

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук профессора Блюменштейна Валерия Юрьевича
на диссертационную работу Самуль Артема Геннадьевича
«ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ
ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИ
ПОВЕРХНОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ», представленную на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – «Технология машино-
строения»

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Применение современных машин характеризуется все более жесткими условиями эксплуатации, когда изделие работает в коррозионной среде с одновременным приложением статических и динамических нагрузок. Это требует от машиностроителей постоянного совершенствования конструкций, применения новых материалов и технологий изготовления. Все более широкое применение при изготовлении ответственных деталей машин находят сплавы алюминия, меди, титана и других пластичных материалов. Известно, что механическая обработка таких сплавов, имеющих относительно невысокую твердость, требует тщательного выбора схем, режущих и деформирующих инструментов, инструментальных материалов и режимов. Например, корпус теплонагруженного усилителя мощности сверхвысокой частоты изготавливается из латунного сплава Л68. При этом необходимо обеспечить высокие эксплуатационные свойства изделия за счёт подбора рациональных режимов и технологий упрочняющей обработки. Повышение эксплуатационных свойств возможно за счёт подбора технологии упрочняюще-чистовой обработки и режимов ее реализации.

К числу наиболее известных и достаточно хорошо изученных относятся методы поверхностного пластического деформирования (ППД), и, в частности, метод ультразвукового поверхностного пластического деформирования инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой (УЗПД). Автор отмечает, что применение УЗПД позволяет интенсифицировать пластическое течение материала поверхностного слоя; при этом реализуется выглаживающий и упрочняющий эффект для широкой номенклатуры деталей, выполненных из различных материалов. Относительно небольшие статические нагрузки позволяют обрабатывать нежесткие, тонкостенные детали, большое количество технологических параметров позволяет управлять итоговым микрогеометрическим и физико-механическим состоянием обработанных поверхностей в широком диапазоне.

Метод УЗПД достаточно хорошо изучен, в том числе, в рамках научного направления И.И. Муханова – Х.М. Рахимянова. Однако, большинство исследований выполнено на материалах высокой и средней твердости; отсутствуют либо незначительны результаты обработки деталей из пластичных металлов и сплавов (с твердостью менее НВ150). Известно, что область применения подобных материалов существенно расширяется; в тоже время, их физико-механические характеристики существенно отличаются от металлов и сплавов средней и высокой твердости. Это требует создания и исследования новых схем обработки, в том числе, УЗПД с тангенциальным (касательным к обрабатываемой поверхности) направлением колебаний индентора.

Поэтому диссертационную работу Самуль А.Г., посвященную разработке технологии формирования поверхностных слоёв с повышенными требованиями к уровню микрогеометрических и физико-механических характеристик на деталях из пластичных металлов и сплавов методом ультразвукового поверхностного пластического деформирования с тангенциальным направлением колебаний индентора, **следует считать актуальной.**

2. Общая характеристика, структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 113 наименований. Работа содержит 203 страниц текста, в том числе, 127 рисунков, 5 таблиц и 6 приложений.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практическая значимость результатов работы, достоверность результатов и основные положения, выносимые на защиту. Отмечены личный вклад автора, соответствие работы паспорту научной специальности, апробация, публикации, структура и объем работы.

В первой главе проведен анализ литературных источников, посвященных результатам исследований метода ультразвукового поверхностного пластического деформирования, в которых широко и доступно описаны его преимущества и рациональные области применения. Отмечено, что формирование поверхностных слоёв деталей, характеризующихся высокими эксплуатационными свойствами, полученных с помощью высокоинтенсивного поверхностного упрочнения является актуальной технологической задачей. Спецификой метода УЗПД является оригинальная схема приложения статической нагрузки в сочетании с ультразвуковыми колебаниями, что позволяет обрабатывать тонкостенные нежесткие детали из различных материалов. Выявлено, что в этой области знаний нет достаточной информации для проектирования технологий УЗПД пластичных материалов из алюминиевых, медных и титановых сплавов, обладающих высокой пластичностью. Это требует поиска рациональной схемы обработки и выявления влияния режимов ультразвукового поверхностного деформирования на качество поверхностного слоя деталей, изготовленных из пластичных материалов.

