

## ОТЗЫВ

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

### **1. Общая характеристика работы и соответствие темы диссертации паспорту научной специальности**

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет». Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 150 наименований и 2 приложений, содержит 93 рисунка и 20 таблиц. Общий объем диссертации составляет 160 страниц.

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, из них 2 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статей – в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, и 5 – изданиях, входящих в РИНЦ.

**Во введении** диссертации обоснована актуальность темы работы и изложена степень её разработанности, сформулирована цель и представлены задачи исследования, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность работы, содержатся сведения о методах и средствах исследования, определены положения, выносимые на защиту, достоверности полученных результатов, апробации результатов работы, публикациях, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** на основе найденной научной и научно-технической литературы дана характеристика процесса пневмодробеструйного упрочнения и показана область его применения на примере взлётно-посадочного устройства шасси самолёта ИЛ 476. Приведен анализ пневмодробеструйного упрочнения, рассмотрены способы подачи рабочего тела к обрабатываемой поверхности, приводится конструкция эжектора, а также рассматриваются факторы влияющие на скорость смеси, диаметр отпечатка, степень поверхностной деформации. Рассмотрены существующие регрессионные и эмпирические модели, позволяющие определять микротвёрдость поверхности, максимальные напряжения в зоне контакта, шероховатость поверхности в зависимости от режимов упрочняющей обработки. Приводятся работы в которых рассматривается решении контактных задач с использованием теории упругости. Выполнен анализ существующих конечно-элементных моделей, ис-

пользуемых для процессов упрочнения. Рассмотрено влияние дробеструйной обработки на остаточные напряжения и микротвёрдость поверхностного слоя, а также на шероховатость поверхности. На основе проведенного системного анализа сформулированы соответствующие выводы.

**Во второй главе** представлены имитационные модели процесса пневмодробеструйного упрочнения, приводятся исходные данные и программное обеспечение, используемое для численного моделирования. Первая имитационная модель, полученная с использованием модуля Fluid Flow (Fluent), в программном комплексе ANSYS, используемый для расчета жидкостных и воздушных сред, полученная автором диссертации модель позволяет определить площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учётом образования застойных зон, в зависимости от угла наклона сопла, скорости и диаметра дроби, физических свойства материала и расстояния до обрабатываемой поверхности. Вторая имитационная модель, полученная с использованием модуля Explicit Dynamics, в программном комплексе ANSYS, позволяет рассмотреть задачу в условиях явной динамики протекания процесса пневмодробеструйного упрочнения, данная модель позволяет получить численным методом остаточные напряжения, упругие и остаточные деформации, а также глубину их залегания, при этом процесс моделируется как процесс точечного контакта потока дроби с поверхностью заготовки и с учётом накопленной пластической деформации. Третья имитационная модель, полученная с использованием программы RockyDEM позволяет определить напряжённо-деформированное состояние поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения рабочих тел распыляющихся соплом и скорости насыщения предельной пластической деформации, при этом учитывается влияние многократного ударного воздействия на поверхность образца.

**В третьей главе** представлены результаты, полученные с использованием имитационных моделей, представленных во второй главе.

В этой же главе представлены регрессионные модели, полученные на основе численного моделирования процесса пневмодробеструйного упрочнения, связывающие остаточные напряжения и глубину их залегания, величину пластической деформации и их глубину залегания, величину упругих деформаций и их глубину залегания с такими параметрами процесса пневмодробеструйного упрочнения как скорость дроби, диаметр дроби и скорость движения сопла. Адекватность полученных соискателем регрессионных моделей проверена с использованием критерия Стюдента и критерия Фишера.

**В четвёртой главе** приводятся результаты натуральных экспериментов, связанных с определением деформации на образцах-свидетелях, определением остаточных напряжений, а также исследования, связанные с определением микротвёрдости по глубине поверхностного слоя. Исследования показали, что повышение скорости распыла дроби 90 до 60 м/с приводит к повышению

микротвердости и глубины деформационного упрочнения на 12...15,5 %, а остаточные напряжения повышаются на 4...7 %.

**В пятой главе** представлены результаты исследования шероховатости поверхности с применением как профильного и оптического методов. Рассмотрено влияние режимов пневмодробеструйном упрочнении, таких как скорость дроби, угол наклона сопла, расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности на величины продольной и поперечной шероховатости поверхности. Исследования показали, что величина шероховатости поверхности по параметру  $Ra$  увеличилась на 20...50 % с увеличением скорости с 90 до 60 м/с.

