояния	Скорость движения сопла $V_c$ , мм/с				
	0,2	0,4	<b>0,6</b>	0,8	1,0
Остаточные напряжения $\sigma$ , МПа	834,4	810,2	<b>790,5</b>	775,6	761,9
Глубина залегания остаточных напряжений $h_\sigma$ , мм	0,12	0,11	<b>0,10</b>	0,09	0,08
Пластические деформации $\varepsilon_{пл}$ , мм	0,027	0,025	<b>0,022</b>	0,018	0,016
Глубина залегания пластических деформаций $h_{\varepsilon_{пл}}$ , мм	0,043	0,040	<b>0,038</b>	0,035	0,032
Упругая деформация $\varepsilon_y$ , мм	0,0095	0,0092	<b>0,0090</b>	0,0089	0,0085
Глубина залегания упругих деформаций $h_{\varepsilon_y}$ , мм	0,125	0,121	<b>0,120</b>	0,118	0,116

В табл. 3.11 приведены результаты расчета по предлагаемым режимам:  $V = 90$  м/с,  $\alpha = 60 - 90^\circ$ ,  $d = 0,3$  мм,  $L = 180$  мм в зависимости от скорости движения сопла.

**Результаты расчета скорости движения сопла при ПДУ титанового сплава BT22 со скоростью дробы  $V = 90$  м/с**

Параметр напряженно-деформированного состояния	Скорость движения сопла $V_c$ , мм/с				
	0,2	0,4	0,6	<b>0,8</b>	1,0
Остаточные напряжения $\sigma$ , МПа	856,4	832,2	806,5	<b>795,6</b>	781,9
Глубина залегания остаточных напряжений $h_\sigma$ , мм	0,14	0,13	0,12	<b>0,10</b>	0,09
Пластические деформации $\varepsilon_{пл}$ , мм	0,030	0,028	0,024	<b>0,021</b>	0,020
Глубина залегания пластических деформаций $h_{\varepsilon_{пл}}$ , мм	0,047	0,043	0,041	<b>0,04</b>	0,037
Упругая деформация $\varepsilon_y$ , мм	0,0097	0,0095	0,0093	<b>0,009</b>	0,0087
Глубина залегания упругих деформаций $h_{\varepsilon_y}$ , мм	0,127	0,125	0,123	<b>0,121</b>	0,120

Анализ полученных результатов показал, что повышение скорости движения сопла повышает параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя после ПДУ. Увеличение скорости движения сопла в 5 раз повышает остаточные напряжения на 7 – 9 %. По техническим требованиям на изготовление заготовок из титанового сплава BT22 величина остаточных напряжений не может быть больше 800 МПа, глубиной 100 – 110 мкм. Таким требованиям удовлетворяет скорость сопла 0,8 мм/с.

Исследования показали, что увеличение скорости движения сопла повышает параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя, которые несколько меньше, чем при обработке со скоростью дробы  $V = 90$  м/с,

поэтому требуемый уровень остаточных напряжений достигается при скорости движения сопла 0,6 мм/с.

### 3.3. Выводы по главе 3

1. Разработанные имитационные модели позволили установить следующее:

- при повышении скорости дроби с 60 до 90 м/с и уменьшении угла потока с 90 до 60° снижается площадь застойной зоны. Результаты расчета показывают, что площадь контакта при  $V = 60$  м/с составляет 36 мм<sup>2</sup>, а при  $V = 90$  м/с – 44 мм<sup>2</sup>, т. е. увеличивается в 1,2 раза, что благоприятно влияет на производительность процесса ПДУ;

- повышение скорости дроби диаметром 0,3 мм с 60 до 90 м/с увеличивает деформацию в 3,5 – 4,0 раза, а остаточные напряжения 7 – 9 %. Установлено количество ударов до образования предельного уровня пластических деформаций: при скорости 60 м/с – 10 – 15 ударов дроби (заводской режим), с увеличением скорости дроби до 90 м/с (предлагаемый режим) – число ударов снизилось до 8 – 10;

- скорость движения сопла при  $V = 60$  м/с составляет  $V_c = 0,6$  мм/с, при  $V = 90$  м/с скорость движения сопла  $V_c = 0,8$  мм/с, т. е. увеличилась в 1,3 раза. Это привело к тому, что требуемый уровень пластической деформации (напряжений) достигается быстрее и на большей площади.

2. Имитационное моделирование позволило определить влияние параметров процесса ПДУ на величину остаточных напряжений, упругих и остаточных (пластических) деформаций, а также глубину их залегания, которые позволили получить регрессионные модели параметров напряженно-деформационного состояния поверхностного слоя обрабатываемой заготовки. Установлено, что наибольшее влияние на величину остаточных напряжений оказывают скорость и диаметр дроби, а также скорость движения сопла, которые позволили спрогнозировать основные направления совершенствования технологии обработки, обеспечивающие требуемые характеристики качества поверхностного слоя.

3. На основе анализа регрессионных моделей и результатов имитационного моделирования получены параметры ПДУ, обеспечивающие остаточные напряжения  $\sigma$ , глубину залегания остаточных напряжений  $h_\sigma$ , пластические деформации  $\varepsilon_{пл}$ , глубину залегания пластических деформаций  $h_{\varepsilon_{пл}}$ , упругую деформацию  $\varepsilon_y$ , глубину залегания упругих деформаций  $h_{\varepsilon_y}$ , соответствующие следующим режимам ПДУ:  $V = 60$  м/с,  $\alpha = 60 - 90^\circ$ ,  $d = 0,3$  мм,  $L = 180$  мм при  $V_c = 0,6$  мм/с и  $V = 90$  м/с,  $\alpha = 60 - 90^\circ$ ,  $d = 0,3$  мм,  $L = 180$  мм при  $V_c = 0,8$  мм/с. Рассчитанные режимы ПДУ позволили обеспечить требуемые технические условия на изготовление детали.

## ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ ПНЕВМОДРОБЕСТРУЙНОГО УПРОЧНЕНИЯ

### 4.1. Исследование деформации образцов после ПДУ

Экспериментальные исследования процесса пневмодробеструйного упрочнения проводились на установке типа АKN-О-330-30 А5-Н.

Управление установкой осуществляется при помощи микроконтроллера, который включает и выключает исполнительные устройства, а также учитывает нештатные ситуации. Электронная система не позволяет проникать в зону обработки во время выполнения процесса, контролирует работу пневматических и электрических узлов, учитывает рабочее время оборудования и период его обслуживания.

В производственных условиях контроль качества поверхности деталей из титановых сплавов (деформации, остаточных напряжений, микротвердости и шероховатости) после ПДУ проводился с помощью образцов-свидетелей, которые обрабатывались совместно с поверхностью деталей. Деформация определялась на образцах-свидетелях по стреле прогиба, измеряемой индикаторным прибором [23]. Фактически при исследовании замерялись остаточные деформации, которые являлись интегрированной оценкой остаточных напряжений.

Данная методика контроля величины деформации поверхности крупногабаритных деталей из титановых сплавов достаточно успешно применяется на промышленных предприятиях.

Геометрические размеры стандартных образцов-свидетелей, изготовленных из титанового сплава BT22 в отожженном состоянии имели следующие геометрические параметры: толщина пластины типа N –  $a_3 = 0,78 \pm 0,025$  мм, типа A –  $a_3 = 1,29 \pm 0,025$  мм и типа C –  $a_3 = 2,38 \pm 0,025$  мм, отклонение от плоскостности  $\pm 0,015$  мм, длина пластины  $76,0 \pm 0,25$  мм, ширина пластины  $19 \pm 0,15$  мм. В процессе исследования применялись образцы типа C для исследования остаточной деформации, пластины типа C применялись также для измерения

остаточных напряжений, микротвердости и шероховатости поверхности.

Образец-свидетель закрепляется в камере установки в специальном приспособлении и подвергается обработке с режимами, как и рабочая деталь.

Таким образом, на образце-свидетеле поверхностный слой имел те же качественные параметры, как и обрабатываемая деталь. После удаления из эталонной подставки образец-свидетель приобретал геометрические формы, которые соответствуют напряженно-деформированному состоянию поверхностного слоя детали. Величину прогиба образца-свидетеля измеряли механическим датчиком Альмена TSP-3 с точностью цифрового индикатора 0,005 мм (в диапазоне 0 – 0,6 мм) (рис. 4.1), который показывает результаты изменения прогиба пластины.



Рис. 4.1. Современные приборы TSP-3 для измерения деформации образца-свидетеля согласно стандарту SAE J442

Экспериментальные исследования влияния режимов ПДУ на формирование остаточных деформаций в поверхностном слое проводили при следующих параметрах процесса ПДУ: скорость дроби  $V = 60$  и  $90$  м/с, угол наклона сопла  $\alpha$  изменяли от  $60$  до  $90^\circ$ , диаметр дроби  $d = 0,3 - 0,7$  мм, расстояние до поверхности заготовки  $L = 180$  мм, скорость движения сопла  $V_c = 0,6 - 0,8$  мм/с. После обработки образца-свидетеля и снятия сил закрепления образец изменяет свою геометрическую форму. В процессе исследования деформации образцов на каждом варьированном режиме ПДУ применялось четыре образца-свидетеля и определялись средние значения величины прогиба, что соответствовало техническим условиям изготовления деталей.



На рис. 4.2 и 4.3 приведены результаты исследования остаточной деформации образцов в зависимости от диаметра и скорости дроби.

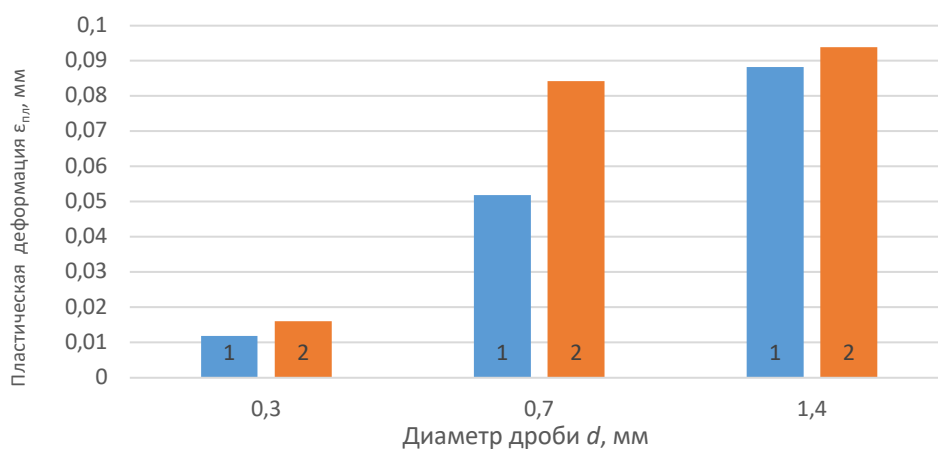


Рис. 4.2. Влияние размера дроби на пластическую деформацию образцов-свидетелей типа С при  $V = 60$  м/с: 1 –  $\alpha = 60^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 90^\circ$

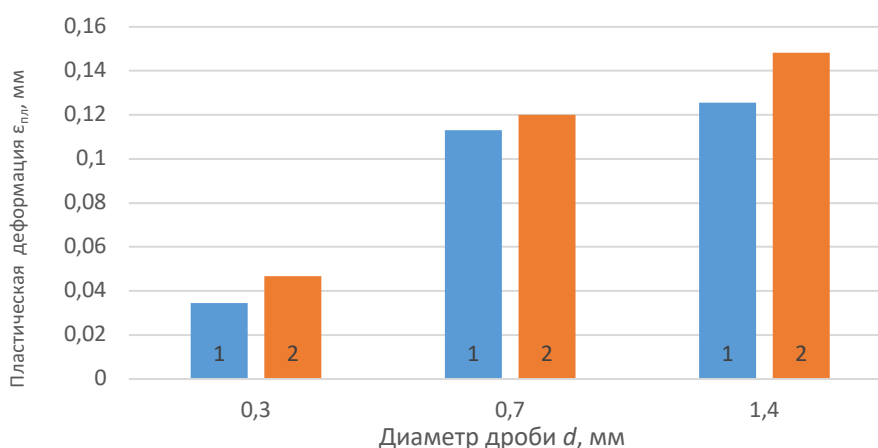


Рис. 4.3. Влияние размера дроби на пластическую деформацию образцов-свидетелей типа С при  $V = 90$  м/с: 1 –  $\alpha = 60^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 90^\circ$

Установлено, что увеличение диаметра дроби с 0,3 до 1,4 мм при скорости дроби 60 м/с повышает остаточную деформацию образцов в 8 раз, при этом изменение угла наклона сопла с 60 до 90° повышает деформацию образца на 27 – 40 %. Повышение скорости дроби с 60 до 90 м/с увеличивает остаточную деформацию образцов-свидетелей на 60 – 80 %.

Полученные результаты сравнивались с допустимой деформацией образцов свидетелей при ПДУ титанового сплава ВТ22. Установлено, что в пределах

исследуемых режимов обработки остаточная деформация образцов-свидетелей не превышает допустимую границу 100 мкм при скорости дроби 60 – 90 м/с и диаметрах дроби 0,3 мм. Применение дроби диаметром 0,7 – 1,4 мм превосходит границу остаточных деформаций при обработке дробью со скоростью 90 м/с. Уменьшение скорости дроби до 60 м/с снижает уровень деформации до требуемых значений, следовательно, дробь диаметром 0,7 – 1,4 мм рекомендуется применять при скоростях не выше 60 м/с.

На рис. 4.4 и 4.5 показано сравнение результатов моделирования и эксперимента по определению остаточных напряжений и пластических деформаций при различных скоростях движения сопла и скорости дроби.

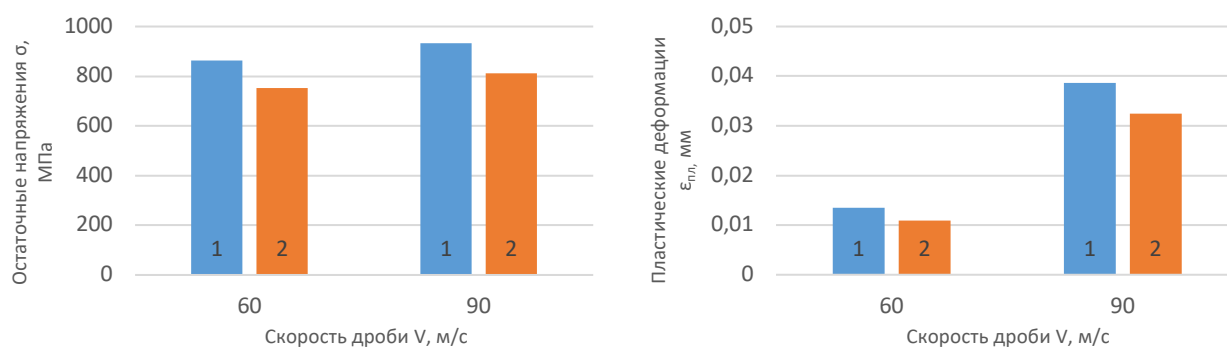


Рис. 4.4. Влияние скорости дроби  $V$  на величину остаточных напряжений  $\sigma$  и пластических деформаций  $\epsilon_{пл}$  при скорости движения сопла  $V_c = 0,015$  мм/с:

1 – моделирование; 2 – эксперимент

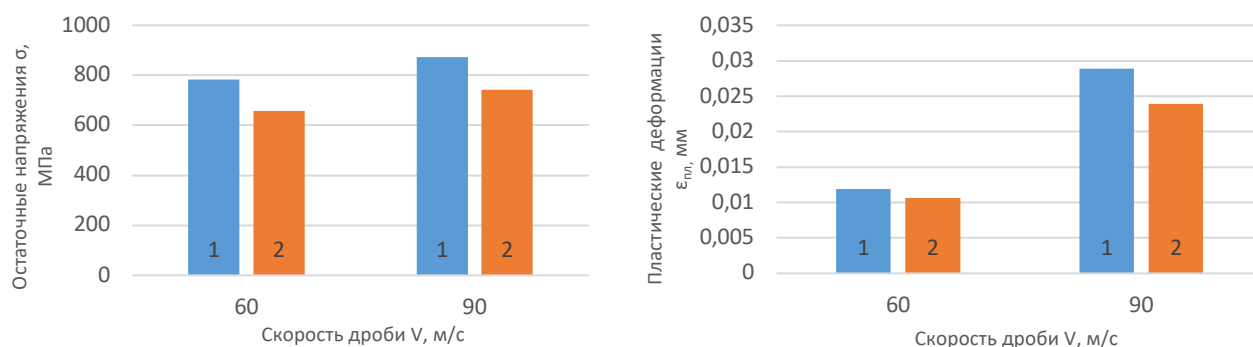


Рис. 4.5. Влияние скорости дроби  $V$  на величину остаточных напряжений  $\sigma$  и пластических деформаций  $\epsilon_{пл}$  при скорости движения сопла  $V_c = 1,3$  мм/с:

1 – моделирование; 2 – эксперимент

Установлено, что при постоянной скорости дробы повышение скорости движения сопла с  $V_c = 0,015$  до  $1,3$  мм/с величина остаточных напряжений снижается на  $7 - 10$  %, а величина пластических деформаций – на  $24 - 27$  %. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами имитационного моделирования. Различие между расчетными и экспериментальными значениями не превышает  $16$  % для остаточных напряжений и  $20$  % для пластических деформаций.

