

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Яшин Александр Васильевич

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

Специальность 05.02.08 - «Технология машиностроения»

Диссертация на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Киричек Андрей Викторович
доктор технических наук, профессор

Брянск 2019

Оглавление

Введение.....	4
1 Состояние вопроса, цель и задачи исследований.....	8
1.1 Анализ конструкции и условий работы каркасных плоских сложнопрофильных деталей из алюминиево-магниевого (АМг) сплавов.....	8
1.2 Анализ способов упрочнения данного класса деталей.....	12
1.3 Повышение параметров качества сложнопрофильных деталей способами ППД.....	19
1.4 Способ волнового деформационного упрочнения (ВДУ).....	29
1.5 Анализ систем инженерного анализа для исследования процесса упрочнения.....	32
1.6 Цель и задачи исследований.....	36
Выводы.....	37
2 Разработка теоретической модели многоконтактного волнового деформационного упрочнения.....	38
2.1 Общая методика исследования повышения параметров качества каркасных плоских сложнопрофильных деталей из АМг сплавов многоконтактным ВДУ.....	38
2.2 Создание конечно-элементной модели многоконтактного ВДУ.....	40
2.3 Разработка экспериментального стенда для исследования закономерностей многоконтактного нагружения и оценки адекватности моделирования многоконтактного ВДУ.....	53
2.4 Оценка адекватности моделирования многоконтактного ВДУ.....	72
Выводы.....	77
3 Анализ теоретической модели и экспериментальные исследования повышения качества деталей из АМг сплавов многоконтактным волновым деформационным упрочнением.....	79

3.1 Анализ конструктивных и конструктивно-технологических параметров, влияющих на процесс многоконтактного ВДУ.....	79
3.2 Исследование конечно-элементной модели многоконтактного ВДУ.....	83
3.3 Технологическое оборудование для экспериментальных исследований.....	97
3.4 Экспериментальные исследования повышения качества деталей из АМг сплавов многоконтактным ВДУ.....	100
Выводы.....	114
4 Производственная апробация и технологические рекомендации по повышению параметров качества деталей из АМг сплавов многоконтактным волновым деформационным упрочнением.....	116
4.1 Исследование напряженно-деформированного состояния детали при приложении эксплуатационных нагрузок.....	116
4.2 Разработка многоинструментальной оснастки для процесса многоконтактного ВДУ.....	119
4.3 Технологические рекомендации по повышению параметров качества каркасных плоских сложнопрофильных деталей многоконтактным ВДУ.....	123
4.4 Техничко-экономический расчет эффективности применения многоконтактного ВДУ.....	127
Выводы.....	129
Основные результаты и выводы.....	131
Список использованных источников.....	135
Приложение А.....	149
Приложение Б.....	157

Введение

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 тактико-технические 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. Сулова, 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.

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».

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.

1 Состояние вопроса, цель и задачи исследований

1.1 Анализ конструкции и условий работы каркасных плоских сложнопрофильных деталей из алюминий-магниевого (АМг) сплавов

В современной промышленности широко применяются алюминиевые сплавы. Замена стальных деталей алюминиевыми при изготовлении транспортной, аэрокосмической и специальной техники обуславливается уменьшением общего веса конструкции, повышением технико-тактических характеристик изделия.

Характерным примером таких сплавов является группа алюминий-магниевого (АМг) сплавов. АМг сплавы широко применяются для изготовления различных ответственных конструкций (система Al-Mg) и сочетают в себе такие характеристики как легкость механической обработки, высокие значения пластичности, удовлетворительные прочностные показатели, возможность применения последующей отделочно-упрочняющей обработки с целью повышения качества изделия.

К достоинствам данных алюминиевых сплавов относятся малый вес (плотность сплавов АМг в ~ 3 раза меньше плотности стали), способность к упрочнению, высокая пластичность (15...20%), пониженная чувствительность к концентраторам напряжений [67, 97].

Алюминий-магниевого сплавы являются термически неупрочняемыми и имеют относительно невысокие прочностные свойства: временное сопротивление при 5-6% Mg $\sigma_{Bmax} = 340-360$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2max} = 200-240$ МПа. Однако повышение механических свойств возможно упрочнением холодной деформацией. Это позволяет повысить предел прочности и особенно резко повышается предел текучести, что ведет к снижению пластичности. Прочность нагартованного и отожженного металла практически одинакова. Холодная деформация с последующим неполным отжигом для восстановления пластичности позволяет повышать прочностные характеристики в пределах 10-40% [67, 97].

Перспективы использования алюминиево-магниевых деформируемых сплавов в промышленности ограничивают такие существенные недостатки как склонность к образованию горячих трещин [3] и низкая прочность (например, гарантированный предел текучести, который является основной расчетной характеристикой для большинства конструкций, для АМг сплавов составляет 100...155 МПа) [105].

Так, из-за нехватки прочностных свойств материала, возможно преждевременное разрушение ослабленных элементов конструкций. Тогда, в случае отказа или выхода из строя при перегрузках возможно возникновение аварийных ситуаций, что является недопустимым.

Большая часть изделий, изготовленных из АМг сплавов, работает под воздействием потока динамических знакопеременных эксплуатационных нагрузок и подвергается преждевременному усталостному разрушению. К таким изделиям относятся каркасные плоские сложнопрофильные детали (КПСД), входящие в состав системы наведения дистанционно-управляемых боевых модулей (рисунок 1), изготавливаемых из АМг сплавов [4, 27, 73].

