

ЯШИН АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА КАРКАСНЫХ
ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ
МНОГОКОНТАКТНЫМ ВОЛНОВЫМ ДЕФОРМАЦИОННЫМ
УПРОЧНЕНИЕМ**

Специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Брянск, 2019

Работа выполнена на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Киричек Андрей Викторович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Афонин Андрей Николаевич**,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Белгородский государственный
национальный исследовательский университет,
профессор кафедры «Информационные и
робототехнические системы»

Лебедев Валерий Александрович,
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический
университет», профессор кафедры «Технология
машиностроения»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»

Защита состоится «20» февраля 2020 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.155.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д.10-Б, учебный корпус №4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»:
<https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/yashin-aleksandr-vasilevich>

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 999.155.03
доктор технических наук, профессор

О.Н. Кириллов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

В современной промышленности все более широкое применение находят алюминиевые сплавы. Замена стальных деталей алюминиевыми является экономически оправданным шагом при изготовлении транспортной, аэрокосмической и специальной техники. Вследствие применения более легких алюминиевых сплавов уменьшается общий вес конструкций, повышаются технико-тактические характеристики изделия, существенно снижаются энергозатраты при эксплуатации. Однако большая часть данных изделий работает в условиях высоких знакопеременных нагрузок и подвергается усталостному разрушению, а при сопоставимых механических характеристиках алюминиевые сплавы существенно уступают сталям по сопротивлению усталости. К таким изделиям относятся, например, каркасные плоские сложнопрофильные детали (КПСД) наукоемких изделий двойного назначения, изготавливаемые из алюминиево-магниевых (АМг) сплавов. Наиболее эффективными для повышения качества поверхностного слоя и сопротивления усталости являются методы поверхностного пластического деформирования (ППД).

В зависимости от применяемого метода в поверхностном слое формируется структура с высокими показателями качества и эксплуатационными характеристиками. Исследованиями А.Ю. Албагачиева, Б.М. Аскинази, А.П. Бабичева, М.А. Балтер, В.Ф. Безъязычного, В.М. Браславского, М.С. Дрозда, С.А. Зайдеса, А.В. Киричека, Ю.Р. Копылова, В.А. Лебедева, М.М. Матлина, А.А. Михайлова, Л.Г. Одинцова, Н.В. Олейника, Д.Д. Папшева, А.Е. Пашкова, В.В. Петросова, Б.П. Рыковского, В.И. Серебрякова, Ю.И. Сидякина, В.М. Смелянского, Д.Л. Соловьёва, Г.В. Степанова, А.Г. Суслова, М.А. Тамаркина, В.М. Торбило, В.П. Федорова, П.А.Чепы, Д.Л. Юдина и др. установлено, что обработка ППД формирует благоприятные напряжения сжатия, мелкозернистую структуру, а также градиентно упрочненный поверхностный слой.

Предварительными исследованиями установлено, что для обеспечения качества плоских сложнопрофильных каркасных деталей из АМг сплавов, предпочтительно локальное, но глубокое упрочнение наиболее нагруженных в процессе эксплуатации участков. Вследствие этого применение большинства известных методов ППД нецелесообразно.

Волновое деформационное упрочнение (ВДУ), в отличие от других методов ППД, с целью обеспечения заданных параметров упрочнения поверхностного слоя позволяет управлять большим количеством технологических факторов в широком диапазоне значений. Так как АМг сплавы пластичнее сталей, а рабочий диапазон энергий удара известного генератора импульсов для ВДУ составляет 140...160 Дж, в очаге деформации - пятне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности, возникает избыточное давление, которое является причиной переупрочнения материала.

Перспективно направление уменьшения давления в пятне контакта за счет многоинструментальной оснастки. Однако, ни способ многоконтактного упрочнения, ни его закономерности применительно к ВДУ не исследованы.

Следовательно, определение рациональных технологических параметров, позволяющих обеспечить заданные показатели качества поверхностного слоя, разработка инструментальной оснастки и адаптация генератора импульсов к процессу многоконтактного ВДУ (МК ВДУ) деталей из АМг сплавов, актуально.

Цель работы: повышение качества поверхностного слоя и сопротивления усталости сложнопрофильных плоских каркасных деталей из алюминиево-магниевого сплава технологическим обеспечением многоконтактного волнового деформационного упрочнения.

Задачи исследования:

1. Исследовать конечно-элементную модель (КЭМ) для определения нагруженных участков изделия, требующих локального упрочнения.
2. Разработать теоретическую конечно-элементную модель (КЭМ) многоконтактного волнового деформационного упрочнения (МК ВДУ), позволяющую оценить глубину и степень упрочнения изделий из АМг сплавов.
3. Провести анализ влияния конструктивно-технологических параметров МК ВДУ на параметры качества изделий из АМг сплавов.
4. Разработать экспериментальный стенд для исследования влияния МК ВДУ на форму, амплитуду и длительность ударных импульсов, а также глубину и степень упрочнения поверхностного слоя.
5. Установить закономерности влияния размера, формы и количества инструментов в ударной системе на коэффициент передачи энергии.
6. Теоретически и экспериментально установить область рациональных технологических и конструктивно-технологических параметров (энергии удара, формы и размера инструмента) процесса МК ВДУ изделий из АМг сплавов.
7. Выполнить экспериментальные исследования по оценке технологических возможностей повышения параметров качества поверхностного слоя МК ВДУ и разработать технологические рекомендации.

Научная новизна.

1. Разработана конечно-элементная модель многоконтактного волнового деформационного упрочнения, позволяющая в зависимости от конструктивно-технологических параметров многоконтактной инструментальной оснастки определить параметры импульса в очаге деформации и параметры качества градиентно упрочненного поверхностного слоя детали.
2. Выявлены закономерности влияния количества, формы и расположения инструментов в инструментальной оснастке на форму, энергию и коэффициент передачи энергии ударного импульса в очаг деформации, глубину и степень упрочнения поверхностного слоя детали.
3. Впервые для ВДУ установлено значимое влияние на коэффициент передачи энергии в очаг деформации (в диапазоне 0,2...0,8 от эталонного значения) соотношения суммы площадей поперечного сечения инструментов и площади поперечного сечения волновода ($S_{отн}$).

Практическая ценность работы заключается в разработанных технологических рекомендациях по упрочнению АМг сплавов МК ВДУ и разработанной конструкции инструментальной оснастки для реализации процесса, модернизированной конструкции экспериментального стенда для исследования энергии и формы ударных импульсов при МК ВДУ.