#### 4.2. Экспериментальное определение остаточных напряжений

Исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя проводилось при травлении плоских образцов-свидетелей типа С (толщина пластины  $2,4$  мм) из титанового сплава ВТ22, имеющих длину  $50$  мм, ширину –  $18,0$  мм. Для определения остаточных напряжений на образцах-свидетелях использовался метод полосок, разработанный профессором Н. Н. Давиденковым. Определение остаточных напряжений осуществлялось на автоматизированной установке АСБ-1, разработанной профессором С. А. Букатым, по его авторской методике. Процесс измерения и схема установки показана на рис. 4.6.

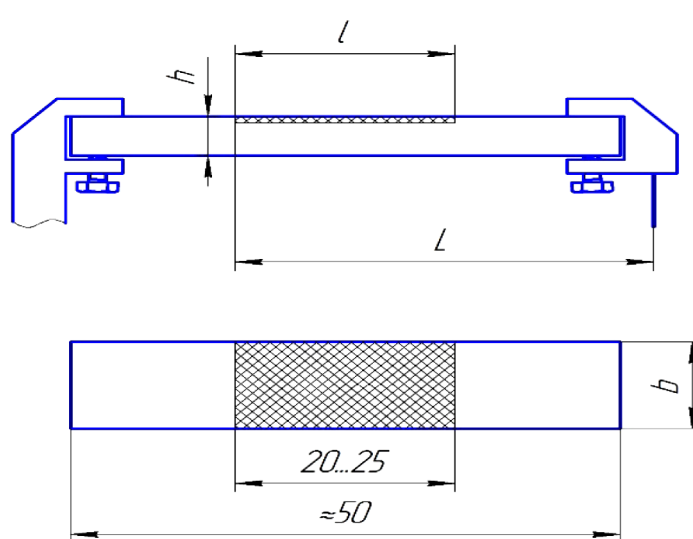


Рис. 4.6. Чертеж образца и схема установки:

$a_3$  – толщина образца-свидетеля;  $l$  – длина зоны травления;  $L$  – расстояние от начала зоны травления до опоры

Послойное снятие слоев осуществляют с помощью электролита, который включает в себя: HF 4,7%, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 21,4%, NH<sub>3</sub> 7,1%, H<sub>2</sub>O остальное.

Результаты экспериментальных исследований сравнивались с результатами расчета по имитационной модели 2 при скорости движения сопла 0 м/с, скоростью дроби  $V = 60$  м/с и углом наклона сопла  $\alpha = 60^\circ$ , и приведены на графиках (рис. 4.7). Исследованиями установлено, что разница показаний экспериментальных и расчетных значений не превышает 30 %. Это связано с тем, что в экспериментальных исследованиях скорость движения сопла была равна 0,6 мм/с, поэтому количество ударов дроби уменьшилось с 12 до 10. Проверка адекватности полученных результатов была выполнена путем сравнения величины распределения сжимающих остаточных напряжений, полученных расчетным и экспериментальным путем.

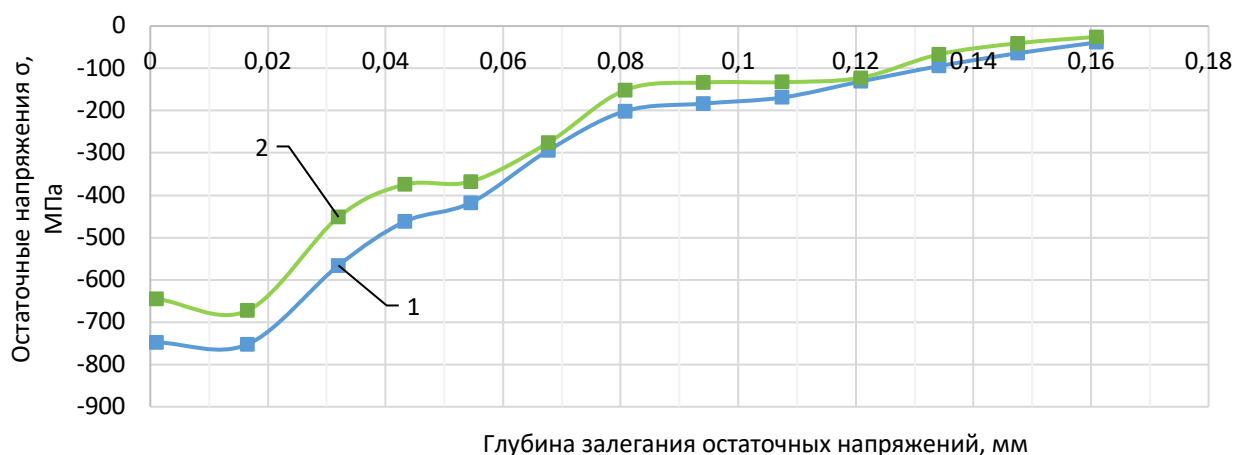


Рис. 4.7. Сравнение остаточных напряжений и глубины их залегания при теоретическом и экспериментальном замерах при скорости –  $V = 60$  м/с:  
1 – расчетные значения; 2 – экспериментальные значения

На рис. 4.8 показано распределение остаточных напряжений при ПДУ со скоростью дроби 90 м/с, углом наклона сопла  $\alpha = 60^\circ$ , скоростью движения сопла 0,8 мм/с, поэтому расчетное и экспериментальные значения отличаются на 40 – 50 %. Такое расхождение эпюры остаточных напряжений связано с тем, что при сравнении расчетные значения получены при скорости движения сопла, равной 0 м/с, т. е. количество ударов дроби уменьшилось с 12 до 8.

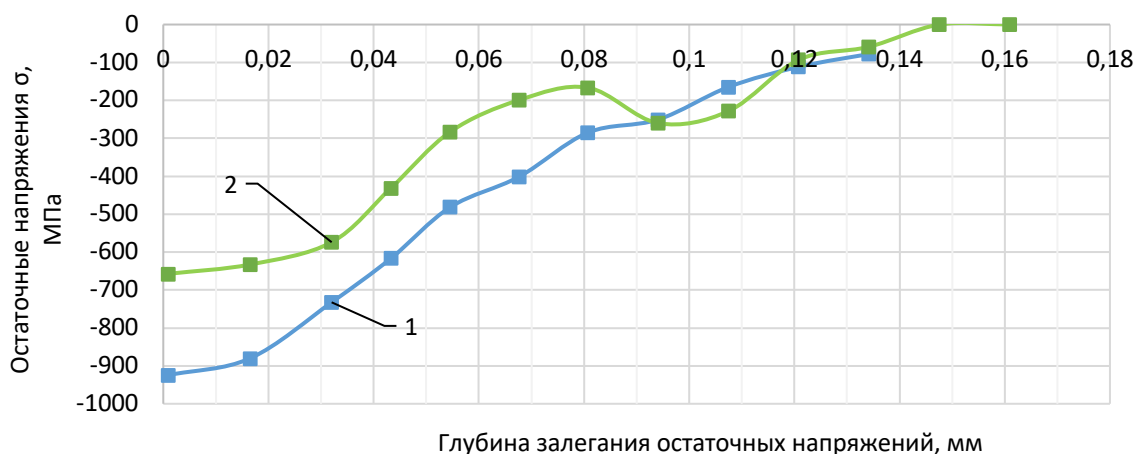


Рис. 4.8. Сравнение остаточных напряжений и глубины их залегания при теоретическом и экспериментальном замерах, при скорости –  $V = 90$  м/с:  
1 – расчетные значения, 2 – экспериментальные значения

Кроме этого, глубина залегания остаточных напряжений практически совпадает при разных скоростях дроби и составляет 120 – 140 мкм. Это связано с тем, что в модели выбором оптимального критерия являлось максимальное насыщение поверхности пластическими деформациями.

На рис. 4.9 и 4.10 показаны остаточные напряжения, полученные в результате взаимодействия потока дроби с поверхностью заготовки. Исследованиями установлено, что при повышении скорости дроби  $V$  с 60 до 90 м/с при диаметре дроби 0,3 мм остаточные напряжения увеличиваются с 750 – 780 до 800 – 810 МПа. Колебания остаточных напряжений связаны с изменением угла наклона сопла, однако они незначительны и не превышают 5 – 7 %.

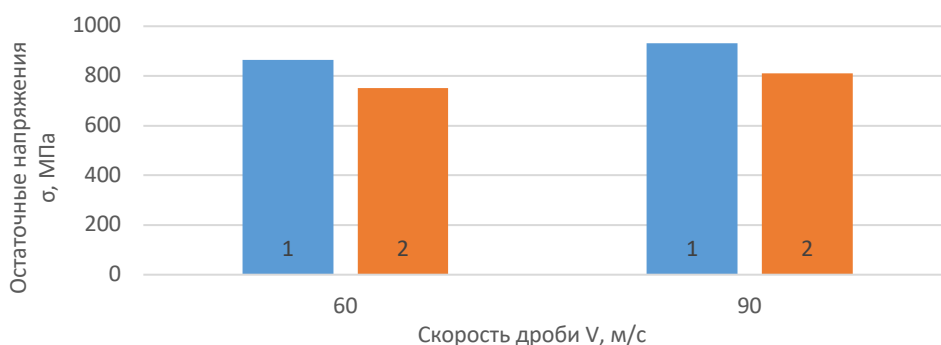


Рис. 4.9. Сравнение остаточных напряжений при расчетном и экспериментальном замерах при скорости движения сопла  $V_c = 0,6$  мм/с:  
1 – расчетные значения; 2 – экспериментальные значения

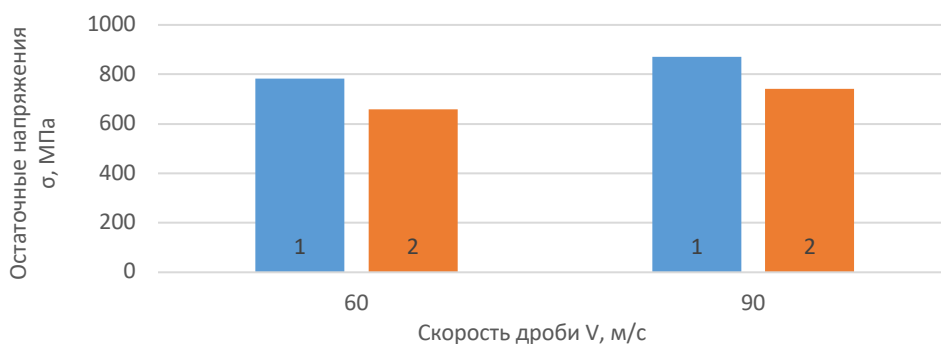


Рис. 4.10. Сравнение остаточных напряжений при расчетном и экспериментальном замерах при скорости движения сопла  $V_c = 0,8$  мм/с:  
1 – расчетные значения; 2 – экспериментальные значения

Анализ приведенных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. При постоянной скорости дроби и повышении скорости движения сопла величина остаточных напряжений изменяется на 7 – 10 %.
2. Разница между расчетными и экспериментальными значениями остаточных напряжений не превышает 16 %.

### 4.3. Исследование микротвердости

Процесс ПДУ приводит к пластической деформации поверхности и повышению микротвердости поверхности обрабатываемой детали.

В работах [25, 53, 60, 62, 70] для определения глубины упрочненного слоя и распределения микротвёрдости в поверхностном слое применяются образцы, представляющие собой часть образцов-свидетелей предназначенных для определения окружных остаточных напряжений.

Для определения микротвёрдости по глубине поверхностного слоя использовался метод косых срезов (шлифов) у образцов из титанового сплава ВТ22. Исследование микротвёрдости производился на приборе Виккерса при вдавливании четырёхгранной алмазной пирамиды с углом при вершине  $136^\circ$  под нагрузкой 5 Н по методике, изложенной в ГОСТ 9450-76.

По данным измерений строят график зависимости микротвердости по

глубине поверхности косого среза, из которого вычисляются параметры деформационного упрочнения:  $h_H$ ;  $U_H$ ;  $U_{сп}$ . При испытании измеряют диагональ отпечатка  $d$  и по соответствующим таблицам (для заданной нагрузки  $P$ ) получают микротвердость  $HV$  МПа.

Для определения глубины и степени наклепа наиболее распространен метод «косого среза» (рис. 4.11). Сущность его заключается в следующем.

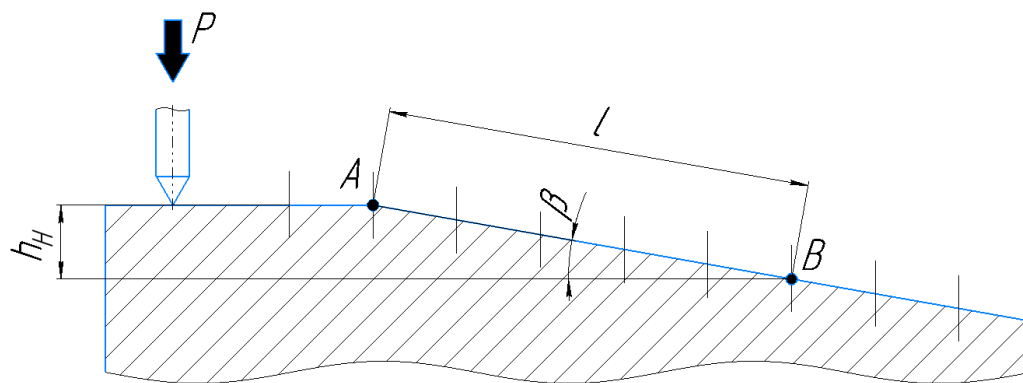


Рис. 4.11. «Косой срез» для определения глубины наклепанного слоя

На образце с помощью притирки пастой ГОИ изготавливают срез под небольшим углом  $\beta = 0^\circ 30' + 2^\circ$ .

С помощью прибора Виккерса определяют твердость по длине среза, находят расстояние от начала среза (точка А на рис. 4.13) до точки, после которой твердость перестает изменяться (точка В).

Глубину наклепанного слоя определяют по выражению

$$h_H = l \cdot \sin \beta, \quad (4.1)$$

где  $\beta$  – угол среза;  $l$  – длина среза от начала до точки, где твердость перестает изменяться.

Степень пластической деформации определяют по выражению

$$I_H = \frac{H_H - H_0}{H_0} \cdot 100 \%, \quad (4.2)$$

где  $H_H$  – наибольшая твердость поверхностного слоя;  $H_0$  – твердость основного металла.

Показателями ППД являются степень наклепа (повышение твердости поверхности по сравнению с исходным состоянием) и толщина упрочненного

слоя. ППД наиболее эффективно для упрочнения конструктивных концентраторов напряжений – галтелей, проточек, шпоночных канавок, шлицев, острых кромок и фасок отверстий. ППД применяется самостоятельно и в сочетании с ХТО или с индукционным нагревом (после них). Так, известно, что после цементации должна проводиться шлифовка деталей для удаления поверхностного обезуглероженного слоя, что снижает уровень напряжений сжатия в слое.