**В шестой главе** приводятся результаты опытно промышленной проверки на ОАО «Авиаагрегат» при пневмодробеструйном упрочнении таких деталей, как траверса, цапфа, тяга. Приводится технико-экономический расчёт себестоимости на операции пневмодробеструйного упрочнения, который подтверждает экономическую оправданность применения скорости распыла дроби 90 м/с и тем самым обеспечивающим повышение производительности в 1,2-1,4 раза.

**В заключении** изложены результаты исследований, а **в приложениях А и Б** представлены соответственно: акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс; акт опытно-промышленной проверки пневмодробеструйной обработки деталей «Траверса».

Материалы диссертационной работы имеют структурированную последовательность изложения, обладают внутренним единством, изложены с использованием современного понятийного аппарата.

Основные научные положения, выносимые автором диссертации на защиту, были доложены и обсуждены на 6 конференциях различного уровня, в том числе на международных и всероссийских, что говорит о достаточно хорошей апробации работы.

Диссертация соответствует пунктам 3, 4, 7 и 9 области исследований паспорта специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

## **2. Актуальность работы**

Для повышения сопротивления усталости деталей машин, в том числе деталей стоек шасси взлётно-посадочных устройств, а, следовательно, их надежности и долговечности, используют различные методы упрочняющей обработки. К данным методам обработки относится метод пневмодробеструйного упрочнения, получивший достаточно широкое распространение при обработке сложнопрофильных деталей и деталей, имеющих достаточно большие габаритные размеры. Данный процесс поверхностно-пластического деформирования способствует формированию, в поверхностном слое дета-

лей, благоприятных сжимающих остаточных напряжений, стабилизирует величину шероховатости поверхности, а также предотвращает образованию концентраторов напряжений. Также преимуществом данного метода упрочнения является то что он не допускает существенного перенаклёпа поверхностного слоя. Процесс пневмодробеструйного упрочнения осуществляется при скоростях дроби порядка 60 м/с и при небольших величинах подачи сопла, в связи с этим трудоемкость для данного процесса достаточно высокая.

С целью повышения производительности процесса пневмодробеструйного упрочнения в работе приведены имитационные модели и регрессионные зависимости, позволяющие определить рациональные условия обработки с обеспечением требуемого качества обработанных поверхностей, исследовано влияние режимов обработки на образование застойных зон, что в свою очередь является **актуальной задачей**.

### **3. Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов**

На основе анализа отечественной и зарубежной научной и научно-технической литературы соискателем сформулированы тема диссертационной работы, цель и задачи исследований.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается обоснованностью принятых допущений и ограничений в регрессионных и имитационных моделях, использованием известных методов расчёта, применением сертифицированных программных продуктов, адекватностью полученных регрессионных зависимостей, проверенных по критериям достоверности.

### **4. Научная новизна**

Научной новизной обладают следующие положения диссертационной работы: имитационная модель процесса пневмодробеструйного упрочнения для определения площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учётом образованием застойных зон; имитационная модель процесса пневмодробеструйного упрочнения для определения остаточных напряжений и накопленной деформации в поверхностном слое заготовок при точечном воздействии дроби; имитационная модель процесса пневмодробеструйного упрочнения для определения напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации; методика исследования шероховатости поверхности крупногабаритных деталей сложных пространственных форм с помощью оптико-электронного комплек-

са на рабочем месте и идентификации параметров структуры с параметрами шероховатости.

## **5. Практическая ценность и реализация работы**

Среди разработок, полученных в процессе выполнения диссертационной работы, практическую ценность представляют: имитационные модели процесса пневмодробеструйного упрочнения для определения площади контакта потока дроби с поверхностью заготовки с учётом образованием застойных зон, остаточных напряжений и накопленной деформации в поверхностном слое заготовок при точечном воздействии дроби, напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя заготовок с учётом скорости движения распыляющего сопла и скорости насыщения предельной пластической деформации; регрессионные модели влияния режимов пневмодробеструйного на параметры напряженно-деформационного состояния поверхностного слоя заготовки в зависимости от условий пневмодробеструйного упрочнения; рекомендации для определения рациональных условий упрочнения поверхностного слоя деталей из титановых сплавов при пневмодробеструйном упрочнении, режимы и условия пневмодробеструйного упрочнения, обеспечивающие требуемые параметры качества поверхности деталей; рекомендации по измерению шероховатости на поверхностях крупногабаритных деталей сложных пространственных форм на рабочем месте; результаты опытно-промышленной проверки на ОАО «Авиаагрегат» при пневмодробеструйном упрочнении детали «Траверса» №47601.4122.300.001 (акт опытно промышленной проверки), а материалы диссертационной работы нашли применение в учебном процессе Самарского государственного технического университета (акт об использовании результатов научно-исследовательской работы в образовательной деятельности).

