

Председателю объединенного диссертационного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 99.2.001.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Гольяттинский государственный университет», доктору технических наук, профессору Табакову В. П.  
432027, г. Ульяновск Северный Венец ул., д. 32

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Тмаркина Михаила Аркадьевича

на диссертационную работу Люшни Дмитрия Андреевича на тему «Повышение эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счет применения рациональных условий и режимов обработки», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

### **Общие сведения о диссертации**

Диссертационная работа Люшни Дмитрия Андреевича направлена на решение вопросов повышения эффективности процесса пневмодробеструйного упрочнения (ПДУ) крупногабаритных деталей из титановых сплавов. Проблема повышения производительности ПДУ и обеспечение качества поверхностей деталей связана с обоснованием выбора рациональных режимов обработки, на основе компьютерного имитационного моделирования процесса ПДУ. На производстве при упрочнении деталей взлетно-посадочных устройств учитываются типовые технологические процессы, которые дают приемлемые решения в условиях единичного и мелкосерийного производства, а режимы обработки определяются через нормативно-справочную литературу. Известно, что при типизации технологических процессов в качестве информационной основы процесса упрочнения применяются усредненные режимы упрочнения, особенно при обработке высокопрочных титановых сплавов. При обработке высокопрочных титановых сплавов, как правило, применяются отраслевые стандарты, характерные для данного производства. В работе Люшни Д. А. определению рациональных режимов упрочнения предшествует решение теоретической задачи по имитационному моделированию процесса ПДУ с учетом особенностей взаимодействия потока дроби с поверхностью.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка, включающего 150 наименований и двух приложений. Основной материал работы изложен на 160 страницах машинописного текста, содержащего 93 рисунков и 20 таблиц.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, входящих в действующий «Перечень ВАК» и 1 статья в

изданиях, индексируемых в МБД SCOPUS и WoS. Таким образом, материалы и результаты исследования опубликованы в 3 работах в рецензируемых и приравненных к ним изданиях, что соответствует требованиям п.п. 11...13 «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции от 25.01.2024 г. Диссертация прошла апробацию на научно-технических и научно-практических конференциях, тематика которых совпадает с основным направлением исследований соискателя.

Содержание автореферата соответствует тексту диссертации и адекватно отражает полученные в ходе исследования результаты.

#### **Актуальность темы**

В рассматриваемой работе предлагается решение проблемы пневмодробеструйного упрочнения крупногабаритных деталей из высокопрочных титановых сплавов на основе имитационного моделирования процесса упрочнения. Как правило, при типизации технологических процессов упрочнения режимы обработки выбираются из справочных данных, которые обеспечивают требуемые показатели качества поверхности, при этом не обращалось внимание на производительность процесса и себестоимость процесса упрочнения. В тоже время известно, что технологические возможности применяемого оборудования с ЧПУ, на которых производилось упрочнение крупногабаритных деталей, недостаточно использованы. Поэтому для более эффективного использования станков с ЧПУ необходимо разработать имитационную компьютерную модель процесса ПДУ, которое позволит определить рациональные режимы обработки и обеспечить требуемое качество поверхности крупногабаритных деталей из высокопрочных титановых сплавов. Следует отметить, анализ исследований ряда технологических научных школ показал, что при проектировании технологии пневмодробеструйного упрочнения не учитывались особенности движения потока воздуха с дробью в процессе ПДУ и его влияния на эффективность процесса упрочнения. Таким образом, рассмотренные выше проблемы и способы ее решения определяют актуальность рассматриваемого диссертационного исследования для современного технологического производства.

#### **Обоснованность и достижимость цели и задач исследования**

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

При выполнении исследований автор поставил и решил следующие **задачи**: разработал имитационную модель ПДУ для оценки площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учетом образования застойных зон; разработал имитационные модели ПДУ для оценки напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки при точечном воз-

действии дроби с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации; провел численное моделирование влияния процесса ПДУ на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя заготовки; на основе результатов численного моделирования разработал регрессионные модели влияния режимов ПДУ на параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки; провел экспериментальные исследования влияния ПДУ на напряженно-деформированное состояние и микротвердость поверхностного слоя заготовки; разработал методику и провел исследования шероховатости поверхности крупногабаритных деталей сложных пространственных форм; провел опытно-промышленную проверку процесса ПДУ в условиях действующего производства.