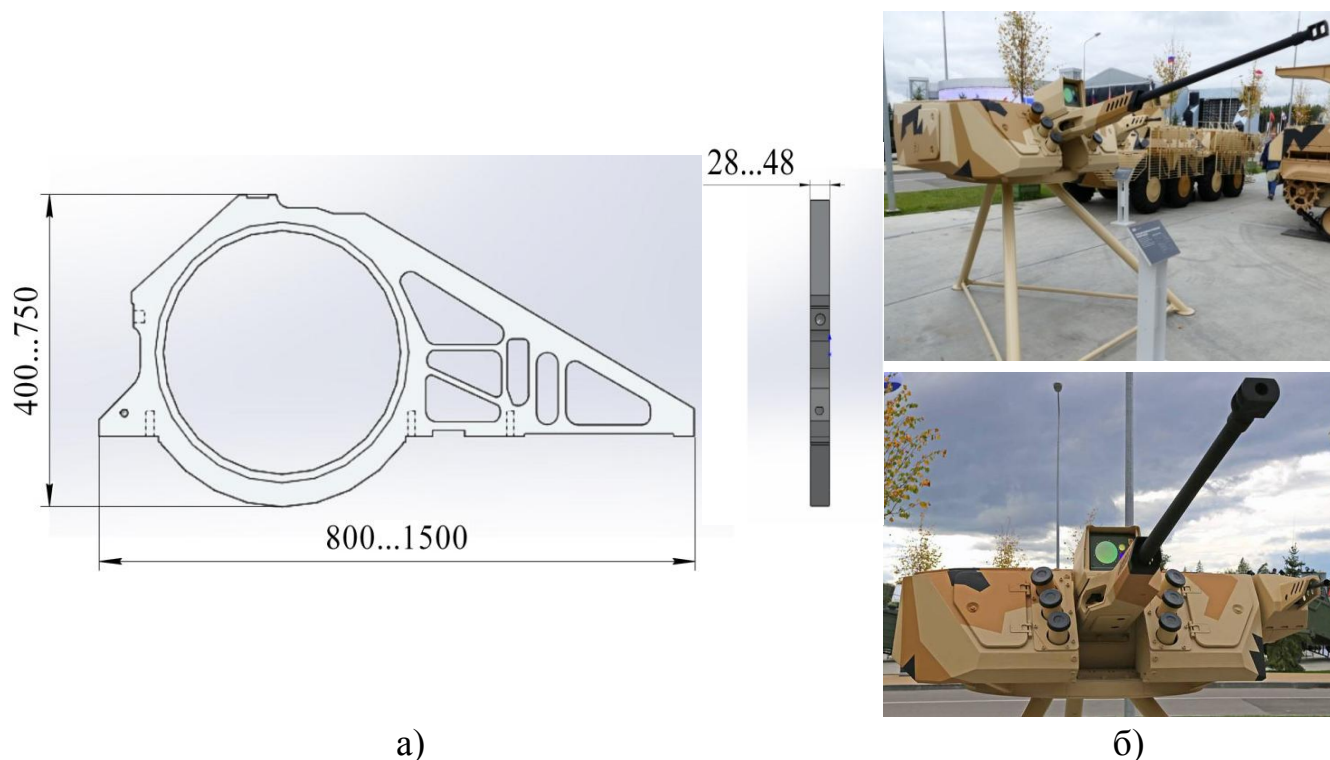
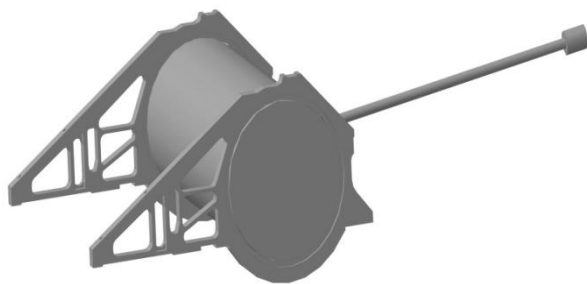


Рисунок 1 – Каркасные плоские сложнопрофильные детали (КПСД) (а) и внешний вид дистанционно-управляемого боевого модуля (б)

Данный боевой модуль является необитаемым и устанавливается на десантируемые бронев автомобили (рисунок 2). Внутри корпуса боевого модуля располагается качающаяся автоматическая пушка. Габаритные размеры боевого модуля изменяются в зависимости от применяемого калибра вооружения. Каркасные плоские детали являются опорами для крепления автоматической пушки [4].

В зависимости от особенностей применяемых конструктивных решений, способов управления и технических решений рабочие нагрузки варьируются в широком диапазоне. В связи с этим можно выделить основные классификационные признаки дистанционно-управляемых боевых модулей, среди которых [27]:

- назначение, количество применений, уровень применения;
- уровень и технико-тактические характеристики вооружения;
- универсальности оборудования;
- габаритно-весовые характеристики;
- материалы, применяемые для изготовления.



а)



б)

Рисунок 2 – Схема расположения детали в изделии (а) и боевой модуль, установленный на бронев автомобиле (б)

В результате эксплуатационных испытаний установлено, что каркасные детали подвержены динамическим нагрузкам различного направления, что приводит к образованию трещин наиболее ослабленных участков. Глубина несущего слоя при этом составляет до 9-10 мм в зависимости от прикладываемых нагрузок. Поэтому необходимо повышать характеристики как конструкции в

целом, так и отдельных ее деталей, для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств. Учитывая величину и кратность приложения рабочих нагрузок, повышенные требования предъявляются к сопротивлению усталостным разрушениям.

Основными факторами, влияющими на сопротивление усталости, являются концентрация напряжений, шероховатость после механической обработки поверхности, масштабный фактор.

В соответствии с ГОСТ 25.504-82 «Методы расчета характеристик сопротивления усталости» падение предела выносливости детали $\sigma_{-1д}$ оценивается через предел выносливости образца σ_{-1} с учетом влияния основных факторов на сопротивление усталости, выраженных коэффициентом снижения предела выносливости $K_{ВЫН}$:

$$\sigma_{-1д} = \sigma_{-1} / K_{ВЫН}, \quad (1)$$

где σ_{-1} – предел выносливости образца;

$\sigma_{-1д}$ – предел выносливости исследуемой детали;

$K_{ВЫН}$ – коэффициентом снижения предела выносливости.

В свою очередь K определяется по формуле:

$$K = \left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_A}, \quad (2)$$

где K_{σ} – коэффициент, учитывающий концентраторы напряжений;

$K_{d\sigma}$ – масштабный фактор;

$K_{F\sigma}$ – качество обработанной поверхности;

K_V – характеристики поверхностного слоя (наклепанный слой);

K_A – неравномерность свойств материала.

Таким образом, учитывая классификационные признаки боевых модулей и факторы, оказывающие влияние на сопротивление усталости можно рассмотреть следующие параметры: состав вооружения и масштабный фактор, в соответствии с которыми КПСД делятся на легкие, средние и тяжелонагруженные.

Резервом для повышения эксплуатационных характеристик и несущей способности КПСД является повышение механических характеристик, таких как

твёрдость, сопротивление ударному изгибу, предел прочности (временное сопротивление разрушению) σ_B , предел текучести σ_T , а также выравнивание всех характеристик по периметру всего изделия [87].

Для обеспечения работоспособности КПСД требуется повышение параметров качества поверхностного слоя и сопротивления усталости технологическим упрочнением.

Достижение данной цели осуществляется применением различных методов упрочнения: поверхностным легированием (химико-термическая обработка (ХТО)), термическим воздействием (термическая обработка (ТО)), деформационным воздействием (поверхностное пластическое деформирование (ППД)) [50, 51].

1.2 Анализ способов упрочнения данного класса деталей

Для снижения вероятности выхода из строя каркасных профильных деталей и повышения их параметров качества применяется множество различных технологических методов. Оценка эффективности применяемых методов контролируется следующими параметрами качества, влияющими на работоспособность детали: параметрами качества поверхностного слоя (глубина и степень упрочнения, изменение микроструктуры) и эксплуатационными свойствами (сопротивление усталости) [89-93].

В последнее время отмечается, что конструктивная прочность различных изделий не может быть гарантирована без применения дополнительной обработки, повышающей их надёжность. В частности, это могут быть методы ППД, термическая обработка и т.д. [106].

Технологические способы повышения качества изделий приобрели широкое распространение в современном производстве. К ним относятся нанесение покрытий, легирование, термическое воздействие, деформационное воздействие и другие. Более подробная классификация представлена в таблице 1 [50, 51].

