

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ) на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты»

Научный руководитель: **Носов Николай Васильевич**
доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

Официальные оппоненты: **Тамаркин Михаил Аркадьевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону

Швецов Алексей Николаевич
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства двигателей» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград

Защита диссертации состоится 25 декабря 2024 г., в 14:00 ч., на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.001.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д 32, главный учебный корпус, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»:
<https://ulstu.ru/upload/iblock/32a/yioqckuqfmzjoi3i2w245o1x3g1yhvw4/Dissertatsiya-Lyushnya-D.A..pdf>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 99.2.001.02,
доктор технических наук



А. Н. Унянин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы. Надёжность и долговечность крупногабаритных деталей из титановых сплавов в значительной степени зависят от параметров качества изготавливаемых деталей, в том числе их поверхностного слоя. Процесс пневмодробеструйного упрочнения (ПДУ) позволяет обрабатывать поверхности деталей сложной формы, стабилизировать шероховатость обработанных поверхностей, увеличивать микротвёрдость поверхностного слоя и сжимающие остаточные напряжения (ОН). На практике ПДУ крупногабаритных деталей сложной формы из титановых сплавов осуществляется на скоростях дроби 60 м/с, поэтому трудоёмкость процесса упрочнения достаточно высокая. Повышение производительности возможно двумя способами: изменение режимов упрочнения и увеличение количества обрабатывающих сопел. В производственных условиях количество работающих сопел – не более двух, поэтому повышение производительности процесса целесообразно осуществлять путем изменения режимных параметров, в частности, скорости дроби на пневмодробеструйной установке с ЧПУ. Опыт эксплуатации таких установок показал, что повышение скорости стальной дроби более 90 м/с приводит к расколу дроби на более мелкие фрагменты. При увеличении скорости дроби повышается энергетическая составляющая процесса и степень пластической деформации, что может привести к нарушению технических требований, предъявляемых к детали, и снижению эксплуатационной долговечности. Поэтому необходимы дополнительные исследования процесса ПДУ при высоких скоростях дроби, определение рациональных режимов ПДУ и исследования качества поверхностного слоя, соответствующие предельной скорости дроби 90 м/с.

Изучением процессов дробеструйной обработки занимались российские, советские и зарубежные учёные: 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 надёжность деталей.

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, микротвёрдостью поверхностного слоя, влиянием концентраторов напряжений на эксплуатационную долговечность деталей.

Решением контактных задач теории упругости деформируемых твёрдых тел занимались Д. А. Галин, Н. И. Мухелишвили, В. Прагер, М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат, которые разработали методики определения упругих деформаций при различных условиях взаимодействия.

В данных работах широко используются программные продукты, базирующиеся на методе конечно-элементного анализа, такие как ANSYS, LS-Dyna, Deform и т.д. В. П. Кузнецов в программе LS-Dyna смоделировал ранее указанный процесс в динамической постановке и определил пластические деформации и сдвиговые напряжения материала. 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 ПДУ крупногабаритных деталей из титановых сплавов за счет применения предельных режимов обработки.

Для решения данной задачи целесообразно разработать математические модели ПДУ, устанавливающие влияние режимов обработки на качество поверхностного слоя: остаточные напряжения, микротвердость и шероховатость поверхности деталей из титановых сплавов. Поэтому тема диссертационной работы, направленная на повышение эффективности процесса ПДУ, является **актуальной**.

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 поверхностей крупногабаритных деталей из титановых сплавов.

Предмет исследований. Исследование закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя деталей 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 напряженно-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 при предельных режимах обработки.
5. Регрессионные модели параметров напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки в зависимости от условий и режима ПДУ.

б. Методика исследования шероховатости поверхностей крупногабаритных деталей сложных пространственных форм с помощью оптико-электронного комплекса на рабочем месте и идентификации параметров структуры с параметрами шероховатости, полученных оптическим и профильным методами.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке имитационных моделей, учитывающих влияние условий и режима процесса 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 при ПДУ, режимы и условия ПДУ, обеспечивающие требуемые параметры качества поверхностей 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 за счет применения предлагаемых режимов в 1,2 – 1,4 раза по сравнению с заводской технологией. Результаты исследований внедрены 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 имитационного моделирования. Для построения электронных 3D-моделей использовалась САПР КОМПАС-3D, имитационное моделирование процесса производилось в программных комплексах RockyDEM и ANSYS. По результатам имитационного моделирования процесса ПДУ получены регрессионные модели. Разработана методика исследования параметров шероховатости поверхности оптико-электронным методом. 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 режимов и условий ПДУ на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя заготовки.

5. Регрессионные модели, описывающие влияние режимов и условий ПДУ (скорость дроби, скорость движения сопла, угол наклона сопла и т. д.) на остаточные напряжения, а также на значения упругих и пластических деформаций и глубину их залегания.

6. Методика исследования шероховатости поверхностей крупногабаритных деталей сложных пространственных форм с помощью оптико-электронного комплекса на рабочем месте и идентификации параметров шероховатости, полученных оптическим и профильным методами.