Сформулированные задачи адекватно отражают содержание исследования и направлены на достижение поставленной цели.

Личный вклад соискателя в решение поставленных задач достаточно четко прослеживается в публикациях по теме исследования.

Выдвинутые автором научные положения и выводы обоснованы использованием известных научных положений теории упрочнения, технологии машиностроения и методов математического моделирования. Достоверность экспериментально полученных результатов подтверждается использованием методов статистического анализа.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

При проведении исследований автор выполнил анализ основных положений работ исследователей научных технологических школ – Волгоградской, Ростовской, Иркутской, Самарской, Рыбинской, и других. Вполне корректно использует научные методы обоснования полученных результатов, в частности, методы математической статистики.

**Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации,** подтверждается корректным использованием перечисленных выше теорий, методов математического моделирования и математической статистики, применением в исследованиях аттестованных приборов и средств измерительной техники, данными экспериментальной проверки полученных выводов.

Анализ выводов по главам и общего заключения по работе позволяет утверждать, что поставленные задачи решены и цель исследования достигнута.

#### **Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований автором установлена взаимосвязь режимов и условий ПДУ с качеством обрабатываемой поверхности: остаточными напряжениями, степенью пластической деформации, микрогеометрией поверхности. Установлено также влияние режимов обработки на производительность ПДУ и себестоимость операции упрочнения крупногабаритных деталей из титановых сплавов. Исследования

показали, что повышение скорости дроби с 60 м/с до 90 м/с повысило производительность процесса в 1,2 – 1,4 раза. Результаты исследования оформлены в виде расчетных таблиц, графиков и диаграмм, которые достаточно корректно оценивают результаты сравнения теоретических и экспериментальных исследований.

Полученные результаты можно расценивать как новые научные знания, вносящие вклад в технологию машиностроения.

В частности, **новые научные результаты** работы заключаются в решении актуальной научно-производственной задачи совершенствования процесса пневмодробеструйной обработки деталей из титановых сплавов:

1. Показано, что имитационное моделирование процесса ПДУ позволило определить площадь застойной зоны и эффективную площадь контакта потока дроби с поверхностью заготовки в зависимости от режимов и условий упрочнения; накопленную деформацию в поверхностном слое заготовки при точечном воздействии дроби для определения остаточных напряжений; напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации.

2. Экспериментально доказано и теоретически обосновано с помощью регрессионной модели, что основное влияние на остаточные напряжения оказывают скорость дроби, диаметр дроби, скорость движения сопла и угол наклона сопла к поверхности заготовки.

3. Разработана методика исследования шероховатости поверхности крупногабаритных деталей сложных пространственных форм и идентификации параметров структуры с параметрами шероховатости, полученных оптическим и профильным методами.

**Практическая ценность** работы заключается в следующем:

1. Разработаны и научно обоснованы рекомендации для определения рациональных режимов и условий ПДУ, обеспечивающих требуемые параметры качества поверхностей деталей.

2. Разработан оптико-электронный комплекс по измерению шероховатости на поверхностях крупногабаритных деталей сложных пространственных форм на рабочем месте.

3. Проведена опытно-промышленная проверка разработанной технологии в производственных условиях ОАО «Авиаагрегат» (г. Самара), которая подтвердила повышение производительности ПДУ деталей из титановых сплавов, за счет применения предлагаемых режимов в 1,2 – 1,4 раза по сравнению с заводской технологией. Экономический эффект при ПДУ детали «Траверса» по разработанной технологии упрочнения составил на 1 деталь 14324 руб за счет увеличения скорости дроби, скорости движения сопла, уменьшения цикла обработки на станке с ЧПУ и снижения расхода дроби.

## **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Предложенные и обоснованные автором технико-технологические решения могут быть рекомендованы для промышленного применения при упрочнении крупногабаритных деталей из высокопрочных титановых сплавов на предприятиях авиационной промышленности.

## **Оценка содержания диссертации и ее завершенности**

**Введение** посвящено обоснованию актуальности темы диссертации по проблеме упрочнения крупногабаритных деталей из высокопрочных титановых сплавов в части обоснованного выбора рациональных режимов пневмодробеструйной обработки, обеспечивающих требуемое качество обработанных изделий. Следует отметить грамотные, с позиций методологии научных исследований, формулировки элементов «паспорта» научного исследования.