Таблица 1 – Технологические способы повышения параметров качества изделий из АМГ сплавов

Технологические способы повышения параметров качества изделий из АМГ сплавов					
Комбинированные способы	Деформационное воздействие	Термическое воздействие	Поверхностное легирование	Нанесение покрытий	
- термомеханическая обработка (ТМО)	- вращающимися металлческими щетками	- закалка токами высокой частоты	- химико-термическая обработка	- химические и электролитические способы	
- электромеханическая обработка (ЭМО)	- выглаживание, обкатывание, раскатывание	- криогенная обработка	- ионная имплантация	- газотермическое напыление	
- закалка ТВЧ + ППД	- ультразвуковая обработка	- лазерное шоквое упрочнение	- лазерное легирование	- погружение в расплав	
- лазерное упрочнение + ультразвуковая обработка	- ударное или центробежное обкатывание	- лазерная аморфизация	- электронно-лучевое легирование	- металлизация	
- электроискровое легирование (ЭИЛ) + ППД	- магнито-импульсная обработка	- электронно-лучевая обработка	- плазменное легирование	- наплавка	
- магнито-импульсная обработка + ППД	- упрочняющая чеканка, виброобкатывание	- плазменная закалка	- электроискровое легирование	- плакирование	
	- вибрационная обработка	- газошламенная закалка	- микродуговое оксидирование	- физическое (PVD) и химическое (CVD) осаждение	
	- упрочнение волной деформации			- эмалирование	
	- дробеструйная и дробеметная обработка			- фрикционный перенос	
	- водовоздушными струями высокого давления			- твердосмазочные материалы	
	- упрочнение взрывом				
	- электрогидравлическим ударом				

Для изучения возможностей по повышению параметров качества, выявления достоинств и недостатков данных методов, рассмотрим их подробнее.

Нанесение покрытий.

Нанесение покрытий является распространенным методом упрочнения поверхностного слоя деталей машин. В поверхностном слое формируются растягивающие остаточные напряжения и образуется резкий переход между покрытием и основным металлом. Толщина нанесенного слоя варьируется в пределах от 3...5 микрон до 2 миллиметров.

В отношении изделий из алюминиевых сплавов нанесение покрытий применяется с целью обеспечения высокой микротвердости на поверхности и коррозионной стойкости.

Упрочнение сложнопрофильных поверхностей кулачковых валов ТНВД, коленчатых валов, валов коробки передач воздушно-плазменным напылением исследовано в [70]. Посредством использования копировального устройства удалось обеспечить высокую точность базирования инструмента относительно упрочняемой детали. Однако напыляемый слой обладает невысокой адгезией к подложке в результате влияния множества факторов при обработке, что негативно сказывается на износостойкости.

В работе [93] автор предлагает методику повышения механических свойств изделия методом микроплазменного оксидирования. Отмечается, что при эксплуатации изделий из сплавов АМг в кислых и щелочных средах из-за дефектов, возникающих при их механической обработке, увеличивается возможность образования межкристаллитной коррозии. Микроплазменное оксидирование является одним из перспективных методов модифицирования.

Достоинством метода является простота реализации и безопасность для окружающей среды, повышение обрабатываемости материала. Данный метод позволяет повысить твердость поверхностного слоя в 4-5 раз. Возможно как локальное применение, так и для крупногабаритных конструкций.

К недостаткам относится небольшая толщина и пористость основного слоя покрытия. Кроме того, нанесение покрытий приводит к охрупчиванию

поверхности основного материала, появлению внутренних напряжений из-за резкой границы раздела «покрытие-подложка». Данные факторы снижают предел выносливости и вызывают трещинообразование.

В отношении каркасных плоских сложнопрофильных деталей, метод нанесения покрытий может обеспечить высокую коррозионную стойкость и твердость на поверхности, но основное эксплуатационное свойство – сопротивление усталости – не повышается. В связи с этим нанесение покрытий для повышения параметров качества КПСД целесообразно применять только совместно с другими операциями отделочно-упрочняющей обработки (ОУО), что неизбежно приведет к увеличению энерго- и трудоемкости технологического процесса, увеличению себестоимости изделия.

Поверхностное легирование.

Легирование является широко применяемым методом повышения параметров качества деталей из алюминиевых сплавов. Легирование существенно изменяет физико-химические характеристики исходного металла или сплава. Эффективно применяется как объемное, так и поверхностное легирование.

Легирование алюминиевых сплавов малыми количествами скандия, иттрия, переходными и тугоплавкими металлами находит все большее применение в производстве сплавов, так как значительно улучшает эксплуатационные свойства различных материалов. Скандий (Sc), цирконий и гафний (Hf) стабилизируют кристаллическую структуру алюминиевых сплавов при высоких температурах, ограничивают рост зерен, повышают механические и коррозионные свойства, улучшают пластические свойства. Введение 0,3% Sc повышает временное сопротивление разрыву отожженных листов алюминия с 55 до 240 МПа, а в сплавах АМг5 и АМг6 с 260 до 400 МПа. Воздействие скандия проявляется при еще меньших концентрациях в присутствии циркония. Гафний в алюминиевых сплавах связывает в интерметаллические соединения такие вредные примеси как железо, щелочные металлы и др. Добавлением 1% Hf в алюминий получают сверхпрочные сплавы с размером зерен ~40-50 нм [102].

Авторы работы [105] модернизировали существующий алюминиевый сплав 1570 корректировкой оптимального содержания основных легирующих элементов (снижение содержания Mg, Mn, снижение верхнего предела Sc), малых добавок (Be, Ce) и увеличением чистоты по примесям. Новый сплав 1570С по механическим характеристикам превосходит аналогичные полуфабрикаты из сплава АМг6 в среднем на 15...20%. Сплав 1570С позволяет получать прочность выше уровня прочности исходного металла при толщине 35 мм. Исследованиями микро- и макроструктуры металла дефектов в виде трещин и несплошностей не установлено. После легирования металл имеет высокую ударную вязкость (KCU до 70 Дж/см²).

Критериями, ограничивающими применение поверхностного легирования для повышения качества механических свойств изделий, являются формирующиеся неблагоприятные растягивающие напряжения до 1200 МПа, неудовлетворительная шероховатость поверхности, сложность последующей механической обработки. При выборе нерациональных режимов легирования возможно образование микротрещин. В зависимости от применяемого метода возможно снижение либо сопротивления усталости, либо ударной вязкости.

Термическое воздействие.

Термическая обработка является наиболее распространенным методом повышения эксплуатационных характеристик деталей машин. Однако объемная термическая обработка алюминий-магниевого сплава является нецелесообразной, так как сплавы системы Al-Mg термически не упрочняются.

В отношении деформируемых сплавов АМг отмечается, что в состоянии поставки они имеют крупнозернистую структуру, схожую по свойствам с литым металлом, и, как следствие, имеют более низкие механические свойства. Для выравнивания структурной неоднородности и механических характеристик по всему объему готовых изделий применяется способ нормализации. Однако следствием является снижение прочностных и эксплуатационных характеристик [63, 97].

Одним из наиболее эффективных методов термического упрочнения алюминиевых сплавов является поверхностная закалка, которая осуществляется методами искровой и лазерной обработки.

Так, искровая обработка деталей двигателей внутреннего сгорания, изготовленных из алюминиевого сплава АЛ30, позволяет повысить прочностные свойства до 10%. [38].