Во второй главе представлены результаты теоретико-экспериментальных исследований метода УЗПД по тангенциальной схеме. По данной схеме вектор результирующей скорости всегда расположен в плоскости касательной к обрабатываемой поверхности, что обеспечивает непрерывный контакт инструмента с поверхностью детали, отсутствие значительного динамического воздействия в направлении по нормали к поверхности, что позволяет формировать поверхностный слой с различным сочетанием выглаживающего и упрочняющего эффектов при дозированном значении нормальной составляющей силового воздействия. В совокупности это обуславливает рациональность применения данной схемы ультразвукового поверхностного пластического деформирования для деталей, выполненных из пластичных металлов и сплавов. Предложена математическая модель траектории перемещения инструмента в процессе УЗПД по тангенциальной схеме в виде системы уравнений, учитывающих смещение соседних следов воздействия инструмента на развёртке обрабатываемой поверхности, обусловленного не кратностью времени одного оборота детали к периоду УЗК. Это позволило установить закономерности формирования траектории движения инструмента на поверхности детали, с учётом влияния технологических параметров обработки, в исследуемом диапазоне режимов. Автором предложено использовать параметр равный отношению ширины коридора следа обработки в направлении подачи инструмента (K) к её величине (S), для установления условий формирования частичного ($K/S < 1$) или полностью нового ($K/S \geq 1$) микрорельефа обрабатываемой поверхности в процессе УЗПД по тангенциальной схеме. Установлена роль угла β – угол между векторами скорости колебательного движения и скорости главного движения, являющимся важным технологическим параметром, позволяющим изменять форму траектории движения инструмента и ширину коридора следа обработки (увеличение вплоть до величины равной удвоенному значению амплитуды колебаний), а также влиять на степень перекрытия следов обработки в процессе формирования микрогеометрии поверхности. Разработана математическая модель формирования топографии поверхности при УЗПД по тангенциальной схеме, учитывающая геометрические па-

раметры следа обработки, что позволяет назначать технологические параметры УЗПД в зависимости от требуемой микрогеометрии.

В третьей главе изложены технологическое и методическое обеспечение экспериментальных исследований. Спроектирована и изготовлена оригинальная технологическая установка для реализации УЗПД по тангенциальной схеме на базе токарно-винторезного станка 250ИТВМ.01, позволяющая регулировать угол ввода ультразвуковых колебаний относительно вектора скорости главного движения, положение инструмента по высоте, что обеспечивает обработку широкого диапазона размеров деталей. Обоснованы материал, форма и размеры образцов и методика их подготовки для проведения экспериментов. Разработаны и/или адаптированы методики исследования качества поверхностного слоя и триботехнических характеристик. Используются современное оборудование и приборы для оценки точности формы поверхности – КИМ ZeissContura; оценки объёмных характеристик обработанных поверхностей – ZYGO NewView 7300; определения высотных параметров шероховатости и волнистости – профилометр MarSurf PS10; оценки структурного состояния исследуемых образцов – оптический микроскоп высокого разрешения; определения физико-механических свойств – микротвердомер; оценки остаточных напряжений по методу Давиденкова – оригинальный прибор, расчетный алгоритм и программное обеспечение; оценки износостойкости – машина трения ИИ5018; определения деформационных характеристик – универсальная сервогидравлическая установка BISS UT-100.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса УЗПД по тангенциальной схеме на образцах из материалов Д16 (НВ31), Д16Т (НВ65), Л68 (НВ150), а также АРМКО-железа (НВ125). Экспериментально установлено, что применение УЗПД по тангенциальной схеме обеспечивает формирование регулярного микрорельефа, характеризующегося ячеистым строением (с плотностью элементов до 1000 на 1 мм² и более), с регулируемым сочетанием значений высотных и шаговых параметров. Металлографические исследования показали, что смена направления ввода колебаний относительно обрабатываемой детали оказывает влияние на изменение глубины распространения деформации в поверхностном слое. Выявлена граница области допустимой статической нагрузки для индентора с профильным радиусом равным 4 мм, за пределами которой наблюдается существенный рост волнистости поверхности. Показана возможность снижения шероховатости более чем в 3 раза, до уровня $R_a = 0,2$ мкм и $R_z = 1,67$ мкм; при этом размер детали изменяется в пределах до 4 мкм (менее 30% от допуска на данный диапазон размеров по 5-му качеству). Это позволяет применять УЗПД по тангенциальной схеме без назначения дополнительного припуска на обработку. Выявлено изменение микроструктуры поверхностного слоя обрабатываемого материала, заключающееся в повышении плотности зёрен на единицу объёма в 2,5 раза, возникновении направленной деформации зёрен со степенью до 37,4 %, на глубину до 298 мкм (для материала 10895 на режимах $P_{СТ} = 120$ Н, $S = 0,1$ мм/об; $V_v = 62,8$ м/мин, $A = 12$ мкм, $f = 20$ кГц, $r_1 = 4$ мм). Выявлена роль угла между векторами скорости главного движения и колебательной скорости β . Изменение данного параметра оказывает влияние на параметры волнистости, шероховатости и микроструктуру поверхностного слоя. Получены регрессионные зависимости в виде уравнений пятого порядка, позволяющие прогнозировать итоговые значения параметров шероховатости R_a и S_m в диапазонах изменения статического усилия $P_{СТ}$ от 20 до 120 Н, подачи S от 0,07 мм/об до 0,13 мм/об, угла β от 0 до 90° при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании деталей из алюминиевого сплава Д16Т.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния УЗПД по тангенциальной схеме на механические и эксплуатационные свойства. Показано, что применение УЗПД по тангенциальной схеме является рациональным для обеспечения качества поверхностного слоя деталей, выполненных из пластичных металлов и сплавов, в связи с возможностью достижения за один рабочий ход различных сочетаний упрочняющего и выглаживающего эффектов. Установлены теоретические и экспериментальные закономер-