На защиту выносятся: технологические рекомендации по обработке АМг сплавов МК ВДУ, инструментальная оснастка для реализации процесса МК ВДУ, КЭМ процесса МК ВДУ, КЭМ каркасной плоской сложнопрофильной детали с определением границ требующих упрочнения наиболее нагруженных в процессе эксплуатации локальных участков, результаты расчетов по теоретическим моделям, результаты экспериментальных исследований: параметров ударного импульса при МК ВДУ; параметров качества поверхностного слоя АМг сплавов после МК ВДУ; влияния МК ВДУ на сопротивление усталости.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения» по следующим пунктам:

п. 2 «Технологические процессы, операции, установовы, позиции, технологические переходы и рабочие хода, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости»;

п. 7 «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 2-й Международной молодежной научно-технической конференции «Физика и технология наноматериалов и структур» (г. Курск, 2015 г.); Международном научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии» (г. Ростов-на-Дону, 2016 г.); X Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2016 г.); IV Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (г. Рыбинск, 2017 г.); X Международной научно-технической конференции «Управление качеством продукции в машиностроении и авиакосмической технике» (г. Воронеж, 2018 г.); научном семинаре «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений» (г. Брянск, 2018 г.); на Всероссийских межвузовских научных конференциях «Регионы России» в рамках Всероссийских научных «Зворыкинских чтений» (г. Муром, 2014-2018 г.г.).

Диссертация выполнялась при поддержке: гранта РФФИ № 16-08-01240А, «Закономерности волнового деформационного многоконтактного нагружения полупространства».

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и 5 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Работа изложена на 159 страницах, содержит 16 таблиц, 85 рисунков, и список литературы из 123 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности решаемой проблемы, цель, задачи, практическая ценность и научная новизна исследования.

В первой главе выявлена группа изготавливаемых из АМг сплавов конструктивно подобных каркасных плоских сложнопрофильных деталей (КПСД) специальной техники, для которых характерно преждевременное усталостное разрушение под воздействием потока динамических знакопеременных эксплуатационных нагрузок.

Выполнен анализ технологических методов упрочнения поверхностного слоя, определяющих значения параметров качества поверхностного слоя детали. Установлено, что в силу ряда ограничений, связанных со свойствами материала, размерами и конфигурацией деталей, необходимой глубиной упрочнения, в технологии изготовления КПСД целесообразно применение методов ППД, благоприятно влияющих на сопротивление усталости и обеспечивающих необходимую твердость и глубину упрочненного слоя. Наиболее перспективным является волновое деформационное упрочнение (ВДУ).

Установлена необходимость адаптации ВДУ для условий обработки деталей из АМг сплавов, которая должна быть направлена на снижение давления инструмента на материал в очаге деформации. Предложено решение поставленной задачи за счет создания многоконтактной инструментальной оснастки, отдаленным аналогом которой является шарико-стержневой упрочнитель (ШСУ), разработанный Ростовской научной школой под руководством А.П. Бабичева. Это позволит без существенных конструктивных изменений параметров генератора импульсов управлять энергетическими параметрами ВДУ в широком диапазоне, снизить давление в очаге деформации (ОД), обеспечить заданную производительность обработки.

Во второй главе описана общая методика исследований, разработана теоретическая конечно-элементная модель (КЭМ) МК ВДУ, выполнена экспериментальная оценка адекватности модели.

Для разработки КЭМ МК ВДУ и исследования волновых процессов, происходящих при динамической обработке ППД, выбрано программное обеспечение ANSYS/LS-DYNA, которое позволяет исследовать нелинейные быстропротекающие динамические процессы, происходящие в неупругих средах. В качестве выходных параметров модели приняты глубина и степень упрочнения, форма, амплитуда и длительность ударного импульса. Данные параметры являются основными и позволяют в полной мере оценить характер упрочнения.

Для создания адекватной модели процесса при задании граничных условий моделирования, свойства обрабатываемого материала заданы упругопластической

моделью степенного вида $\sigma = k\varepsilon^n$. Исходные параметры прочности (σ_B и $\sigma_{0,2}$) и микротвердости (H_μ) материала, относительно которых рассчитывается глубина и степень упрочнения, заданы по свойствам сплава АМг2. Элементы модели: боек, волновод, инструменты, а также стол, на котором смонтирован упрочняемый образец, считаются абсолютно жесткими недеформируемыми телами.

Графическими средствами ANSYS/LS-DYNA создана трехмерная модель системы нагружения и осуществлено разбиение на конечные элементы (рисунок 1,а). Всем объектам присвоены соответствующие модели материалов и их характеристики, заданы перемещения, нагрузки и граничные условия.

Для оценки адекватности КЭМ создан экспериментальный стенд (рисунок 1,б). Стенд позволяет исследовать зависимость распределения ударного импульса в ОД при многоконтактной схеме нагружения. Под инструментами располагается пьезоэлектрический датчик, соединенный с осциллографом, регистрирующим ударный импульс. Стенд позволяет установить зависимость коэффициента передачи энергии K_ε от количества инденторов (инструментов) в ударной системе. Схема нагружения соответствует схеме нагружения при ВДУ на известном оборудовании. Количество и размер инструментов ограничивается диаметрами волновода и пьезоэлектрического датчика. Стенд с помощью цифрового осциллографа позволяет регистрировать форму, энергию, амплитуду и длительность ударных импульсов.