В **первой главе** на основе аналитического обзора результатов исследований в области упрочняющих технологий, проведенных ранее и проводимых в настоящее время в ведущих отечественных и зарубежных научных школах, автор систематизировал основные подходы к обоснованию выбора рациональных режимов обработки в зависимости от требуемого качества поверхности деталей. Приведены материалы исследования изучаемой проблемы. Обоснована перспективность предлагаемых в работе научно-технических решений в плане повышения производительности окончательной обработки деталей из высокопрочных титановых сплавов. По результатам систематизации сформулированы основные направления управления качеством поверхности и напряженно-деформированным состоянием поверхностного слоя, обоснована необходимость имитационного моделирования процесса пневмодробеструйного упрочнения деталей из высокопрочных титановых сплавов с учета изменения физико-механических свойств в процессе упрочнения. На основе выполненного анализа сформулированы цель и задачи исследования, обоснованы применяемые методы исследования.

Во **второй главе** приведены результаты построения имитационной модели ПДУ, которые позволили определить площадь застойной зоны и эффективную площадь контакта потока дроби с поверхностью заготовки в зависимости от режимов и условий упрочнения; накопленную деформацию в поверхностном слое заготовки при точечном воздействии дроби для определения остаточных напряжений; напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя заготовок, с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации.

В **третьей главе** описаны результаты теоретических исследований разработанных имитационных моделей. Имитационная модель №1 позволила разделить поток дроби на две области и определить динамические параметры потока дроби при различных углах наклона сопла (60 – 90°). При этом установлено, что угол одностороннего расширения внешней границы струи  $\alpha_1$  практически не оказывает влияния на эффективность ПДУ, а угол внутренней границы (ядро

потока)  $\alpha_2$  формирует эффективную площадь контакта потока дроби с поверхностью заготовки. Теоретические исследования позволили выделить в зоне контакта застойную зону потока (зона, в которой скорость дроби практически равна нулю). Наличие застойной зоны, снижает эффективность упрочнения, поэтому в работе исследовалось влияние режимов и условий упрочнения на площадь застойной зоны, установлено, что увеличение скорости дроби (диаметр дроби и  $d = 0,3$  мм с 60 м/с до 90 м/с уменьшает площадь застойной зоны на 10...15 % при  $L = 150$  мм и на 50...55 % при  $L = 200$  мм, т.е. застойная зона существует при любых режимах ПДУ. Установлено, что площадью застойной зоны можно управлять за счет изменения угла наклона сопла и скорости дроби или применением нескольких сопел.

Результаты исследований имитационной модели №2 показали, что повышение скорости дроби с 60 м/с до 90 м/с приводит к снижению количества ударов, необходимых для насыщения поверхностного слоя предельными пластическими деформациями с 12-15 ударов при скорости дроби 60 м/с до 6-8 ударов при 90 м/с. Таким образом, увеличение скорости дроби до 90 м/с и  $\alpha = 60...90^\circ$  повышает интенсивность насыщения поверхности пластической деформацией с обеспечением требуемого напряженно-деформированного состояния в более короткие сроки.

Имитационная модель №3 позволила определить напряженно-деформированное состояние поверхности с учетом скорости движения сопла и воздействия потока дроби на обрабатываемую поверхность заготовки, а также описать процесс ПДУ с учетом всех факторов, оказывающие влияние на качество обработки. Установлено, что при увеличении скорости движения сопла до  $V_c = 1,3$  мм/с величина максимальных остаточных напряжений, независимо от расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности, снижается на 7...12 %, а величина пластических деформаций на 12...60 %.