ности формирования топографии поверхности при УЗПД по тангенциальной схеме, взаимосвязи параметров шероховатости и физико-механических свойств поверхности с технологическими параметрами УЗПД. Триботехническими испытаниями выявлена возможность повышения износостойкости до 60 % (сплав Л68) по сравнению с износостойкостью поверхности, обработанной шлифованием. Испытаниями на универсальной сервогидравлической установке BISS UT-100 в условиях растяжения по методике от нулевого цикла с увеличивающейся амплитудой напряжений на каждом цикле показано, что УЗПД по тангенциальной схеме увеличивает число циклов нагружения до возникновения пластической деформации образцов в 5 и более раз. Разработан алгоритм управления технологическим процессом УЗПД по тангенциальной схеме и технологические рекомендации по его применению для обработки пластичных металлов и сплавов, учитывающие ключевые параметры обработки. Приведены результаты промышленной апробации технологии УЗПД по тангенциальной схеме.

Автором представлены предложения по развитию исследований в данной области, включая разработку математической модели, позволяющей прогнозировать комбинированное микрогеометрическое и физико-механическое состояние поверхностей после применения УЗПД по тангенциальной схеме, а также установление рациональных границ применимости данной схемы ультразвукового деформирования

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обеспечение достоверности полученных результатов обусловлено использованием современного экспериментального оборудования, применением методов математической статистики для оценки погрешности измерений, математическим моделированием формируемого микрогеометрического состояния поверхности, достоверность которого подтверждена сходимостью теоретических и экспериментальных данных.

Выводы по главам и по работе в целом в достаточной степени обоснованы, опираются на существующие научные положения и не противоречат существующим теориям и исследованиям. Принятые граничные условия являются допустимыми и не оказывают существенного влияния на результаты работы. В процессе диссертационного исследования автор корректно ссылается на заимствованные методики и научные результаты, полученные другими авторами.

Изложенные в диссертации результаты прошли апробацию на международных и российских конференциях различного уровня.

Основные научные результаты достаточно полно отражены в публикациях: опубликованы 19 научных работ, из них 3 работы входят в перечень журналов, рекомендованных ВАК, и 3 статьи в изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus.

4. Научная новизна исследований

1. Установлено, что изменение схемы УЗПД с нормальной на тангенциальную, обеспечивает формирование стабильного качества поверхностного слоя с низкими параметрами шероховатости и повышенными физико-механическими свойствами на деталях, выполненных из пластичных металлов и сплавов (алюминиевых, титановых, медных, а также низкоуглеродистых сталях).
2. Разработана математическая модель формирования топографии поверхности при УЗПД по тангенциальной схеме, учитывающая влияние исходной твёрдости обрабатываемого материала и шероховатости поверхности, кинематические и динамические параметры обработки.

3. На основании экспериментальных исследований образцов из пластичных материалов при обработке УЗПД по тангенциальной схеме и расчётных данных установлены закономерности формирования поверхностного слоя, включая микрогеометрию и физико-механические свойства.

5. Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость заключается в выявленных в результате кинематического и силового анализа УЗПД по тангенциальной схеме особенностях движения рабочего инструмента относительно обрабатываемой поверхности и характера действующих сил в зоне деформирования; создании математической модели формирования топографии поверхности; разработанных аналитических и эмпирических зависимостях влияния технологических параметров, включая угол β ввода ультразвуковых колебаний инструмента относительно вектора скорости главного движения, на качество поверхностного слоя.

Практическая значимость работы заключается в разработке алгоритма управления процессом и технологических рекомендациях по выбору режимов обработки УЗПД по тангенциальной схеме для формирования характеристик качества поверхностного слоя деталей; установленных технологических параметров обработки, оказывающих влияние на микрогеометрическое и физико-механическое состояние поверхностного слоя деталей; апробации и внедрении в действующее производство технологии УЗПД по тангенциальной схеме для повышения эксплуатационных свойств корпусов теплонагруженных СВЧ усилителей мощности; всесторонней апробации в ходе учебного процесса по направлениям подготовки 15.03.05 и 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

6. Анализ публикаций автора по теме диссертационного исследования

Основные научные результаты достаточно полно отражены в публикациях: опубликованы 19 научных работ, из них 3 работы входят в перечень журналов, рекомендованных ВАК, и 3 статьи в изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus.

