

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԴՈՒԽՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ
(ՀԻՄՆԱԴՐԱՄ)**

ԶԻՐՈՒՄԻՉՅԱՆ ՀՈՎՀԱՆՆԵՍ ՍՈՒՐԵՆԻ

**ԹՈՂՈՂ ԱՊԱՐԱՏՆԵՐԻ ԲԱՐԱԿԱՊԱՏ ՄԵԶԵՆԱՄԱՍԵՐԻ ԱՍՐՈՒԹՅԱՆ
ԲԱՐՁՐԱՑՈՒՄԸ ՈՒՆՏՐԱԶԱՅՆԱՅԻՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ԿԻՐԱՌՄԱՍԲ**

Ե.02.03 – «Մեքենաշինական արտադրության տեխնոլոգիաներ և սարքավորումներ» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2020

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ**

ЧИБУХЧЯН ОГАНЕС СУРЕНОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.03 “Технологии и оборудование машиностроительного производства”

ЕРЕВАН 2020

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի գիտական խորհրդի կողմից

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ., պրոֆեսոր Բորիս Սերգեյի Բալասանյան

Պաշտոնական ընդհանխոսներ՝ տ.գ.դ. Միշա Մամիկոնի Սիմոնյան
տ.գ.թ. Դավիթ Գալուստի Յուրմուզյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ճարտարապետության և
շինարարության Հայաստանի ազգային
համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 17.12.2020թ.-ին, Ժ.13⁰⁰ ին
Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող 034
մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105
Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ –ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2020թ.-ի նոյեմբերի <<_06_>> -ին

034 Մասնագիտական խորհրդի գիտական
քարտուղար տ.գ.թ., դոցենտ



Միքայել Գուրգենի Հարությունյան

Тема диссертации утверждена ученым советом Национального политехнического университета Армении.

Научный руководитель

д.т.н., профессор Борис Сергеевич Баласаян

Официальные оппоненты:

д.т.н. Миша Мамиконович Симонян

к.т.н. Давид Галустович Юрмузян

Ведущая организация:

Национальный университет
архитектуры и строительства Армении

Защита состоится 17 декабря 2020 г. в 13⁰⁰ч. на заседании Специализированного совета 034 при Национальном политехническом университете Армении по адресу: 0009, Ереван, ул. Терьяна, 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА

Автореферат разослан «_06_» ноября 2020г.

Ученый секретарь Специализированного
Совета 034 к.т.н., доцент



Микаел Гургенович Арутюнян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Воздушный транспорт является неотъемлемой частью жизнедеятельности современного общества, обеспечивающий эффективное развитие бизнес среды и взаимосвязь между различными структурами и ветвями экономики.

Совершенствование аэродинамических характеристик и весовой эффективности современных летательных аппаратов является актуальной задачей, направленной на повышение показателей их качества и конкурентоспособности, что, естественно, налагает серьезные требования к надежности, прочности и долговечности. В связи с этим предъявляются все более жесткие требования к качеству поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей авиационной промышленности различного назначения, в частности, несущих и ответственных деталей фюзеляжа, крыльев, планера и т.п.

Одним из эффективных путей повышения весовой эффективности летательных аппаратов различного назначения на сегодняшний день является их применение в различных конструкциях материалов пониженной плотности, таких как алюминиевые, магниевые и титановые сплавы с высокими показателями прочности, долговечности и технологии изготовления. С другой стороны, решение этого вопроса возможно улучшением механических прочностных характеристик материалов тонкостенных деталей машин путем применения различных методов упрочнения, к числу которых относятся термическая обработка, легирование, нанесение на поверхность деталей машин износостойких покрытий и их упрочнение различными методами поверхностно-пластического деформирования (ППД), среди которых особое место занимают методы ППД с применением ультразвуковых колебаний (УЗК).

В настоящее время исследования в области ультразвукового ППД деталей машин проводятся с целью повышения их эксплуатационных характеристик и осуществляются ультразвуковым упрочнением их рабочих поверхностей с одной стороны, при котором, согласно известным результатам Алехина В.П., на глубине 25...40 мкм создается наноструктура, которая способствует значительному повышению износостойкости рабочих поверхностей таких деталей. Таким образом, если деталь тонкостенная, то ее двустороннее ультразвуковое упрочнение может способствовать еще большему увеличению ее механических характеристик. До настоящего времени такие исследования не проводились, что и обуславливает актуальность темы исследования.

Цель и задачи работы. Целью работы является улучшение весовой эффективности летательных аппаратов путем повышения физико-механических характеристик их тонкостенных деталей с применением технологии двустороннего ультразвукового выглаживания их рабочих поверхностей.

Исходя из поставленной цели, в работе были выдвинуты и решены следующие задачи:

1. Выявить основные преимущества процесса ППД тонкостенных деталей машин с использованием УЗК и установить возможности получения нанозернистой структуры и глубины ее пролегания в зависимости от технологических режимов осуществления процесса ППД.
2. Разработать теоретические принципы определения эквивалентных изгибных и осевых жесткостей тонкостенных деталей машин путем условного деления их упрочненной поверхности на слои с определенными механическими характеристиками, определяемыми на основе экспериментальных зависимостей изменения их предела прочности от глубины пролегания слоя.

3. Разработать теоретические принципы определения эквивалентной изгибной жесткости многослойных тонкостенных деталей машин на основе известной модели D-Ross для расчета эквивалентной изгибной жесткости двуслойных конструкций.
4. Разработать способ ультразвукового двустороннего упрочнения тонкостенных листовых материалов с целью последующего их применения в качестве заготовок для получения тонкостенных деталей машин методами обработки материалов давлением.
5. Разработать компактный малогабаритный магнитострикционный преобразователь УЗК и на его основе создать промышленные образцы ультразвуковых выглаживателей для упрочнения деталей машин как сферическим, так и цилиндрическим инденторами.
6. Разработать общую методику проведения экспериментальных исследований, выбрать математическую модель и программу для машинной обработки результатов экспериментальных исследований, выявить математические модели исследуемых параметров процесса ППД с использованием УЗК в зависимости от его входных параметров.
7. На основе анализа результатов экспериментальных исследований разработать технологические рекомендации, обеспечивающие высокую эффективность осуществления двустороннего ультразвукового ППД деталей машин, а также рекомендации для их практического применения.

Методы исследования. Приведенные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований основаны на научных положениях технологии машиностроения, теории пластического деформирования, положениях контактирования твердых тел, принципах системного анализа и математического моделирования, методах многофакторного планирования эксперимента и математической статистики, а также современных методах исследования процессов ультразвукового ППД рабочих поверхностей деталей машин. Машинная обработка результатов экспериментальных исследований осуществлена посредством программы в среде LabView 8.6, разработанной кафедрой Машиностроительных технологий и автоматизации Национального политехнического университета Армении.

Экспериментальные исследования проведены с применением современных разрывных машин марок Tira Test 2300 и HOUNSFIELD HKS5 с компьютерным интерфейсом, которые позволяют измерять и регистрировать предел текучести, предел прочности, модуль Юнга и относительное удлинение испытуемых образцов до разрыва в реальном времени и осуществлять сбор экспериментальных результатов в отдельном файле. Для изучения зернистости структуры образцов до и после эксперимента использован микроскоп ZEISS AXIO VERT A1 с 1000-кратным увеличением. Виртуальные исследования проведены посредством программной среды ANSYS Multiphysics.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке при Министерстве образования, науки, культуры и спорта Республики Армения в рамках научного проекта № 18T-2D408, а также в рамках научно-исследовательской тематики базовой лаборатории “Машиностроительные технологии” Национального политехнического университета Армении.

Теоретические, справочные и методические основы работы. В качестве теоретической основы диссертации служили отечественные и зарубежные классические и современные работы. Справочной основой являлись изданные официальные справочники, технические периодические издания, ГОСТы, ОСТы, рекомендации заводоизготовителей и др.

В процессе исследований применены современные компьютерные устройства измерения, регистрации и сбора данных экспериментальных исследований, утвержденные ГОСТом методы измерения физических величин, их регистрации и оценки, классические и современные методы сопоставительного анализа, прикладные и графические компьютерные программные пакеты и др.