Исследование влияния скорости дроби на распределение микротвёрдости в поверхностном слое осуществлялось на образцах-свидетелях. Результаты исследования влияния параметров процесса пневмодробеструйного упрочнения титанового сплава ВТ22 (скорости дроби) на микротвёрдость поверхностного слоя приведены на рис. 4.12. Как видно из рисунка, скорость дроби при ПДУ оказывает существенное влияние на деформационное состояние поверхностного слоя. Повышение скорости дроби с 60 до 90 м/с при упрочнении образцов из титанового сплава ВТ22 приводит как к повышению микротвёрдости поверхности, так и глубины деформационного упрочнения на 12 – 15,5 %.

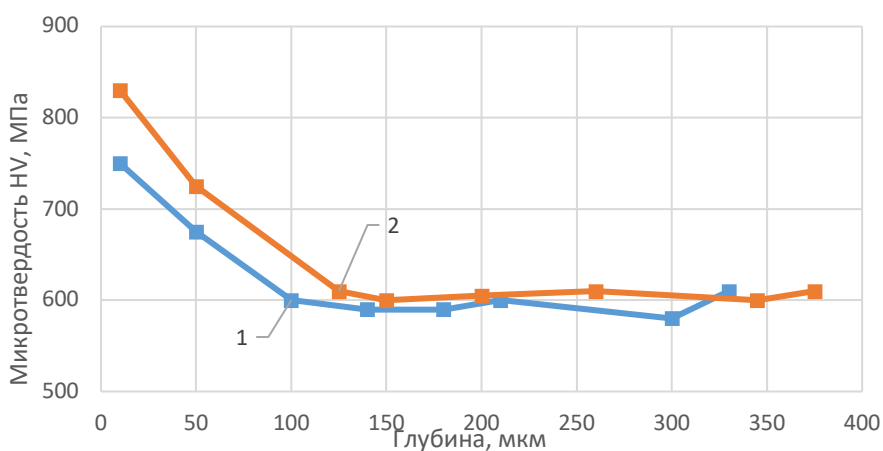


Рис. 4.12. Результат замера микротвёрдости по Виккерсу образцов из ВТ22:

1 –  $V = 60$  м/с; 2 –  $V = 90$  м/с

Как показали исследования, скорость дроби при ПДУ оказывает существенное влияние на деформационное состояние поверхностного слоя. Повышение скорости дробеструйной обработки с 60 до 90 м/с при обработке образцов из титанового сплава ВТ22 приводит к повышению микротвёрдости поверхности и глубины деформационного упрочнения на 12 – 15,5 %.



Исследованиями установлено, что степень деформации поверхности при  $V = 60$  м/с – 30 %, при  $V = 90$  м/с – 36 %, что соответствует техническим требованиям на изготовление данных деталей. Таким образом, что повышение скорости дроби при ПДУ с 60 до 90 м/с увеличивает степень пластической деформации с 30 % до 36 %. При этом микротвердость повысилась на 4 %, а глубина упрочненного слоя на 5 %.

#### **4.4. Выводы по главе 4**

1. Экспериментальные исследования влияния процесса ПДУ на величину остаточных напряжений, глубину их залегания и пластических деформаций показали, что увеличение скорости дроби при ПДУ с 60 м/с при работе двумя соплами до 90 м/с при работе одним соплом повышает остаточные напряжения на 8 %, глубину залегания остаточных напряжений на 40 – 60 %, величину пластических деформаций на 3,5 – 4,0 раза. Проведенные исследования подтвердили результаты имитационного моделирования процесса ПДУ. Разница между теоретическими и экспериментальными значениями остаточных напряжений не превышает 16 %.

2. Установлено, что повышение скорости дроби при ПДУ с 60 м/с при работе двумя соплами до 90 м/с при работе одним соплом увеличивает степень пластической деформации с 30 до 36 %. При этом микротвердость поверхности и глубина упрочненного слоя практически не изменились.

## ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Многочисленными исследованиями установлено существенное, а в некоторых случаях и определяющее воздействие шероховатости рабочих поверхностей деталей взлетно-посадочных устройств на их надёжность и долговечность при эксплуатации [36].

На рис 5.1 показан процесс формирования микронеровностей при ПДУ.

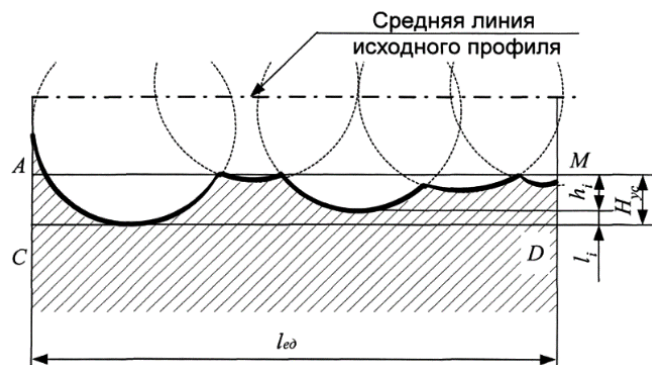


Рис. 5.1. Схема образования профиля шероховатости поверхности при ПДУ

Для определения шероховатости после упрочнения воспользуемся тем фактом, что при упрочнении дробью имеет место сплошное покрытие поверхности отпечатками, т. е. установившиеся параметры шероховатости поверхности: средний шаг  $S_{omn}$ , радиус впадин  $R_{omn}$ , глубина микронеровностей  $H_{omn}$  (рис. 5.2).

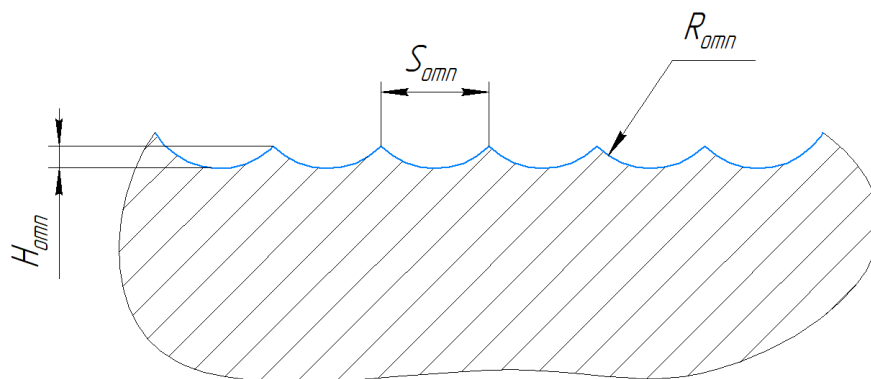


Рис. 5.2. Профиль поверхности детали после обработки

Характер микрогеометрии, в основном, определяется скоростью дроби, давлением воздуха и временем обработки [36]. Так, при обработке поверхности дробью  $d = 0,3$  мм при  $V = 60$  м/с (давлении 0,2 МПа) образуются мелкие отпечатки,

не связанные между собой (рис. 5.3). При  $V = 70 - 80$  м/с (давлении до 0,3 – 0,4 МПа) микрогеометрия поверхности приобретает равномерную структуру в продольном и поперечном направлениях. При  $V = 90$  м/с (давлении 0,5 МПа) поверхность имеет более четкий равновысотный профиль во всех направлениях.

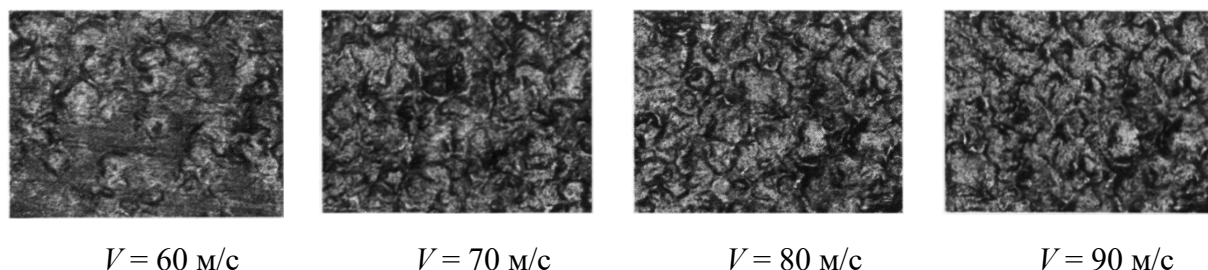


Рис. 5.3. Внешний вид поверхности образцов из материала BT22 после обработки при угле наклона сопла  $60^\circ$ , расстояние 150 мм (X100)

### 5.1. Анализ шероховатости поверхности

Анализ шероховатости поверхности занимает важное место в оценке качества поверхности деталей машин. Основой в оценке шероховатости лежит компьютерная обработка изображений различной природы. В связи с этим методы описания шероховатости и их различия, как правило, разрабатываются эвристически отдельно для каждого конкретного случая.

В 2015 году был утвержден стандарт ГОСТ Р ИСО 4287-2014 «Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности».

В стандарте описываются геометрические характеристики поверхности, которые включают высотные и шаговые параметры структуры поверхности на разных масштабных уровнях, получаемые путем применения различных фильтров. Отдельно термин «шероховатость» в данном стандарте не применяется, стандартом определяются критерии разграничения между параметрами за счет применения фильтров с различной частотой пропускания и корреляционных преобразований. В связи с действием в РФ стандартов системы ГОСТ Р ИСО и ГОСТ в качестве совокупности параметров, характеризующих микрорельеф

поверхности, применен термин «структура поверхности» вместо шероховатости профиля поверхности. Однако данный стандарт редко применяется на производстве и для оценки микрогеометрии поверхности деталей используется профильный метод, который позволяет определять параметры шероховатости простых поверхностей: плоских, цилиндрических и конических. На деталях сложной формы и крупногабаритных данный метод не используется, а применяется органолептический метод или метод сравнения. В диссертации мы предлагаем исследовать микрогеометрию поверхности поверхностей сложной формы с помощью обработки цифровых изображений поверхности.

Для описания изображения и её количественной оценки достаточно часто применяется метод, основанные на измерении пространственной частоты. Для теоретического и практического обоснования предлагаемого метода устранения дополнительной погрешности используемый оптико-электронный комплекс в работе был представлен в виде структуры информационно-измерительной системы (ИИС), которая показана на рис. 5.4.

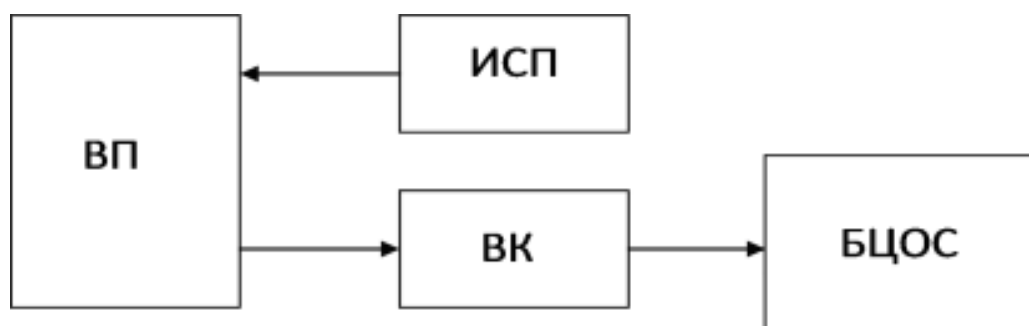


Рис. 5.4. Структура ИИС оценки параметров микрорельефа

Данная структура состоит из выделенной площади ВП исследуемой части поверхности, источника опорного светового потока ИСП, видеокамеры ВК и блока цифровой обработки сигналов БЦОС. Система, состоящая из ИСП и ВК, может рассматриваться как оптико-электронный измерительный преобразователь (ИП). Совокупность ИСП и ВП образует канал первичного рельефно-оптического преобразования. Входная величина, воздействующая на вход оптико-электронного ИП, формируется из элементарных площадок с различным микрорельефом.

Выходом ИСП является величина опорного светового потока  $\Phi_0$ . Анализ полученных экспериментальных данных показал, что функция влияния на интервале рабочих значений  $\Phi_0$  имеет линейную зависимость в пределах угла падения потока от  $\alpha_{min} = 10^\circ$  до  $\alpha_{max} = 85^\circ$ .

Разработан метод обработки изображения анализируемой поверхности для получения автокорреляционной функции, представленный на рис. 5.5. В исходном полутоновом кадре формата  $K_1 \times K_2$  пикселей, начиная с первой строки, выделяется полоса шириной в  $N_2$  пикселей. По центру этой полосы задаётся эталон размером  $N_1 \times N_2$  пикселей. Затем эталон, начиная с крайней левой позиции, перемещается по выделенной полосе с шагом в один пиксель.

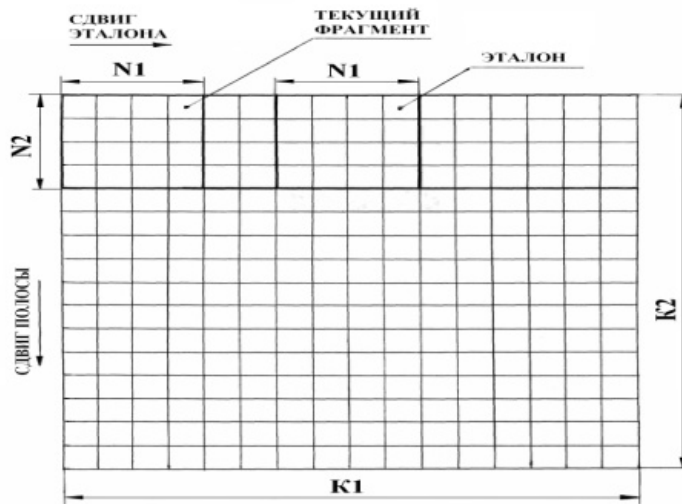


Рис. 5.5. Схема перемещения эталона

При каждом совмещении эталона  $u(n_1, n_2)$  и текущего фрагмента полутонового изображения  $x(n_1, n_2)$  подсчитывается коэффициент корреляции по известной формуле [50]:

$$r_{xy}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) \cdot (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}, \quad (5.1)$$

где  $(n_1, n_2)$  — индексы элементов эталонного окна;  $k_1, k_2$  — координаты эталона внутри зоны поиска  $K_1 \times K_2$ ,  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — средние квадратические отклонения величин  $u(n_1, n_2)$  и  $x(n_1, n_2)$  от их математических ожиданий  $m_u$  и  $m_x$  соответственно. Закончив вычисление коэффициентов корреляции в первой

полосе, задаётся следующая полоса того же формата, что и предыдущая, но смещённая вниз на один пиксель. В этой полосе по центру задаётся новый эталон с теми же размерами, что и предыдущий, и выполняются те же самые действия, и. т. д. После обработки всего изображения в запоминающем устройстве будет сформирована матрица  $M_1 \times M_2$  коэффициентов корреляции или двумерная автокорреляционная функция. Анализируя выражение (5.1), можно отметить, что его числитель и знаменатель представляют собой суммы произведений сигналов  $x(n_1, n_2)$  и  $u(n_1, n_2)$  – функции влияния. Следовательно, эту формулу можно преобразовать к следующему виду:

$$r_{xu}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) \cdot (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x) \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)}{\sigma_1 \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) \cdot \sigma_2 \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)}. \quad (5.2)$$

Как видно из приведённого выражения, микрорельефу поверхности соответствует выражение (5.1) и функции влияния сокращаются. Следовательно, функцию (5.2) можно рассматривать как частный случай отношения (5.1), который устраняет дополнительную погрешность, возникающую при оценке параметров микрорельефа непосредственно по видеосигналу.

## **5.2. Исследование шероховатости поверхности опико-электронным методом**

Для исследования шероховатости крупногабаритных деталей из титановых сплавов был разработан переносной опико-электронный комплекс для бесконтактного контроля шероховатости поверхности в режиме 2D, представленный на рис. 5.6.

Комплекс обеспечен ноутбуком (персональным компьютером), для которого в процессе исследования разрабатывались специальные алгоритмы и программы. В качестве видеокамеры использовалась камера DIGITAL CAMERA Computar ZC-F11CH3, на выходе которой формировались чёрно-белые изображения заданного формата.