В публикациях полностью отражены основные научные результаты исследований.

7. Соответствие автореферата диссертации

Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание диссертации и отвечает требованиям ВАК РФ.

8. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа Самуль Артема Геннадьевича соответствует паспорту научной специальности 2.5.6 «Технология машиностроения» по следующим направлениям исследований:

2 – Технологические процессы, операции, установки, позиции, технологические переходы и рабочие ходы, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости.

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. Замечания по диссертационной работе

1. Автор использует аббревиатуру УЗПД, трактуя это как ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование (стр. 8 диссертации). Если так, то почему сокращение не выглядит как УЗППД?
2. Непонятно, с какой целью в 1-й главе автор приводит термины, определения и классификации, приемлемые для учебного процесса. Например, определения шероховатости, волнистости, классификацию остаточных напряжений, классификацию методов ППД и др. При этом, отсутствует научный анализ достижений в заявленной предметной области, который должен сопровождаться графическими зависимостями, моделями и др. научной информацией; в 1-й главе приведен только текст.
3. Цель диссертационной работы: «Разработка технологии формирования поверхностных слоёв с повышенными требованиями к уровню микрогеометрических и физико-механических характеристик на деталях из пластичных металлов и сплавов методом ультразвукового поверхностного пластического деформирования». И где же собственно технология?
4. Автор утверждает, что «Благоприятное влияние УЗПД на точность геометрической формы обрабатываемых деталей, обусловлено незначительным уменьшением значения отклонения от круглости в поперечном сечении цилиндрических деталей» (стр. 12 автореферата, стр. 114-117 диссертации). Это требует пояснения.
5. Неясна роль профильного радиуса/диаметра деформирующего инструмента в формировании качества поверхностного слоя. Традиционно, профильный радиус индентора при ППД – один из ключевых технологических факторов. Непонятно, использован инструмент только с одним профильным радиусом равным 4 мм?
6. Требуется пояснения термин «Очаг деформирования» (стр. 79 диссертации). В теории пластичности и, в частности, теории ППД, известен термин «Очаг деформации». Здесь на рис. 2.31 (стр. 70 диссертации) приводится лунка от статического внедрения индентора и нет очага деформации как такового. С какой целью определяется площадь контакта? Обычно при ППД площадь контакта используется при работе инструмента по контактному давлению.
7. Являются ли приемлемыми численные значения волнистости после обработки УЗПД для процессов эксплуатации деталей из данных материалов (табл. 4.1, стр. 119 диссертации)?
8. Исследования характера распределения, уровня и глубины залегания тангенциальных остаточных напряжений (σ_t) проводились методом Н.Н. Давиденкова на кольцах (стр. 170 диссертации). А как учитывались деформации от вырезки и разрезки колец? Или исходные образцы были выполнены в виде колец? Тогда как оценивалась деформация от разрезки кольца? В диссертации нет детального изложения. Поэтому данная методика требует дополнительного пояснения.
9. К сожалению, выводы по 2-й, 4-й и 5-й главам весьма многословны, что несколько «размывает» представления об основных научных достижениях.

Приведенные замечания носят частный характер и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

10. Заключение

Диссертационная работа Самуль Артема Геннадьевича «Повышение качества поверхностного слоя деталей тангенциальным ультразвуковым воздействием при поверхностном деформировании», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором самостоятельно на высоком техническом уровне. В работе содержатся научная новизна результатов и технологических решений в области обеспечения высокого качества поверхностного слоя ответственных деталей машин методом поверхностного пластического деформирования с применением оригинальной схемы ультразвукового поверхностного пластического деформирования; также диссертация обладает теоретической и практической значимостью в области повышения эффективности упрочняющей обработки деталей методом ультразвукового пластического деформирования по тангенциальной схеме.

Основные результаты и выводы по работе обоснованы теоретически и экспериментально и опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Автореферат достоверно и полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемых к кандидатским диссертациям (пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, Самуль Артём Геннадьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения».

Профессор кафедры технологии машиностроения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ), доктор технических наук

В.Ю. Блюменштейн

Блюменштейн Валерий Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ).

Научная специальность: 05.02.08 - Технология машиностроения.
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, тел.: 8(3842)-39-63-75,
e-mail: blumenstein@rambler.ru

Подпись Блюменштейна В.Ю. заверяю

Ученый секретарь Ученого совета



Подпись: В.Ю. Блюменштейн
ЗАВЕРЯЮ
Ученый секретарь совета
М.И. Косленко
10 2023