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

**В четвертой главе приведены** результаты экспериментальных исследований влияния режимов ПДУ на формирование остаточных напряжений и микротвердости в поверхностном слое. Эксперименты проводились на образцах-свидетелях из титанового сплава ВТ22, которые обрабатывались в струйно-абразивной камере типа АКН-О-330-30 А5-Н с режимами: скорость дроби  $V = 60$  м/с и 90 м/с, угол наклона потока дроби  $\alpha$  от  $60^\circ$  до  $90^\circ$ , диаметр дроби  $d = 0,3$  мм, расстояние до поверхности заготовки  $L = 180$  мм, скорость движения сопла  $V_c = 0,6 - 0,8$  мм/с. Анализ полученных результатов показал, что повышение скорости дроби  $V$  с 60 до 90 м/с при

постоянном угле подачи дроби вызывает повышение величины максимальных остаточных напряжений и глубины их залегания на 7...9 %.

Исследование влияния скорости дроби на распределение микротвёрдости по глубине поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТ22 показали, что увеличение скорости дроби с 60 до 90 м/с практически не влияет на величину микротвёрдости и глубину упрочненного слоя и находится в пределах ошибки (микротвёрдость - 4 %, глубина упрочненного слоя - 5 %).

**В пятой главе** приведены исследования микрогеометрии поверхности после ПДУ (по ГОСТ Р ИСО 4287-2014). Исследования шероховатости поверхности проводилось на образцах-свидетелях с использованием автоматизированного профилографа-профилометра «Абрис ПМ7» при следующих режимах обработки: диаметр дроби  $d = 0,3$  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  $Ra$  после ПДУ со скоростью  $V = 90$  м/с параметр  $Ra = 1,45 - 2,7$  мкм, а при  $V = 60$  м/с -  $Ra = 0,9 - 1,7$  мкм, т.е. увеличилась на 20...50 %. При допустимой шероховатость поверхности при допустимой  $Ra = 1,6 ... 3,0$  мкм.

Кроме этого, исследовали шероховатость поверхности на поверхности детали «Траверса», обработанных дробью, с помощью переносного оптико-электронного комплекса. Оптико-электронный метод позволяет связать параметр шероховатости поверхности  $Ra$  с параметрами автокорреляционной функции поверхности: средней амплитудой ( $A_{cp}$ ) и средним шагом ( $T_{cp}$ ) автокорреляционной функции. Сравнение оптического и профильного методов показало, что значение величины  $Ra$ , полученное оптическим методом, ниже на 30...40 %. Это связано с тем, что объем обработанных профилей при оптическом методе измерения больше, чем при профильном методе в сотни раз.

**В 6 главе** рассмотрена эффективность предлагаемой технологии ПДУ, которая подтверждена опытно-промышленными испытаниями в условиях предприятия ОАО «Авиаагрегат» (г. Самара). Испытания проводились при ПДУ детали «Траверса №47601.4122.300.001».

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 1 деталь 14324 руб за счет увеличения скорости дроби, скорости движения сопла, уменьшения цикла обработки на станке с ЧПУ и снижения расхода дроби.

#### **Достоверность и обоснованность основных результатов и выводов.**

- первый вывод обоснован, достоверность подтверждается материалами исследований, описанными в гл. 2 диссертации, содержит признаки научной новизны по п. 3 паспорта специальности 2.5.6 – Технология машиностроения;

- второй вывод обоснован, достоверность подтверждается материалами гл. 3 диссертации, содержит признаки научной новизны по п. 3, 4 паспорта специальности 2.5.6 – Технология машиностроения;
- третий вывод обоснован, достоверность подтверждается материалами исследований, приведенными в гл. 3 диссертации, содержит признаки научной новизны по п. 3, 4 паспорта специальности 2.5.6 – Технология машиностроения;
- четвертый вывод обоснован, достоверность подтверждается материалами гл. 3 диссертации, содержит признаки научной новизны по п. 3, 4 паспорта специальности 2.5.6 – Технология машиностроения;
- пятый и шестой выводы обоснованы, достоверность подтверждается материалами исследований, описанными в гл. 4 диссертации, не содержит признаков научной новизны, представляет практическую значимость в соответствии с п. 4, 7 паспорта специальности 2.5.6 – Технология машиностроения;
- седьмой вывод обоснован, достоверность подтверждается материалами исследований, описанными в гл. 5, диссертации, не содержит признаков научной новизны, представляет практическую значимость в соответствии с п. 4,7 паспорта специальности 2.5.6 – Технология машиностроения;
- восьмой вывод обоснован, достоверность подтверждается материалами исследований, описанными в гл. 6, диссертации, не содержит признаков научной новизны, представляет практическую значимость в соответствии с п. 4,9 паспорта специальности 2.5.6 – Технология машиностроения;

**Практическая ценность** материалов исследования состоит в возможности их использования при проектировании операций ПДУ в условиях действующих производств. Материалы и результаты исследования могут быть использованы при подготовке технологов механообрабатывающего производства.