Научная новизна

1. Получены формулы для расчета эквивалентных изгибных и осевых жесткостей тонкостенных деталей машин путем условного деления их упрочненной поверхности на слои с определенными механическими характеристиками, определяемыми на основе экспериментальных зависимостей изменения их микротвердостей или предела прочности от глубины пролегания слоя.
2. Теоретически обосновано, что между микротвердостями слоев условной многослойной пластины и ее механическими характеристиками существует определенная функциональная связь. Показано, что предел текучести, предел прочности и модуль Юнга слоев пропорциональны микротвердостям этих слоев.
3. На основе известной модели D-Ross, предназначенной для расчета эквивалентной изгибной жесткости двуслойных конструкций, получены формулы для расчета эквивалентной изгибной жесткости многослойных тонкостенных деталей машин. Сущность метода заключается в том, что вначале по формуле D-Ross определяется эквивалентная изгибная жесткость двуслойной конструкции, которая с полученными эквивалентными параметрами принимается за первый слой, затем вместе с параметрами третьего слоя по той же формуле D-Ross рассчитывается эквивалентная изгибная жесткость уже для новой трехслойной конструкции и т. д..
4. Разработан способ ультразвукового двустороннего упрочнения тонкостенных листовых материалов, позволяющий получать заготовки в виде упрочненных с двух сторон листовых материалов, из которых методами обработки давлением получают тонкостенные детали машин.
5. Разработан способ изготовления компактных трехстержневых малогабаритных магнитострикционных преобразователей УЗК (Патент РА 3265 А), на основе которых созданы промышленные образцы ультразвуковых выглаживателей для упрочнения деталей машин как сферическим, так и цилиндрическим инденторами.
6. Экспериментальными исследованиями установлены упрочненные квадратические математические модели зависимостей микротвердости упрочненных слоев и глубины их проникания от технологических параметров процесса ультразвукового выглаживания.
7. Установлено, что применение технологии двустороннего ультразвукового упрочнения листовых заготовок для изготовления из них методами обработки материалов давлением позволяет до 20...30% улучшить весовые характеристики изготовленных тонкостенных деталей машин.

Практическая ценность

1. Полученные формулы для расчета эквивалентных изгибных и осевых жесткостей тонкостенных деталей машин на основе условного деления их упрочненной поверхности на слои с определенными механическими характеристиками позволяют на стадии проектирования детали машин установить ее толщину из условия равной прочности.
2. Полученная на основе известной модели D-Ross формула для расчета эквивалентной изгибной жесткости многослойных конструкций позволяет расширить область их практического применения.

3. Разработанный способ ультразвукового двустороннего упрочнения тонкостенных листовых материалов (Патент РА 3255 А) позволяет получать упрочненные с двух сторон листовые заготовки с равными прочностными характеристиками как в поперечном, так и в продольном направлениях.
4. Разработанный новый способ изготовления компактных трехстержневых малогабаритных магнитоотрицательных преобразователей УЗК (Патент РА 3265 А) позволяет независимо от магнитоотрицательного материала увеличить мощность ультразвукового преобразователя до 25,5%, а при заданной мощности уменьшить его габаритные размеры до 1,14 раза.
5. Установленные в процессе экспериментальных исследований упрощенные квадратические математические модели зависимостей микротвердости упрочненных слоев и глубины их проникания от технологических параметров процесса ППД с УЗК могут быть использованы для управления этим процессом.
6. Результаты научно-экспериментальных исследований рекомендованы к внедрению в технологических процессах производства деталей летательных аппаратов в ЗАО "Ереванский научно-исследовательский институт связи", в производстве деталей в ЗАО "Армбас" (Аргел).
7. Применение технологии двустороннего ультразвукового упрочнения листовых заготовок для изготовления из них методами обработки материалов давлением позволяет до 20...30% уменьшить весовые характеристики изготовленных тонкостенных деталей машин.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. **Получение формулы** для расчета эквивалентных изгибных и осевых жесткостей тонкостенных деталей машин на основе условного деления их упрочненной поверхности на слои с определенными механическими характеристиками.
2. **Установление функциональной связи** между микротвердостью слоев условной многослойной пластины и ее механическими характеристиками.
3. Применение формулы D-Ross, предназначенной для расчета эквивалентной изгибной жесткости двуслойных тонкостенных деталей машин, для определения эквивалентной изгибной жесткости многослойных конструкций.
4. Новый способ ультразвукового двустороннего упрочнения тонкостенных листовых материалов, позволяющий получать заготовки в виде упрочненных с двух сторон листовых материалов, из которых методами обработки давлением получают тонкостенные детали машин.
5. Новый способ изготовления компактных трехстержневых малогабаритных магнитоотрицательных преобразователей УЗК (Патент РА 3265 А).
6. Упрощенные квадратические математические модели зависимостей микротвердости упрочненных слоев и глубины их проникания от технологических параметров процесса ультразвукового выглаживания, зависимости изменения прочностных характеристик листовых материалов от толщины обрабатываемого ультразвуком материала и возможности повышения эквивалентных изгибной и осевой жесткостей тонкостенных деталей машин.

Апробация работы. Основные положения диссертации и рекомендации докладывались и обсуждались на: годичных научно-технических конференциях НПУА (2018-2019 гг.); научных семинарах проблемной лаборатории "Машиностроительные технологии" и кафедры "Технологии машиностроения и автоматизация" НПУА, Международной научно-технической конференции на Digital UAV Forum – 2019: Международный форум по IT-разработке, искусственному интеллекту и беспилотным

летательным аппаратам (Ереван, 16–20 октября 2019 г.); научном семинаре “Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий” (Донской гос. техн. ун-т, г.Ростов на Дону, 2020 г.).

Публикации. Основные результаты исследования опубликованы в 11 статьях и научных работах, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень Скопус, 6- за пределами РА. По теме исследования получены два патента РА.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 152 наименования. Общий объем работы составляет стр.131, включая рис. 60, таблиц. 14, приложения стр. 3.

Диссертация написана на армянском языке.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, практическое значение и основные положения выносимые на защиту.

В первой главе изложено состояние вопроса, изучены тенденции и требования к новым материалам и технологиям, применяемым в авиационной промышленности, особенности и проблемы традиционных и ультразвуковых методов ППД рабочих поверхностей тонкостенных деталей транспортного машиностроения.

Начиная с середины XX века изучению процессов и технологии традиционных методов ППД посвящено большое количество научных исследований, среди которых следует отметить работы Аскинази Б.М., Бабичева А.П., Бломеньштейна В.Ю., Дрозда М.С., Киричека А.В., Маркова А.И., Минанкова А.П., Муханова И.И., Папшева Д.Д., Рижова Э.Д., Саверина М.М., Сулова А.Г., Хана К., Фицпатрика М. и др.

Большой вклад в теорию и практику ППД с применением УЗК внесли российские ученые Казанцев В.Ф., Клубович В.В., Мицкевич А.М., Розенберг Л.Д., Северденко В.П., Степаненко А.В., Устинов И.Д., Алехин В.П., Холопов Ю.В., Хмелев В.Н. и др. Впервые ультразвуковое выглаживание было предложено и осуществлено в 1965г. Холоповым Ю.В. и Мицкевичем А.М., которые использовали его в основном как способ ультразвуковой полировки металлических деталей машин, что позволило значительно улучшить внешний вид продукции и тем самым вызвало большой интерес у машиностроителей. В дальнейшем эти научные работы были приняты в качестве основы развития теории и практики применения ППД с наложением на индентор УЗК, которые до настоящего времени успешно продолжают и эффективно применяются в производстве деталей машин различного назначения.

В последние годы исследования в этом направлении интенсивно продолжают, в частности, этому вопросу посвящены диссертационные работы Боровина Ю.М., Горбенко А.В., Ким Чанг Сика, Селиванова А.С., Семеновой Ю.С., Степановой Т.Ю., Смелянского В.М., Степошина С.В., Степчевой З.В., Харченко В.В., Осипенкова Г.А., Пегашкина В.Ф. и др., научные исследования Карими А., Рамин Хашеми, Саид Амини.

На основе исследований ведущих металлофизиков Панина В.Е., Коневского Н.А., Козлова Э.В., Д. Брандона и У. Каплана удалось разработать иерархию структурных уровней после ППД.