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

Степень достоверности результатов исследований

Достоверность изложенных в работе результатов обеспечивается обоснованным изучением достаточного объема научной литературы, корректностью поставленных задач, целесообразным использованием применяемых методик, что подтверждается согласованностью теоретических выводов и данных моделирования с результатами экспериментальной проверки, обоснованностью принятых допущений и ограничений в компьютерной моделях, использованием известных методов расчёта, применением сертифицированного программного комплекса ANSYS, адекватностью полученных эмпирических зависимостей, проверенных по критерию Фишера, хорошей сходимостью результатов численных и экспериментальных исследований между собой, а также 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 2021-2023 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности темы диссертационной работы, изложены цель и задачи исследований, её практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен подробный анализ выполненных ранее исследований в области физики процесса дробеструйного упрочнения, указаны основные подходы к оценке эффективности этого процесса. Установлено, что, несмотря на определенные успехи в разработке и практическом освоении методов ПДУ деталей из титановых сплавов, выбор режимов производится в большинстве случаев на основании экспериментальных данных. Известно, что производительность ПДУ деталей из титановых сплавов зависит от режимов и условий обработки. Правильный выбор режимов ПДУ связан с повышенными техническими требованиями на качество изготовления обрабатываемых деталей. Анализ технической литературы показал отсутствие обоснованных моделей оценки влияния режимов и условий ПДУ на производительность процесса, формирование требуемых остаточных напряжений, микротвердость и параметры шероховатости поверхности. Как правило, обоснованный выбор режимов ПДУ предусматривает построение математических 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 поверхности детали.

Во второй главе разработан комплекс имитационных моделей, предназначенных для исследования влияния потока сжатого воздуха с дробью при ПДУ на напряженно-деформированное состояние поверхности заготовки.

Первая имитационная модель процесса ПДУ предназначена для определения площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учетом образования застойных зон, в зависимости от скорости и диаметра дроби, физических свойств материала, расстояния до обрабатываемой поверхности. Граничные условия в виде преград, мест генерации и рассеивания дроби указываются на предварительно построенной модели, созданной в модуле DesignModeler. Готовые модели передавались в модуль Fluid Flow (Fluent) программного комплекса Ansys. Размер конечно-элементной сетки – 1,5 x 1,5 мм в виде правильных многоугольников (с целью уменьшения погрешности вычисления).

В качестве примера на рис. 1 показан фрагмент моделирования потока дроби с воздухом при скорости дроби $V = 60$ м/с, диаметре дроби $d = 0,3$ мм, расстоянии от сопла до обрабатываемой поверхности $L = 150$ мм и угле наклона сопла $\alpha = 60^\circ$. Видно, что при соприкосновении потока дроби (1) с поверхностью заготовки (3) в результате столкновения дроби, поступающей к поверхности заготовки (3) и отскочившей от нее, образуется застойная зона (2), размеры которой влияют на эффективность процесса ПДУ.

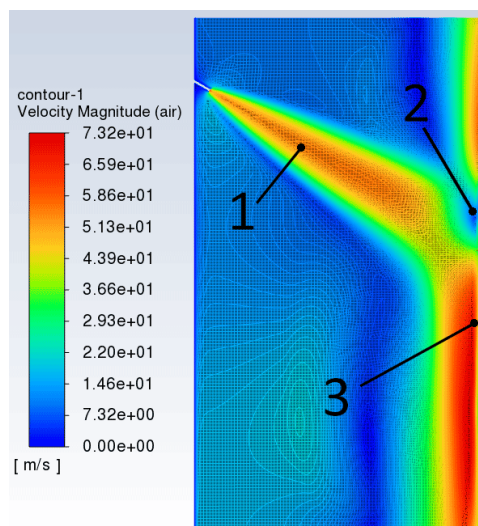


Рис. 1. Имитационная модель потока дроби, визуализированная цветовыми векторами:
1 – поток дроби; 2 – застойная зона; 3 – обрабатываемая поверхность

Разработанная имитационная модель позволяет описать особенности процесса движения потока дроби и перейти к моделированию точечного контакта дроби с поверхностью заготовки и исследованию влияния режимов ПДУ на напряженно-деформированное состояние в поверхностном слое заготовки.

Вторая имитационная модель процесса ПДУ предназначена для определения остаточных напряжений, упругих и пластических деформаций, а также глубины их залегания. Задаваемые параметры: скорость и диаметр дроби, угол наклона сопла, физические свойства материалов. Для построения 3D-моделей применялся модуль DesignModeler. Готовые модели передавались в модуль Explicit Dynamics программного комплекса Ansys. Для уменьшения времени расчета реализована осесимметричная модель, размер конечно-элементной сетки – 0,03 мм для контактной поверхности (0,1 мм для дроби) в виде треугольных элементов.

На рис. 2 приведена имитационная модель процесса точечного контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учетом накопленной пластической деформации.

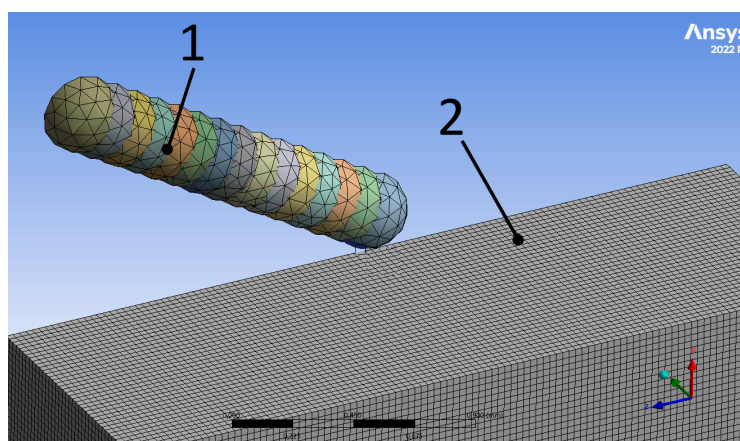


Рисунок 2 – Имитационная модель точечного контакта потока дроби с поверхностью заготовки, разбитая на конечные элементы: 1 – поток дроби, 2 – поверхность заготовки

Имитационная модель позволяет определить напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя заготовки при точечном воздействии дроби без учета скорости движения сопла при обработке потоком дроби.