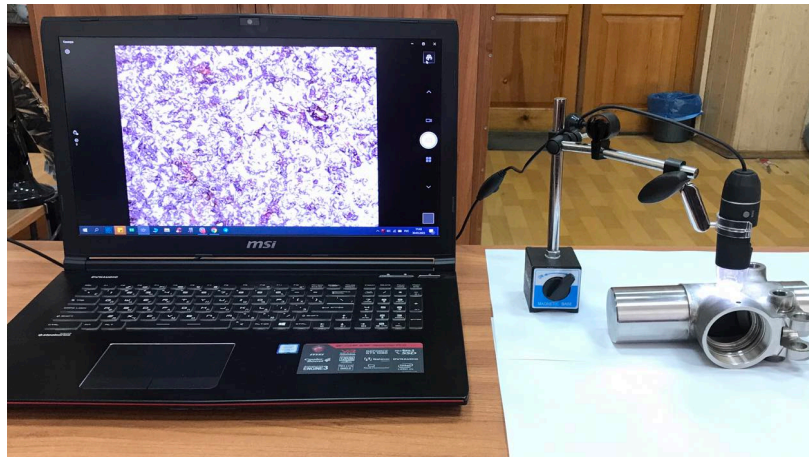


Рис. 5.6. Оптико-электронный комплекс для измерения параметров шероховатости сложных поверхностей деталей

Мощность светового потока, падающего на исследуемую поверхность, в проведённых исследованиях изменялась варьированием напряжения питания лампы накаливания мощностью  $P = 60$  Вт и  $U = 36$  В. Питание подавалось от стабилизированного источника постоянного напряжения. Измерение освещённости исследуемой поверхности производилось люксметром марки 1016М, который располагался перпендикулярно падающему световому потоку. При этом площадь светового пятна на поверхности люксметра составляла  $S = 0,00126$  м<sup>2</sup>. Мощность светового потока  $\Phi$  (в люменах) определялась с помощью известного соотношения  $\Phi = E \cdot S$ , где  $E$  – освещённость, измеряемая в люксах.

Исследования шероховатости поверхности деталей из титанового сплава ВТ22 производились после ПДУ на станках с ЧПУ. Для каждой детали было получено 30 цифровых изображений с различных участков исследуемой поверхности. Деталь может не сниматься со станка или находиться рядом на столике, переносная видеокамера устанавливается на магнитной опоре над измеряемой поверхностью. Видеокамера передает цифровой сигнал в программный комплекс, который обрабатывает полученный сигнал, определяя основные параметры корреляционной поверхности, средний шаг автокорреляционной функции  $T_{cp}$  и их ошибки. Для идентификации результатов измерения шероховатости поверхности оптическим комплексом с профильным

методом изготавливались образцы-свидетели, которые прошли ПДУ на станке с ЧПУ с различными режимами обработки. Затем на образцах-свидетелях определялись стандартные параметры шероховатости профиля поверхности на профилографе модели SJ-201P. Найденные значения среднеарифметического отклонения профиля представляют собой средние значения, вычисленные по 10 измерениям для каждого образца в различных направлениях.

При использовании оптического метода анализируемая поверхность имела размер  $3 \times 2$  мм, что соответствовало  $K_1 \times K_2$  пк, выбирался эталон  $N_1 \times N_2$ , который сканировал по поверхности изображения слева-направо, сверху-вниз и определял параметры автокорреляционной функции профиля изображения. Количество профилей цифрового изображения  $n_k$  определяется по формуле

$$n_k = A \frac{K_1}{N_1} + B \frac{K_2}{N_2}, \quad (5.3)$$

где  $A$  и  $B$  – масштабные коэффициенты.

Например, при размере изображения  $K_1 = 600$  пк,  $K_2 = 400$  пк и размере эталона  $N_1 = A = 10$  пк,  $N_2 = B = 10$  пк количество профилей  $n_k = 1000$ . Таким образом, оптический метод дает возможность более точно определить параметры коррелограммы поверхности и сравнить их с параметрами шероховатости профиля поверхности.

На рис. 5.7 показана методика обработки цифровых изображений поверхности после пневмодробеструйного упрочнения. При этом световой поток мощностью  $600 \cdot 10^{-3}$  лм падал на исследуемую поверхность под углом  $45^\circ$ .

Методика построения коррелограммы поверхности выполняется в следующей последовательности:

1. Применяя разработанную оптическую систему (см. рис. 5.7), на реальной поверхности фотографируем анализируемый участок (рис. 5.8, а).
2. Затем преобразуем реальную поверхность в бинарное изображение, для чего находим средний уровень яркости изображения, больше которого участок поверхности становился чисто белым и менее черным (рис. 5.8, б).
3. Выбираем размер эталона  $N_1 \times N_2$ , который сканирует по поверхности через



пиксель. Определяя параметры автокорреляционной функции, получаем реальную корреляционную поверхность (рис. 5.8, в).

4. Затем преобразуем реальную корреляционную поверхность в бинарное изображение, для чего находим средний уровень яркости корреляционного изображения, больше которого участок поверхности становился чисто белым и менее черным (рис. 5.8, г).

5. В программном модуле производится статистический анализ полученных результатов, определяются частотные параметры поверхности и строится коррелограмма поверхности.

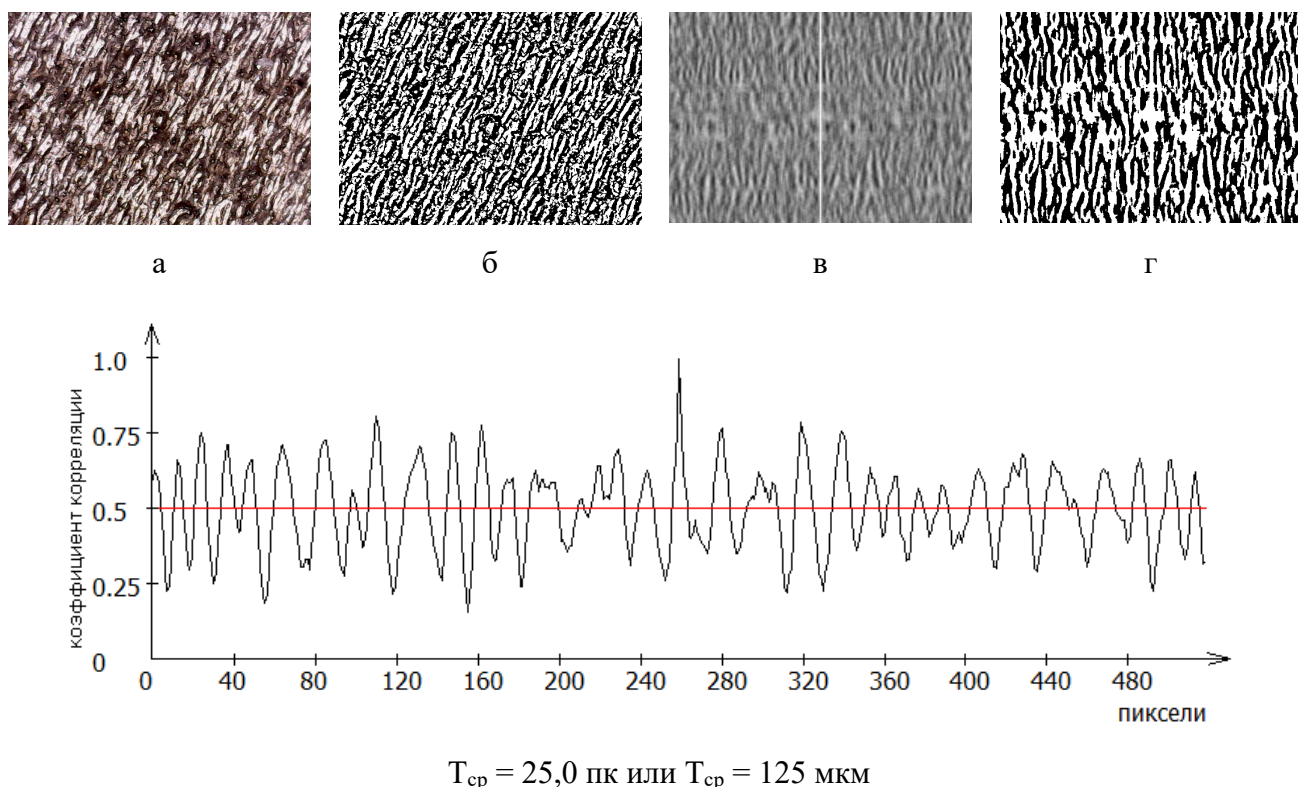


Рис. 5.7. Частотные параметры поверхности образца-свидетеля, обработанного дробью диаметром 0,3 мм с режимами:  $V = 90$  м/с,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $L = 150$  мм,  $V_c = 0,8$  мм/с

Программа построена таким образом, чтобы можно было построить корреляционный профиль, который чем-то напоминает профилограмму профиля поверхности шероховатости, но имеет другой физический смысл. В работе предложена идентификация коррелограммы и профиля поверхности по высотным и шаговым параметрам.

### 5.3. Исследование влияния режимов ПДУ на шероховатость поверхности

Проведены исследования микрогеометрии поверхности после ПДУ (по ГОСТ Р ИСО 4287-2014). Для идентификации параметров шероховатости и коррелограммы поверхности исследовалась микрогеометрия на образцах-свидетелях. Параметры профиля поверхности образцов-свидетелей измерялись на автоматизированном профилографе-профилометре «Абрис ПМ7». Исследования показали, что величина шероховатости зависит от скорости и диаметра дроби, расстояния до поверхности, скорости движения и угла наклона сопла. В производственных условиях при обработке деталей на станках с ЧПУ диаметр шарика 0,3 мм, угол наклона сопла  $\alpha = 60 - 90^\circ$ ,  $L = 180$  мм,  $V_c = 0,7$  мм/с оставались неизменными. На производстве предварительно поверхность перед ПДУ обрабатывалась фрезерованием концевыми твёрдосплавными фрезами и имела шероховатость  $Ra = 2.5 - 3.6$  мкм. При ПДУ дробью диаметром 0,3 мм величина  $Ra$  не должна превышать 2,5 мкм.

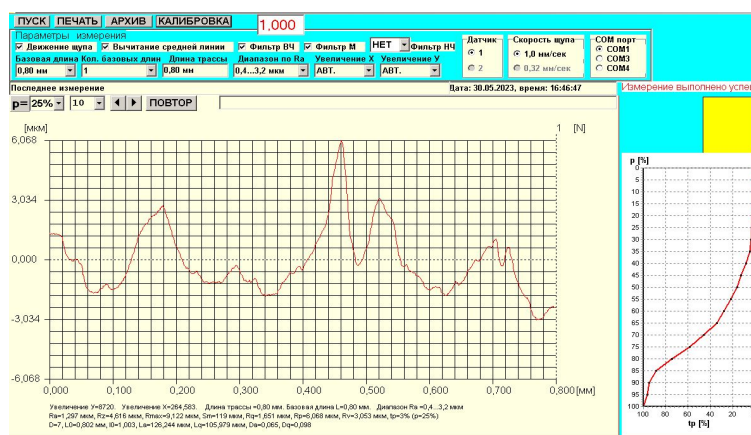


Рис. 5.8. Профилограмма поверхности, полученная после дробеструйного упрочнения с параметрами:  $Ra = 1,3$  мкм,  $Rz = 4,6$  мкм,  $Sm = 119$  мкм

На рис. 5.8 приведена типичная профилограмма поверхности после ПДУ, по которой приведены параметры шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Sm$  и др. Для определения равномерности распределения микронеровностей профили поверхности замерялись в продольном и поперечном направлениях в зависимости от скорости движения сопла при диаметре дроби 0,3 мм с режимами:  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 180$  мм (рис. 5.9 и 5.10).

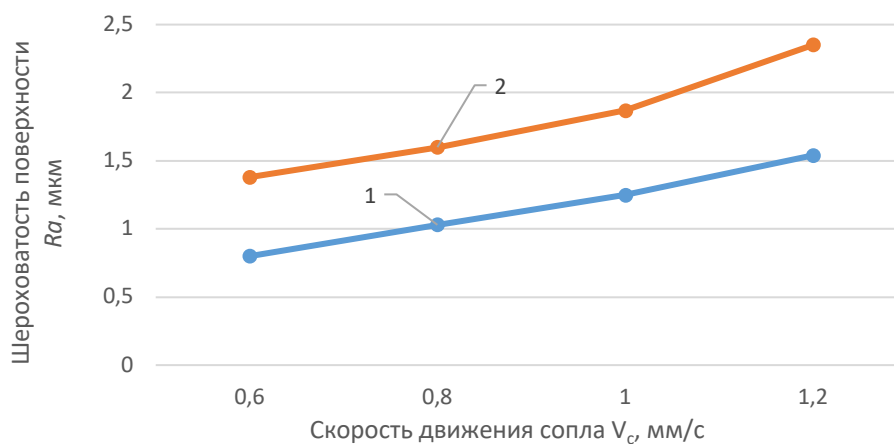


Рис. 5.9. Значения продольной шероховатости  $Ra$ , полученной профильным методом: 1 –  $V = 60$  м/с; 2 –  $V = 90$  м/с

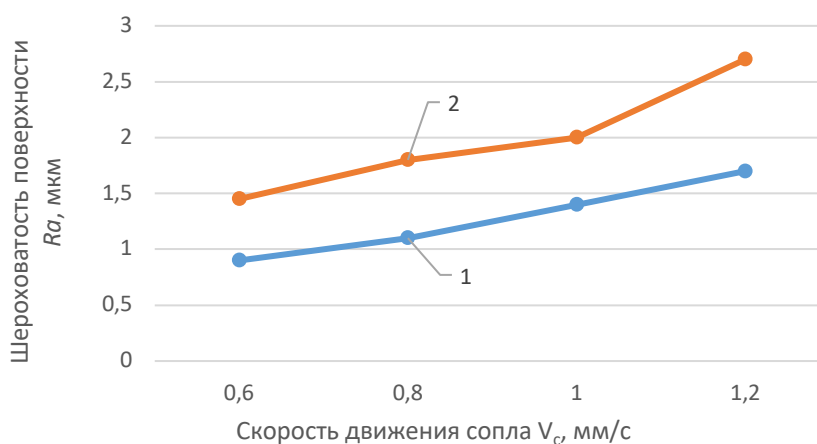


Рис. 5.10. Значения поперечной шероховатости  $Ra$ , полученной профильным методом: 1 –  $V = 60$  м/с; 2 –  $V = 90$  м/с

Установлено, что с увеличением скорости движения сопла и скорости дробы шероховатость повышается. С повышением скорости дробы до  $V = 90$  м/с величина  $Ra$  больше, чем при  $V = 60$  м/с, на 60 – 70 %. Это связано с большей пластической деформацией поверхности при скорости 90 м/с. Сравнение шероховатости в продольном и поперечном направлениях показало, что разница величины  $Ra$  на 5 – 12 % больше в поперечном направлении и при скорости дробы  $V = 90$  м/с и скорости дробы 1,2 мм/с величина  $Ra$  выше предельного уровня шероховатости  $Ra = 2,5$  мкм.

При обработке микропрофиль, образовавшийся при перемещении детали в результате пластического деформирования, изменяется, образуется новый

микропрофиль, характерный для поверхности после дробеструйной обработки, т. е. становится равномерным, что подтверждают результаты замеров величины  $Ra$  в продольном и поперечном направлениях (расхождение в пределах ошибки измерения не более 10 %).

Проведены исследования влияния расстояния от поверхности образцов до сопла и скорости дробы на шероховатость поверхности (рис. 5.11 и 5.12) при:  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 180$  мм,  $V_c = 1.0$  мм/с.