В работе [34] исследовано влияние лазерной термической обработки (ЛТО) на механические свойства алюминиевого сплава АК9. После ЛТО микротвердость в зоне лазерного воздействия возросла в 1,5 раза по сравнению с исходной (110-130 НV) вследствие значительного измельчения структуры. Также в процессе закалки возможен переход из жидкого состояния в твердый раствор кремния и магния, что также ведет к увеличению микротвердости. Процесс закалки алюминиевых сплавов ЛТО затрудняется необходимым нанесением поглощающих покрытий.

Кроме того, ЛТО позволяет повысить пластичность алюминиевых сплавов [89]. Авторами установлено, что пластичность сплава АМг6 повышается вследствие ускоренного термического воздействия на поверхностный слой. Модуль упругости уменьшается на 10...15 %, а относительное удлинение материала увеличивается на 2,5...3 %.

При всех достоинствах термической обработки, существуют и недостатки, ограничивающие ее применение в отношении алюминиевых деформируемых сплавов. По мере увеличения глубины упрочненного слоя растут и неблагоприятные растягивающие напряжения, происходит коробление изделия, требуется последующая механическая обработка. Также к недостаткам относится неравномерность упрочнения по глубине и твердости. Наличие резкого перехода от закаленного поверхностного слоя к основному металлу обуславливает снижение сопротивления усталости. Кроме того, глубина упрочненного поверхностного слоя не превышает 2-3 мм [34, 36, 89].

Наибольший эффект от поверхностной термической обработки алюминиевых сплавов достигается за счет комбинированного использования с другими операциями ОУО.

Комбинированные способы.

В настоящее время все более широко используют комбинированные методы упрочнения. Так, совместное применение различных способов позволяет снизить негативное влияние одного способа за счет достоинств другого. Это приводит к значительному повышению механических свойств и увеличению срока эксплуатации изделия в целом. Комбинирование различных технологических методов позволяет формировать в поверхностном слое требуемую эпюру упрочнения.

Наиболее распространенные способы комбинированного упрочнения сочетают в себе термическое и деформационное взаимодействие на обрабатываемую поверхность [1, 23, 24, 72, 81].

Так, в работе [98] исследовано, что применение термообработки (отжига) после деформационного упрочнения магниевого сплава АМ60 способами ротационнойковки позволяет повысить прочность и пластичность материала, а также нормализует микроструктуру, тем самым снижая внутренние напряжения (рисунок 3).

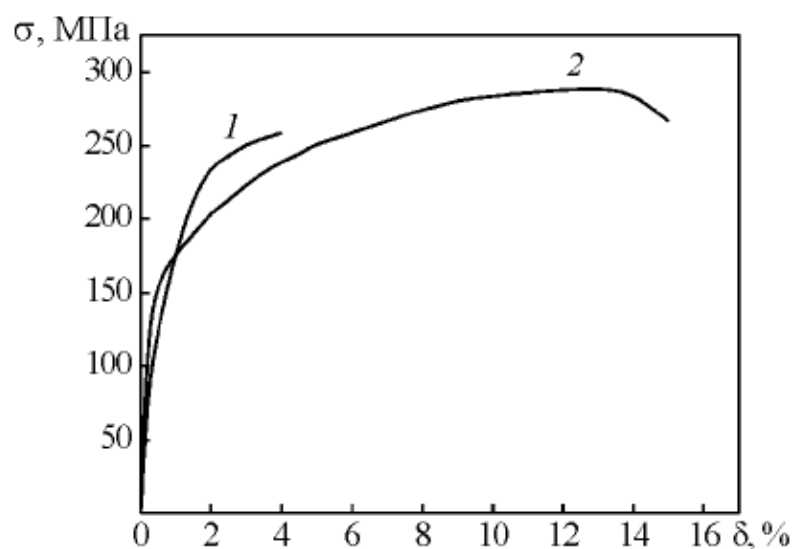


Рисунок 3 – Кривые растяжения образцов сплава АМ60 после ротационнойковки (1) и последующего отжига при 250° С, 30 мин (2)

Однако комбинированное упрочнение требует высоких энергозатрат при низкой энергоэффективности, использования дорогостоящего оборудования. Также возникают сложности при обработке крупногабаритных длинномерных изделий. Все это накладывает ограничения на применение данного способа и сдерживает его развитие.

В связи с этим, наибольшее распространение в области обеспечения требуемых параметров качества каркасных плоских сложнопрофильных деталей получили упрочняющие технологии ППД.

Целесообразность применения ППД для повышения параметров качества профильных деталей обуславливается их способностью к созданию упрочненного слоя глубиной более 10 мм с высокими прочностными характеристиками, высокой степенью упрочнения и благоприятными сжимающими остаточными напряжениями, которые не обеспечиваются другими видами упрочняющей обработки.

1.3 Повышение параметров качества сложнопрофильных деталей способами ППД

Одним из наиболее эффективных и широко применяемых способов для повышения механических свойств профильных изделий является способ деформационного упрочнения ППД. Данный вид обработки является менее энергоемким по сравнению с термической обработкой, позволяет сэкономить дорогостоящие металлы в отличие от нанесения покрытий и легирования, и обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики, износостойкость, сопротивление усталости и контактному выкрашиванию [26].

В разное время вопросами упрочнения ППД занимались А.Ю. Албагачиев, Б.М. Аскинази, А.П. Бабичев, М.А. Балтер, В.Ф. Безъязычный, В.М. Браславский, М.С. Дрозд, С.А. Зайдес, А.В. Киричек, Ю.Р. Копылов, В.А. Лебедев, М.М. Матлин, А.А. Михайлов, Л.Г. Одинцов, Н.В. Олейник, Д.Д. Папшев, А.Е. Пашков, В.В. Петросов, Э.В. Рыжов, Б.П. Рыковский, В.И. Серебряков, Ю.И. Сидякин,

В.М. Смелянский, Д.Л. Соловьёв, Г.В. Степанов, А.Г. Суслов, М.А. Тамаркин, В.М. Торбило, В.П. Федоров, П.А.Чепа, Д.Л. Юдин и др. [9-13, 18, 37, 51, 58, 61, 65, 75, 76, 86, 99, 100, 103, 104, 109, 116].

ГОСТ 18296-72 в зависимости от упрочняющего воздействия разделяет способы ППД на статические и динамические. Статические способы ППД подразумевают передачу в очаг деформации постоянного по величине усилия при непрерывном контакте упрочняемой поверхности и деформирующего инструмента. Основными статическими способами ППД являются упрочняющее обкатывание, выглаживание, поверхностное дорнование, виброобкатывание и вибровыглаживание [29, 51].

Существующими статическими способами ППД упрочнять каркасные плоские сложнопрофильные детали проблематично ввиду сложности обеспечения заданной траектории движения инструмента, больших габаритов заготовки и ограничений по глубине упрочненного слоя (до 2-3 мм). Поэтому, для упрочнения КПСД наиболее перспективно применение динамических способов ППД [20, 49, 59, 60, 86, 112, 113].