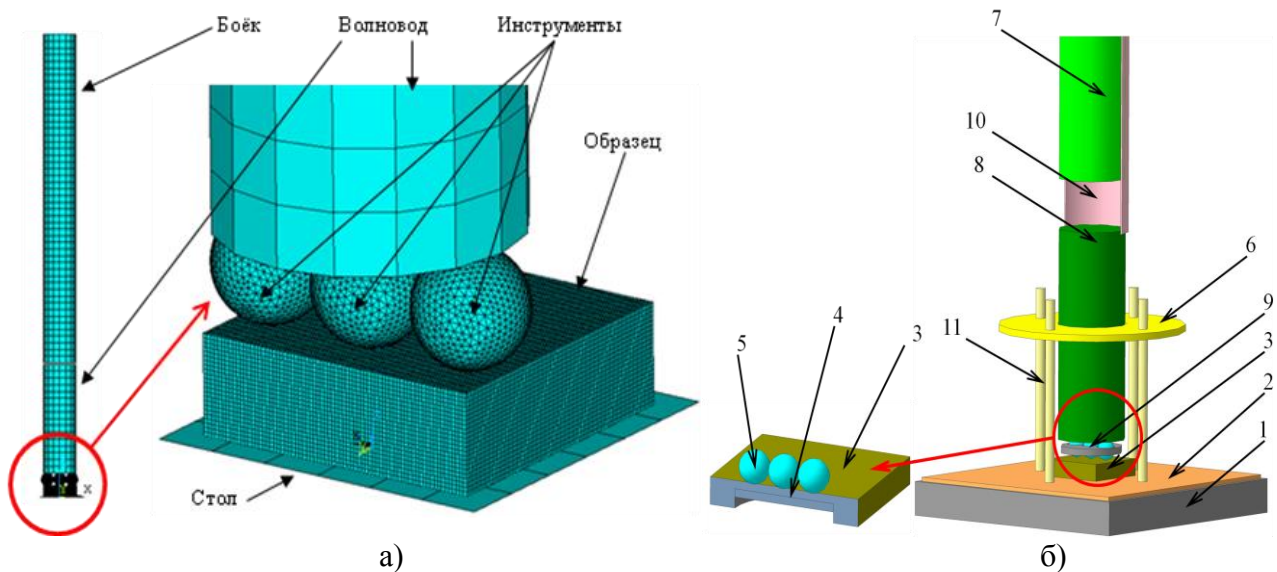


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель МК ВДУ (а) и экспериментальный стенд для оценки адекватности моделирования (б): 1 – основание; 2 – виброгасящий элемент; 3 – образец; 4 – пьезоэлектрический датчик; 5 – инструменты; 6 – пластина; 7 – боек; 8 – волновод; 9 – сепаратор; 10 – направляющая труба; 11 – винты для статического поджатия

Оценка адекватности моделирования выполнялась на примере единичных ударов с различными значениями энергии удара. Контролируемые параметры – форма, амплитуда и длительность ударного импульса, коэффициент передачи энергии импульса в очаг деформации, которые оказывают определяющее влияние на процесс упрочнения, а также глубина и степень упрочнения. С применением известных статистических методов обработки сравнивались значения,

рассчитанные по разработанной КЭМ МК ВДУ – с одной стороны, и полученные на экспериментальном стенде данные – с другой стороны.

Энергия импульса $A_{И}$ определялась по формуле:

$$A_{И} = \frac{\sum(P_i^2 t_i)}{\rho_2 F_2 a_2},$$

где P_i – амплитуда импульса, Н;

t_i – длительность импульса, с;

ρ_2, F_2, a_2 – плотность (кг/м^3), площадь поперечного сечения (мм^2), скорость распространения ударной волны (м/с) в волноводе соответственно.

Известно, что максимальное количество энергии удара бойка по волноводу передается в очаг деформации тогда, когда боек и волновод имеют форму цилиндрических стержней с равными диаметрами и закругленными контактными торцами с радиусом, стремящимся к бесконечности. Так как форма и размеры элементов ударной системы (бок-волновод) приняты постоянными, формирующийся в такой ударной системе импульс, а также энергия, сообщаемая в очаг деформации ($A_{ЭГ}$), приняты эталонными.

Важной характеристикой эффективности процесса МК ВДУ является $K_{Э}$ – коэффициент передачи энергии ударного импульса, который определяется как отношение энергий исследуемого и эталонного ударного импульса:

$$K_{Э} = A_{И} / A_{ЭГ}.$$

Обработано большое количество экспериментальных ударных импульсов (рисунок 2), полученных при количестве инструментов от 1 до 8. Установлено, что рассчитанные по модели значения $K_{Э}$ соответствуют экспериментальным при уровне доверительной вероятности 0,8. Параметры глубины и степени упрочнения, рассчитанные по КЭМ, соответствуют результатам эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95. Сделан вывод об адекватности разработанной модели и достоверности получаемых результатов.

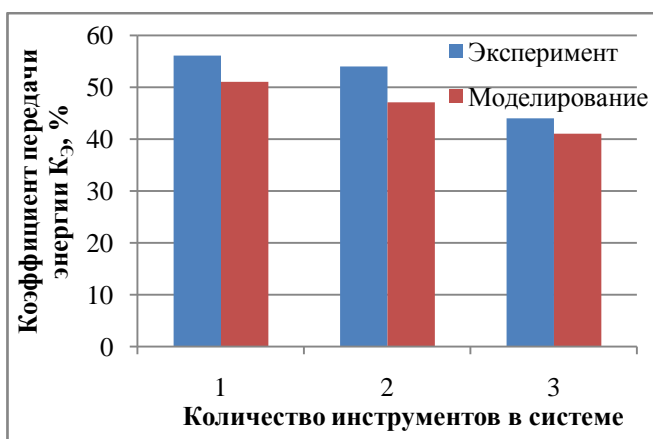
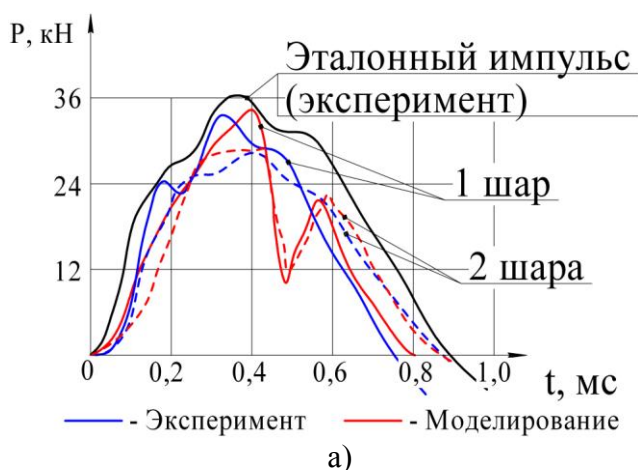


Рисунок 2 – Ударные импульсы при одно- и многоконтактной схеме нагружения с инструментами-шарами $\text{Ø}27$ мм (а) и зависимость коэффициента передачи энергии $K_{Э}$ от количества инструментов в ударной системе для инструментов-шаров $\text{Ø}27$ мм (б)

В результате анализа экспериментальных данных установлено, что введение каждого следующего инструмента сопровождается уменьшением

амплитуды ударного импульса в 1,4...1,9 раза при увеличении длительности импульса в 1,2...1,6 раза. При этом уменьшение K_{Σ} при введении второго и третьего инструмента в инструментальную систему составляет менее 5%. Дальнейшее увеличение количества инструментов сильнее снижает энергетическую эффективность процесса ВДУ.

В третьей главе с целью выявления закономерностей МК ВДУ и рациональных технологических факторов обработки деталей из АМг сплавов исследована КЭМ процесса, проведены экспериментальные исследования.

При моделировании ВДУ приняты во внимание следующие конструктивные и технологические параметры, оказывающие доминирующее влияние на процесс:

$$L_1, L_2, d_1, d_2, D_{И}, P_{СТ}, A, f, s,$$

где L_1, d_1 и L_2, d_2 – длина и диаметр бойка и волновода соответственно, мм; $D_{И}$ – диаметр инструмента, мм; $P_{СТ}$ – статическое поджатие инструмента, Н; A – энергия удара, Дж; f – частота ударов, Гц; s – скорость подачи заготовки относительно инструмента, м/с.