## **6. Общие замечания по диссертационной работе**

Несмотря на достаточно высокий уровень, диссертационная работа Люшни Дмитрия Андреевича не лишена некоторых недостатков:

1. В первой главе автором диссертации приводятся какие результаты были достигнуты авторами других работах и что в данных работах не учитывается, однако не на все литературные источники в тексте данной главы присутствуют библиографические ссылки, автор диссертации в некоторых ссылках ограничивается только упоминанием фамилий и инициалов авторов упоминаемых работ. В данной главе следовало бы приводить все литературные источники, без исключения, которые автор диссертации анализировал в ходе своей научной работы.

2. К сожалению, автором рассматривается только одна группа обрабатываемых материалов – титановые сплавы, производство деталей авиационной техники не ограничивается применением только этой группы материалов, в производстве стоек шасси самолётов ИЛ-476 также используются высокопрочная сталь 30ХГСН2А-ВД.

3. В подразделе 2.3 при построении имитационной модели №1 отмечается, что при построении учитывались скорость дробы, диаметр дробы и угол распыла, а при построении имитационной модели №2 не ясно, какие именно параметрами процесса пневмодробеструйного упрочнения учитывались в данной модели, и какие допущения принимались.

4. Из подраздела 3.1 не ясно, какие виды напряжений (нормальные, касательные эквивалентные) рассматривались и в каком направлении (окружном, осевом, радиальном). Также автором при анализе результатов моделирования не отмечается какой характер, сжатия или растяжения имеют полученные численным методом остаточные напряжения. О каких напряжениях идет речь?

5. Из результатов расчёта напряжённо-деформированного состояния полученного с использованием имитационных моделей №2 и №3 приведенных в таблицах 3.4 - 3.6 возникает вопрос, подтверждаются ли данные результаты, с результатами натуральных исследований соискателя, либо с работами других авторов, рассмотренных в ходе литературного анализа.

6. На рисунке 4.8 представлены результаты натуральных и численных экспериментов, расхождение результатов составляет порядка 50%, автор объясняет эти результаты уменьшением числа многократных воздействий на обрабатываемую поверхность, не совсем понятно, почему они увеличиваются при этом. Из рисунка 4.9 не ясно, какие именно напряжения сравнивались, максимальные или напряжения на поверхности?

7. Автор диссертации в конце раздела 1.5 утверждает, что не существует методик, позволяющих оценить шероховатость на крупногабаритных деталях сложной формы. Вопрос заключается в том, что достаточно ли глубоко соискателем произведен литературный анализ, позволяющий так однозначно говорить. Может быть, стоило говорить, что по результатам литературного анализа в рассмотренных работах подобных исследований найдено не было.

8. Глава 4 имеет название «Исследование остаточных напряжений поверхности после пневмодробеструйного упрочнения», но кроме остаточных напряжений в данной главе рассматриваются деформации образцов после упрочняющей обработки, а также приводятся исследования микротвёрдости. Почему нельзя было дать обобщенное название главы?

9. Каким образом при опытно-промышленной проверки на детали «Траверса» контролировались полученные результаты микротвёрдости, глу-

бины упрочнения, максимальной величины остаточных напряжений и глубины её залегания и шероховатости поверхности.

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от выполненной диссертационной работы.

### 7. Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Люшни Д.А. является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему и обладающей как научной новизной, так и практической значимостью. Она направлена на повышение эффективности пневмодробеструйного упрочнения деталей из титановых сплавов за счёт применения рациональных условий и режимов обработки, испытывающих знакопеременные нагрузки, таких как траверсы взлетно-посадочных устройств самолетов и т.д., путём определения рациональных условий и режимов обработки. Диссертационная работа в полной мере отвечает 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. Считаю, что Люшня Дмитрий Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения.

Доцент кафедры технологий производства двигателей, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва»

(Самарский университет),  
кандидат технических наук.

Защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.07.05



Швецов  
Алексей Николаевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» (Самарский университет)

443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

E-mail: shvecov.an@ssau.ru, раб. тел. 8 (846) 267 45 74