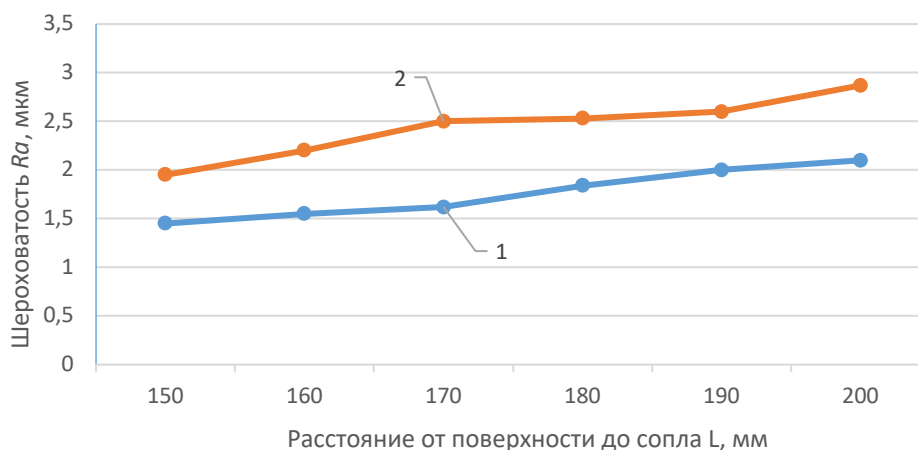


Рис. 5.11. Влияние расстояния от поверхности образца до торца сопла на продольную шероховатость поверхности образца из материала ВТ22: 1 –  $V = 60$  м/с; 2 –  $V = 90$  м/с

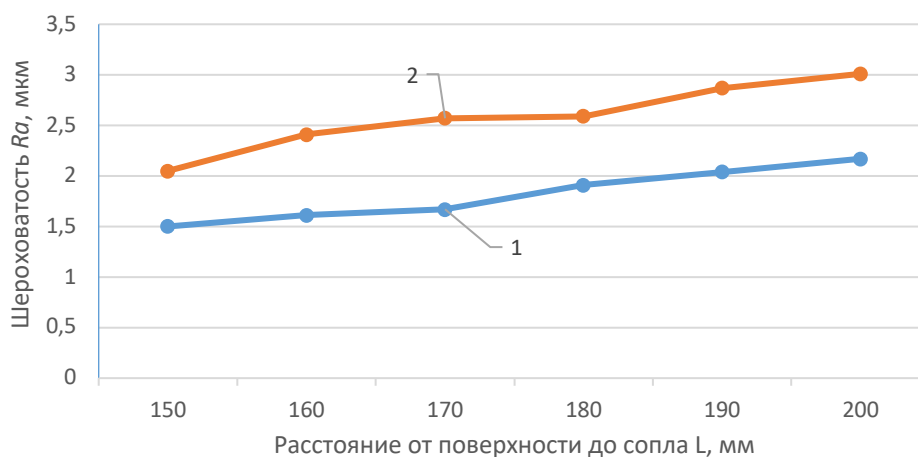


Рис. 5.12. Влияние расстояния от поверхности образца до торца сопла на поперечную шероховатость поверхности образца из материала ВТ22: 1 –  $V = 60$  м/с; 2 –  $V = 90$  м/с

Исследования показали, что с увеличением расстояния от сопла до поверхности образца шероховатость повышается. В то же время наибольшее влияние оказывает угол наклона сопла. Максимальные значения  $Ra$  получены при

угле сопла равном  $90^\circ$  (прямой удар), уменьшение угла снижает величину  $Ra$  на 20 – 30 %. После ПДУ со скоростью с  $V = 60$  м/с параметр  $Ra$  уменьшился до 0,9 – 1,7 мкм, а при  $V = 90$  м/с величина  $Ra$  составила 1,45 – 2,7 мкм.

Второй способ определения шероховатости связан с тем, что шероховатость поверхности определялась непосредственно на обработанной заготовке опико-электронным методом. Для исследования шероховатости на деталях взлетно-посадочных устройств, обработанных дробью, был использован переносной опико-электронный комплекс для контроля качества сложных поверхностей деталей в режиме 2D. Опико-электронный метод позволяет определять параметры шероховатости поверхности по цифровой фотографии через определение шага автокорреляционной функции ( $T_{cp}$ ).

В этом случае можно предложить следующую методику оценки микрогеометрии по параметрам корреляционной поверхности.

1. Для измеряемой шероховатости промышленного изделия изготавливаются по той же самой технологии образцы-свидетели поверхности с различной шероховатостью, определяемой стандартными, ГОСТовскими методами с помощью образцового средства измерения.

2. С помощью опико-электронного измерительного средства формируются изображения образцовых поверхностей полученных поверхностей, по ним вычисляются корреляционные функции и строится аналитическая зависимость  $Ra = f(T_{cp})$

4. Для заданной вероятности распознавания строится доверительный интервал  $I_\beta = f(T_{cp})$ , в который попадает случайная величина  $T_{cp}$ .

5. Для анализируемой поверхности с неизвестной шероховатостью, сформированной по той же самой технологии, с помощью опико-электронного измерительного средства формируется изображение поверхности  $T_{cp}$  корреляционной функции.

6. Используя полученные зависимости  $Ra = f(T_{cp})$  и  $I_\beta = f(T_{cp})$ , определяются  $Ra, Ra_{min}, Ra_{max}$  и их доверительные интервалы.

Разработана программа построения корреляционного профиля (рис. 5.13), который чем-то напоминает профилограмму поверхности.

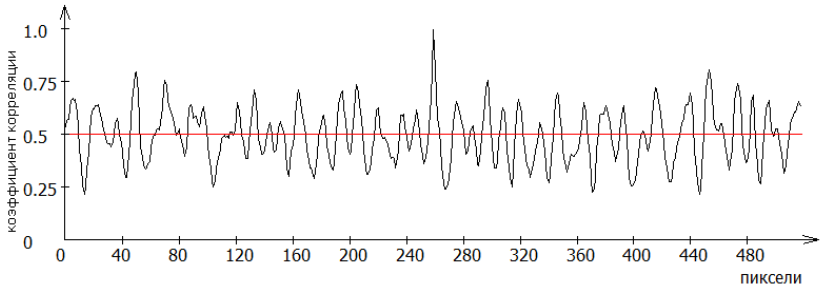
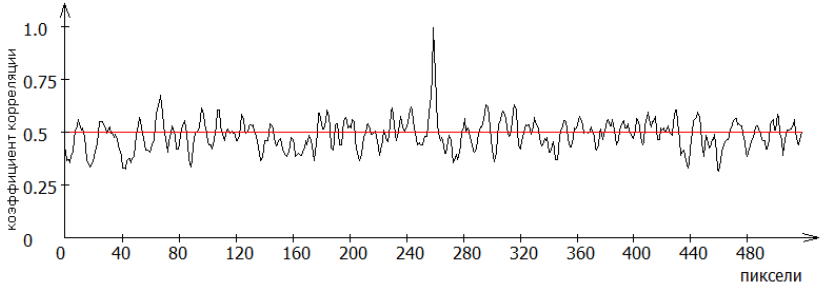
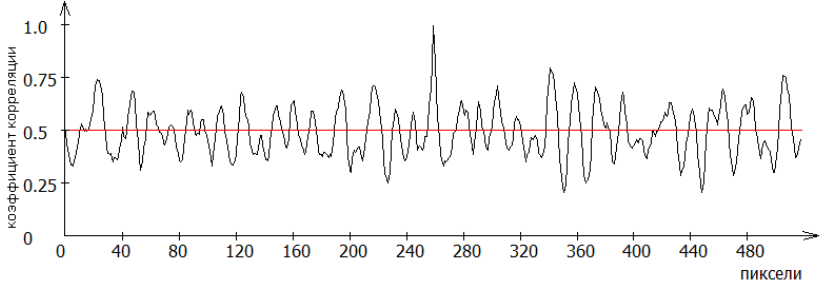
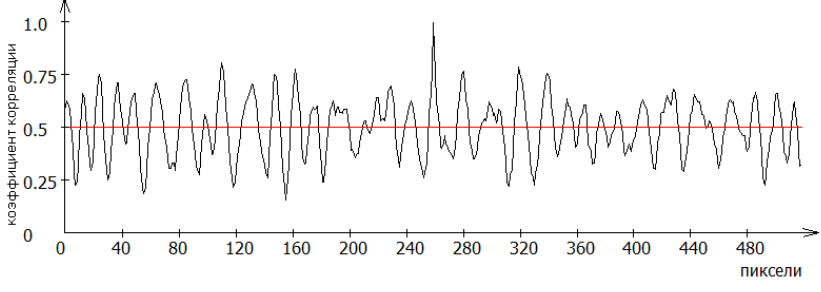
Коррелограммы поверхности	Частотные параметры
<p>1</p> 	<p><math>T_{cp} = 14,3</math> пк или <math>T_{cp} = 71,5</math> мкм</p>
<p>2</p> 	<p><math>T_{cp} = 16,7</math> пк или <math>T_{cp} = 83,5</math> мкм</p>
<p>3</p> 	<p><math>T_{cp} = 20,8</math> пк или <math>T_{cp} = 104</math> мкм</p>
<p>4</p> 	<p><math>T_{cp} = 25,0</math> пк или <math>T_{cp} = 125</math> мкм</p>

Рис. 5.13. Коррелограммы поверхности после ПДУ  $d = 0,3$  мм со скоростью дробы  $V = 60$  м/с при скорости движения сопла  $V_c = 0,6$  мм/с (1),  $V_c = 0,8$  мм/с (2),  $V_c = 1,0$  мм/с (3),  $V_c = 1,2$  мм/с (4)

На частотный параметр поверхности оказывает большое влияние скорость дробы. На рис. 5.14 показаны коррелограммы поверхности обработанных дробью со скоростью 90 м/с.

Коррелограммы поверхности		Частотные параметры
1		$T_{cp} = 10,0$ пк или $T_{cp} = 50$ мкм
2		$T_{cp} = 11,1$ пк или $T_{cp} = 55,5$ мкм
3		$T_{cp} = 13,5$ пк или $T_{cp} = 70,5$ мкм
4		$T_{cp} = 16,7$ пк или $T_{cp} = 83,5$ мкм

Рис. 5.14. Коррелограммы поверхности после ПДУ  $d = 0,3$  мм со скоростью дробы

$V = 90$  м/с при скорости движения сопла  $V_c = 0,6$  мм/с (1),  $V_c = 0,8$  мм/с (2),

$V_c = 1,0$  мм/с (3),  $V_c = 1,2$  мм/с (4)

Анализ полученных результатов показал, что для поверхностей с дробеструйным упрочнением наблюдается повышение частотного параметра  $T_{cp}$ . Установлено, что при увеличении скорости дроби и скорости движения сопла  $T_{cp}$  повышается. Отмеченное обстоятельство объясняется возрастающим влиянием регулярной компоненты в формировании микрорельефа исследуемых поверхностей.

Анализ коррелограмм поверхности показал, что шероховатость поверхности можно определять по шаговому параметру коррелограммы поверхности  $T_{cp}$ , применяя известное выражение из теории резания:

$$Ra = \frac{T_{cp}^2}{32 \cdot r} \quad (5.4)$$

где  $r$  – радиус шара.

Таблица 5.1

**Сравнение шероховатости поверхности, замеренной  
оптическим и профильным методами**

Скорость движения сопла $V_c$ , мм/с	Оптический метод			Профильный метод
	$T_{cp}$ , пк	$T_{cp}$ , мкм	$Ra$ , мкм	$Ra$ , мкм
Скорость потока дроби $V = 90$ м/с				
0,6	14,30	71,50	1,06	1,45
0,8	16,70	83,50	1,45	1,80
1.0	20,80	94,00	1,84	2,00
1.2	22,00	110,00	2,52	2,70
Скорость потока дроби $V = 60$ м/с				
0,6	11,70	61,40	0,77	0,90
0,8	12,40	68,50	0,96	1,10
1.0	13,50	72,50	1,07	1,40
1.2	16,70	81,50	1,23	1,70



Исследования показали, что с увеличением скорости дробы с 60 до 90 м/с величина  $Ra$  повышается на 15 – 20%. Большое значение на величину шероховатости оказывает скорость движения сопла, с увеличением скорости движения сопла в 2 раза величина  $Ra$  повышается в 1,5 раза. Это объясняется большей пластической деформацией при скорости 90 м/с, которая в 1,7 раза выше, чем при скорости 60 м/с. Сравнение оптического и профильного методов показало, что качественное расхождение в параметрах  $Ra$  не наблюдается, количественно оптический метод показывает значение величины  $Ra$  ниже на 30 – 40%, так как испытания при профильном методе проводились только в одном направлении, которое совпадало с направлением движения сопла.

**Выводы.** Разработан переносной оптико-электронный комплекс для бесконтактного контроля шероховатости поверхностей деталей взлетно-посадочных устройств. Обозначена методика построения коррелограммы поверхности, включающая выделение анализируемого участка, преобразование поверхности в бинарное изображение, сканирующую методику движения эталона для получения корреляционной поверхности и ее бинарного поля. Указывается, что программа позволяет строить корреляционный профиль, что имеет отношение к физическому смыслу профиля поверхности.

#### 5.4. Выводы по главе 5

В результате проведенных исследований установлено, что термины *структура* и *шероховатость* равнозначны, однако термин *шероховатость* является пока более распространенным в практике производства, поэтому в данной работе сделана попытка связать параметры структуры (ГОСТ Р ИСО 4287-2014) и шероховатости поверхности.

Установлены расчетные зависимости, связывающие параметры структуры поверхности (амплитуда и шаг автокорреляционной функции на основе применения оптико-электронного комплекса) с параметром  $Ra$  сложных поверхностей деталей из титанового сплава ВТ22 в зависимости от скорости дробы

при ПДУ. Показано, что применение дробеструйного упрочнения со скоростью дробы 90 м/с увеличивает шероховатость в 1,3 – 1,5 раза, поэтому важно правильно выбирать скорость движения сопла, при которой шероховатость не превышала бы  $Ra = 2,0 - 2,5$  мкм (требование технических условий на изготовление деталей). Установлено, что скорость движения сопла при скорости дробы 90 м/с не может быть больше 1,0 мм/с.

## ГЛАВА 6. ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ

### 6.1. Опытно-промышленная проверка

Результаты работы прошли опытную-промышленную проверку (ОПП) на ОАО «Авиаагрегат» при пневмодробеструйном упрочнении таких деталей, как «Траверса №47601.4122.300.001», «Цапфа», «Тяга».

Дробеструйное упрочнение осуществлялось в соответствии с инструкцией «ВИАМ 1039-74» в струйно-абразивной камере типа АКН-О-330-30 А5-Н с использованием следующих режимов:  $V = 60$  и  $90$  м/с, угол наклона сопла  $\alpha = 60$  и  $90^\circ$ , диаметр дроби  $d = 0,3$  мм.

При упрочнении с заданными режимами были рассчитаны показатели производительности и качества поверхностного слоя, указанные в таблице 6.1:

*Таблица 6.1*

#### Сравнительные технико-экономические параметры ПДУ

Параметры обработки	Производственная технология	Предлагаемая технология
Давление воздуха, бар	$1,8 \pm 0,2$	$4,8 \pm 0,2$
МПа	$0,2 \pm 0,02$	$0,5 \pm 0,02$
Скорость дроби, м/с	60	90
Количество сопел	2	1
Расстояние от сопла до детали, мм	170 – 190	
Эффективная площадь контакта, мм <sup>2</sup> , см. главу 3	36	44
Угол между направлением сопла и поверхностью детали, градусов	60 – 90°	

Параметры обработки	Производственная технология	Предлагаемая технология
Количество ударов до предельной пластической деформации, см. главу 3	10 – 15	6 – 8
Скорость поступательного передвижения прямых сопел, мм/с	0,5 – 0,6	0,8 – 0,9
Тип дроби	ASH-230 (55 – 62 HRC)	
Расход дроби на каждое сопло, кг/мин	$2,5 \pm 0,25$	$3,5 \pm 0,25$
Максимальный прогиб пластины при допустимой деформации 0,1 – 0,2, мм	0,04 – 0,06	0,05 – 0,07
Степень упрочнения, %	30	36
Глубина упрочнения, мкм	100	120
Максимальное значение остаточных напряжений, МПа	790	800
Глубина залегания остаточных напряжений, мкм	100	100
Шероховатость поверхности при допустимой $Ra = 1,6 – 3,0$ мкм	0,8 – 1,1	1,0 – 2,5
Штучное время обработки поверхности $2,3 \text{ м}^2$ , мин	69	57
Экономический эффект на одну деталь, руб	-	14329

## 6.2. Расчет себестоимости ПДУ

Расчет себестоимости производился при ПДУ детали «Траверса» на ОАО «Авиаагрегат» (рис. 6.1). Как видно из приведенной фотографии, деталь имеет сложную пространственную форму, поэтому расчет себестоимости осуществлялся только по траектории прямых движений сопла по площади 1 м<sup>2</sup>. Анализ 3D-модели детали позволил определить общую площадь траверсы, обработанной ПДУ, которая составила 2,3 м<sup>2</sup>.