Третья имитационная модель процесса ПДУ предназначена для определения напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации, в зависимости от скорости и диаметра дроби, угла наклона сопла, расстояния до поверхности заготовки. Для выбора рационального режима обработки разработана модель массивированного влияния ударного воздействия на обрабатываемую поверхность, основываясь на результатах первых двух имитационных моделей.

Для построения 3D-модели заготовки применялось ПО Компас-3D. Готовые модели передавались в сторонний модуль RockyDEM, синхронизированный с программным комплексом Ansys, размер конечно-элементной сетки в виде треугольных элементов – 0,5 мм, модель износа геометрической поверхности – Shear Work Proportionality (Archard`s Law). На рис. 3 представлен процесс воздействия потока дроби на обрабатываемую поверхность с учетом накопленной пластической деформации.

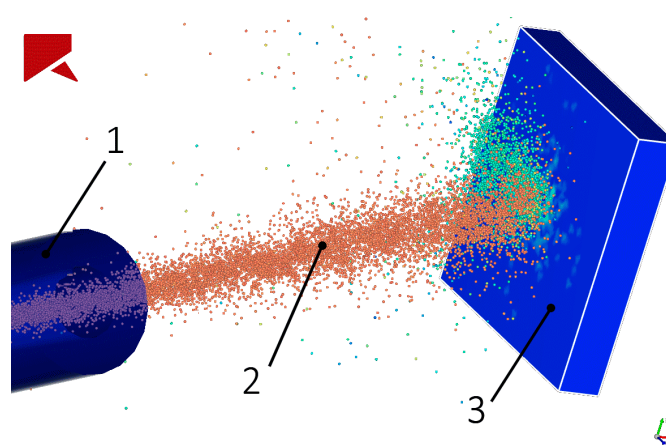


Рис. 3. Имитационная модель взаимодействия потока дроби с поверхностью заготовки:
1 – сопло; 2 – поток дроби; 3 – поверхность заготовки

Имитационная модель позволяет определить напряженно-деформированное состояние поверхности с учетом скорости движения сопла при воздействии потока дроби на обрабатываемую поверхность заготовки, а также описать процесс ПДУ с учетом факторов, оказывающих влияние на качество обработанной поверхности.

В третьей главе приведены результаты имитационного моделирования процесса ПДУ с использованием моделей, разработанных во второй главе.

Используя имитационную модель №1, были определены динамические параметры дроби в потоке воздуха в диапазоне угла наклона сопла $60 - 90^\circ$ – угол одностороннего расширения внешней границы струи α_1 , описывающий расширение обрабатывающего потока дроби и угол внутренней границы α_2 , который характеризует размер наиболее активной зоны влияния обрабатывающего потока на поверхность – ядро потока. На основе значений α_1 и α_2 были определены площадь контакта потока дроби с поверхностью заготовки и площадь застойной зоны при изменении угла наклона сопла в пределах $60 - 90^\circ$. На рис. 4 представлена модель расчета динамических параметров потока дроби при режиме обработки: $V = 60$ м/с, $L = 150$ мм, $d = 0,3$ мм, $\alpha = 60^\circ$. Результаты расчета площади застойной зоны приведены на рис. 5.

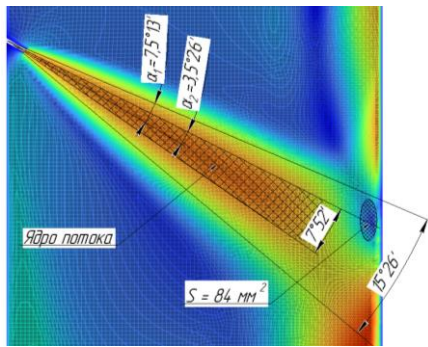


Рис. 4. Результаты расчета динамических параметров потока дроби (S – площадь застойной зоны)

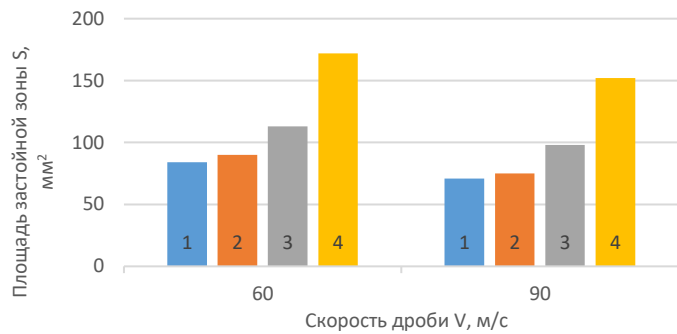


Рис. 5. Влияние скорости дроби на площадь застойной зоны:
 1 – $L = 150$ мм, $d = 0,3$ мм; 2 – $L = 200$ мм, $d = 0,3$ мм;
 3 – $L = 150$ мм, $d = 1,4$ мм; 4 – $L = 200$ мм, $d = 1,4$ мм

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. Увеличение 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 раза. Исследования показали, что застойная зона существует при любых режимах ПДУ. Минимальные ее значения получены при $V = 90$ м/с, $L = 150$ мм и $\alpha = 60^\circ$. Учитывая то, что уменьшение расстояния до поверхности снижает пятно контакта, в дальнейших расчетах принято значение $L = 180$ мм.

Результаты исследований, полученные с использованием имитационной модели №2, влияния процесса ПДУ на величину остаточных напряжений, упругих и пластических деформаций и глубину их залегания при точечном взаимодействии дроби с поверхностью заготовки, представлены на рис. 6 – 9.

Установлено, что повышение скорости дроби до 90 м/с приводит к снижению количества ударов дроби, необходимых для насыщения поверхностного слоя пластическими деформациями.