Проведенный анализ результатов исследований показал, что в настоящее время исследования в области ультразвукового ППД деталей машин проводятся с целью повышения их эксплуатационных характеристик и осуществляются ультразвуковым упрочнением их рабочих поверхностей с одной стороны, при котором согласно известным результатам Алехина В.П., на глубине 25...40 мкм создается наноструктура, которая

способствует значительному повышению износостойкости рабочих поверхностей таких деталей. Таким образом, если деталь тонкостенная, то ее двустороннее ультразвуковое упрочнение может способствовать еще большему увеличению ее механических характеристик, что является актуальной задачей развития авиастроения в Армении.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке математических моделей для оценки изгибной и осевой жесткостей тонкостенных листов при двустороннем ультразвуковом упрочнении. Для решения поставленной задачи изучены результаты многочисленных исследований, касающихся напряженного состояния многослойных листовых материалов, которые описываются известными сложными математическими выражениями. Сравнение результатов оценки эквивалентной жесткости многослойных листовых материалов, рассчитанных по этим формулам с аналогичными результатами, полученными в программной среде ANSYS Multiphysics, показало их большое расхождение, достигающее вплоть до одного порядка.

Известная формула D-Ross для определения эквивалентной изгибной жесткости двуслойной пластины имеет вид $B_{h_2} = B_1(1 + 5\alpha_2^3 + 4\alpha_2\beta_2)$, где B_{h_2} - эквивалентная изгибная жесткость двуслойной пластины; B_1 - изгибная жесткость первого слоя двуслойной пластины; $\alpha_2 = \frac{h_2}{h_1}$, $\beta_2 = \frac{E_2}{E_1}$, и E_1 - соответственно толщина и модуль Юнга первого нижнего слоя двуслойной пластины; h_2 и E_2 - соответственно толщина и модуль Юнга второго слоя двуслойной пластины.

Примем упрочненную ультразвуком пластину как двуслойную, состоящую из исходного материала толщиной h_1 и упрочненного слоя толщиной h_2 . Посредством соответствующих подстановок и элементарных преобразований, а также с учетом того, что толщина пластины после ультразвукового выглаживания практически не изменяется, преобразуем эту формулу в следующий вид:

$$E_{\varepsilon 2} = E_1 \left(1 + \frac{h_2}{h_1} \frac{E_2}{E_1} \left(5 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2 + 4 \right) \right). \quad (1)$$

Примем далее, что после ультразвуковой обработки этой пластины со второй стороны ее также можно принять как двуслойную, с тем различием, что первым слоем является упрочненный до этого ультразвуком с одной стороны слой пластины со своим эквивалентным модулем Юнга $E_{\varepsilon 2}$, а вторым – новый упрочненный ультразвуком слой толщиной h_3 и модулем Юнга E_3 . Учтя, что ультразвуковое упрочнение в обоих случаях происходит при тех же технологических режимах процесса выглаживания и приняв $h_3 = h_2$ и $E_3 = E_2$, из (1) получим

$$E_{\varepsilon 3} = E_{\varepsilon 2} \left(1 + \frac{h_2}{h_1 + h_2} \frac{E_3}{E_{h_2}} \left(5 \left(\frac{h_2}{h_1 + h_2} \right)^2 + 4 \right) \right). \quad (2)$$

Аналогичными рассуждениями получена обобщенная формула для расчета эквивалентного модуля Юнга многослойных конструкций и пластин в виде выражения

$$E_{\varepsilon N} = E_{\varepsilon(N-1)} \left(1 + \frac{h_N}{\sum_{i=1}^{N-1} h_i} \left(5 \left(\frac{h_N}{\sum_{i=1}^{N-1} h_i} \right)^2 + 4 \right) \right), \quad (3)$$

где $E_{\varepsilon N}$ - эквивалентный модуль Юнга многослойной конструкции или пластины; N - число ее слоев; h_i - толщина ее i -го слоя.

Полученная формула может быть использована и для расчета эквивалентного модуля Юнга многослойных конструкций, в том числе строительных конструкций и перекрытий.

Предпринята попытка установления теоретической зависимости повышения жесткости тонкостенных деталей машин для случая их одноосного растяжения после двустороннего ультразвукового упрочнения пластическим деформированием их поверхностей. На рис.1 приведена расчетная схема одноосного растяжения тонкостенной пластины длиной L , толщиной h и шириной b (b на рис.1 не показана), поверхности 1 и 2 которой упрочнены на глубину h_{np} ультразвуковым индентором. Учитывая, что микротвердости упрочненных слоев 1 и 2 (рис.1), в зависимости от ее глубины пролегания, монотонно убывают по определенной закономерности, которые в конце доходят до величины микротвердости исходного материала пластины, эти слои условно разделены на n -е число подслоев с одинаковой толщиной Δh_i , однако с различной микротвердостью H_{Vi} . Таким образом, задача сводится к определению жесткости пластины в виде параллельно соединенных упругих слоев.

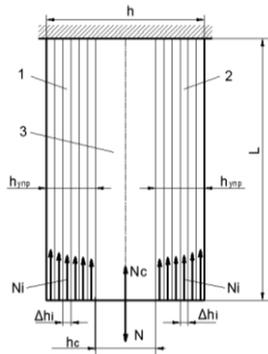


Рис. 1. Схема одноосного растяжения тонкостенной пластины после двустороннего ультразвукового пластического деформирования: 1,2 - упрочненные слои, 3 - сердцевина из исходного материала

На основе решения этой задачи получен коэффициент K повышения жесткости тонкостенных деталей машин при их осевом растяжении после двустороннего ультразвукового упрочнения пластическим деформированием их поверхностей по отношению к пластине в исходном состоянии в виде соотношения приведенной жесткости K_{np} тонкостенной пластины после двустороннего ультразвукового упрочнения пластическим деформированием ее поверхностей к жесткости K_1 необработанной такой же пластины:

$$K = \frac{K_{np}}{K_1} = \frac{E_c h_c b + 2\Delta h_i b \sum_1^n E_i}{E_c h b} \Rightarrow K = \frac{E_c h_c + 2\Delta h_i \sum_1^n E_i}{E_c h}, \quad (4)$$

где E_{np} , E_c , E_i - соответственно модули продольной упругости, характеризующие приведенную жесткость всей пластины; жесткость сердцевины пластины, не подвергнутой пластическому деформированию; жесткости i -ых условно разделенных подслоев упрочненного слоя.

Учитывая также, что модуль продольной упругости E является коэффициентом пропорциональности между напряжениями и деформациями, который зависит от материала пластины и ее структурного состояния, можно допустить, что между ним и микротвердостью существует определенная функциональная связь, с учетом чего из (4) можно получить

$$K = \frac{h_c}{h} + \frac{2 \int_0^{h_{-ymp}} Hv(h) d\Delta h}{Hv_0 \cdot h}, \quad (5)$$

где $Hv(h)$ - зависимость микротвердости от глубины упрочненного слоя; Hv_0 - микротвердость исходного материала.

Аналогично получен коэффициент K повышения жесткости тонкостенных деталей машин при их осевом растяжении после двустороннего ультразвукового упрочнения ППД их поверхностей по отношению к пластине в исходном состоянии:

$$K = \frac{K_{np}}{K1} = \frac{\sigma_c h_c + 2 \int_0^{h_{-ymp}} \sigma_e(h) dh}{\sigma_c h}, \quad (6)$$

где σ_{np} , σ_c , σ_i - соответственно приведенный предел текучести пластины; предел текучести сердцевины пластины, не подвергнутой пластическому деформированию, и пределы текучести i -ых условно разделенных подслоев упрочненного слоя, которые можно измерить посредством разрывной машины согласно ГОСТ 1497-84.

В данной главе приведен также разработанный нами новый способ получения высокопрочной титановой фольги (патент РА 3255 А2) двусторонним ультразвуковым упрочнением. Согласно предлагаемому способу, заготовку из сплава титана с ультра-мелкозернистой структурой подвергают многоциклической обработке, в течение каждого цикла которой осуществляют холодную многоходовую реверсивную прокатку и вакуумный отжиг. Во время осуществления последнего цикла прокатки вместо вакуумного отжига посредством двух пар колеблющихся с ультразвуковой частотой инденторов фольгу подвергают дополнительной деформации. Инденторы в каждой паре устанавливают в одной и той же плоскости, при этом первую пару инденторов относительно его поперечного направления устанавливают под углом 45^0 , а вторую – под углом 135^0 . Такая схема получения высокопрочной титановой фольги позволяет выравнивать ее механические характеристики в продольном и поперечном направлениях с одновременным упрочнением конструкции для осуществления ультразвуковой обработки.

В третьей главе приведена общая методика проведения натуральных и виртуальных экспериментальных исследований, использованные экспериментальное оборудование, измерительно-регистрирующие приборы, методы сбора экспериментальных результатов и их машинной обработки.