Рис. 6.1. Траверса на участке контроля пространственных отклонений от действия остаточных напряжений

Общую себестоимость можно рассчитать по формуле с учетом единичного производства:

$$C_0 = C_1 \cdot F_T \quad (6.1)$$

где  $C_1$  – себестоимость обработки 1 м<sup>2</sup> площади поверхности траверсы, руб;

$F_T$  – площадь поверхностей 3D-модели детали, подлежащих ПДУ, для траверсы 2,3 м<sup>2</sup>.

$$C_1 = Z_0 \cdot t_{шт},$$

где  $t_{шт}$  – штучное время ПДУ траверсы, мин.

$$t_{шт} = t_0 + t_{всп} + t_{п.з}, \quad (6.2)$$

где  $t_0$  – основное время прохождения всей траектории обработки (при 60 м/с – два сопла) составляет 44 мин и (при 90 м/с – одно сопло) – 32 мин;

$t_{ecn}$  – вспомогательное время включает время на установку и снятие траверсы и не зависит от скорости дроби (15 – 20 мин);

$t_{н.з.}$  – подготовительно-заключительное время, как правило, включает время отладки управляющей программы (10 – 15 мин).

Тогда при  $V_d = 60$  м/с  $t_{шт} = t_o + t_{всп} + t_{п.з} = 44 + 15 + 10 = 69$  мин.,

при  $V_d = 90$  м/с  $t_{шт} = t_o + t_{всп} + t_{п.з} = 32 + 15 + 10 = 57$  мин.

С учетом особенностей операции ПДУ стоимость оплаты труда по данным завода ОАО «АВИААГРЕГАТ» составит  $Z_0 = 977,84$  руб./ч.

Дополнительная заработная плата на единицу продукции:

$Z_{доп} = Z_0 \cdot 13\% = 977,84 \cdot 0,13 = 127,12$  руб.

Отчисление в социальные фонды:

$Z_{сф} = (Z_0 + Z_{доп}) \cdot 32\% = (977,84 + 127,12) \cdot 0,32 = 353,59$  руб.

Общие затраты на единицу продукции:

$Z_{общ} = Z_0 + Z_{доп} + Z_{сф} = 977,84 + 127,12 + 353,59 = 1458,55$  руб.

Тогда

$V_d = 60$  м/с  $C_1 = 1458,55 \cdot 69/60 = 1677$  руб.,  $C_{01} = 2,3 \cdot 1677 = 3857$  руб.

$V_d = 90$  м/с  $C_2 = 1458,55 \cdot 57/60 = 1385$  руб.,  $C_{02} = 2,3 \cdot 1385 = 3185$  руб.

#### *Амортизационные отчисления на оборудование*

Для обработки используется струйно-абразивная камера типа АКН-О-330-30 А5-Н. Примем стоимость камеры с вычетом затрат на перевозку, монтаж и запуск равной 30 млн. руб.

$$A_{отч} = \sum_{i=1}^{m_{оп}} \frac{K_{перi} \cdot H_{a_i} \cdot t_{oc_i}}{100 \cdot F_d \cdot 60}, \quad (6.3)$$

где  $K_{перi}$  – первоначальная стоимость оборудования на  $i$ -й операции, руб.;

$H_{a_i}$  – годовая норма амортизационных отчислений на оборудование (оснастку) на  $i$ -й операции (%);

$t_{oc_i}$  – основное (машинное) время на  $i$ -й операции, мин;

$F_d$  – действительный (эффективный) фонд времени работы оборудования (оснастки), ч.

Норма амортизации технологического оборудования составляет 14,12 % (по сроку его полезного использования, равному 7 годам).

$F_d = 1940$  – действительный (эффективный) фонд времени работы оборудования, ч.

$$A_{\text{отч}} = \frac{3397224 \cdot 14,12 \cdot 6,85}{100 \cdot 1940 \cdot 60} = 249 \text{ руб. (1 – й вариант, 69 мин)}$$

$$A_{\text{отч}2} = 205 \text{ руб (2 – й вариант, 57 мин)}.$$

$$\text{Затраты на инструмент: } S_{\text{инст}} = K \cdot N_y \cdot Q \cdot C_d \cdot t_o,$$

где  $N_y$  – мощность установки 25 кВт;

$Q$  – расход дроби на одно сопло 16 кг/кВт·мин;

$C_d$  – цена дроби, 84 руб./кг;

$K$  – количество сопел.

$$S_{\text{инст}1} = K \cdot N_y \cdot Q \cdot C_d \cdot t_o = 2 \cdot 25 \cdot 16 \cdot 84 \cdot 69 = 4636800 \text{ руб.}$$

$$S_{\text{инст}2} = K \cdot N_y \cdot Q \cdot C_d \cdot t_o = 1 \cdot 25 \cdot 16 \cdot 84 \cdot 57 = 1915200 \text{ руб.}$$

С учетом возврата дроби  $n = 200$ .

$$S_{\text{инст}1} = 4636800/200 = 23184 \text{ руб.}$$

$$S_{\text{инст}2} = 1915200/200 = 9576 \text{ руб.}$$

**Вывод.** Расчет технико-экономических показателей приведенных затрат, технологического процесса ПДО детали «Траверса» при 90 м/с показал, что приведенные затраты по предлагаемому варианту составили:

$$Z_2 = 3185 + 205 + 9576 = 12961 \text{ руб.}$$

Приведенные затраты по базовому технологическому процессу завода ОАО «Авиаагрегат» составляют  $Z_1 = 3857 + 249 + 23184 = 27290$  руб.

Экономический эффект от ПДО при скорости дроби 90 м/с составляет на одну деталь  $\Delta_0 = \Delta_1 - \Delta_2 = 27290 - 12961 = 14329$  руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана имитационная модель процесса ПДУ для определения площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учетом образования застойных зон. Установлено, что при повышении скорости дроби с 60 до 90 м/с и уменьшении угла потока с 90 до 60° снижается площадь застойной зоны. Результаты расчета показывают, что площадь контакта при  $V = 60$  м/с составляет 36 мм<sup>2</sup>, а при  $V = 90$  м/с – 44 мм<sup>2</sup>, т. е. увеличивается в 1,2 раза, что благоприятно влияет на производительность процесса ПДУ.

2. Разработана имитационная модель процесса ПДУ для определения остаточных напряжений и накопленной деформации в поверхностном слое заготовки при точечном взаимодействии дроби. Установлено, что повышение скорости дроби диаметром 0,3 мм с 60 до 90 м/с увеличивает деформацию в 3,5 – 4,0 раза, а остаточные напряжения на 7 – 9 %. Установлено количество ударов до образования предельного уровня пластических деформаций: при скорости 60 м/с – 10 – 15 ударов дроби (заводской режим), с увеличением скорости дроби до 90 м/с (предлагаемый режим) – число ударов снизилось до 8 – 10.

3. Разработана имитационная модель процесса ПДУ для определения напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла. Исследованиями установлено, что скорость движения сопла при  $V = 60$  м/с составляет  $V_c = 0,6$  мм/с, при  $V = 90$  м/с скорость движения сопла  $V_c = 0,8$  мм/с, т. е. увеличилась в 1,3 раза. Это привело к тому, что требуемый уровень пластической деформации (напряжений) достигается быстрее и на большей площади.

4. Проведено имитационное моделирование влияния параметров процесса ПДУ на величину остаточных напряжений, упругих и остаточных (пластических) деформаций, а также глубину их залегания, которые позволили получить регрессионные модели параметров напряженно-деформационного состояния поверхностного слоя обрабатываемой заготовки. Установлено, что наибольшее влияние на величину остаточных напряжений оказывают скорость и диаметр



дробь, а также скорость движения сопла, которые позволили спрогнозировать основные направления совершенствования технологии обработки, обеспечивающие требуемые характеристики качества поверхностного слоя.

5. Экспериментальные исследования влияния процесса ПДУ на величину остаточных напряжений, глубину их залегания и пластических деформаций подтвердили результаты имитационного моделирования. Различие экспериментальных и расчетных данных не превысило 20 %. Установлено, что увеличение скорости дробь при ПДУ до 90 м/с повышает остаточные напряжения на 8 %, глубину залегания остаточных напряжений – на 40 – 60 %, величину пластических деформаций – в 3,5 – 4,0 раза.

6. Установлено, что повышение скорости дробь при ПДУ с 60 до 90 м/с увеличивает степень пластической деформации с 30 до 36 %.

7. Разработана методика определения шероховатости поверхности крупногабаритных деталей взлетно-посадочных устройств, связывающая профильные параметры шероховатости поверхности с оптическими параметрами структуры поверхности в зависимости от режимов ПДУ. Установлено, что повышение скорости дробь с 60 до 90 м/с уменьшает параметр  $R_a$  на 20 – 50 %.

8. Эффективность предлагаемой технологии ПДУ подтверждена опытно-промышленными испытаниями в условиях предприятия ОАО «Авиаагрегат» (г. Самара). Результаты ОПП показали, что производительность процесса упрочнения повысилась в 1,2 – 1,4 раза при обеспечении требуемых показателей качества поверхностного слоя детали. Экономический эффект при ПДУ «Траверсы» получен за счет увеличения скорости дробь, скорости движения сопла, уменьшения цикла обработки на станке с ЧПУ, снижения расхода дробь и составляет на одну деталь  $\Delta_0 = Z_2 - Z_1 = 27290 - 12966 = 14324$  руб.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

1. БЦОС – блок цифровой обработки сигналов
2. ВК – видеокамера
3. ВП – выделенная площадь исследуемой части поверхности
4. ГТД – газотурбинный двигатель
5. ИИС – информационно-измерительная система
6. ИМ – имитационная модель
7. ИП – измерительный преобразователь
8. ИСП – источник светового потока
9. МКЭ – метод конечных элементов
10. ОН – остаточные напряжения
11. ПДО – пневмодробеструйная обработка
12. ПДУ – пневмодробеструйное упрочнение
13. ППД – поверхностно-пластическое деформирование
14. ПФЭ – полный факторный эксперимент
15. САПР – система автоматизированного проектирования
16. ЭВМ – электронная вычислительная машина
17. CFD – вычислительная гидродинамика
18. DEM – метод дискретных элементов от компании ESSS
19. ESS – суммы квадратов остатков
20.  $A_{отч}$  – амортизационные отчисления на оборудование, руб.
21.  $A_{ср}$  – средняя амплитуда автокорреляционной функции, пк
22.  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.
23.  $Z_o$  – стоимость оплаты труда, руб./ч.
24.  $Z_{o.общ}$  – общие затраты на единицу продукции, руб.
25.  $Z_{сф}$  – отчисление заработной платы в социальные фонды, руб.
26.  $I_H$  – степень наклепа, %

27.  $C_0$  – общая себестоимость, руб.
28.  $C_1$  – себестоимость обработки 1 м<sup>2</sup> площади, руб.
29.  $\Phi$  – мощность светового потока, люмен
30.  $C_d$  – цена дроби, руб./кг
31.  $\mathcal{E}$  – экономический эффект, руб.
32.  $a_1$  – коэффициент турбулентности, определяющий интенсивность переноса и перемешивания дроби;
33.  $a_2$  – размеры пластического отпечатка, мм;
34.  $a_3$  – толщина образца-свидетеля, мм
35.  $d$  – диаметр дроби, мм;
36.  $d_1$  – средний диаметр пятна контакта, мм;
37.  $d_f$  – число степеней свободы
38.  $E$  – модуль упругости материала, МПа
39.  $f_m$  – прогиб образца-свидетеля, мкм
40.  $E_o$  – освещённость, люкс
41.  $F_d$  – действительный (эффективный) фонд времени работы оборудования (оснастки), ч
42.  $F_T$  – площадь поверхностей 3D-модели детали, подлежащих ПДО, мм<sup>2</sup>
43.  $F_{omn}$  – площадь отпечатка, мм
44.  $h$  – глубина упрочненного слоя, мм
45.  $h_l$  – глубина вдавливания индентора в заготовку, мм;
46.  $h_{enl}$  – глубина залегания пластических деформаций, мм
47.  $h_{ey}$  – глубина залегания упругих деформаций, мм
48.  $h_\sigma$  – глубина залегания максимальных остаточных напряжений, мкм
49.  $h_n$  – глубина наклепанного слоя
50.  $H_{\mu scx}$  – микротвёрдость ненаклепанного материала, МПа
51.  $H_{a.i}$  – годовая норма амортизационных отчислений на оборудование (оснастку) на  $i$ -й операции, %
52.  $H_n$  – наибольшая твердость поверхностного слоя

53.  $H_{omn}$  – глубина отпечатка, мм
54.  $HV$  – твердость обрабатываемого материала по Виккерсу, МПа
55.  $k$  – количество факторов, включенных в модель
56.  $K_{\beta}$  – коэффициент стабилизации  $\beta$ -фазы
57.  $K_c$  – количество сопел
58.  $K_{пер.i}$  – первоначальная стоимость оборудования на  $i$ -й операции, руб
59.  $L$  – расстояние до заготовки, мм
60.  $L_{обр}$  – длина образца-свидетеля, мм
61.  $L_{cp}$  – среднее расстояние от сопла до поверхности детали, мм
62.  $n_1, n_2$  – количество наблюдений в каждой группе
63.  $N_y$  – мощность установки, кВт
64.  $P$  – сила сопротивления
65.  $P_N$  – нормальная составляющая
66.  $P_{\tau}$  – касательная составляющая
67.  $Q$  – расход дробы на одно сопло, кг/кВт·мин
68.  $r$  – радиус контакта, мм
69.  $r_0$  – радиус отверстия сопла, мм
70.  $R^2$  – коэффициент детерминации
71.  $R_a$  – среднеарифметическое отклонение профиля поверхности, мкм;
72.  $R_z$  – высота шероховатости, мкм
73.  $R_{zр}$  – радиус внешней границы струи, мм
74.  $R_{omn}$  – радиус впадин отпечатка, мм
75.  $S$  – площадь светового пятна на поверхности люксметра, м<sup>2</sup>
76.  $S_e$  – стандартная ошибка оценки регрессии
77.  $S_{инстр}$  – затраты на инструмент, руб.
78.  $S_n$  – длина начального участка, мм
79.  $S_{нач}$  – расстояние от выходного сечения сопла до конца начального участка, мм

80.  $S_{omn}$  – средний шаг отпечатка, мм
81.  $t_{всп}$  – вспомогательное время обработки, мин
82.  $t_{набл}$  – значение t-критерия Стьюдента
83.  $t_o$  – основное время обработки, мин
84.  $t_{n.з}$  – подготовительно-заключительное время обработки, мин
85.  $T_{cp}$  – средний шаг автокорреляционной функции, пк
86.  $V$  – скорость дроби, м/с
87.  $V_m$  – скорость движения воздуха и смеси на аэродинамической оси, м/с
88.  $V_{в.ср}$  – средняя скорость воздуха, м/с
89.  $V_c$  – скорость движения сопла, мм/с
90.  $V_{сеч}$  – скорость выбранной точки сечения, м/с;
91.  $V_{ср}$  – средняя скорость дроби, м/с
92.  $w_{max}$  – максимальная глубина вдавливания, мм
93.  $z_p$  – глубина пластической зоны влияния, мм
94.  $\alpha$  – угол наклона сопла, градусов
95.  $\beta_{упр}$  – коэффициент упрочнения
96.  $\delta$  – относительное удлинение, %
97.  $\Delta h$  – глубины деформационного упрочнения, мкм
98.  $\varepsilon$  – степень упрочнения, %
99.  $\varepsilon_{пл}$  – пластические деформации, мм
100.  $\varepsilon_y$  – упругая деформация, мм
101.  $\zeta = 1 - e^{-}$  – коэффициент сопротивления свободной струи
102.  $\mu$  – коэффициент Пуассона
103.  $\mu_{нД}$  – степень деформационного упрочнения (наклёпа), %
104.  $\mu_{нmax}$  – максимальная величина микротвёрдости, МПа
105.  $\rho_v$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>
106.  $\sigma$  – остаточные напряжения, МПа
107.  $\sigma_{02}$  – предел текучести, кгс/мм<sup>2</sup>