Генератор импульсов для ВДУ имеет следующие конструктивные параметры: $L_1 = 480$ мм, $L_2 = 160$ мм, $d_1 = d_2 = 48,5$ мм, обеспечивающие высокую эффективность процесса обработки. Изменение данных параметров затруднительно и экономически не рационально, поэтому они принимаются за исходные. Эффективный параметр $P_{СТ}$ также ранее определен и составляет 10% от динамической составляющей нагрузки. Влияние параметров f и s рассматривается через комплексный параметр – коэффициент перекрытия единичных пластических отпечатков K , который определяется по формуле:

$$K = 1 - \frac{s}{\delta f 60},$$

где δ – характерный размер пластического отпечатка, мм.

Определены области варьирования значений основных технологических факторов МК ВДУ при обработке АМг сплавов: $A_{min} \dots A_{max} = 5 \dots 80$ Дж; $D_{Иmin} \dots D_{Иmax} = 8 \dots \infty$; $K_{min} \dots K_{max} = 0,2 \dots 0,8$.

Кроме того, для МК ВДУ исследовалось влияние дополнительных технологических параметров: $S_{ОТН}$ – соотношение суммы площадей поперечного сечения инструментов и площади поперечного сечения волновода; $N_{И}$ – количество инструментов в системе нагружения, шт; p – суммарное давление в очаге деформации, МПа; δ' – расстояние между соседними пластическими отпечатками, мм.

Соотношение суммы площадей поперечного сечения инструментов и площади поперечного сечения волновода $S_{ОТН}$ определяется как (рисунок 3):

$$S_{ОТН} = \frac{S_{N_1} + S_{N_2} + \dots + S_{N_{И}}}{S_{ВОЛН}},$$

где $S_{N_1}, S_{N_2} \dots S_{N_{И}}$ – сумма площадей поперечного сечения инструментов от 1 до $N_{И}$, мм², а $S_{ВОЛН}$ – площадь поперечного сечения волновода, мм².

Суммарное давление в очаге деформации p влияет на градиент изменения степени упрочнения по глубине поверхностного слоя и определяется как:

$$p = \frac{P_{УД}}{S_{ОД}},$$

где $P_{УД}$ – сила удара, Н;
 $S_{ОД}$ – площадь пластического отпечатка в очаге деформации, мм².

$$P_{УД} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \sqrt{\frac{2A}{m_1}},$$

где C_1, C_2 – акустическая жесткость бойка и волновода соответственно, кг/с;
 A – энергия удара, Дж; m_1 – масса бойка, кг.

Схема для определения параметра δ' представлена на рисунке 3.

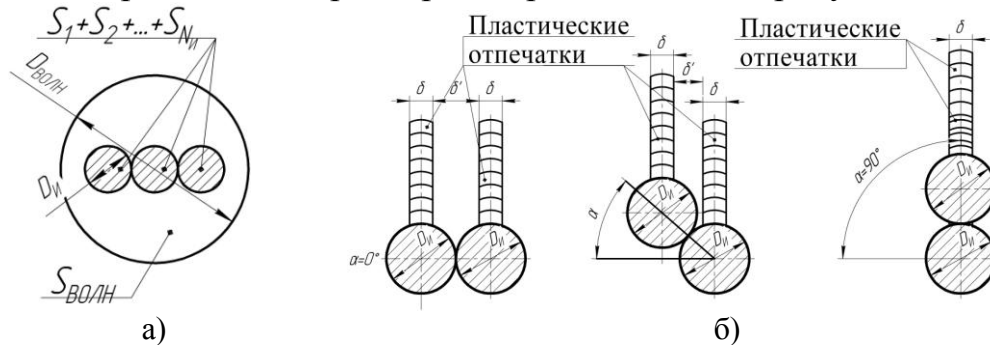


Рисунок 3 – Схема для определения: а) $S_{ОД}$, б) δ' и α (вид в сечении инструмента)

Возможность регулирования параметра δ' обеспечивается за счет поворота многоинструментальной оснастки на заданный угол α в пределах $0^\circ \dots 90^\circ$ с точностью $\pm 1^\circ$. Изменение δ' позволяет управлять картой микротвердости поверхностного слоя, определяет производительность обработки.

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\delta \pm \delta'}{D_{Ш}}\right),$$

Знак « \pm » перед δ' указывает на взаимное положение соседних отпечатков: если один отпечаток накладывается на другой, то перед δ' используется « $-$ ».

На основании исследования разработанной КЭМ предложена регрессионная математическая модель, описывающая закономерность изменения степени упрочнения по глубине упрочненного слоя в зависимости от технологических и конструктивно-технологических параметров МК ВДУ:

$$\Delta H_{\mu} = a_1 + a_2 h_{\mu} + a_3 h_{\mu} A + a_4 h_{\mu} D_{И} + a_5 h_{\mu}^2 + a_6 D_{И}^2 + a_7 h_{\mu} K.$$

Значения коэффициентов $a_1 \dots a_7$ сведены в таблицу.

Инструмент	Коэффициент						
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Шар	82,25	-22,05	0,03	0,26	1	-0,02	0,5
Стержень со сферическим торцом	71,88	0	-0,39	0,04	0,89	0	0

Установлено, что при заданных значениях факторов ($A=30 \dots 50$ Дж на один инструмент, $D_{И}=12 \dots 27$ мм) глубина упрочнения достигает $6 \dots 10$ мм, а степень упрочнения $80 \dots 110\%$ (рисунок 4, 5 за нулевую плоскость принята поверхность образца после удаления дефектного слоя).

Установлено, что при однократной обработке МК ВДУ снижения ударной вязкости (KCU) по сравнению с исходной практически не происходит (рисунок 6). После МК ВДУ для всех инструментов и $K=0,2 \dots 0,6$ ударная вязкость находится в диапазоне $87 \dots 96$ Дж/см². Второй проход МК ВДУ снижает ударную вязкость на 8-10%, что отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах.