При динамической обработке ППД происходит дискретное ударное деформационное воздействие инструмента или рабочих тел на обрабатываемую поверхность. Основными динамическими способами являются дробеметная и дробеструйная обработка, чеканка, виброударная и центробежная обработка, обработка вращающимися щетками [51].

Динамические методы по сравнению со статическими позволяют создавать градиентно наклепанный слой большей глубины и с более высокими механическими свойствами. При выборе оптимальных режимов глубина упрочненного слоя может достигать 15..30 мм, степень упрочнения в среднем достигает 50-60%. В поверхностном слое формируются благоприятные сжимающие напряжения до 1000 МПа. К преимуществам динамических методов можно отнести: кратковременный и локальный характер приложения нагрузки, возможность обработки тонкостенных деталей. Однако существуют и недостатки – нестабильность результатов из-за сложности регулирования энергии удара,

необходимость последующей механической обработки для обеспечения требуемой шероховатости, наличие негативных производственных факторов, таких как вибрации и шум [42, 51].

Анализ литературы показал, что для упрочнения алюминиевых сплавов наиболее эффективно применение следующих динамических способов ППД.

Обработка дробью.

Осуществляется ударами стальных шариков диаметром 1...5 мм, микрошариками или стеклянными гранулами. Различают сухую дробеструйную и дробеметную обработку, а также обработку с применением смазочно-охлаждающих жидкостей – гидродробеструйная и гидродробеметная обработка. Схема дробеструйной обработки представлена на рисунке 4а.

Дробеструйный наклеп в зависимости от кинетической энергии и длительности обработки способствует формированию упрочненного слоя глубиной 1..1,5 мм, степени упрочнения до 40% и сжимающих остаточных напряжений в пределах от 200 до 1000 МПа. При соударении рабочих тел с деформируемой поверхностью образуются следы в виде лунок, и происходит локальный нагрев детали. Из-за невысокой плотности потока дроби возможны появления необработанных участков детали. Данные факторы сказываются на однородности и сплошности упрочненного слоя [86].

Виброударная обработка.

Представляет собой интенсивное относительное перемещение обрабатываемых деталей и рабочих тел в замкнутом пространстве (рабочей камере) под воздействием колебаний в различных направлениях. Вследствие постоянного изменения векторов движения тел, находящихся в рабочей камере между ними возникают столкновения и усиленное трение [60, 62]. Схема виброударной обработки представлена на рисунке 4б.

В результате данное деформационное упрочнение повышает микротвердость поверхностного слоя, создает остаточные напряжения сжатия, снижает шероховатость поверхности. Эффективность виброударной обработки зависит от геометрических параметров рабочих тел и частиц, длительности

обработки, размеров камеры и ее заполнения во время обработки, механических свойств обрабатываемой детали.

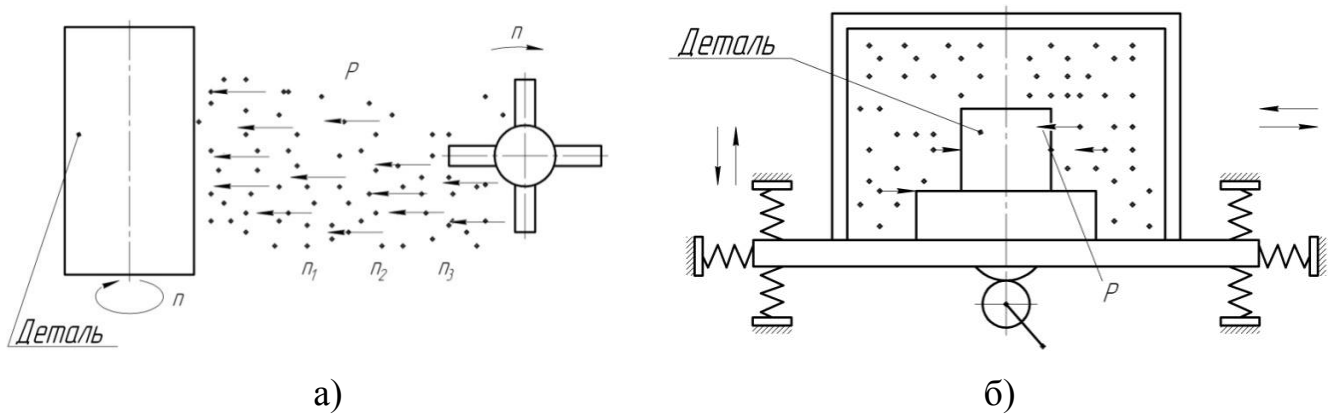


Рисунок 4 – Схема упрочняющей обработки:

а) дробеструйной; б) вибрационной

Вибрационная ударная обработка успешно применяется при упрочнении деталей имеющих сложную форму, а также при серийной обработке малогабаритных изделий. Недостатком является высокий уровень шума и потребность в большом количестве рабочих тел, частиц.

Ультразвуковая обработка (УЗО).

Представляет собой деформационное пластическое упрочнение поверхностного слоя детали под воздействием на нее статической и ударно-импульсной энергии колебательной системы, состоящей из ультразвукового генератора (УЗГ), магнитострикционного преобразователя и концентратора. Схема ультразвуковой обработки представлена на рисунке 5.

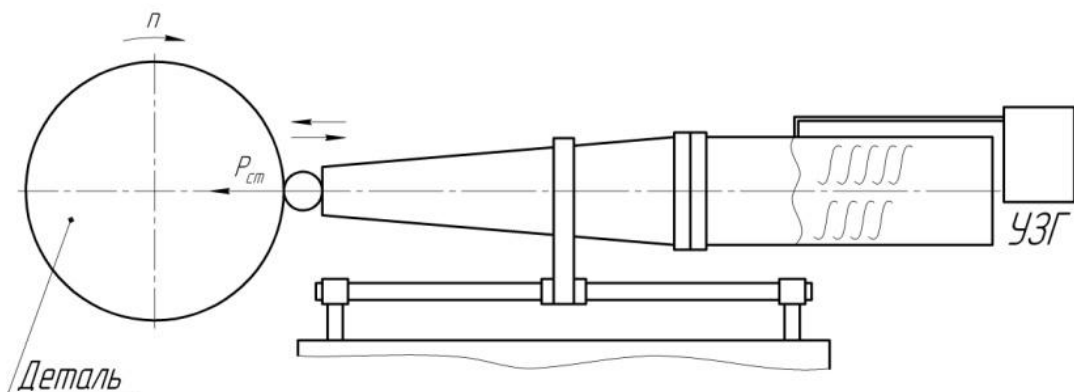


Рисунок 5 – Схема ультразвуковой обработки

УЗО создает сжимающие остаточные напряжения до 1000 МПа, а степень упрочнения на глубинах до 0,1..0,3 мм достигает 100%. Обработанная поверхность отличается высокой износостойкостью и низкой шероховатостью. Но сложность и высокая стоимость приборов, высокий расход энергии сдерживают развитие данной технологии [74].

Упрочняющая чеканка.