- 108.  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости детали до упрочнения, МПа
- 109.  $\sigma_{-1\text{упр}}$  – предел выносливости детали после упрочнения, МПа
- 110.  $\sigma_{\text{в}}$  – предел прочности, МПа
- 111.  $\psi$  – относительное сужение, %
- 112.  $\psi_{\text{пд}}$  – степень поверхностной деформации, %

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Александров. – М.: Наука, 1976. – 432 с.
2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
3. Бабичев А.П. Теоретико-вероятностная модель процесса виброобработки плоской детали в случае эллиптических пятен контакта / А. П. Бабичев, Н. Т. Мишняков // Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология: Межвуз. сб. – Ростов н/Д, 1981. – С. 8 – 10.
4. Бабичев, А. П. Вибрационная обработка деталей / А. П. Бабичев. – М.: Машиностроение, 1974. – 134 с.
5. Бабичев, А. П. Исследование технологических основ процессов обработки деталей в среде колеблющихся тел с использованием низкочастотных вибраций / А. П. Бабичев: дис. ... д-ра. техн. наук. – Ростов н/Д, 1975. – 462 с.
6. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. – Ростов н/Д: ДГТУ, 1999. – 624 с.
7. Балтер, М. А. Упрочнение деталей машин / М. А. Балтер. – М.: Машиностроение, 1978. – 181 с.
8. Безъязычный, В. Ф. Методика исследования напряжений в поверхностном слое лопаток ГТД после дробеструйного упрочнения / В. Ф. Безъязычный, А. Н. Рябов, А. Н. Сутягин, А. В. Толкачев // Инженерный журнал. – 2015. – № 1. – С. 104 – 108.
9. Безъязычный, В. Ф. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей / В. Ф. Безъязычный, Т. Д. Кожина, А. В. Константинов, В. В. Непомилуев, А. Н. Семенов, Т. В. Шарова, Ю. П. Чистяков. – М.: изд-во МАИ, 1993. – 184 с.

10. Биргер, И. А. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей / И. А. Биргер, Б. Ф. Балашов. – М.: Машиностроение, 1981. – 229 с.

11. Бобровский, Н. М. Направления развития поверхностно-пластического деформирования деталей машин // Н. М. Бобровский, П. А. Мельников, И. Н. Бобровский, А. В. Ежелев, А. А. Лукьянов / SWorld – 19 – 30 March 2013. Modern directions of theoretical and applied researches '2013, – 2013.

12. Богуслаев, В. А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, В. Ф. Притченко. – Запорожье: Мотор Сич, 2006. – 335 с.

13. Богуслаев, В. А. Финишные технологии обработки деталей ГТД / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой // Вестник двигателестроения – 2009. – № 1. – С. 71 – 78.

14. Браславский, В. М. Деформационное упрочнение деталей машин / В. М. Браславский, А. А. Бараз // Вестник машиностроения. – 1983. – №7. – С. 61 – 63.

15. Бубнов, В. А. Титан и его сплавы в машиностроении / В. А. Бубнов, А. Н. Князев // Вестник Курганского государственного университета. – 2016. – №3 (42). – С. 16 – 22.

16. Букатый, А. С. Обеспечение выносливости деталей шасси применением упрочняющей дробеструйной обработки/ А. С. Букатый, С. А. Букатый, Е. В. Зотов // XXIV Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – 2022. – С. 160 – 164.

17. Букатый, А. С. Назначение режимов упрочняющей обработки крупногабаритных деталей – элементов шасси по допускаемым деформациям / А. С. Букатый, Е. В. Зотов, А. В. Ефросинин [и др.] // XXII Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – 2020. – Ч. II. – С. 3 – 5.



18. Букатый, С. А. Упрочнение крупногабаритных маложёстких деталей шасси поверхностным пластическим деформированием / А. С. Букатый, Е. В. Зотов, А. В. Ефросинин [и др.] // XXV Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – 2022. – С. 166 – 169.
19. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Вартгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
20. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и, ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.
21. Виноградова, Н. В. Исследование влияния технологических условий механической обработки на уровень накопленной энергии деформации / Н. В. Виноградова // Вестник машиностроения. – 2012. – №4 – С. 60 – 62.
22. Винокуров, В. И. Повышение усталостной прочности лопаток компрессора упрочняющей обработкой / В. И. Винокуров [и др.] // Авиационная промышленность. – 1992. – JN211. – С. 10 – 12.
23. Гаркунов, Д. Н. Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов / Д. Н. Гаркунов, А. А. Поляков. – М.: Машиностроение, 1974. – 200 с.
24. Генкин, М. Д. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач / М. Д. Генкин, Н. М. Рыжов. – М. Машиностроение, 1981. – 231 с.
25. Гольдсмит, В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел / В. Гольдсмит. – М.: Физматгиз, 1965. – 245 с.
26. Горбунов, М. Н. Основы технологии производства самолетов / М. Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1976. – 260 с.
27. Горицкий, В. М. Структура и усталостное разрушение металлов / В. М. Горицкий, В. Ф. Терентьев. – М.: Metallургия, 1980. – 208 с.
28. Горохов В. А. Обработка деталей пластическим деформированием / В. А. Горохов. – Киев: Техника, 1978. – 192 с.
29. Данилин, А. И. Самолет – синкретическое достижение науки и техники (как и почему устроен самолет) [Электронный ресурс] / А. И. Данилин; Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2011.

30. Джураев, А. Д. Анализ напряженно–деформированного состояния поверхностного слоя при дробеструйном упрочнении деталей машин / А. Д. Джураев, И. Г. Шин. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 10. – С. 3 – 7.

31. Джураев, А. Д. О коэффициенте восстановления скорости при ударе твердой сферической частицы о плоскую металлическую преграду / А. Д. Джураев, И. Г. Шин // Изв. ВУЗов. Серия техн. наук. – 1995. – №1 – С. 121 – 129.

32. Дзукас, Д. А. Динамика удара / Д. А. Дзукас, Т. Николас, Х. В. Свифт. – М.: Мир, 1985. – 296 с.

33. Драпкин, Б. М. Свойства сплавов в экстремальном / Б. М. Драпкин, В. К. Кононенко, В. Ф. Безъязычный. – М.: Машиностроение, 2004. – 256 с.

34. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

35. Жасимов, М. М. Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании / М. М. Жасимов. – Алма-ата: Наука, 1986. – 208 с.

36. Жуков, К. А. Эксплуатационная надежность авиационной техники / К. А. Жуков, Е. А. Милов, Н. И. Епишев. – Куйбышев: КуАИ, 1987. – 109 с.

37. Жукова, А. В. Упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД). Обзор перспективных технологий / А. В. Жукова, И. А. Гейдан, И. И. Ерахтина, Е. А. Плешакова // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России: IV Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. IV Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 3 февр. 2012 г. – Муром: Изд.-полиграф. центр МИ ВлГУ, – 2012. – С. 275 – 276.

38. Зайдес, С. А. Моделирование процессов поверхностного пластического деформирования / С. А. Зайдес, Е. Ю. Кропоткина, А. Р. Лебедев; Под ред. С. А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. – 309 с.

39. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.
40. Исупов, М. Г. Технологические характеристики газобразивной струи / М. Г. Исупов, Л. Л. Лукин // Вестник машиностроения. – 2008. – № 6. – С. 57 – 59.
41. Исупов, М. Г. Шероховатость поверхности, получаемая струйно-ударной обработкой / М. Г. Исупов // Вестник машиностроения. – 1999. – №11. – С. 50 – 52.
42. Кабатов, А. А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием / А. А. Кабатов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. трудов / Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт». – Харьков, 2013. – № 58. – С. 49 – 54.
43. Каледин, Б. А. Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием / Б. А. Каледин, П. А. Чепа. – Минск: Наука и техника, 1974. – 232 с.
44. Качество поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей авиационных двигателей: сборник научных трудов/ ЯПИ. – Ярославль, 1990. – 138 с.
45. Киричек, А. В. Анализ способов динамического упрочнения поверхности пластическим деформированием / А. В. Киричек // СТИН. – 2000. – №6. – С. 13 – 17.
46. Киричек, А. В. Способы динамического упрочнения поверхности пластическим деформированием /А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев // КШП. –2001. – №2. – С. 28 – 33.
47. Киричек, А. В. Технологические методы упрочнения деталей машин / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, А. Н. Афонин, Д. Е. Тарасов. – М.: Машиностроение, 2009. – 296 с.
48. Киричек, А. В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, А. Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

49. Кирпичев, В. А. Моделирование остаточного напряжённого состояния поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям образца-свидетеля / В. А. Кирпичев, В. С. Вакулюк, А. С. Букатый [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16. № 6 (2). – С. 461 – 464.

50. Коцаньда, С. Усталостное растрескивание металлов / С. Коцаньда – М.: Металлургия, 1990. – 623 с.

51. Кочетков, А.В. Обзор исследований отделочно-упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования / А. В. Кочетков, Ф. Я. Барац, И. Г. Шашков // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – №4. – Идентификац. номер статьи в журнале: 38ТВН413. – С. 1 – 19.

52. Кроха, В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник / В. А. Кроха. – М.: Машиностроение, 1980. – 157 с.

53. Кудрявцев, И. В. Повышение прочности и долговечности крупных тяжелых деталей машин поверхностным наклепом / И. В.Кудрявцев [и др.] – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. – 144 с.

54. Кудрявцев, И. В. Современное состояние и практическое применение ППД / И. В. Кудрявцев // Вестник машиностроения. – 1972. – №1. – С. 35 – 38.

55. Кузнецов А. Н. Основы конструкции и технической эксплуатации воздушных судов / А. Н. Кузнецов. – М.: Транспорт, 1990. – 294 с.

56. Кузнецов, В. П. Инженерия плосковершинного регулярного микрорельефа поверхности при многоцелевой обработке деталей / В. П. Кузнецов, В. Г. Горгоц, О. В. Дмитриева // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2009. – Т.12, №4 (33). – С. 113 – 115.

57. Кузнецов, Н. Д. Пневмодробеструйное упрочнение / Н. Д. Кузнецов // Инженерный журнал. – 2002. – № 6. – С. 14 – 19.

58. Кузнецов, Н. Д. Технологические методы повышения надёжности деталей машин: справочник/ Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков. – М.: Машиностроение, 1992. – 304 с.

59. Кургузов, Ю. И. Движение микрочастиц в воздушной среде при пневмодробеструйной обработке / Ю. И. Кургузов, Д. А. Люшня // Известия

Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22, № 3(95). – С. 120 – 126.

60. Ландау, Л. Д. Теория упругости /Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – М.: Наука, 1987. – 248 с.

61. Лебедев, В. А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования [Текст] / В. А. Лебедев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 183 с.

62. Лебедев, В. А. Энергетические аспекты упрочнения деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования / В. А. Лебедев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. – 156 с.

63. Люшня Д. А. Исследование остаточных напряжений в лопатках ГТД при упрочнении микрошариками // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий : сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей / под ред. В. А. Лебедева ; Донской государственный технический университет. – Текст : электронный. – Ростов н/Д : ДГТУ, 2021. – 531 с.

64. Люшня, Д. А. Исследование неполной линейной регрессионной модели эффективности пневмодробеструйного упрочнения / Д. А. Люшня, В. А. Дмитриев // Высокие технологии в машиностроении : материалы XX всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 9 – 10 ноября 2023 года / отв. редактор Р. Г. Гришин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2023. – с. 68 – 74.

65. Люшня, Д. А. Исследование процесса дробеструйной обработки с применением DEM–FEM подхода / Д. А. Люшня // Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2022 (ICMSSTE 2022) : Материалы международной научно-практической конференции, Ялта, 16 – 19 мая 2022 года / отв. редактор В. В. Дядичев. – Симферополь: Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (Медицинская академия имени С. И. Георгиевского – структурное подразделение), 2022. – С. 531 – 537.

66. Люшня, Д. А. Исследование энергетической составляющей при пневмодробеструйном упрочнении / Д. А. Люшня // Высокие технологии в машиностроении : материалы XIX всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 10 – 11 ноября 2022 года / отв. редактор Р. Г. Гришин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2022. – С. 108 – 110.

67. Люшня, Д. А. Шероховатость поверхности деталей при дробеструйной обработке / Д. А. Люшня // Высокие технологии в машиностроении : Материалы XVIII всероссийской научно–технической конференции с международным участием, Самара, 24–25 ноября 2021 года / Отв. редактор Р.Г. Гришин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2021. – С. 82 – 84.

68. Малышев, В. И. Анализ взаимосвязи плотности дислокаций с пластической деформацией поверхностного слоя при обычном ультразвуковом алмазном выглаживании / В. И. Малышев, А. С. Селиванов // Вектор науки ТГУ. – 2009. – № 6. – С. 20 – 25.

69. Маталин, А. А. Технологические методы повышения долговечности машин / А. А. Маталин. – Киев: Техника, 1971. – 142 с.

70. Матлин, М. М. Комбинированное пластическое деформирование деталей дробью / М. М. Матлин, С. Л. Лебский // Вестник машиностроения. – 2000. – №1. – С. 54 – 56.

71. Матлин, М. М. Определение глубины пластически деформированного слоя при упрочняющей обкатке деталей цилиндрическими роликами / М. М. Матлин, С. Л. Лебский, А. В. Бабаков // Вестник машиностроения. – 2002. – №10. – С. 53 – 55.

72. Матлин, М. М. Определение степени покрытия отпечатками дроби поверхности при дробеобработке / М. М. Матлин, В. О. Мосейко, В. В. Мосейко // СИЖ. – 2005. – №2. – С. 18 – 25.

73. Матлин, М. М. Прогнозирование глубины наклепанного слоя при комбинированном упрочнении / М. М. Матлин, С. Л. Лебский // Вестник машиностроения. – 2001. – №4. – С. 56 – 58.

74. Матюхин Е. В. Исследование процесса виброударного упрочнения металлообрабатывающего инструмента: Автореф. дис....канд. техн. наук: 05.02.08 / Е. В. Матюхин. – Москва, 1979 – 23 с.

75. Митряев, К. Ф. Повышение эксплуатационных свойств деталей путем регулирования состояния поверхностного слоя при механической обработке / К. Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйб. авиац. ин-т, 1986. – 91 с.

76. Михайлов, А. Л. Проектирование и вибродиагностика двигателей ГТД на основе исследований объемного напряженно–деформированного состояния / А. Л. Михайлов. – Рыбинск, 2005. – 216 с.

77. Мозговой, А. В. Оценка эффективности обработки поверхности стали при помощи механической спектроскопии / А. В. Мозговой // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2012. – № 5. – С. 51 – 55.

78. Муминов, М. Р., Энергетический подход к оценке шероховатости поверхности деталей при упрочнении дробью / М. Р. Муминов, Д. А. Маматова, И. Г Шин. // *Вестник машиностроения.* – 2012. – №4. – С. 60 – 63.

79. Надуваев, В. В. Процессы обеспечения износостойкости деталей машин / В. В. Надуваев, Е. Н. Фролов, А. Н. Прокофьев // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні.* – 2011. – № 10. – С. 227 – 236.

80. Назаров, Ю. Ф. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов / Ю. Ф. Назаров, А. М. Шкилько, В. В. Тихоненко, И. В. Компанец // *Физическая инженерия поверхности.* – 2007. – Т. 5. – № 3 – 4. – С. 207 – 216.