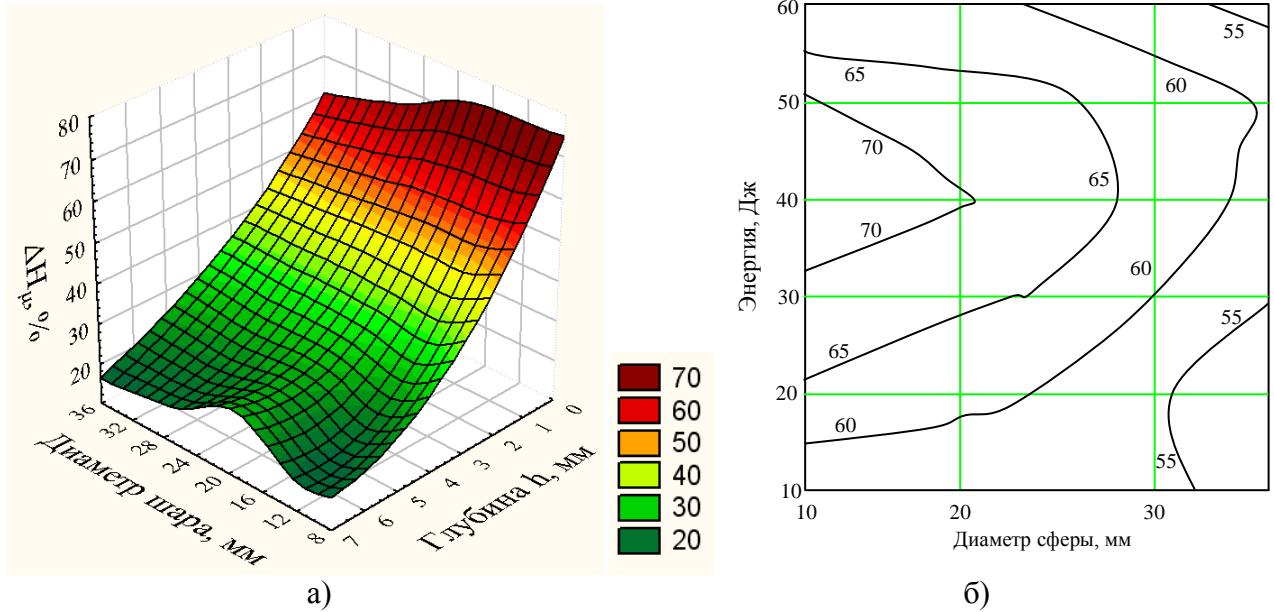


Рисунок 4 – Зависимость степени упрочнения ΔH_{μ} поверхностного слоя от: а) диаметра шара и глубины слоя; б) диаметра сферического торца цилиндрического индентора и энергии удара

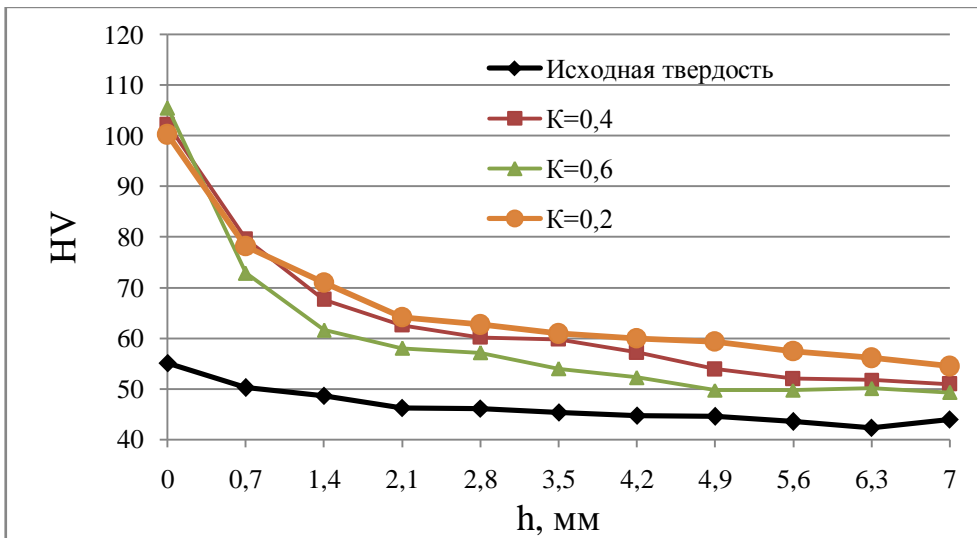


Рисунок 5 – Изменение микротвердости в поверхностном слое после МК ВДУ шарами \varnothing 27 мм

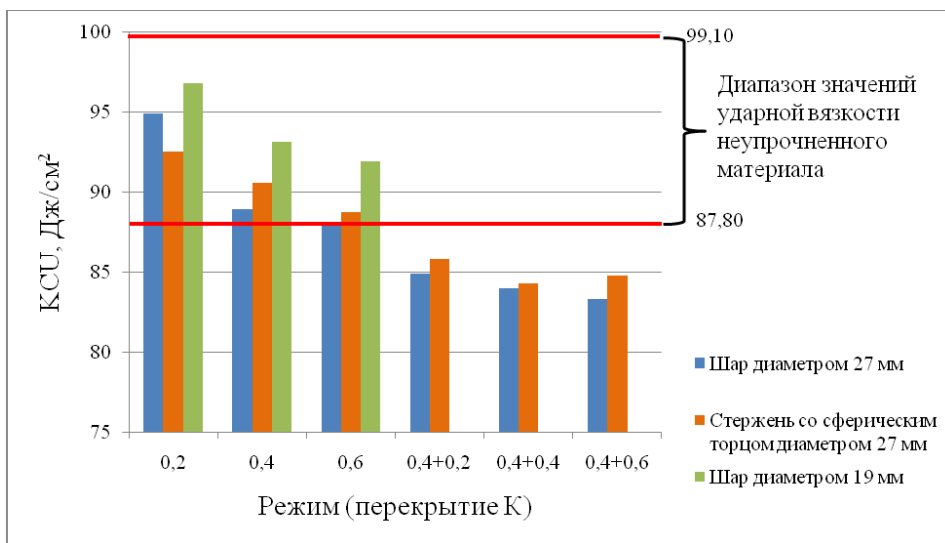


Рисунок 6 – Испытания на сопротивление ударному изгибу

Установлены рациональные значения суммарных давлений p в очаге деформации и соотношения суммы площадей поперечного сечения инструментов и волновода S_{OTH} при неизменной энергии удара $A=50$ Дж, при которых обеспечиваются близкие градиенты изменения степени упрочнения по глубине поверхностного слоя:

- для инструментов-шаров $0,2 < K < 0,4$:

при $\varnothing 19$ мм - $90 < p < 870$ МПа (снижено в 1,3...9,6 раза по сравнению с одноконтakтным вариантом);

при $\varnothing 27$ мм - $130 < p < 590$ МПа (снижено в 1,45...4,5 раза);

- для инструментов-стержней $0,2 < K < 0,6$ при диаметре сферического торца $\varnothing 27$ мм - $130 < p < 950$ МПа (снижено в 1,3...7,3 раза).

Установлено, что при $S_{OTH}=0,2...0,8$ и $N_M=2...3$ обеспечиваются следующие параметры: коэффициент передачи энергии $K_{\varepsilon} > 45\%$, глубина $h=8...10$ мм и степень упрочнения $\Delta H_{\mu} > 80\%$.

При проведении металлографических исследований установлено, что однократная обработка МК ВДУ с $K=0,4$ приводит к измельчению зерен твердого раствора в 2,5-3 раза и обеспечивает материалу изотропные свойства на глубине до 5 мм. Повторная обработка сопровождается формированием микротрещин в подповерхностном слое на глубине от 2 до 4 мм.