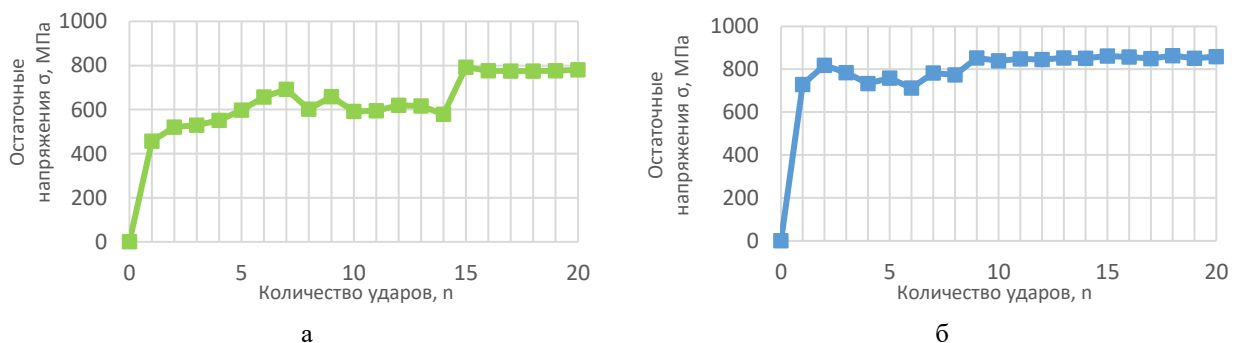


Рис. 6. Зависимость величины остаточных напряжений от количества ударов дроби:
 а – $V = 60$ м/с; б – $V = 90$ м/с; $\alpha = 90^\circ$, $d = 0,3$ мм

Как видно из рис. 6, при скорости дроби $V = 60$ м/с насыщение поверхности пластическими деформациями (до момента постоянства напряжений) наступает после 10 – 15 ударов дроби, а при скорости $V = 90$ м/с – после 6 – 8 ударов при том же уровне насыщения.

На рис. 7 показаны результаты моделирования остаточных напряжений в зависимости от скорости и угла наклона сопла. Установлено, что повышение скорости с 60 до 90 м/с увеличивает остаточные напряжения с 870 до 940 МПа, а изменение угла наклона сопла повышает остаточные напряжения на 2 – 5 %.

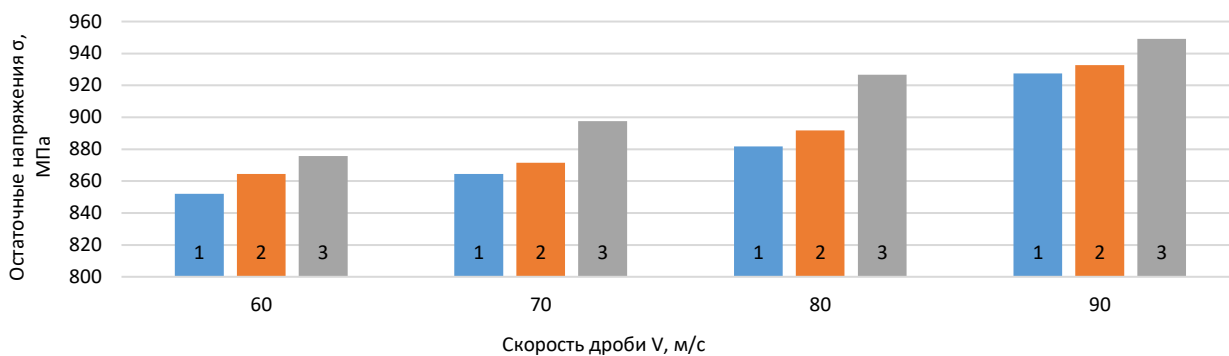


Рис. 7. Влияние скорости дроби V на величину остаточных напряжений σ при различных углах наклона сопла α : 1 – $\alpha = 30^\circ$; 2 – $\alpha = 60^\circ$; 3 – $\alpha = 90^\circ$; $L = 150$ мм, $d = 0,3$ мм

Исследования показали, что большое влияние на глубину залегания остаточных напряжений h_σ оказывают скорость и угол наклона сопла (рис. 8). Из приведенных данных видно, что увеличение скорости дроби с 60 до 90 м/с повышает величину h_σ на 40 – 60 %, а увеличение угла наклона сопла с 30 до 90° – в 2 – 4 раза.

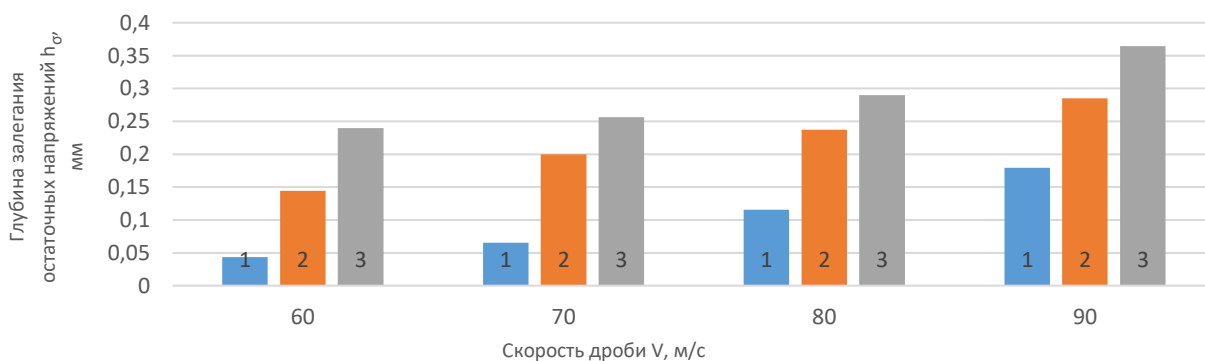


Рис. 8. Влияние скорости дроби V на глубину залегания остаточных напряжений h_σ при различных углах наклона сопла α : 1 – $\alpha = 30^\circ$; 2 – $\alpha = 60^\circ$; 3 – $\alpha = 90^\circ$; $L = 150$ мм, $d = 0,3$ мм