Заключается в деформационном воздействии инструмента на упрочняемую поверхность специальным устройством (механическим, гидравлическим, электромеханическим и т.д.) через систему волноводов и бойков [42, 51]. Схема упрочняющей чеканки для цилиндрических поверхностей представлена на рисунке 6.

Чеканка характеризуется большой степенью и глубиной упрочнения (до 60% и 30 мм соответственно), формированием в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия до 1000 МПа.

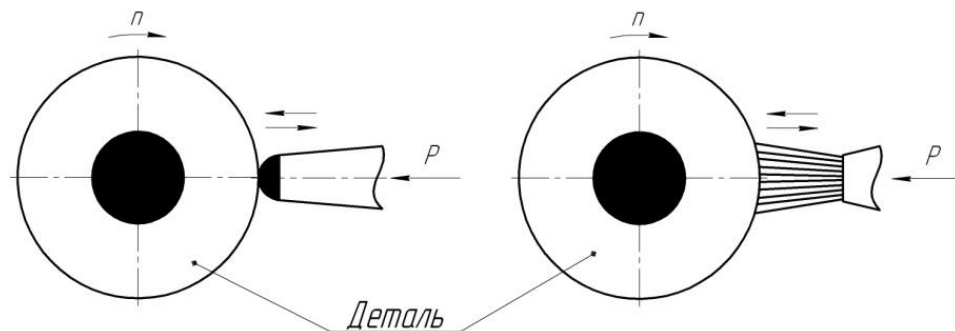


Рисунок 6 – Схема упрочняющей чеканки

В качестве деформирующего инструмента наиболее распространены стальные шары и ролики различной формы. Применение профильного инструмента расширяет технологические возможности упрочняющей чеканки и позволяет обрабатывать зубчатые, шлицевые поверхности, резьбы. Принцип упрочнения чеканкой схож с УЗО, однако при чеканке удары наносятся с более низкой частотой, в пределах 10-50 Гц, а импульсная составляющая деформации значительно больше, чем при УЗО. Недостатком чеканки является повышение

шероховатости обработанной поверхности, что требует последующей механической обработки [17, 42, 51, 115].

Данные способы ППД эффективно применяются для повышения качества сложнопрофильных изделий: прочности, сопротивления ударному изгибу, твердости, усталостной прочности.

Примеры использования методов ППД для повышения параметров качества изделий.

Ультразвуковая обработка (УЗО) и ее разновидности являются распространенными методами повышения качества деталей. УЗО является эффективным методом импульсного воздействия на изделия машиностроения [39]. Она обеспечивает снижение концентрации напряжений в изделии, создает упрочненный поверхностный слой с повышенной сопротивляемостью к усталостному разрушению, перераспределяет остаточные напряжения. При УЗО создается наклепанный слой глубиной 0,8-1,0 мм с образованием сжимающих остаточных напряжений. Производительность УЗО составляет 18-20 м/час. Использование УЗО обеспечивает снижение остаточных напряжений до 25-40%, повышение циклической прочности в 2..4 раза, а срок службы всего изделия в 5..10 раз. Также данный метод используется для повышения коррозионной стойкости детали. В результате измельчения зерна снижается склонность к межкристаллитной коррозии.

Автор работы [84] предлагает использование многоинденторной системы УЗО для обработки сложнопрофильных изделий (гребной винт, винт пропеллера) с целью повышения прочностных свойств, твердости, создания постоянного микро- и макрорельефа, снижения остаточных напряжений, а также управления поверхностной текстурой материала. Ультразвуковая установка жестко закреплена на токарном станке, что позволяет регулировать параметры упрочнения.

Разновидностью УЗО является высокочастотная механическая проковка (ВМП) [91]. ВМП совмещает статический поджим инструмента к обрабатываемой поверхности и динамическое воздействие в виде ударов, следующих с высокой

частотой. Оптимальная ширина обработки при выходной мощности генераторного устройства до 1,2 кВт составляет 4-7 мм при скорости перемещения инструмента 0,5 м/мин. При ВМП плоских образцов, выполненных из алюминиевого сплава 6061Т6, предел выносливости был повышен на 21% по сравнению с исходным. Отмечается, что основными причинами повышения механических свойств является снятие растягивающих и создание благоприятных остаточных напряжений сжатия, уменьшение концентрации напряжений, деформационное упрочнение поверхностного слоя металла.

В работе [118] авторы исследовали долговечность плоских образцов, упрочненных ВМП в исходном состоянии, при накоплении 70 % усталостных повреждений, при образовании поверхностных трещин усталости. Выявлено, что ВМП повышает предел ограниченной выносливости на 50 %, а циклическую долговечность – в 5...10 раз. Эффективность упрочнения образцов с 70 % накопленными усталостными повреждениями зависит от степени прикладываемых напряжений при испытаниях. Применение технологии ВМП повышает остаточную циклическую долговечность деталей с поверхностными трещинами усталости (глубиной до 2 мм) в 2,5 раза по сравнению с долговечностью до образования трещины.

Несмотря на то, что УЗО является одним из эффективных способов повышения качества изделий, обеспечивает степень упрочнения до 100% на глубине 0,05...0,3 мм, но обладает низким КПД и требует большого расхода энергии, больших производственных площадей, поэтому широкого распространения в промышленности не получила.

В работе [114] авторы исследовали возможность устранения дефектов поверхности изделий электродинамической обработкой (ЭДО). ЭДО является одной из разновидностей магнитно-импульсной обработки. Эффективность применения ЭДО для повышения параметров качества изделия и снижения брака выпускаемой продукции подтверждается экспериментальными исследованиями. При этом применение подложек при ЭДО позволяет предотвратить изменения в микроструктуре материала.

Однако, наибольший эффект от применения ЭДО достигается только в сочетании с динамическими способами ППД, что существенно затрудняет и увеличивает стоимость обработки.

Авторы работы [53] исследовали возможность повышения механических свойств деформируемого сплава АМг6 в результате обработки многопроходным пластическим деформированием. Многопроходная обработка сплава АМг6 позволяет измельчать размер исходного зерна до 10-15 мкм. Мелкозернистая структура обеспечивает повышение микротвердости, условного предела текучести, временного сопротивления разрушению. Также после обработки у сплава АМг6 отмечено одновременное увеличение предельной деформации до разрушения на 28 % и временного сопротивления на 27 %.

Формирование микрокристаллической структуры сплава АМг6 позволяет повысить предел прочности на 100 МПа, при этом обеспечивается повышение пластичности более чем в 3 раза [70].

Недостатком метода является ограничение по размерам и форме упрочняемой детали.

Так как обрабатываемая поверхность имеет сложную геометрию, является крупногабаритной и требует локального упрочнения отдельных участков, то одними из наиболее эффективных методов являются дробеструйная обработка, упрочняющая чеканка, обработка шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ), обработка волновым деформационным упрочнением.

Дробеструйная обработка является одним из распространенных способов ППД. В [85] в результате нескольких этапов обработки алюминиевого сплава дробью различных размеров повышено сопротивление усталости, снижена шероховатость поверхности, в поверхностном слое сформированы сжимающие остаточные напряжения величиной до 150 МПа.