Проведенные испытания на сопротивление статическому растяжению выявили возможность повышения предела прочности σ_B и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ АМг сплавов после МК ВДУ. Так, при упрочнении сплава АМг2 шарами $\varnothing 27$ мм с $K=0,2...0,4$, σ_B повышается на 19,8%, а $\sigma_{0,2}$ на 48,8%. При этом относительное удлинение материала уменьшается на 7...8%.

В результате испытаний на сопротивление усталости установлено (рисунок 7), что однократная обработка МК ВДУ с двух сторон шарами $\varnothing 27$ мм с $K=0,4$ повышает сопротивление усталости в 3,01 раза, а с $K=0,6$ сопротивление усталости повышается в 1,43 раза по сравнению с материалом в исходном состоянии. Двухпроходное упрочнение с $K=0,4$ в одном направлении ($K=0,4+0,4$) снижает сопротивление усталости на 14%, а двухпроходное упрочнение в перпендикулярных направлениях с $K=0,4$ ($K=0,4 \times 0,4$) снижает сопротивление усталости менее чем на 4%.

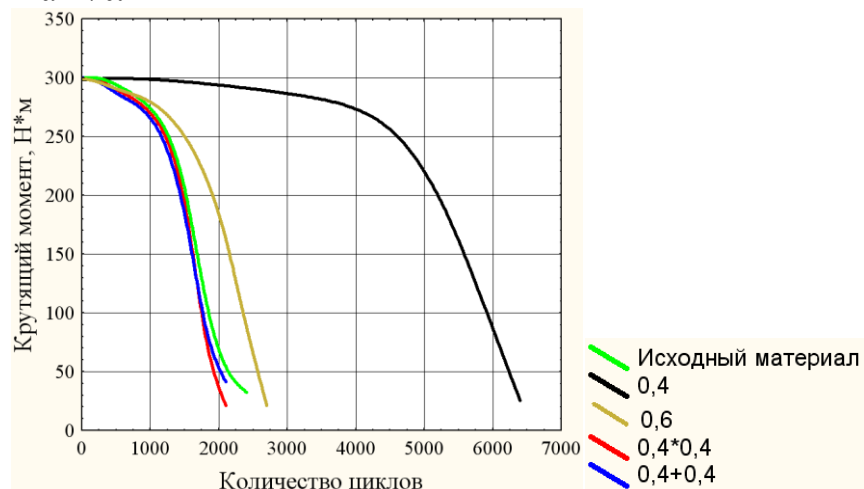


Рисунок 7 – Результаты испытаний на сопротивление усталости при кручении

В четвертой главе изложены результаты производственной апробации результатов исследования и даны технологические рекомендации по повышению параметров качества поверхностного слоя деталей из АМГ сплавов МК ВДУ.

Разработана КЭМ для определения требуемой глубины упрочнения и расположения опасных локальных участков, наиболее нагруженных знакопеременными нагрузками в процессе эксплуатации. Установлено, что глубина несущего слоя достигает 6-10 мм в зависимости от условий работы изделия (рисунок 8).

Разработана многоконтактная инструментальная оснастка для МК ВДУ (рисунок 9).

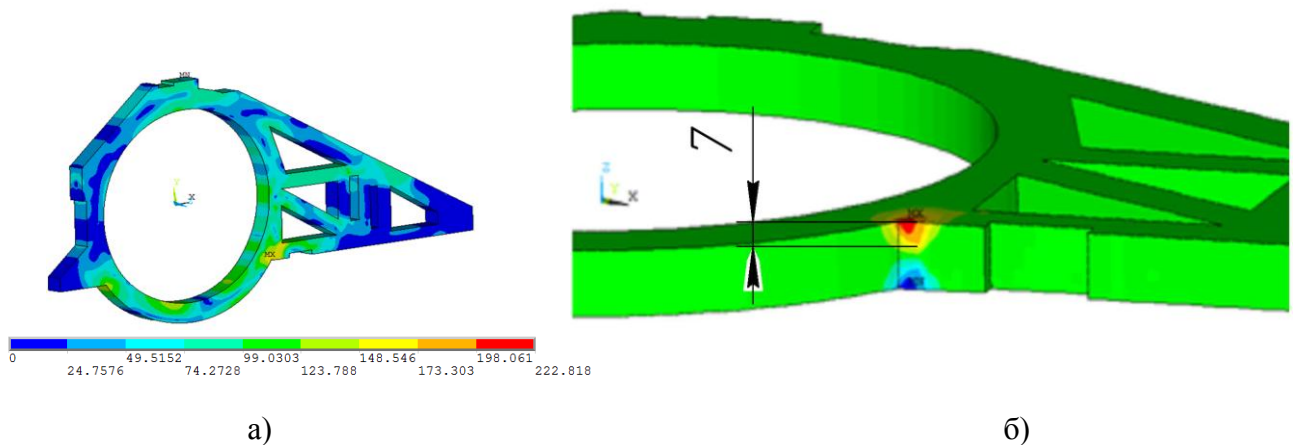


Рисунок 8 – Напряженно-деформированное состояние (НДС) детали (а) и глубина залегания опасных напряжений (б), возникающих в детали при эксплуатации

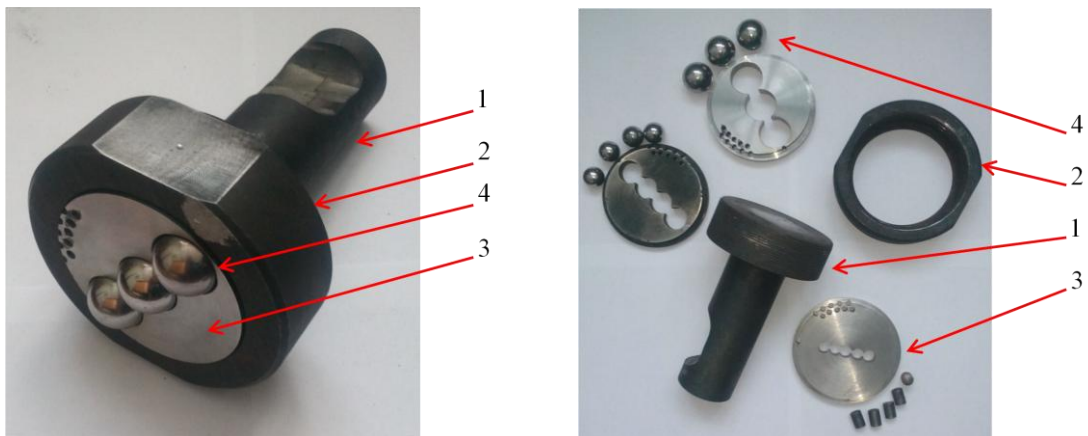


Рисунок 9 – Многоконтактная инструментальная оснастка: 1 – волновод; 2 – гайка; 3 – сепаратор; 4 – инструмент

Установлено место МК ВДУ в технологическом процессе изготовления КСПД. Упрочнение наиболее нагруженных в процессе эксплуатации локальных участков рекомендовано производить сразу после получения заготовки, до операций механической обработки плоских поверхностей. В связи со значительной толщиной детали для обеспечения требуемого уровня эксплуатационных свойств необходима обработка МК ВДУ с двух сторон с $K=0,4$.