На рис. 9 приведены результаты влияния скорости дроби на величину пластических деформаций $\epsilon_{пл}$. Данный параметр зависит от скорости перемещения сопла и позволяет определить степень перекрытия ударов дробью в пределах площади пятна контакта. При увеличении скорости дроби с 60 до 90 м/с величина $\epsilon_{пл}$ повышается в 3,5 – 4,0 раза, а увеличение угла наклона сопла с 30 до 90° повышает величину $\epsilon_{пл}$ на 30 – 50 %.

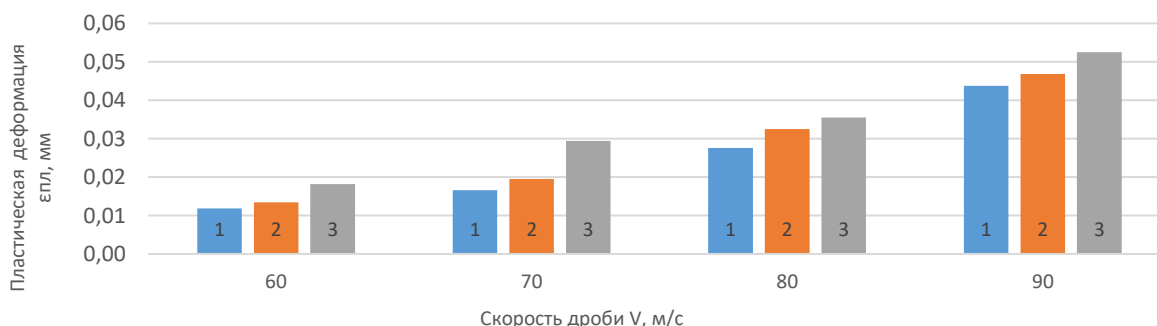


Рис. 9. Влияние скорости дроби V на величину пластических деформаций $\epsilon_{пл}$ при различных углах наклона сопла α : 1 – $\alpha = 30^\circ$; 2 – $\alpha = 60^\circ$; 3 – $\alpha = 90^\circ$; $L = 150$ мм, $d = 0,3$ мм

Анализ полученных результатов позволяет отметить следующее:

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

2. Повышение скорости дроби V с 60 до 90 м/с при постоянном угле наклона сопла вызывает увеличение величины остаточных напряжений и глубины их залегания на 9 – 11 % и 40 – 60 % соответственно, а величины пластических деформаций – в 3,5 – 4,0 раза.

3. Изменение угла наклона сопла с 30 до 90° ведет к росту величины пластических деформаций на 30 – 50 %.

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

Имитационная модель №3 позволила определить напряженно-деформированное состояние поверхности с учетом движения сопла и воздействия потока дроби на обрабатываемую поверхность заготовки, а также описать процесс ПДУ, учитывая все факторы, оказывающие воздействие на качество обработки.

На рис. 10 и 11 показано влияние скорости движения сопла на величину остаточных напряжений и пластических деформаций при воздействии потока дроби на поверхность заготовки при $\alpha = 60^\circ$, $d = 0,3$ мм.

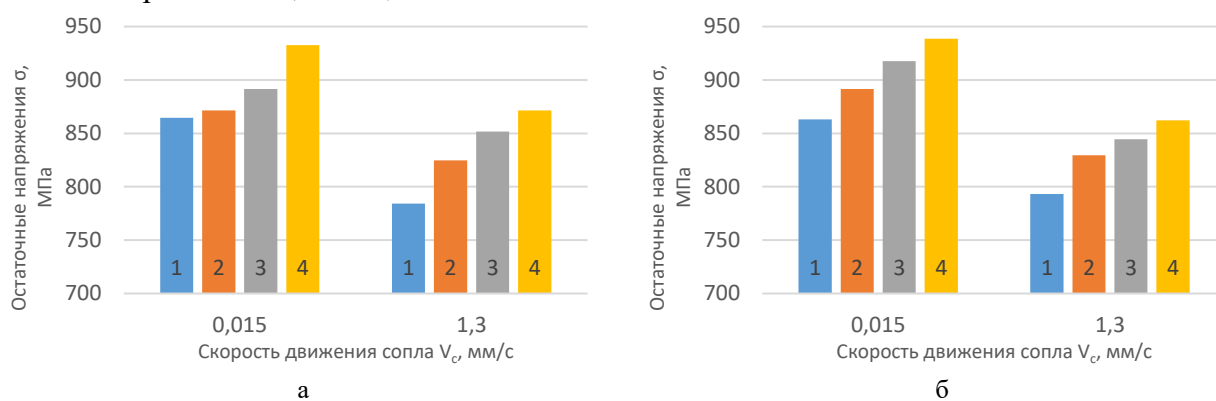


Рис. 10. Влияние скорости движения сопла V_c на величину остаточных напряжений σ при различных скоростях дроби V : а – $L = 150$ мм; б – $L = 200$ мм; 1 – $V = 60$ м/с; 2 – $V = 70$ м/с; 3 – $V = 80$ м/с; 4 – $V = 90$ м/с;