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе проведены исследования ультразвукового одностороннего упрочнения кольцевых образцов размерами наружного диаметра $\varnothing 40$ мм, внутреннего диаметра $\varnothing 26$ мм и шириной 20мм из нержавеющей стали марки Х18Н9Т, дюралюминия марки ДТ16 и титанового сплава марки В1-0. Кольцевые образцы посредством промежуточных втулок были собраны и закреплены на специальной оправке (рис.2), которая посредством ее центровочных отверстий была установлена в центрах прецизионного токарно-винторезного станка марки 16Б05А. Перед проведением экспериментов для устранения радиального биения образцов они были подвергнуты токарной чистовой обработке.

На втором этапе проведены исследования ультразвукового двухстороннего упрочнения как многослойных плоских образцов, полученных намоткой фольги толщиной 20 мкм в 21 слой на прямоугольную подложку (рис. 2б), так и однослойных плоских образцов толщиной, мм: 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2 и 1,4 с оптимальными технологическими режимами, полученными на первом этапе исследований. После ультразвуковой обработки из них электроэрозией были вырезаны образцы предусмотренными ГОСТом 1497-84, для последующего их испытания на растяжение (рис. 2в). Образцы изготовлены из алюминиевого сплава марки 8011, нержавеющей стали марки X18Н9Т и титанового сплава марки В1-0.

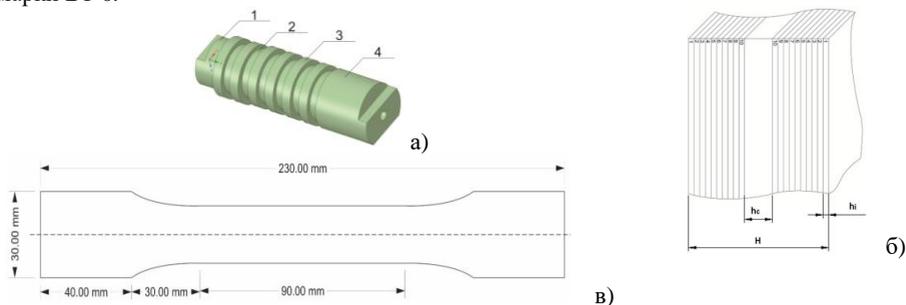


Рис.2. Экспериментальные образцы: а - оправка в сборе с кольцевыми образцами, б - слоистые образцы, $h_i = 20$ мкм, в - образцы для испытания на растяжение

Для проведения экспериментальных исследований разработан ультразвуковой магнитострикционный выглаживатель с алмазным индентором и встроенными динамометрами, который имеет возможность задания величины статической силы процесса выглаживания посредством цифрового индикатора. Преобразователь УЗК изготовлен разработанным нами новым способом изготовления компактных малогабаритных трехстержневых магнитострикционных колебаний (Патент РА 3265 А2), приведенным на рис.3.

Предлагаемый способ изготовления малогабаритных трехстержневых магнитострикционных преобразователей УЗК позволяет при заданных габаритных размерах увеличить их выходную мощность до 1,25 раза, а при заданной мощности уменьшить габаритные размеры до 1,14 раза. Помимо этого, упрощается намотка обмотки, так как она изготавливается на намоточном станке и устанавливается на средний стержень.

В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использована 5%-я эмульсия подсолнечного масла в воде, полученная их ультразвуковым эмульгированием. Радиус алмазного индентора из синтетического алмаза $r=0,5$ мм. Скорость выглаживания для нержавеющей стали марки X18Н9Т – $V=52$ м/мин, для дюралюминия марки ДТ16 и титанового сплава марки В1-0 - $V=24$ м/мин. Подача процесса ультразвукового выглаживания: $S_{мин}= 0,09$ мм/об, $S_0= 0,011$ мм/об, $S_{макс}= 0,13$ мм/об. Статическая сила: $P_{ст_мин}= 50$ Н, $P_{ст_0}=125$ Н, $P_{ст_мах}=200$ Н. Амплитуда ультразвуковых колебаний: $A=0$, $A=8$ мкм, $A=16$ мкм. В качестве выходных параметров исследований приняты: микротвердость H_{100} и глубина упрочненного слоя h , которые были измерены методом косого среза микротвердомером марки ПМТЗ согласно ГОСТ Р 52381-2005.

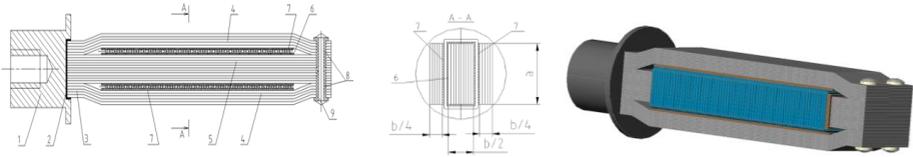


Рис.3. Способ изготовления трехстержневых магнитострикционных колебаний (Патент РА 3265 А2): 1 - волновод, 2 - припой, 3 - магнитопровод, 4 - крайний стержень, 5 - средний стержень, 6 - накладка из электроизоляционного материала, 7 - ультразвуковой трансформатор, 8 - втулка из электроизоляционного материала, 9 - заклепка

Исследования проведены новым методом математического планирования экспериментов, разработанным в НПУА, а машинная обработка результатов экспериментов - посредством разработанного в НПУА, виртуального прибора для моделирования трехфакторных технологических процессов в программной среде LabVIEW, который позволяет воспроизвести результаты экспериментов с точностью машинной погрешности и получить математические модели исследуемых параметров в кодовых и натуральных значениях входных параметров в виде следующих выражений:

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2 + B_{33} X_3^2 + B_{112} X_1^2 X_2 + B_{122} X_1 X_2^2,$$

$$\text{где } B_0 = b_0 - b_{12} - b_{34} - b_{56}, \quad B_1 = 2(b_1 - b_{134}), \quad B_2 = 2(b_3 - b_{123}), \quad B_3 = 2b_{13}$$

$$B_{11} = 2b_{12}, \quad B_{22} = 2b_{34}, \quad B_{33} = 2b_{1234}, \quad B_{112} = 4b_{123}, \quad B_{122} = 4b_{134};$$

$$Y = A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 + A_{11} x_1^2 + A_{22} x_2^2 + A_{33} x_3^2 + A_{112} x_1^2 x_2 + A_{122} x_1 x_2^2,$$

$$A_0 = B_0 + B_1 c_1 + B_2 c_2 + B_3 c_3 + B_{11} c_1^2 + B_{22} c_2^2 + B_{33} c_3^2 + B_{112} c_1^2 c_2 + B_{122} c_1 c_2^2,$$

$$\text{где } A_1 = B_1 + 2B_{11} + 2B_{112} c_2 + B_{122} c_2^2, \quad A_2 = B_2 + 2B_{22} + 2B_{122} c_1 + B_{112} c_1^2, \quad A_3 = (B_3 + 2B_{33}) k_3,$$

$$A_{11} = B_{11} + B_{112} c_2) k_1^2, \quad A_{12} = 2(B_{112} + B_{122}) k_1 k_2, \quad A_{22} = (B_{22} + B_{122} c_1) k_2^2,$$

$$A_{33} = B_{33} k_3^2, \quad A_{112} = B_{112} k_1^2 k_2, \quad A_{122} = B_{122} k_1 k_2^2.$$

На втором этапе проведены исследования ультразвукового двустороннего упрочнения как многослойных плоских образцов, полученных намоткой фольги толщиной 20 мкм в 21 слой на прямоугольную подложку, так и однослойных плоских образцов толщиной, мм: 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2 и 1,4 с оптимальными технологическими режимами, полученными на первом этапе исследований. После ультразвуковой обработки из них электроэрозионной обработкой были вырезаны образцы с размерами для последующего их испытания на растяжение согласно ГОСТ 1497-84. Образцы изготовлены из алюминиевого сплава марки 8011, нержавеющей стали марки X18H9T и титанового сплава марки В1-0.

Ультразвуковое выглаживание осуществлено на ультразвуковом прошивочном станке марки 4772А, электропитание акустической системы (мощностью 2,5 кВт) было подсоединено к выходу ультразвукового генератора УЗГ-10 мощностью 10 кВт. Выбор ультразвукового прошивочного станка марки 4772А обусловлен тем, что он имеет возможность установления необходимого статического давления путем уравнивания пиноли его акустической системы, а его стол имеет возможность продольного перемещения и поворота вокруг своей вертикальной оси, что достаточно для проведения намеченных экспериментов.