В целях удаления дефектного слоя с грубой шероховатостью и следами обработки целесообразно фрезеровать упрочненные поверхности на глубину 1 мм.

Определена технико-экономическая эффективность применения МК ВДУ локальных плоских участков поверхности КСПД из АМг сплавов, которая составляет 121800 рублей на одно изделие.

Разработаны технологические рекомендации по назначению рациональных режимов МК ВДУ при обработке КСПД в зависимости от степени нагруженности в условиях эксплуатации. Выделены три группы условий работы изделия: легкие (нагрузка $P < 25$ кН), средние (нагрузка $25 \text{ кН} < P < 50 \text{ кН}$) и тяжелые (нагрузка $P > 50$ кН) специальные изделия двойного назначения.

Технологические рекомендации для обработки МК ВДУ КСПД из АМг сплавов

	Условия эксплуатации КСПД		
	Легкие (нагрузка $P < 25$ кН)	Средние (нагрузка $25 \text{ кН} < P < 50 \text{ кН}$)	Тяжелые (нагрузка $P > 50$ кН)
Глубина несущего слоя	4-6 мм	6-8 мм	8-10 мм
Рекомендуемые параметры МК ВДУ	$A = 30$ Дж (на один инструмент); $D_{\text{и}} = 27$ мм; инструмент – стержень со сферическим торцом; $N_{\text{и}} = 5$ шт.; $K = 0,2 \dots 0,4$; $\delta' = 0 \dots 3$ мм.	$A = 40$ Дж (на один инструмент); $D_{\text{и}} = 19$ мм; инструмент – шар; $N_{\text{и}} = 4$ шт.; $K = 0,4 \dots 0,6$; $\delta' = 0 \dots 3,5$ мм.	$A = 50$ Дж (на один инструмент); $D_{\text{и}} = 27$ мм; инструмент – шар; $N_{\text{и}} = 3$ шт.; $K = 0,4 \dots 0,6$; $\delta' = 0 \dots 4,2$ мм.
Параметры упрочнения поверхностного слоя	$\Delta H_{\mu} = 70 \dots 80\%$, $h_{\mu} = 6 \dots 7,4$ мм	$\Delta H_{\mu} = 80 \dots 95\%$, $h_{\mu} = 7,7 \dots 9$ мм	$\Delta H_{\mu} = 75 \dots 80\%$, $h_{\mu} = 8,5 \dots 10$ мм

Заключение

Диссертационное исследование содержит комплекс научно-технических решений задачи повышения качества поверхностного слоя и сопротивления усталости каркасных сложнопрофильных плоских деталей (КСПД) из алюминиево-магниевых (АМг) сплавов технологическими методами. Задача решена введением в технологический процесс обработки КСПД операции (перехода) многоконтактного волнового деформационного упрочнения (МК ВДУ). Разработанные технологические рекомендации позволяют обеспечить заданные параметры работоспособности КСПД в зависимости от условий эксплуатации изделия.

1. Установлено, что в результате МК ВДУ КСПД из АМг сплавов формируется упрочненный поверхностный слой с глубиной упрочнения до 10 мм и максимальной степенью упрочнения до 112% (или в 2,12 раза выше исходной). Введение в технологический процесс изготовления КСПД из АМг сплавов

операции (перехода) МК ВДУ способствует повышению сопротивления усталости до 3 раз.

2. Исследована конечно-элементная модель, позволяющая определить взаимосвязь между эксплуатационными нагрузками и напряженно-деформированным состоянием (НДС) детали. Установлено, что для КСПД при приложении предельно допустимых эксплуатационных нагрузок в локальных участках возникают опасные напряжения на глубине до 10 мм, приводящие к возникновению усталостных трещин.

3. Впервые разработана конечно-элементная модель (КЭМ) МК ВДУ, учитывающая исходные свойства материала и явления, происходящие при волновом деформационном воздействии на материал, позволяющая с требуемым уровнем достоверности рассчитать параметры качества поверхностного слоя – глубину и степень упрочнения. Выявлен новый фактор, характеризующий процесс МК ВДУ – соотношение суммы площадей поперечного сечения инструментов и площади поперечного сечения волновода ($S_{отн}$).

4. Впервые экспериментально установлено, что коэффициент передачи энергии в очаг деформации ($K_э$) при МК ВДУ зависит от соотношения площадей поперечного сечения инструментов и волновода $S_{отн}$, а также от количества, формы и размеров инструментов. $K_э$ наибольший и составляет 53...63% когда инструмент один, расположен соосно с волноводом, а площадь его максимального поперечного сечения близка к площади поперечного сечения волновода. С увеличением количества инструментов изменяются параметры импульса в очаге деформации:

- введение каждого следующего инструмента сопровождается уменьшением амплитуды ударного импульса в 1,4...1,9 раза при увеличении длительности импульса в 1,2...1,6 раза;

- при введении второго и третьего инструмента в инструментальную систему уменьшение $K_э$ по сравнению с одноконтантной системой составляет менее 5%, что допустимо, при дальнейшем увеличении количества инструментов наблюдается значительное уменьшение $K_э$, что снижает энергетическую эффективность процесса.

5. Теоретически и экспериментально установлено, что:

- наибольшую глубину упрочнения до 10 мм КСПД из АМг сплавов при МК ВДУ обеспечивают инструменты-шары диаметром 27 мм при однократном упрочнении с коэффициентом перекрытия единичных отпечатков $K=0,4$.

- при неизменной энергии удара наибольшие коэффициент передачи энергии, глубина и степень упрочнения ($K_э > 45\%$; $\Delta H_\mu > 80\%$; $h = 8...10$ мм) обеспечиваются при МК ВДУ 2...3 инструментами, при этом соотношение площадей поперечного сечения инструментов и волновода $S_{отн}$ лежит в диапазоне от 0,2 до 0,8.

6. Установлено влияние количества, расположения инструментов, а также расстояния между ними, при МК ВДУ на параметры качества упрочненного поверхностного слоя деталей из АМг сплавов:

- увеличение количества линейно расположенных инструментов-стержней со сферическим торцом от 2 до 4, ведет к уменьшению максимального значения степени упрочнения с 82% до 73% при увеличении глубины максимально упрочненного слоя в 3 раза - с 0,2 мм до 0,6 мм;

- увеличение расстояния между инструментами-стержнями со сферическим торцом на величину, равную половине их диаметра, способствует увеличению более, чем в 3 раза (с 0,25мм до 0,8мм) глубины максимально упрочненного слоя и обеспечению упрочнения АМг сплава на глубину 7 мм, что позволяет без ухудшения параметров упрочнения, при одной и той же энергии удара, повысить в 2 раза производительность МК ВДУ.