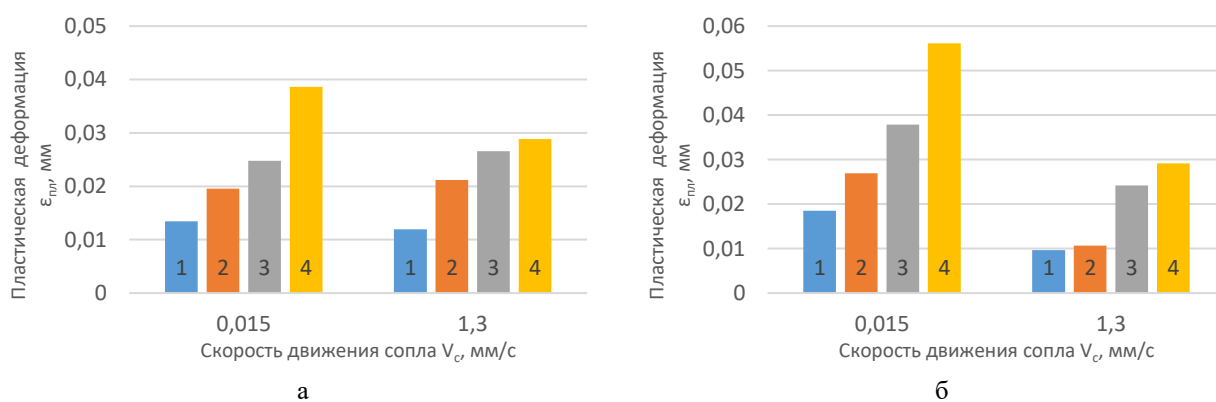


Рис. 11. Влияние скорости движения сопла V_c на величину пластических деформаций $\epsilon_{пл}$ при различных скоростях дроби V : а – $L = 150$ мм; б – $L = 200$ мм; 1 – $V = 60$ м/с; 2 – $V = 70$ м/с; 3 – $V = 80$ м/с; 4 – $V = 90$ м/с;

Анализ полученных результатов позволяет отметить следующее:

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

2. 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.

Исследования показали, что повышение скорости движения сопла способствует снижению интенсивности насыщения поверхности пластической деформацией, которое компенсируется повышением скорости дробы для обеспечения требуемого уровня остаточных напряжений и пластических деформаций.

На основании результатов имитационного моделирования были получены регрессионные модели параметров напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя обрабатываемой заготовки (табл. 1).

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

Таблица 1

Регрессионные модели параметров напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя

Параметр	Модель
Остаточные напряжения σ , МПа	$\Delta\sigma = 672,727 + 2,4946V + 0,332\alpha + 77,01d - 55,44V_c$
Глубина залегания остаточных напряжений h_σ , мм	$\Delta h_\sigma = 0,00434V + 0,0034\alpha + 0,283d - 0,023V_c - 0,404$
Пластические деформации $\epsilon_{пл}$, мм	$\Delta\epsilon_{пл} = 0,001244V - 0,00021\alpha + 0,087d - 0,01267V_c - 0,0977$
Глубина залегания пластических деформаций $h_{\epsilon_{пл}}$, мм	$\Delta h_{\epsilon_{пл}} = 0,00372V + 0,00428\alpha + 0,437d - 0,0701V_c - 0,4559$
Упругая деформация ϵ_y , мм	$\Delta\epsilon_y = 2,47e^{-3} + 8,3e^{-5}V + 3,48e^{-5}\alpha + 3,91e^{-4}d - 1,06e^{-3}V_c$
Глубина залегания упругих деформаций h_{ϵ_y} , мм	$\Delta h_{\epsilon_y} = 2,66e^{-3}V + 2,72e^{-3}\alpha + 2,33e^{-1}d - 4,04e^{-2}V_c - 0,2109$
Примечание: размерности – V , м/с; α , град; d , мм; V_c , мм/с	

На основе анализа регрессионных моделей и результатов имитационного моделирования определены режимы процесса ПДУ, обеспечивающие параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя деталей, соответствующие техническим условиям на их изготовление при повышении производительности процесса ПДУ.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния режимов ПДУ на формирование остаточных напряжений, пластических деформаций и микротвердости в поверхностном слое. Экспериментальные исследования проводили при следующих параметрах процесса ПДУ: скорость дробы $V = 60$ и 90 м/с, угол наклона сопла α изменяли от 60 до 90° , диаметр дробы $d = 0,3$ мм, расстояние до поверхности заготовки $L = 180$ мм, скорость движения сопла $V_c = 0,6 - 0,8$ мм/с.

Исследованиями установлено, что при повышении скорости дробы V с 60 до 90 м/с при диаметре дробы $0,3$ мм остаточные напряжения увеличиваются с $750 - 780$ МПа

до 800 – 810 МПа. Колебания остаточных напряжений связаны с изменением угла наклона сопла и не превышают 5 – 7 %.

На рис. 12 и 13 показано сравнение результатов моделирования и эксперимента по определению остаточных напряжений и пластических деформаций при различных скоростях движения сопла и скорости дробы.