В качестве выходных приняты параметры, определяемые разрывной машиной: модуль упругости, пределы текучести и прочности, а также относительное удлинение образцов до их разрыва в соответствии с ГОСТ 7855-84. Эти испытания для образцов из нержавеющей стали марки X18H9T и титанового сплава марки В1-0 проведены разрывной

машиной марки TIRA Test 2300, а для образцов из алюминиевого сплава марки 8011-разрывной машиной марки HOUNSFIELD HKS5 с компьютерным интерфейсом. Для исследования микроструктуры образцов до и после упрочнения и их разрыва использован электронный микроскоп ZEISS AXIO VERT A1 со специальным оптическим окуляром с 1000 - кратным увеличением и компьютерным интерфейсом с программным пакетом AxioVision LE.

Четвертая глава посвящена математической обработке результатов экспериментальных исследований и их анализу.

На основе экспериментальных исследований, проведенных на первом этапе, получены математические модели зависимостей глубины и микротвердостей упрочненного слоя в кодовых и натуральных значениях от технологических режимов в виде следующих математических моделей:

- для титанового сплава марки BT1-0:

$$h = -573,59 + 11318,056S + 5,884P_{st} - 1,219A + 245625S^2 - 77,889SP_{st} - 0,013P_{st}^2 + 0,137A^2 + 200S^2P_{st} - 116SP_{st}^2, \quad (7)$$

$$H_{100} = -12903,014 + 352925S + 179,554P_{st} + 20,094A - 1620416,333S^2 - 3041,667SP_{st} - 0,056P_{st}^2 + 2,391A^2 + 13583,335S^2P_{st} + 0,213SP_{st}^2;$$

- для дюралюминия марки D16:

$$h = -366,625 + 6325S + 7,608P_{st} + 2,187A - 21250S^2 - 107SP_{st} - 0,013P_{st}^2 - 0,023A^2 + 350S^2P_{st} + 0,12SP_{st}^2 \quad (9)$$

$$H_{100} = 4085,038 + 19647,917S + 29,736P_{st} + 56,422A - 74479,167S^2 - 346,833SP_{st} - 0,051P_{st}^2 - 1,537A^2 + 1008,335S^2P_{st} + 0,5SP_{st}^2;$$

- для нержавеющей стали марки X18H9T:

$$h = 60,455 + 1692,36S + 0,521P_{st} + 1,641A + 9479,17S^2 - 8,944SP_{st} - 0,001P_{st}^2 - 0,021A^2 + 58,335S^2P_{st} - 0,016SP_{st}^2, \quad (11)$$

$$H_{100} = 8589,049 - 28176,389S + 0,742P_{st} + 58,687A + 99375S^2 + 192,222SP_{st} - 0,021P_{st}^2 - 0,16A^2 - 1000S^2P_{st} + 0,111SP_{st}^2.$$

Анализ полученных математических моделей (7)-(12) и графических зависимостей выходных параметров от изменения всех входных параметров показал следующие обобщенные результаты: независимо от вида полученных графических зависимостей исследуемых параметров от технологических режимов процесса выглаживания, во всех случаях и для всех обрабатываемых материалов они получаются при наибольших статическом давлении и амплитуде УЗК индентора и наименьшей подаче процесса выглаживания. При этом наибольшая глубина упрочненного слоя для титанового сплава марки BT1-0 и нержавеющей стали марки X18H9T доходит до $h=194$ мкм, для дюралюминия марки D16 - $h=168,5$ мкм. Наибольшая микротвердость упрочненного слоя для титанового сплава марки BT1-0 доходит до $H_{100}=8781,2$ МПа, для дюралюминия марки D16-до $H_{100}=6920,1$ МПа, для нержавеющей стали марки X18H9T- $H_{100}=9431,5$ МПа.

Измерения показывают, что до ППД с УЗК размеры зерен находятся в пределах 2...5 мкм для сплава из алюминия марки 8011 (рис.4), а после двусторонне ППД с УЗК-уменьшаются до 40...80 нм (рис.5), при этом структура с минимальными размерами образуется в передней части второго слоя. Это доказывает известные результаты о том, что наноструктуры образуются на глубине 20...30 мкм.

Как видно из рис.5 предел текучести в зависимости от глубины упрочненного слоя вначале уменьшается до срединного сечения, после чего увеличивается до своей наибольшей величины. При этом наименьшая его величина оказывается больше предела

текучести исходного материала. Это означает, что глубина упрочненного слоя больше 0,22 мм.

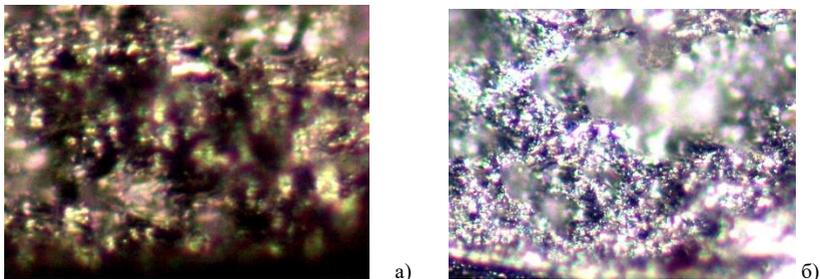


Рис.4. Микроструктура поверхностного слоя среза после испытания на машине разрыва для алюминиевого сплава марки 8011: а- исходный материал, 200 \times , б- упрочненный материал, 1000 \times

На основе проведенных исследований установлены экспериментальные зависимости изменения пределов текучести и относительных удлинений слоев после их разрыва от глубины упрочненного слоя, приведенные на рис.5.

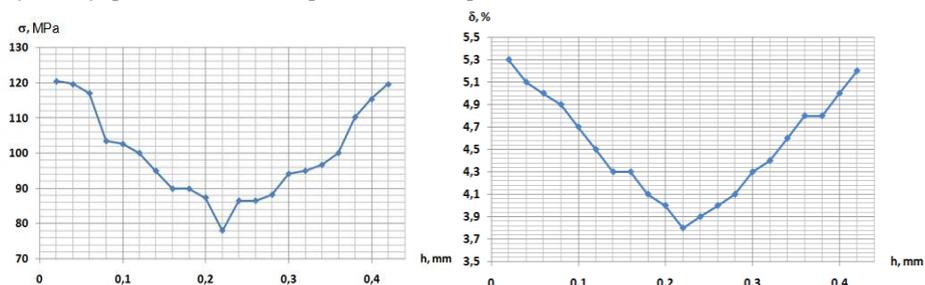


Рис. 5. Зависимости изменения пределов текучести и относительных удлинений слоев после их разрыва от глубины упрочненного слоя

Помимо этого из рис. 5 видно, что чем больше предел текучести упрочненного слоя, тем больше его относительное удлинение, т.е. пластичность тонкостенной детали. Повышение относительного удлинения слоев до их разрыва превышает установленные ГОСТом 618-2014 требования в два и более раза. Это возможно только в том случае, когда, согласно результатам известных исследований, в этих слоях образуются наноструктурные образования. С учетом приведенных на рис. 5 результатов экспериментальных исследований проведенные расчеты согласно выражению (6) показали, что двусторонняя ультразвуковая обработка тонкостенной пластины позволяет до 20,6% увеличить ее осевую жесткость с одновременным увеличением ее пластичности, что дает возможность значительно улучшить условия штамповки сложных деталей машин из таких пластин. Таким образом, экспериментальными исследованиями установлено, что предел текучести тонкостенного многослойного образца из фольги марки 8011, обработанной двусторонним ультразвуковым выглаживанием, в зависимости от глубины упрочненного слоя вначале уменьшается до срединного сечения, затем увеличивается до своей наибольшей величины. По аналогичной зависимости изменяется относительное

удлинение, т.е. пластичность тонкостенной детали, что является признаком образования наноструктурных образований в исследуемых слоях (рис.6). Установлено, что двусторонняя ультразвуковая обработка многослойной пластины из алюминиевой фольги марки 8011 общей толщиной 0,42 мм позволяет до 20,6% увеличить ее осевую жесткость с одновременным увеличением ее пластичности, что дает возможность значительно улучшить условия изготовления сложных деталей машин из таких тонкостенных пластин методами штамповки.

На втором этапе проведения экспериментальных исследований получены графические зависимости коэффициентов K повышения механических характеристик пластин обработанных двусторонним ультразвуковым выглаживанием, от их толщины в виде соотношения силы разрыва однослойных пластин после ультразвуковой двусторонней обработки к силе разрыва однослойных пластин в исходном состоянии: $K = F_{УЗ} / F_{Буз}$ (рис.6).