#### **Замечания по диссертационной работе**

Работа в целом производит хорошее впечатление, однако следует отметить некоторые вопросы и замечания, в том числе редакционного характера:

1. Задачи, решаемые в диссертациях, ставятся на основе материала ВТ22, однако не понятно на какой основе сделан этот выбор, т.к. высокопрочных титановых сплавов больше.
2. Не приведены методики КЭ-анализа. В частности, ничего не сказано про этапы выполнения анализа, необходимого для решения задачи; разбиение модели на конечные элементы (какую форму конечных элементов, тип разбиения) и т.д. Не понятно также, каким образом решали задачу идентификации профиля остаточных напряжений и добавления этого профиля в модель конечных элементов.



3. В разделе имитационное моделирование приведены рекомендации по выбору режимов ПДУ для плоских поверхностей, но отсутствует переход по выбору режимов для криволинейных цилиндрических поверхностей и поверхности сложной формы. Нужно обосновать, возможно ли такое допущение?
4. Следует привести в порядок терминологию. Необходимо пояснить, что означают понятия, «глубина деформационного воздействия», «эквивалентные упругие деформации» и др.
5. В работе используется скорость дроби при упрочнении 90 м/с, но не сказано, чем ограничивается такая скорость шариков.
6. Следовало бы подробно пояснить почему результаты расчетов остаточных напряжений получаются положительными, что приведено в соответствующих таблицах и графиках.
7. На рис. 3.24 и 3.25 максимальные значения остаточных напряжений, формируемых при скорости 60 и 90 м/с отличаются незначительно? С чем это связано?
8. В описании методики исследования шероховатости поверхности оптическим методом неясно как выбирались размеры эталона (дисс., стр. 40), а также отсутствует объяснение по влиянию освещенности исследуемой поверхности на параметры автокорреляционной функции. Какова погрешность измерения параметров шероховатости с помощью оптико-электронного комплекса? В каких случаях его использование необходимо?

Указанные замечания носят частный характер и не снижают значимости выполненных исследований. Актуальность работы, её научная новизна, практическая и теоретическая полезность полученных в ней результатов не вызывают сомнений.

**Соответствие паспорту научной специальности 2.5.6 «Технология машиностроения (технические науки)».**

Диссертация соответствует следующим пунктам области исследования:

3. Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения.
4. Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска.
7. Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин.
9. Методы и средства повышения производительности изготовления изделий машиностроения.

Полученные результаты достаточно полно представлены в опубликованных научных трудах автора.

## Заключение о соответствии диссертации

Несмотря на приведенные замечания, диссертация Люшни Дмитрия Андреевича является самостоятельной, завершенной научно-квалификационной работой, отвечающей требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, в которой содержится системные теоретико-экспериментальные исследования.

Диссертация Люшни Дмитрия Андреевича представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальной научной и практической задачи в области повышения эффективности процесса пневмодробеструйного упрочнения крупногабаритных деталей из титановых сплавов. Работа выполнена автором самостоятельно. Полученные результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа написана доходчиво, в целом грамотно, аккуратно оформлена.

Диссертационная работа «Повышение эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счет применения рациональных условий и режимов обработки» по своему содержанию, объему, актуальности, научной и практической значимости соответствует требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям и определенным пунктами 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. за № 842 в редакции от 25.01.2024 г., а ее автор, Люшня Д.А., заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

Заведующий кафедрой  
«Технология машиностроения» ДГТУ,  
д.т.н., проф.

М.А. Тамаркин

Тамаркин Михаил Аркадьевич, 344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. р. 2738-725, e-mail: [tehn\\_rostov@mail.ru](mailto:tehn_rostov@mail.ru), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Донской государственный технический университет, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», специальность 05.02.08 «Технология машиностроения».

Подпись М.А.Тамаркина

Ученый секретарь  
Ученого совета  
26.11.2024



Завсегая  
Ильинский В.Н.