81. Носов, Н. В. Исследование структуры сложных поверхностей деталей после дробеструйной обработки / Н. В. Носов, Д. А. Люшня // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2023. –Т.24, № 4(2). – С. 104 – 108.

82. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

83. Олейник, Н. В. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин / Н. В. Олейник, В. П. Кычин, А. Л. Луговской. – К.: Техника, 1984. – 151 с.

84. Отений, Я. Н. Сравнительный анализ определения глубины упрочнения при поверхностно-пластическом деформировании по различным методикам / Я. Н. Отений // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – №3. – С. 3 – 4.

85. Папшев, Д. Д. Технологические методы повышения надежности и долговечности деталей машин поверхностным упрочнением / Д. Д. Папшев. – Куйбышев: КПТИ, 1983. – 81 с.

86. Папшев, Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.

87. Папшев, Д. Д. Повышение эксплуатационных свойств деталей различными способами деформационного поверхностного упрочнения / Д. Д. Папшев // Материалы семинара «Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов». – М.: Московский Дом научно-технической пропаганды имени Ф. Э. Дзержинского, 1984. – С 74 – 77.

88. Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий : сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей / под ред. В.А. Лебедева ; Донской государственный технический университет. – Текст : электронный. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2021. – 531 с.

89. Петросов, В. В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента / В. В. Петросов. – М.: Машиностроение, 1977. – 167 с.

90. Петухов, А. П. Сопротивление усталости деталей ГТД / А. П. Петухов. – М.: Машиностроение, 1993. – 232 с.

91. Поляк, М. С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. Т.2 / М. С. Поляк. – М.: Машиностроение, 1995. – 688 с.

92. Попенко, А. И. Аналитический метод определения параметров процесса динамического упрочнения ГШД / А. И. Попенко [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2005. – №1. – С. 89 – 98.

93. Пшибыльский В. П. Технология поверхностной пластической обработки / В. П. Пшибыльский. – М.: Metallurgia, 1991 – 476 с.



94. Рыбаков, Г. М. Формирование сжимающих остаточных напряжений в металлических деталях при дробеструйной обработке / Г. М. Рыбаков // Технология машиностроения. – 2007. – № 1. – С. 51 – 54.
95. Рыковский, Б. П. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом / Б. П. Рыковский, В. А. Смирнов, Г. М. Щетинин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 152 с.
96. Саверин, М. М. Дробеструйный наклеп / М. М. Саверин. – М.: Машгиз, 1955. – 312 с.
97. Серенсен, С. В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению / С. В. Серенсен. – М.: Атомиздат, 1975. – 192 с.
98. Сидоров, С. Ю. Разработка математической модели для определения рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания при изготовлении деталей авиационной техники / С. Ю. Сидоров, Д. Л. Скуратов // Вестник СГАУ. – 2006. – № 2 – 2. С. 20 – 25.
99. Смелянский, В. М. Механика упрочнения поверхностного слоя деталей машин в технологических процессах поверхностного пластического деформирования / В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 1992. – 59 с.
100. Смелянский, В. М. Технологическое управление качеством поверхностного слоя при обкатывании титановых сплавов / В. М. Смелянский, В. В. Колеватов // Вестник машиностроения. – 2001. – №9. – С. 51–52.
101. Смелянский, В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
102. Соловов, А. В. Конструкция самолетов: фундаментальные основы и классика типовых решений : учебное пособие для вузов / А. В. Соловов, А. А. Меньшикова. – М.: Юрайт, 2022. – 385 с.
103. Справочник технолога-машиностроителя. Т.1. / ред. А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков. – М.: Машиностроение, 1972. – 694 с.
104. Стихановский, Б. Н. Передача энергии ударом / Б. П. Стихановский. – Омск: ОПИ, – 1995. – Ч. 2, 3. – 145 с. – Деп. в ВИПТИ, № 1726 – В95.

105. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей ГТД / А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 1988. – 239 с.

106. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин [Текст] / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

107. Сулима, А. М. Основы технологии производства газотурбинных двигателей / А. М. Сулима, А. А. Носков, Г. З. Серебренников. – М.: Машиностроение, 1996. – 480 с.

108. Тамаркин М. А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... д-ра. техн. наук. / М. А. Тамаркин. – Ростов н/Д, 1995. – 150 с.

109. Тамаркин, М. А. Технологические основы обработки деталей ППД в гибких гранулированных средах / М. А. Тамаркин [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 9-й Международной практической конференции: СПб.: Издательство Политехнического университета, 2007. – С. 224 – 233.

110. Тихомиров, В. П. Приближенная оценка параметров контактирования шара с шероховатой поверхностью / В. П. Тихомиров, Д. В. Воробьев // Инженерный журнал. – 2005. – №1. – С. 32 – 35.

111. Федонин, О. Н. Научное обоснование выбора режимов обработки при поверхностном пластическом деформировании / О. Н. Федонин, С. В. Степошина // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 1 (29). – С. 4 – 8.

112. Хворостухин, Л. А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л. А. Хворостухин, С. В. Шишкин, А. П. Ковалев, Р. А. Ишмаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.

113. Хейфец, С. Г. Аналитическое определение глубины наклепанного слоя при обкатке роликами стальных изделий / С. Г. Хейфец // Новые исследования в области прочности машиностроительных материалов / ЦИИИТМАШ. – М.: Машгиз, 1952. – Кн. 49.

114. Чечулин, Б. Б. Циклическая и коррозионная прочность титановых сплавов / Б. Б. Чечулин, Ю. Д. Хесин. – М.: Metallurgia, 1987. – 208 с.

115. Чаава, М. М. Оптимизация технологических параметров вибрационной отделочной обработки: дис. ... канд. техн. наук. – Ростов н/Д, 1997. – 152 с.

116. Чепан, П. А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием / П. А. Чепан. – Минск: Наука и техника, 1981. – 128 с.

117. Чепан, П. А. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей / П. А. Чепан, В. А. Андриягин. – Минск: Наука и техника, 1988. – 192 с.

118. Чепурных, И. В. Прочность конструкций летательных аппаратов / И. В. Чепурных. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2013. – 137 с.

119. Чернявский, Д. И. Контактная прочность элементов машин при динамическом ударном взаимодействии / Д. И. Чернявский // Вестник машиностроения. – 2002. – №5. – С. 3 – 8.

120. Шанявский, А. А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях / А. А. Шанявский. – Уфа, 2003. – 803 с.

121. Шарипов, Б. У. Формирование поверхностного слоя при обработке деталей методами поверхностного пластического деформирования / Б. У. Шарипов // Вестник машиностроения. – 2000. – №8. – С. 46 – 48.

122. Шин, И. Г. Деформационное упрочнение поверхностного слоя деталей колеблющимся индентором / И. Г. Шин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 10. – С. 24 – 26.

123. Шманев, В. А. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД / В. А. Шманев, А. П. Шулепов, А. В. Мещеряков – М.: Машиностроение, 1995. – 144 с.

124. Кургузов Ю. И. Движение микрочастиц в воздушной среде при пневмодробеструйной обработке / Ю. И. Кургузов, Д. А. Люшня // Известия Самарского научного центра РАН. – 2020. – №3. – С. 120 – 126.
125. Asi O, Yesil O. Failure analysis of an aircraft nose landing gear piston rod end. Eng Fail Anal 2013;32:283–91.
126. Azevedo CR, Hippert E, Spera G, Gerardi P. Aircraft landing gear failure: fracture of the outer cylinder lug. Eng Fail Anal 2002;9:1–15.
127. Azevedo CR, Hippert E. Fracture of an aircraft's landing gear. Eng Fail Anal 2002;9:265–75.
128. Bagnoli F, Bernabei M. Fatigue analysis of a P180 aircraft main landing gear wheel flange. Eng Fail Anal 2008;15:654–65.
129. Bagnoli F, Dolce F, Colavita M, Bernabei M. Fatigue fracture of a main landing gear swinging lever in a civil aircraft. Eng Fail Anal 2008;15:755–65.
130. Barter SA. Investigation of a Boeing 747 wing main landing gear trunnion failure. Eng Fail Anal 2013;35:387–96.
131. Baughman, D. L. Peen forming. [Text]. / D. L. Baughman. // Machine Design.–1989.–№42.–P.156–160.
132. Brandel, W.W. Ball forming solves contouring problems. / W.W. Brandel, L. S. Klass // Metal Production. – 1999. – №4. – P. 56–57.
133. Chen, Guo–Qing & JIAO, Yan & TIAN, Tang–yong & ZHANG, Xin–hua & LI, Zhi–qiang & Zhou, Wen. (2014). Effect of wet shot peening on Ti–6Al–4V alloy treated by ceramic beads. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 690–696.
134. Eliaz N, Sheinkopf H, Shemesh G, Artzi H. Cracking in cargo aircraft main landing gear truck beams due to abusive grinding following chromium plating. Eng Fail Anal 2005;12:337–47.
135. Erasmus DJ, Hattingh DG, Young AB, Els–Botes A, James MN. Design of a motor glider landing gear strut–the role of failure analysis in structural integrity. Eng Fail Anal 2014; 41:30–8.
136. Franco L, Lourenco N, Graca M, Silva O, Campos P, von Dollinger C. Fatigue fracture of a nose landing gear in a military transport aircraft. Eng Fail Anal 2006;13:474

137. Gao, Y–K. An analysis of residual stresses fields caused by shot peening [Text]. / Y–K. Gao. // Metallurgical and materials transactions. – 2002. — V.33A.–№6.– P. 9–13.

138. Kurdelski Marcin, Leski Andrzej, Dragan Krzysztof. Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland. Fatigue life analysis of main landing gear pull–rod of the fighter jet aircraft. 28th International Congress of the Aeronautical Sciences. 2012

139. Lee HC, Hwang YH, Kim TG. Failure analysis of nose landing gear assembly. Eng Fail Anal 2003;10:77–84.

140. Meguid, S.A. Some factors in the shot–peening and peen–forming processes. [Text]. / S.A. Meguid, W. Johnson, S.T. Al–Hassani // 17th International Machine Tool Design Conference. – Birmingham. – 1976. – P. 653–659.

141. Niansheng X, Peidao Z, Chunhu T. Failure analysis and prevention of a brake nave on a landing gear. Eng Fail Anal 1996;3(3):211–8.

142. Nosov, N. V. Investigation of residual stresses during processing of GTE blades with microbeads / N. V. Nosov, Y. I. Kurguzov, D. A. Lyushnya // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 547–551.

143. Nosov, Nikolay V., Yuri I. Kurguzov, and Dmitry A. Lyushnya. “Investigation of Residual Stresses during Processing of GTE Blades with Microbeads.” Materials Science Forum. Trans Tech Publications, Ltd., July 6, 2021

144. Ossa EA. Failure analysis of a civil aircraft landing gear. Eng Fail Anal 2006;13: 1177–83.

145. Petit–Renaud, F. Optimization of the shot peening Parameters. [Text]./ F. Petit–Renaud // Proc. ICSP. – 2000. – P. 119–129.

146. Pope, J.A. Residual plastic strains produced by single and repeated spherical impact. [Text]. / J.A. Pope, A.K .Mohamed // Iron Steel Industry. –1955. – №7. – P.285–297.

147. Shiou, F.–J. Determination of Optimal Ball–Burnishing Parameters for Plastic Injection Moulding Steel / F.–J. Shiou, C.–H. Chen // International Journal Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 3. – P. 177–185.

148. Tao JX, Smith S, Duff A. The effect of overloading sequences on landing gear fatigue damage. *Int J Fatigue* 2009;31:1837–47.

149. UK Air Accidents Investigation Branch. Report on the accident to Boeing 777–236ER, G–YMMM, at London Heathrow Airport on 17 January 2008. Aircraft accident report 1/2010; 2010.

150. Wang, Cheng & Yongbin, Lai & Long, Wang & Chuanli, Wang. (2019). Dislocation–based study on the influences of shot peening on fatigue resistance. *Surface and Coatings Technology*.



УТВЕРЖДАЮ :  
 Проректор по УР  
 д.т.н., профессор  
 Юсупова О.В.

Акт

об использовании результатов научно-исследовательской работы в образовательной деятельности

Разработка Самарского государственного технического университета «Повышение эффективности процесса дробеструйной обработки деталей взлетно-посадочных устройств», выполненная аспирантом кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» Люшней Дмитрием Андреевичем, принята для использования в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» при изучении дисциплин «Основы технологии машиностроения» и «Прикладные задачи технологии машиностроения». Дисциплины «Научные основы технологии машиностроения» и «Методологии научных исследований», входящие в образовательную программу подготовки магистров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», профиль «Технология машиностроения», кафедра «Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГБОУ ВО СамГТУ.

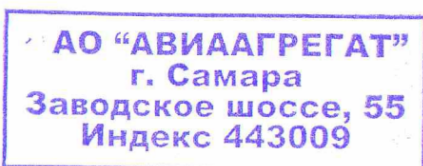
При подготовке лекционных курсов, практических и лабораторных работ, а также курсовому проектированию были использованы следующие материалы диссертации:

1. Объемная конечно-элементная модель высокоскоростной пневмодробеструйной обработки с учётом движения продольной подачи распыляющего сопла.
2. Имитационная модель для определения глубины распространения пластической деформации в поверхностном слое обрабатываемого материала на операциях высокоскоростной пневмодробеструйной обработки.
3. Расчетные зависимости шероховатости поверхности, остаточных напряжений, глубины и степени наклепа поверхностного слоя при высокоскоростном дробеструйном упрочнении.

СОГЛАСОВАНО:

И.о. зав кафедрой  
 «Технология машиностроения,  
 станки и инструменты»  
 к.т.н., доцент

Галлямов А.Р.



**Акт опытно-промышленной проверки**

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Люшни Дмитрия Андреевича прошли опытно-промышленную проверку (ОПП) на ОАО «Авиаагрегат» при пневмодробеструйной обработке деталей «Траверса №47601.4122.300.001».

Дробеструйная обработка осуществлялась в соответствии с инструкцией «ВИАМ 1039-74» в струйно-абразивной камере типа АКН-О-330-30 А5-Н с использованием следующих режимов:  $V = 90 \text{ м/с}$ , угол подачи частиц  $\alpha = 60^\circ$  и  $90^\circ$ , диаметр дроби  $d = 0.3 \text{ мм}$ , скорость возвратно поступательного движения  $V = 40 \dots 50 \text{ мм/мин}$ .

При упрочнении с заданными режимами были обеспечены следующие показатели качества поверхностного слоя:

Микротвердость  $H_V = 800 \dots 810 \text{ МПа}$ ;

Глубина упрочнения  $\Delta h = 100 \dots 120 \text{ мкм}$ ;

Максимальные значения остаточных напряжений составили:

$\sigma_{\text{max}} = 800 \text{ МПа}$  на глубине  $h = 80 \text{ мкм}$ ;

Шероховатость поверхности  $R_a = 0,8 - 1,1 \dots \text{ мкм}$ .

Время обработки,  $\text{м}^2$   $T_0 = 32 \text{ мин}$

**Выводы**

1. Опытно-промышленная проверка показала, что при высокоскоростной пневмодробеструйной обработки:  $V = 90 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $d = 0.3 \text{ мм}$ ,  $V_{\text{подачи}} = 40 - 50 \text{ мм/мин}$  время процесса упрочнения поверхности детали «Траверса №47601.4122.300.001» снизилось с  $T_0 = 44 \text{ мин}$  (заводской режим) до  $T_0 = 32 \text{ мин}$ .

2. Использование в производстве материалов кандидатской диссертации Люшни Д. А. на тему: «Повышение эффективности процесса дробеструйной обработки деталей взлетно-посадочных устройств» позволит повысить производительность процесса упрочнения детали «Траверса №47601.4122.300.001 в 1,2 ... 1,4.

3. Применение высокоскоростной пневмодробеструйной обработки детали «Траверса №47601.4122.300.001» обеспечивают все параметры качества поверхностного слоя, предусмотренные техническими требованиями на изготовление данной детали.

Главный технолог завода

Просоедов И.А.

Начальник отдела главного технолога

Масов В.Н.

Начальник бюро механической обработки ОГТ

к.т.н. Парфенов В.А.

Профессор кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты

Д.т.н. Носов Н.В.