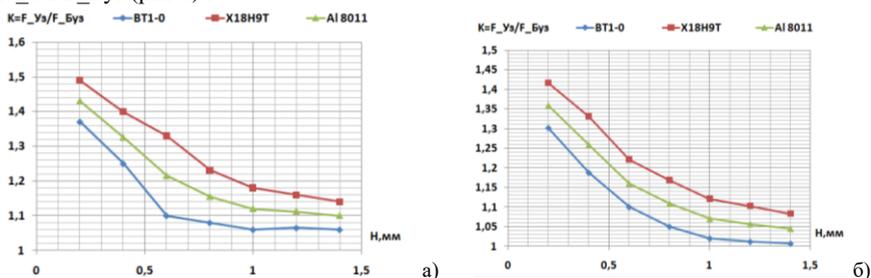


Рис. 6. Зависимости изменения пределов текучести и относительных удлинений слоев после их разрыва от глубины упрочненного слоя: а - экспериментальные результаты, б - расчетные результаты

Виртуальные исследования проведены для тех же условий и тех же материалов. Принято, что как все слои, так и сердцевина образцов до ультразвуковой обработки имеют исходную микротвердость. В этом случае при виртуальном растяжении образца в программной среде ANSYS Multiphysics напряжения образца до ультразвуковой обработки по Фон-Мизесу имеют вид, приведенный на рис.7. Получены зависимости силы растяжения образцов без ультразвуковой обработки $F_{БУЗ}$ и с ультразвуковой обработкой $F_{УЗ}$ от толщины экспериментальных образцов. Установлено, что, все они носят линейный характер и их можно описать посредством следующих математических моделей:

$$F_{БУЗ} = 45189 \cdot B1 + 355,94;$$

$$F_{УЗ} = 47309 \cdot B2 + 3698,1.$$

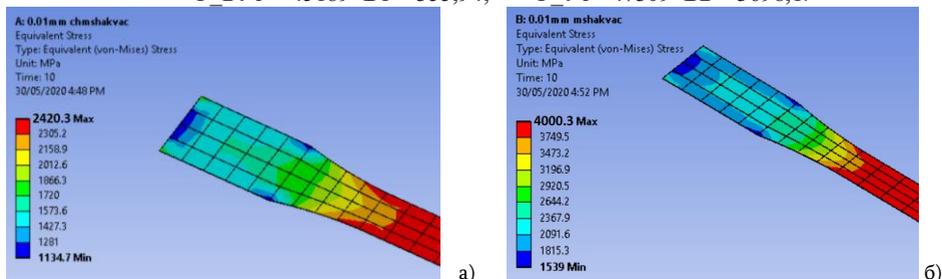


Рис.7. Напряжения образца: а - до ультразвуковой обработки, б - после ультразвуковой обработки

Это позволило сравнить толщины как необработанных тонкостенных деталей машин при той же силе растяжения, так и упрочненных с УЗК. В этом случае $F_{БУЗ} = F_{УЗ}$, откуда следует

$$45189 \cdot B1 + 355,94 = 47309 \cdot B2 + 3698,1 \Rightarrow 47309 \cdot B2 = 45189 \cdot B1 - 3342,16 \Rightarrow \\ \Rightarrow B2 = 0,955188 \cdot B1 - 0,07065.$$

Таким образом, получена зависимость толщины тонкостенной детали, обработанной с УЗК, от толщины необработанной такой же детали из условия равной прочности.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Проведенные исследования по изучению процессов ультразвукового упрочнения рабочих поверхностей деталей машин показывают их положительное влияние на повышение эксплуатационных характеристик. Установлено, что в процессе ультразвукового упрочнения повышение эксплуатационных характеристик деталей машин может быть связано с образованием нанозернистых структур на глубине 20...40 мкм от рабочей поверхности.
2. На основе проведенных теоретических исследований получены формулы для расчета эквивалентных изгибных и осевых жесткостей тонкостенных деталей машин путем условного деления их упрочненной поверхности на слои с определенными механическими характеристиками. Полученные формулы позволяют на стадии проектирования детали машин установить ее толщину из условия равной прочности.
3. Теоретически обосновано, что между микротвердостями слоев условной многослойной пластины и ее механическими характеристиками существует определенная функциональная связь. На основе известной модели D-Ross предназначенной для расчета эквивалентной изгибной жесткости двуслойных конструкций, получены формулы для расчета эквивалентной изгибной жесткости многослойных тонкостенных деталей машин, которые могут быть использованы и для расчета эквивалентной изгибной жесткости многослойных строительных конструкций.
4. Разработан способ ультразвукового двустороннего упрочнения тонкостенных листовых материалов, который позволяет получать заготовки в виде упрочненных с двух сторон листовых материалов с равными прочностными характеристиками как в поперечном, так и продольном направлениях (Патент РА 3255 А).
5. Разработан способ изготовления компактных трехстержневых малогабаритных магнитострикционных преобразователей ультразвуковых колебаний (Патент РА 3265 А), на основе которых созданы промышленные образцы ультразвуковых выглаживателей для упрочнения деталей машин как сферическим, так и цилиндрическим инденторами. Данный способ позволяет увеличить мощность ультразвукового преобразователя до 25,5%, а при заданной мощности уменьшить его габаритные размеры до 1,14 раза.
6. Экспериментальными исследованиями установлены упрощенные квадратические математические модели зависимостей микротвердости упрочненных слоев и глубины их проникания от технологических параметров процесса ультразвукового выглаживания. Анализ полученных математических моделей и их графических зависимостей выходных параметров от изменения всех входных параметров показал, что, независимо от вида полученных графических зависимостей исследуемых параметров от технологических режимов процесса выглаживания, во всех случаях и для всех обрабатываемых материалов они получаются при наибольших статическом давлении и амплитуде УЗК индентора и наименьшей подаче процесса выглаживания.

7. Установленные в процессе экспериментальных исследований упрощенные квадратические математические модели зависимостей микротвердости упрочненных слоев и глубины их проникания от технологических параметров процесса ультразвукового выглаживания при одностороннем ультразвуковом упрочнении могут быть использованы для управления процессом двустороннего процесса ППД с применением ультразвука.
8. На основе проведенных исследований установлены экспериментальные зависимости изменения пределов текучести и относительных удлинений слоев после их разрыва от глубины упрочненного слоя. Установлено, что предел текучести в зависимости от глубины упрочненного слоя вначале уменьшается до срединного сечения, после чего увеличивается до своей наибольшей величины. Установлено также, что чем больше предел текучести упрочненного слоя, тем больше его относительное удлинение. Показано, что двусторонняя ультразвуковая обработка тонкостенных пластин позволяет до 49,6% увеличить их осевую жесткость с одновременным увеличением их пластичности, что дает возможность значительно улучшить условия штамповки сложных деталей машин из таких пластин.
9. Установлено, что применение технологии двустороннего ультразвукового упрочнения листовых заготовок для изготовления из них методами обработки материалов давлением позволяет до 20...30% улучшить весовые характеристики изготовленных тонкостенных деталей машин.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. Արշակյան Ա.Լ., Բալասանյան Բ.Ա., Չիբուխչյան Յ.Ս., Բալասանյան Բ.Ս. Կանոնավոր միկրոռեյնիտի ձևավորման օպտիմալ պարամետրերի որոշման սկզբունքները // Չայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Լրաբեր: Փիտական հոդվածների ժողովածու՝ 3 մասով 2018, Մաս 2, էջ 440-444
2. Чибухчян Г.С., Стакян М.Г., Чибухчян О.С. Влияние коррозионных сред на несущую способность элементов конструкций горных машин // Горный журнал. - 2018. - N 5. - С. 69-71, (Индексируется базами: Scopus, Web of Science). DOI: 10.17580/gzh.2018.05.10 ISSN 0017-2278
3. Sogomonyan V.K., Chibukhchyan G.S., Chibukhchyan H.S. Diagnostics of fatigue fractures of building structures elements// Magazine of Civil Engineering/Инженерно-строительный журнал № 4(80), 2018. С.195-203, (Индексируется международными базами:Scopus,Web of Science). DOI: 10.18720/MCE.80.17
4. Баласанян Б.С., Агбалян С.Г., Захарян А.А., Баласанян Б.А., Чибухчян О.С. О возможности повышения прочности и пластичности титановой фольги с ультразвуковым упрочнением ее поверхностей // Весник НПУА, Механика, машиноведение, машиностроение. Ереван: Чартарагет, 2018.-N 2. - С.76 – 89.
5. Чибухчян Г.С., Стакян М.Г., Чибухчян О.С. Повышение несущей способности элементов конструкций транспортных средств по критерию коррозионной прочности // Проблемы машиностроения и надежности машин.- 2019.-N 6, (Индексируется международными базами: Scopus, Web of Science).-С.91-98. DOI: 10.1134/S0235711919060038
6. Чибухчян О.С. Состояние и перспективы развития воздушного транспорта в ЕАЭС. // Логистика.-М., - 2019. - № 10. - С.42-45. ISSN:2219-7222
7. Баласанян Б.С., Аршакиан А.Л., Чибухчян О.С. О возможности улучшения весовых характеристик БЛА за счет повышения прочностных характеристик их тонкостенных деталей путем двустороннего ультразвукового упрочнения // Digital UAV Forum – 2019: Международный форум по IT-разработке, искусственному интеллекту и