7. Выявлены рациональные диапазоны варьирования интегральных технологических параметров МК ВДУ: а) коэффициента перекрытия единичных пластических отпечатков (K), зависящего от технологических режимов обработки (частоты и энергии импульсов, подачи, приведенного радиуса кривизны контакта, свойств обрабатываемого материала), б) суммарных давлений (p) в очаге деформации, - при которых обеспечиваются близкие градиенты изменения степени упрочнения по глубине поверхностного слоя при практически полном сохранении исходной ударной вязкости АМг сплавов:

- для инструментов-шаров $0,2 < K < 0,4$

при $\varnothing 19$ мм - $90 < p < 870$ МПа (снижено в 1,3...9,6 раза по сравнению с одноконтakтным вариантом);

при $\varnothing 27$ мм- $130 < p < 590$ МПа (снижено в 1,45...4,5 раза);

- для инструментов-стержней $0,2 < K < 0,6$ при диаметре сферического торца $\varnothing 27$ мм - $130 < p < 950$ МПа (снижено в 1,3...7,3 раза).

8. Исследовано влияние одно- и многократной обработки МК ВДУ на микроструктуру и сопротивление усталости деталей из АМг сплавов:

- установлена целесообразность однократного МК ВДУ с режимами в диапазоне $0,2 < K < 0,6$ КСПД из АМг сплавов, что ведет к повышению сопротивления усталости материала до 3 раз, предела прочности σ_B на 20%, условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ на 49%;

- в результате однократного МК ВДУ образцов из АМг сплавов меняется микроструктура материала, уменьшается характерный размер зерен α -твердого раствора в 2,5-3 раза, структура приобретает более изотропный характер, в результате чего на глубине до 5 мм следует ожидать выравнивания свойств;

- при двукратной обработке МК ВДУ образцов из АМг сплавов в параллельном направлении и $0,4 < K < 0,6$ по сравнению с исходным материалом ударная вязкость снижается на 10...12%, сопротивление усталости на 14%, а в подповерхностном слое на глубине 2...4 мм формируются микротрещины.

9. Разработаны технологические рекомендации по повышению параметров качества поверхностного слоя КСПД из АМг сплавов. Выполнена производственная апробация разработанной технологии и технологической оснастки. Экономический эффект от применения разработанной технологии составляет 121800 рублей на одно изделие.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных списком ВАК:

1. **Яшин А.В.** Энергетические закономерности импульсного нагружения системами с промежуточным звеном [Текст] / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. - №1(54). – С. 83-90.
2. **Яшин А.В.** Волновое деформационное многоконтактное нагружение [Текст] / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин, А.А. Зайцев, А.М. Константинов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. - №7 (60). – С. 18-26.
3. **Яшин А.В.** Моделирование волнового деформационного нагружения алюминиево-магниевых сплавов [Текст] / А.В. Киричек, С.В. Баринов, А.В. Яшин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. - №11 (72). – С. 73-80.

Статьи в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science:

4. **Yashin A.V.** The peculiarities of the influence of the finite sizes of a detail on the distribution of the surface layer micro-hardness in case it is hardened by a deformation wave [Text] / Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V. // Journal of Nano and Electronic Physics, Vol.7 no 4, 04019 (4pp), 2015.
5. **Yashin A.V.** Increasing durability by deformational hardening under the conditions of back-to-back endurance by creating heterogeneous patterns [Text] / Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V. // IOP: Conference Series. Materials Science and Engineering, 2016, pp. 1-4. 124 011001.
6. **Yashin A.V.** Structural heredity influence upon principles of strain wave hardening [Text] / Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 177 (2017) 012144.
7. **Yashin A.V.** Patterns of Wave Deformational Multicontact Half-Subspace Loading [Text] / Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V. // Key Engineering Materials, Vol. 736 (2017), pp. 12-17.
8. **Yashin A.V.** Strengthening of surface layer of material by wave deformation multi-contact loading [Text] / Kirichek A.V., Barinov S.V., Aborkin A.V., Yashin A.V., Zaicev A.A // // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018), 042011.

Публикации в материалах конференций:

9. **Яшин А.В.** Закономерности формирования ударных импульсов в многоконтактной ударной системе [Текст] / Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В. // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: Сб. тр. научн. семинара памяти А.П. Бабищева / отв. ред. В.А. Лебедев ; Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. – С. 20 – 23.
10. **Яшин А.В.** Конечно-элементное моделирование процесса упрочнения волной деформации алюминиево-магниевых сплавов [Текст] / Киричек А.В., Баринов С.В., Рыжкова М.Н., Яшин А.В. // Сб. трудов IV Всерос. молодежн. научно-практ. школы с междунар. участием «Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении». – Под ред. В.Ю. Блюменштейна, 2018. С. 17.1-17.5.
11. **Яшин А.В.** Оценка адекватности моделирования процесса деформационного упрочнения методом конечных элементов [Текст] / Яшин А.В., Кандрушин В.А., Мурындин И.О., Головкин М.А. // VI всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. Тез. докл. Всерос. межвуз. научн. конф. Муром, 25 апр. 2014 г.– Муром: Изд МИ ВлГУ, 2014. С. 546-549.
12. **Яшин А.В.** Особенности влияния конечных размеров детали на распределение микротвердости в поверхностном слое при его упрочнении волной деформации [Текст] / Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В. // Физика и технология наноматериалов и структур. – Курск, 2015. - С.165-170.

13. **Яшин А.В.** Измерительный комплекс для исследования закономерностей распределения энергии ударных импульсов при многоинденторных схемах нагружения [Текст] / Киричек А.В., Баринов С.В., Силантьев С.А., Яшин А.В., Зайцев А.А. // Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии: Сб. трудов по материалам междунар. научн. симпозиума технологов-машиностроителей. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2016. - С.245-246.

14. **Яшин А.В.** Исследование материала с гетерогенными свойствами, полученными волновым деформационным упрочнением [Текст] / Киричек А.В. , Баринов С.В., Яшин А.В., Медведев М.Н., Скотников А.А. // Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии: сборник трудов по материалам международного научного симпозиума технологов-машиностроителей. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2016. – С.201-202.

Подписано в печать от «10» октября 2019 г.
Формат бумаги 60×84 1/16. Объем 1,0 усл. п. л.
Тираж 100 экз. Заказ № _____
Издательство МУП «Типография»
602267, Муром, ул. Льва Толстого, 27.