В работе [94] проведены экспериментальные исследования по повышению эксплуатационных характеристик образцов из алюминиевого сплава АМг6-1 методом дробеструйной обработки.

Дробеструйная обработка сформировала сжимающие остаточные напряжения в образцах. Поверхностное упрочнение данным методом проводится с целью повышения усталостной и коррозионно-усталостной прочности. Результаты экспериментов показали, что после обработки достигнуто уменьшение остаточных напряжений на 77-94%.

Эффективность применения дробеструйной обработки отмечается в работе [88]. Отмечается, что при проведении коррозионно-усталостных испытаний упрочненных образцов, выполненных из алюминиевых сплавов, позволяет повысить циклическую долговечность в 2-3 раза. Также, дробеструйное упрочнение повышает общую (до разрушения) долговечность на 20%, время до момента появления трещин при этом увеличивается в 2,5 раза.

Дробеструйная обработка успешно применяется для негабаритных изделий. Обработка же крупногабаритных плоских деталей затрудняется сложностью размещения заготовки в упрочняемой среде. Кроме того возникает сложность направления инструмента (шариков) в необходимую зону обработки, а глубина упрочненного слоя не превышает 2-3 мм.

В работе [26] выявлено, что причиной образования дефектов в стыковых рельсовых соединениях, выполненных из алюмотермитных сплавов, является недостаточная твердость на поверхности катания головки рельса. Исследованиями определены оптимальные режимы упрочняющей чеканки, которой на поверхности катания рельса был сформирован упрочненный слой глубиной 1,5-1,7 мм и микротвердостью в 2-2,5 раза выше исходной.

Метод упрочняющей чеканки обеспечивает формирование наклепанного слоя на глубину более 10 мм. С другой стороны чеканка обладает низким КПД, малой длительностью ударного воздействия и невозможностью управления ударным импульсом. Это не позволяет создавать равномерно упрочненный слой с требуемой эпюрой упрочненного слоя.

Одним из эффективных способов ППД является виброударная отделочная обработка шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ), разработанная Ростовской научной школой под руководством А.П. Бабичева. ШСУ относится к

многоконтактным виброударным инструментом для обработки сложнопрофильных поверхностей ППД. Метод сочетает в себе достоинства виброударной обработки (гибкость обрабатывающей среды) и чеканки (высокое импульсное воздействие). Передача ударного импульса в очаг деформации передается от пневматического устройства через замкнутый объем стальных закаленных шаров к упаковке стержней со сферическими наконечниками, которые создают упрочненный слой на обрабатываемой поверхности (рисунок 7) [2, 5, 9-12]. Применение обработки ШСУ эффективно для упрочнения локальных участков изделий.

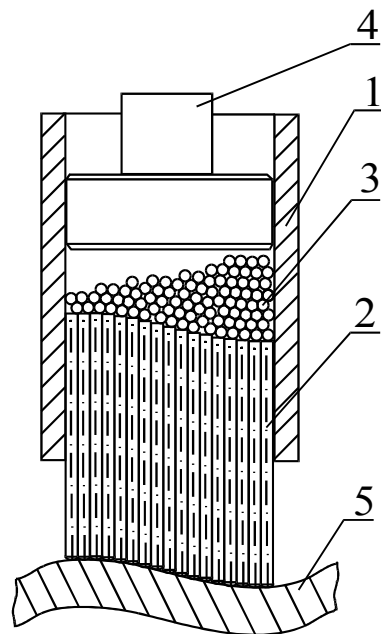


Рисунок 7 – Схема многоконтактного виброударного устройства ШСУ:
1 – корпус, 2 – пакет стержней, 3 – замкнутый объем стальных шаров, 4 – пневматический ударник, 5 – обрабатываемая поверхность

Так, виброударная обработка алюминиевых сплавов позволяет повысить предел выносливости до 28% в зависимости от режимов упрочнения. Упрочненный слой формируется на глубину до 1 мм [12].

Благодаря свойству псевдотекучести шариков, находящихся в замкнутом объеме, инструмент в очаге деформации может принимать форму обрабатываемой поверхности. Поэтому ШСУ имеет возможность упрочнения как плоских, так и сложнопрофильных поверхностей. В поверхностном слое

формируются сжимающие остаточные напряжения и наносится регулярный микрорельеф.

На рисунке 8 представлены конструктивные схемы обработки различных поверхностей [2].

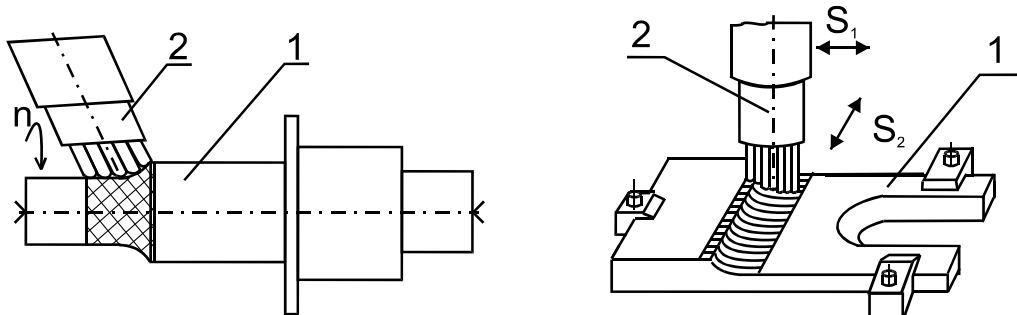


Рисунок 8 – Схемы упрочняющей обработки ШСУ: 1 – деталь, 2 – инструмент

Однако для создания регулярного микрорельефа необходимо применение жестких станочных приводов. Кроме того, для обработки длинномерных крупногабаритных деталей требуется сложное и дорогостоящее оборудование, которое существенно повысит стоимость обрабатываемых изделий [96].

Рассмотренные способы ППД эффективно применяются для повышения параметров качества ответственных деталей и обеспечения требуемых эксплуатационных свойств изделия в целом. Но их существенным недостатком является низкий КПД и сложность управления ударными импульсами, что негативно сказывается на равномерности формируемого упрочненного слоя.

1.4 Способ волнового деформационного упрочнения (ВДУ)

Волновое деформационное упрочнение (ВДУ) является одним из современных способов ППД, обеспечивающим требуемый комплекс механических свойств изделия. Данный эффект достигается нагружением очага деформации управляемым ударным потоком энергии, что позволяет контролировать величину прикладываемого усилия.

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 (рисунок 9).

Упрочнение волной деформации сочетает в себе комбинированное воздействие статического поджатия упрочняемой поверхности и динамического ударного воздействия на нее.