- беспилотным летательным аппаратам (электронное издание)/ Под ред. д.т.н., академика РАН М.А. Погосяна.– М.: МАИ, Ереван(Армения):НПУА, 2019. – С. 22-23.
8. Чибухчян О.С. Развитие беспилотных летательных аппаратов в ЕАЭС: Проблемы и решения // Транспорт: наука, техника, управление.-М., 2019.- №12.- С.72-76. ISSN печатной версии:0236-1914 Перечень ВАК
 9. Чибухчян О.С. Повышение прочности деталей летательных аппаратов на основе технологии обработки ультразвуком // Транспорт: наука, техника, управление.-М., 2020. - № 10. - С. 58-61 .ISSN печатной версии: 0236-1914 Перечень ВАК: включен <http://www.viniti.ru>
 10. Чибухчян О.С. Повышение прочности тонкостенных деталей машин двусторонним ультразвуковым упрочнением ее поверхностей // Вестник Национального политехнического университета Армении: Механика, машиноведение, машиностроение. - Ереван, 2020.- № 1. - С. 69-82.
 11. Чибухчян О.С. Совершенствование конструкции промышленных ультразвуковых выглаживателей для повышения прочности несущих элементов БПЛА // сб. тр. науч. семинара "Перспективные направления развития отделочноупрочняющей обработки и виброволновых технологий" Под ред. В.А. Лебедева; Донской гос. техн. ун-т.– Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2020. -С. 285-291. ISBN 978-5-7890-1804-0

ՀՈԿԿԱՆՆԵՍ ՍՈՒՐԵՆԻ ԶԻՐՈՒՄԻՆՍԱԿ
ԹՈՂՈՂ ԱՊԱՐԱՏՆԵՐԻ ԲԱՐԱԿԱՊԱՏ ՄԵՔԵՆԱՄԱՍԵՐԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՈՒՄ
ՈՒՆՏՐԱԶԱՅՆԱՅԻՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ԿԻՐԱՈՄԱՄԲ

Աշխատանքի արդիականությունը

ԹՎ մեքենամասերի մոտավորապես 75%-ը բարակապատ են, որոնք պատրաստվում են մետաղե թիթեղներից ճշմամբ մշակման տարբեր եղանակներով: ԹՎ կառուցվածքային տարրերում շարունակում են պահանջված մնալ մեծ ամրությամբ մետաղները և տարբեր համաձուլվածքները, որոնց մեխանիկական հատկությունները կարելի է բարձրացնել բարակապատ մեքենամասերի մակերևույթները ՈւՋՏ-ով երկկողմանի պլաստիկ դեֆորմացմամբ: Այս խնդիրը մինչ այժմ ուսումնասիրված չէ, որը կարող է ապահովել մեծ պաշար մեքենամասերի չափերի փոքրացման, հետևաբար և՛ քաշի նվազեցման համար: Դա ավիաշինության արդիական խնդիրներից է, որը թույլ կտա բարելավել ԹՎ-ի քաշային բնութագրերը:

Աշխատանքի նպատակն է թռչող ապարատների քաշային բնութագրերի բարելավումը՝ նրա բարակապատ մեքենամասերի աշխատանքային մակերևույթների ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների բարձրացմամբ, երկկողմանի ուլտրաձայնային հարթեցման տեխնոլոգիայի կիրառմամբ:

Նախաբանում հիմնավորվել է թեմայի արդիականությունը, բերված են աշխատանքի նպատակը և խնդիրները, հետազոտության մեթոդները, գիտական նորույթը և կիրառական նշանակությունը, պաշտպանության համար ներկայացված աշխատանքի գիտական դրույթները, տեսական, տեղեկատվական և մեթոդաբանական հիմքերը, արդյունքները և հրապարակումները, ինչպես նաև կառուցվածքը:

Առաջին գլխում շարադրված են հարցի դրվածքը, ավիացիոն արդյունաբերությունում նոր կյութերի և տեխնոլոգիաների կիրառման ժամանակակից միտումները, տրանսպորտային մեքենաշինության բարակապատ մեքենամասերի աշխատանքային մակերևույթների մակերևութային պլաստիկ դեֆորմացմամբ (ՄՊԴ) ամրացման ավանդական և ուլտրաձայնային մեթոդների հիմնախնդիրները և առանձնահատկությունները:

ՄՊԴ ոլորտում իրականացված հետազոտությունների արդյունքների վերլուծությունը ցույց է տվել, որ մակերևութային շերտի ուլտրաձայնային տատանումների կիրառումով (ՈՒՋՏ) մակերևութային պլաստիկ դեֆորմացմամբ տեխնոլոգիական հնարավորությունները, մասնավորապես՝ մեքենաների բարակապատ մասերի պատրաստման համար բարակապատ նախապատրաստվածքների մակերևույթների երկկողմանի ամրացումը դրանց ամրային հատկությունների բարձրացման համար ունեն գարգացման և գործնական կիրառության մեծ պաշար, որի ուսումնասիրությունը ատենախոսական աշխատանքի նպատակն է:

Երկրորդ գլխից նվիրված է երկկողմանի ուլտրաձայնային մշակմամբ բարակապատ թերթերի ծռման և առանցքային կոշտության մաթեմատիկական մոդելների մշակմանը:

Երկչերտ թիթեղների Յունգի համագոր մոդուլի հաշվարկման D-Ross-ի հայտնի բանաձևի հիման վրա դուրս է բերվել բազմաչերտ թիթեղի Յունգի համագոր մոդուլի հաշվարկման բանաձև: Արտածվել է բարակապատ թիթեղների մակերևույթների երկկողմանի ուլտրա- ձայնային պլաստիկ դեֆորմացմամբ ամրացումից հետո դրանց առանցքային կոշտության հաշվարկային բանաձև՝ միաառանցք ձգման դեպքում: Հիմնավորվել է, որ թիթեղի նույնիսկ միակողմանի ուլտրաձայնային մշակումը թույլ է տալիս թիթեղի հաստությունը փոքրացնել 11,6%-ով, իսկ երկկողմանի ուլտրաձայնային մշակումը՝ մինչև 28,2%-ով:

Մշակվել է բարձր ամրության տիտանի նրբաթիթեղի ստացման նոր եղանակ (ՀՀ թիվ 3255 A2 արտոնագիր), որի կիրառումը թույլ է տալիս նրբաթիթեղի մեջ ստեղծել բարձրամուր ցանցատեսք շերտեր, որի արդյունքում հավասարվում են նրբաթիթեղի ամրային հատկությունները՝ դրա և՛ երկայնական, և՛ լայնական ուղղություններով:

Երրորդ գլխում ներկայացված են բնական և վիրտուալ փորձարարական հետազոտությունների իրականացման մեթոդիկան, փորձարարական սարքավորումների, չափիչ-գրանցող սարքերի կիրառումը, փորձարարական արդյունքների հավաքման և մեքենայական մշակման մեթոդները:

Մշակվել է մեքենամասերի աշխատանքային մակերևույթների պլաստիկ դեֆորմացման՝ նոր ուլտրաձայնային հարթեցուցիչ մագնիսաառաձգական տրանսֆորմատորով: Մշակվել է մագնիսաառաձգական տրանսֆորմատորի պատրաստման նոր եղանակ, որը հնարավորություն է տալիս ուլտրաձայնային մագնիսակծկման կերպափոխիչ տրված զաբարիտային չափերի դեպքում մինչև 1,25 և ավելի անգամ բարձրացնել դրա հզորությունը, կամ տրված հզորության դեպքում իջեցնել դրա գաբարիտային չափերը 1,14 անգամ (ՀՀ թիվ 3265 A2 արտոնագիր, հրապարակման թվականը՝ 2019.02.01):