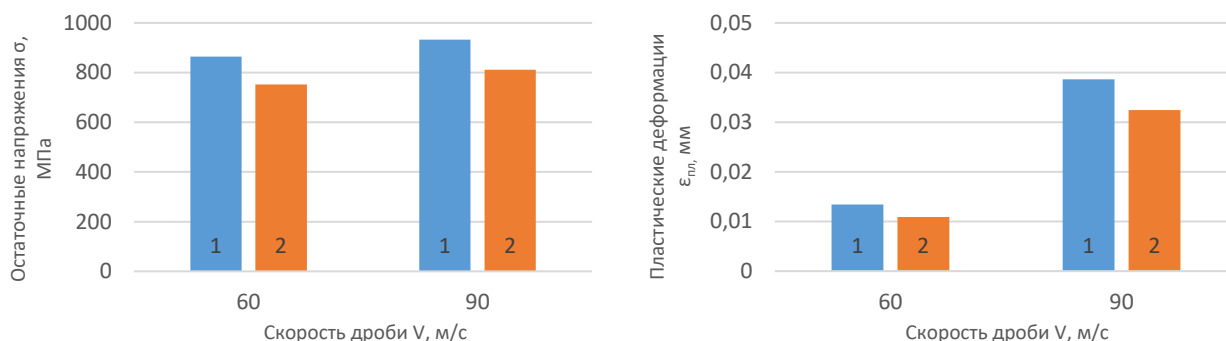


Рис. 12. Влияние скорости дробы V на величину остаточных напряжений σ и пластических деформаций $\epsilon_{пл}$ при скорости движения сопла $V_c = 0,015$ мм/с:
1 – моделирование; 2 – эксперимент

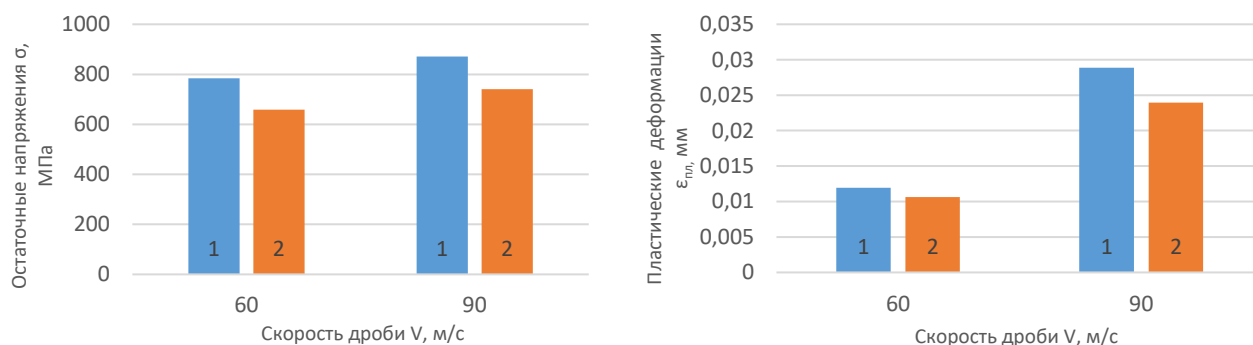


Рис. 13. Влияние скорости дробы V на величину остаточных напряжений σ и пластических деформаций $\epsilon_{пл}$ при скорости движения сопла $V_c = 1,3$ мм/с:
1 – моделирование; 2 – эксперимент

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.

Была исследована глубина залегания остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя по методу профессора Н. Н. Давиденкова. Проведено травление плоских образцов-свидетелей из титанового сплава ВТ22 толщиной 2,4 мм, длиной 50 мм, шириной 18,0 мм. Использовалась автоматизированная установка АСБ-1, разработанная профессором С. А. Букатым.

Результаты экспериментальных исследований сравнивались с результатами имитационного моделирования с использованием имитационной модели №2 (рис. 14).

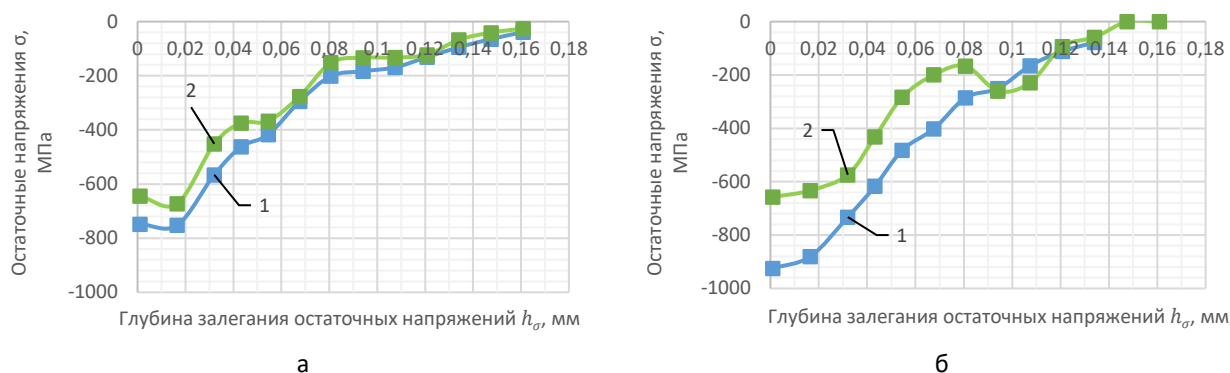


Рис. 14. Влияние скорости дробы V на глубину залегания остаточных напряжений h_{σ} :
 а – $V = 60$ м/с, б – $V = 90$ м/с ; 1 – моделирование; 2 – эксперимент

Анализ полученных результатов показал, что различие экспериментальных и расчетных значений не превышает 30 % при скорости $V = 60$ м/с и 50 % при $V = 90$ м/с. Полученные различия связаны с тем, что при имитационном моделировании не учитываются случайные кривые распределения потока дробы и наследственность при выполнении технологических операций.

Исследование влияния скорости дробы на распределение микротвёрдости по глубине поверхностного слоя образцов из титанового сплава проводили с использованием метода косых шлифов. Установлено, что повышение скорости дробы при ПДУ с 60 до 90 м/с увеличивает степень пластической деформации с 30 до 36 %.