Ներկայացված են փորձարարական հետազոտությունների իրականացման համար անհրաժեշտ տեխնոլոգիական և չափիչ-գրանցող սարքավորումների, փորձանմուշների կյուբի և չափերի, հետազոտության հաստատուն, փոփոխական մուտքային ու հետազոտվող ելքային գործոնների ընտրության հիմնավորումները, ՈՒՁՏ տատանման ամպլիտուդի, մշակված մակերևույթների ամրության և հոսունության սահմանների չափումների սխեմաները ու եղանակները, մակերևութային շերտերի միկրոկառուցվածքների ուսումնասիրման, գնահատման և չափումների սխեմաները ու եղանակները:

Հետազոտություններն իրականացվել են 4772A մակնիշի ուլտրաձայնային հաստոցի վրա, փորձանմուշների մեխանիկական հատկությունները որոշվել են TIRAtest 2300 և HOUNSFIELD HKS5 մակնիշների պրկման (խզման) մեքենաներով, իսկ նրանց միկրոկառուցվածքի ուսումնասիրման համար կիրառվել է համակարգչային ինտերֆեյսով ZEISS AXIO VERT A1 մակնիշի էլեկտրոնային մանրադիտակ:

Չորրորդ գլուխը նվիրված է փորձարարական հետազոտությունների արդյունքների մշակման հարցերին և դրանց վերլուծությանը:

Հաստատվել է, որ բոլոր դեպքերում, երկկողմանի հարթեցման գործընթացում ամրացվող շերտի խորությունից կախված, ժամանակավոր դիմադրությունն սկզբում նվազում է մինչև հատույթի միջնամասը, այնուհետև մեծանում մինչև իր առավելագույն արժեքը, որը թույլ է տալիս դրանց առանցքային կոշտության գործակիցը բարձրացնել 22...36,7%-ով՝ կախված կյուբից: Ընդ որում, որքան բարձր են կյուբի պլաստիկ հատկությունները, այնքան բարձր է նշված գործակիցի մեծությունը: Հաստատվել է, որ նույնիսկ միակողմանի ՈՒՁՏ-ով ամրացումից հետո ամրացված փորձանմուշների առանցքային կոշտության բարձրացման գործակիցը աճում է 9,8...13,8%-ով, իսկ երկկողմանի ՈՒՁՏ-ով ամրացումից հետո այդ թվերը աճում են մոտ երկու անգամ: Ցույց է տրվել, որ ունենալով միակողմանի ՈՒՁՏ-ով ամրացված շերտի միկրոկարծրությունների կախվածությունները շերտերի խորությունից՝ հնարավոր է ANSYS Multiphysics փաթեթի կիրառմամբ բացահատել դրա երկկողմանի ՈՒՁՏ-ով ամրացված բարակապատ մեքենամասի ամրության բարձրացման հնարավորությունները:

Հետազոտությունների տեսական և փորձարարական արդյունքները կարող են կիրառվել մագնիստրոսների և ճարտարագետ հետազոտողների ուսումնական ծրագրերում:

ANSYS Multiphysics միջավայրում որոշվել է նմուշի լարումը՝ ըստ Վոն-Միզեսի, մինչև ՈՒՁՏ մշակումը: Գիտափորձարարական հետազոտությունների արդյունքները նախատեսվում է ներդնել «ԱՐՄԲԱՉԱՍ» ՓԲԸ-ում և «ԵՐԵՎԱՆԻ ԿԱՊԻ ՄԻՋՈՑՆԵՐ ԳԻՏԱԳԵՏԱԶՈՏԱԿԱՆ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ» ՓԲԸ-ում:

HOVHANNES SUREN CHIBUKHCHYAN
INCREASING THE STRENGTH OF THIN-WALLED MACHINE PARTS OF THE AIRCRAFT
WITH THE USE OF ULTRASOUND TECHNOLOGY

Relevance of the work

About 75% of aircraft machine parts are thin-walled, which are made of metal sheets by various methods of processing under pressure. High-strength metals and various alloys are still in demand in the structural elements of aircraft, the mechanical properties of which can be improved by two-way plastic deformation of the surfaces of thin-walled machine parts with the use of ultrasonic technology. This problem has not yet been studied, which can provide a large reserve for reducing the size of machines, and therefore reducing weight. This is one of the urgent tasks of the aircraft industry, which will improve the weight characteristics of the flying machines.

The purpose of the work is to improve the weight characteristics of aircraft by increasing the physical and mechanical properties of the working surfaces of the thin-walled machine parts, using the technology of two-way ultrasonic smoothing.

The Preface substantiates the relevance of the topic, provides the goals and objectives of the work, research methods, scientific novelty and applied value, scientific provisions of the work submitted for the defense, the theoretical, informational and methodological grounds, the results and publications, as well as the structure of the project.

Chapter One describes the statement of the problem, the current trends in the use of new materials and technologies in the aviation industry, the problems and features of traditional and ultrasonic methods of strengthening the working surfaces of the thin-walled machine parts in transport engineering by surface-plastic deformation (SPD).

The analysis of the results of research conducted in the field of SPD has shown that the technological capabilities with the use of ultrasonic vibrations of the surface layer (USV) for the surface-plastic deformation, in particular, the two-way strengthening of the surfaces of thin-walled semis for the manufacture of thin-walled machine parts to improve their strength properties have a large reserve of development and practical application, the study of which is the goal of the dissertation:

Chapter Two is devoted to the development of mathematical models of bending and axial stiffness of the thin-walled sheets by two-way ultrasonic processing.

Based on the well-known D-Ross formula for calculation of Young's equilibrium modulus of the two-layer sheets, a formula has been derived for calculating the Young's equilibrium modulus of the multi-layer sheet. The calculation formula of the axial stiffness of the thin-walled sheets after strengthening their surfaces by two-way ultrasonic plastic deformation in case of uniaxial stretching has been obtained. It has been substantiated that even the one-way ultrasonic processing of the sheet can reduce the thickness of the sheet by 11.6%, while the two-way ultrasonic processing – by up to 28.2%.

A new method has been developed for producing high-strength titanium foil (RA Patent N 3255 A2), the use of which makes it possible to create high-strength mesh strips in the foil, as a result of which the strength properties of the foil in its both longitudinal and transverse directions are equalled.

Chapter Three presents methods for conducting natural and virtual experimental studies, the use of experimental equipment, measuring and recording devices, methods for collecting experimental results and machine processing.

A new ultrasonic smoothener with magneto-elastic transformer for plastic deformation of the working surfaces of machine parts has been developed. A new method for manufacturing a magneto-elastic transformer has been developed, which makes it possible to increase the power of an ultrasonic magnetic reduction converter with the specified overall dimensions up to 1.25 or more times, or to reduce its overall dimensions by 1.14 times under the specified power (RA Patent N 3265 A2, publication of 2019.02.01).

The article provides justification for the choice of technological and measuring and recording equipment, the sample material and sizes required for experimental research, the constant and variable input and investigated output factors of research, the schemes and methods for measuring the USV amplitude, the strength and fluidity limits of the treated surfaces, as well as the schemes and methods for the research, evaluation and measurement of microstructures of surface layers.

The research was carried out on the ultrasonic machine 4772A, the mechanical properties of the samples were determined by TIRAtest 2300 and HOUNSFIELD HKS5 breaking machines, and an ZEISS AXIO VERT A1 electronic microscope with a computer interface was used to study their microstructure.

Chapter Four is devoted to the processing of experimental research results and their analysis.

It was found that in all cases, depending on the depth of the strengthened layer in the process of two-way smoothing, the temporary resistance first decreases to the middle of the cross section, then increases to the maximum value, which increases their key coefficient of rigidity by 22 ... 36.7%, depending on the material. The higher the plastic properties of the material, the higher the value of the specified coefficient is. It has been confirmed that even after strengthening by a one-way ultrasound technology, the coefficient of increasing the axial stiffness of the strengthened samples increases by 9.8...13.8%, and after being strengthened by a two-way ultrasound vibration, these figures grow approximately twice. It has been shown that having a dependence of the micro-rigidities of the layer strengthened by one-way ultrasonic technology on the depth of the layers, it is possible to use the package ANSYS Multiphysics to identify the opportunities of improving the durability of the machine parts treated by USV.

The results of the theoretical and experimental research can be applied in the training programs of Graduate students and research engineers.

In the ANSYS Multiphysics environment, the voltage of the sample was determined according to Von-Misses before ultrasound processing. The results of scientific and experimental research are planned to be implemented in ARMBAZALT CJSC and YEREVAN RESEARCH INSTITUTE OF COMMUNICATION FACILITIES CJSC.