В пятой главе приведены исследования микрогеометрии поверхности после ПДУ (по ГОСТ Р ИСО 4287-2014). Исследования шероховатости поверхности проводилось двумя способами. В первом случае шероховатость поверхности определялась на образцах-свидетелях с использованием автоматизированного профилографа-профилометра «Абрис ПМ7» при следующих режимах обработки: диаметр дробы $d = 0,3$ мм, угол наклона сопла $\alpha = 60 - 90^\circ$, расстояние до обрабатываемой поверхности $L = 180$ мм, скорость движения сопла $V_c = 0,7$ мм/с. Исследования показали, что величина шероховатости зависит от скорости и диаметра дробы, расстояния до поверхности, скорости движения и угла наклона сопла. Установлено, что после ПДУ со скоростью $V = 60$ м/с параметр Ra составил 1,45 – 2,7 мкм, а при $V = 90$ м/с – 0,9 – 1,7 мкм, т. е. уменьшился на 20 – 50 %.

Во втором случае исследовали шероховатость поверхности на деталях, обработанных дробью, с помощью переносного оптико-электронного комплекса. Оптико-электронный метод позволяет определять параметры шероховатости поверхности на основе цифровой фотографии по средней амплитуде (A_{cp}) и среднему шагу (T_{cp}) автокорреляционной функции.

Учитывая, что наибольшее значение на шероховатость поверхности оказывает не амплитуда A_{cp} , а средний шаг T_{cp} автокорреляционной функции, для определения шероховатости поверхности Ra получена формула

$$Ra = \frac{T_{cp}^2}{32 \cdot r},$$

где r - радиус дробы, мм.

Сравнительные данные по шероховатости поверхности, измеренные оптическим и профильным методами в зависимости от скорости движения сопла, приведены в табл. 2.

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

Скорость движения сопла V_c , мм/с	Оптический метод			Профильный метод
	T_{cp} , пиксель	T_{cp} , мкм	Ra , мкм	Ra , мкм
Скорость потока дроби $V_{др} = 60$ 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 $V_{др} = 90$ 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 дроби с 60 до 90 м/с величина Ra повышается на 15 – 20 %. При этом существенное влияние на величину шероховатости оказывает скорость движения сопла, с увеличением которой в 2 раза величина Ra повышается в 1,5 раза, однако полученные значения не превосходят величину допустимой шероховатости. Полученные результаты объясняются большим расходом дроби, проходящей через сопло при скорости 90 м/с, который в 1,7 раза выше, чем при скорости 60 м/с. Сравнение оптического и профильного методов показало, что значение величины Ra , полученное оптическим методом, ниже на 30 – 40 %. Это связано с тем, что профильный метод измеряет шероховатость только в одном направлении.

Опытно-промышленные испытания, проведенные в производственных условиях ОАО «Авиаагрегат» (г. Самара), подтвердили эффективность предлагаемой технологии ПДУ. Испытания проводились при ПДУ деталей «Траверса №47601.4122.300.001».

Дробеструйное упрочнение осуществлялось в соответствии с инструкцией «ВИАМ 1039-74» в струйно-абразивной камере типа АКН-О-330-30 А5-Н. Условия упрочнения: давление воздуха – $1,8 \pm 0,2$ бар, $L = 170 - 190$ мм, $\alpha = 60 - 90^\circ$, $V = 90$ м/с, $V_c = 0,8$ мм/с. В табл. 3 приведен сравнительный анализ производственной и предлагаемой технологий.

Сравнительные технико-экономические параметры ПДУ

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

Параметры обработки	Производственная технология	Предлагаемая технология
Угол между направлением сопла и поверхностью детали, градусов	60 – 90°	
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 (55-62HRC)	
Расход дроби на каждое сопло, кг/мин	2,5 ± 0,25	3,5 ± 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 м ² , мин	69	57
Экономический эффект на одну деталь, руб	-	14329

Экономический эффект при ПДУ детали «Траверса» составил на 1 деталь 14329 руб. за счет увеличения скорости дроби, скорости движения сопла, уменьшения цикла обработки на станке с ЧПУ и снижения расхода дроби.

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 мм², а при $V = 90$ м/с – 44 мм², 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 воздействии дроби. Установлено, что повышение скорости дроби диаметром 0,3 мм с 60 до 90 м/с увеличивает величину пластических деформаций в 3,5 – 4,0 раза, а остаточных напряжений – на 7 – 9 %. Выявлено количество ударов до образования предельного уровня пластических деформаций: при скорости 60 м/с – 10 – 15 ударов дроби, при скорости 90 м/с – 8 – 10 ударов.

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 процесса ПДУ на величину остаточных напряжений, упругих и пластических деформаций, а также глубину их залегания. На основании результатов имитационного моделирования были получены регрессионные модели параметров напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя обрабатываемой заготовки. Установлено, что наибольшее влияние на величину остаточных напряжений оказывают скорость и диаметр дроби, а также скорость движения сопла. Полученные регрессионные модели позволили спрогнозировать основные направления совершенствовании 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 дроби при ПДУ до 90 м/с повышает остаточные напряжения на 7 – 9 %, глубину залегания остаточных напряжений на 40 – 60 %, величину пластических деформаций – в 3,5 – 4,0 раза.

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

7. Разработана методика определения шероховатости поверхности крупногабаритных деталей, связывающая профильные параметры шероховатости поверхности с оптическими параметрами структуры поверхности в зависимости от режимов ПДУ. Установлено, что повышение скорости дроби с 60 до 90 м/с уменьшает параметр Ra 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» составил на одну деталь 14329 руб. за счет увеличения скорости дроби, скорости движения сопла, уменьшения цикла обработки на станке с ЧПУ и снижения расхода дроби.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. 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.
2. 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

Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Scopus

3. 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.

Публикации в других изданиях

4. Люшня, Д. А. Исследование остаточных напряжений в лопатках ГТД при упрочнении микрошариками / Д. А. Люшня // 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.