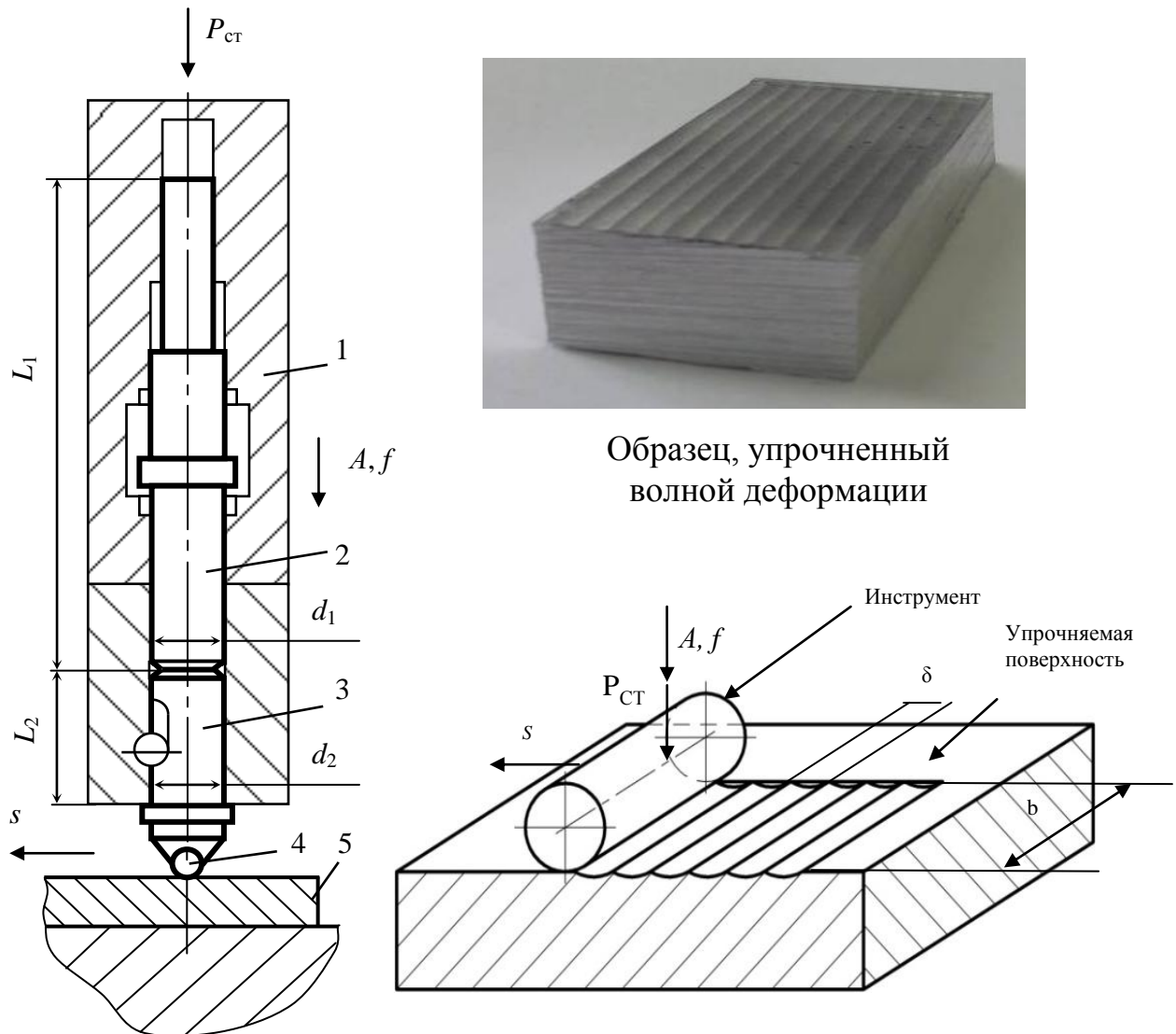


Рисунок 9 – Схема нагружения поверхности при волновом деформационном упрочнении: 1 – генератор импульсов, 2 – боек, 3 – волновод, 4 – инструмент, 5 – упрочняемая поверхность; A – энергия ударов, $P_{ст}$ – статическая нагрузка, s – подача детали относительно инструмента, L_1 , L_2 – длина бойка и волновода соответственно, d_1 , d_2 – диаметр бойка и волновода соответственно, f – частота ударов, δ – характерный размер пластического отпечатка, b – ширина инструмента

Соотношение статической и динамической составляющих выбирается исходя из механических свойств обрабатываемого материала, необходимой степени и равномерности упрочнения. Статическая нагрузка должна быть выше предела упругости материала и обеспечивать непрерывный контакт ударной системы с упрочняемой поверхностью. Величина статической нагрузки должна составлять не менее 10% от динамической нагрузки. Основное результирующее воздействие на поверхность оказывает динамическая составляющая приложенной энергии. Постоянный контакт с деформируемым телом создает эффект пролонгированного ударного импульса. Это позволяет более полно передавать энергию от источника к нагружаемой среде. Тем самым, КПД процесса упрочнения волной деформации выше, чем у других аналогичных способов ППД [51].

В зависимости от применяемых режимов на обработанной поверхности формируются пластические отпечатки, геометрия которых определяет свойства упрочненного слоя: глубину, степень и равномерность упрочнения. Так, глубина при упрочнении волной деформации может достигать 6..10 мм, а степень упрочнения до 150%, в случае отделочно-упрочняющей обработки на поверхности создается упрочненный слой с высокой степенью упрочнения, небольшой глубиной и низкой шероховатостью [51].

Кроме того, авторами способа волнового упрочнения [51] были запатентованы схемы обработки профильных поверхностей стальных изделий [77-80, 82, 83], в результате которых были снижены шероховатость обработанных поверхностей, энергоемкость процесса снижена более чем в 2 раза по сравнению с другими способами ППД, твердость повышена в 1,3-2,6 раза, глубина упрочнения составила 3-6 мм.

Таким образом, применение управляемой обработки волной деформации для создания градиентно упрочненных участков на большой глубине поверхностного слоя с высокой твердостью, прочностными свойствами и повышенным сопротивлением усталости делает перспективным использование

данного способа ППД для повышения качества сложнопрофильных плоских деталей, где указанные параметры играют одну из ключевых ролей.

Ранее исследования по ВДУ проводились только для стальных материалов. Алюминиевые деформируемые сплавы упрочнению не подвергались. Так, установлено, что при одноконтантной схеме обработки более пластичных АМг сплавов инструментами, характерными для ВДУ стальных материалов, в пятне контакта инструмента с заготовкой – очаге деформации – возникает избыточное давление, которое ведет к переупрочнению материала. Уменьшение рабочей энергии удара ведет к существенному снижению глубины упрочненного слоя.

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

Установлена необходимость адаптации ВДУ для условий обработки деталей из АМг сплавов, которая должна быть направлена на снижение давления инструмента на материал в очаге деформации. Решение поставленной задачи возможно за счет создания многоконтантной инструментальной оснастки, отдаленным аналогом которой является ШСУ. Это позволит без существенных конструктивных изменений параметров генератора импульсов управлять энергетическими параметрами ВДУ в широком диапазоне, снизить давление в очаге деформации, обеспечить заданную производительность обработки.

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

1.5 Анализ систем инженерного анализа для исследования процесса упрочнения

В настоящее время все более широко применяются автоматизированные программные комплексы, позволяющие существенно ускорить и повысить

эффективность математического моделирования. Данное программное обеспечение работает на основе метода конечных элементов (МКЭ). Конечно-элементное моделирование (КЭМ) на основе вычисления систем дифференциальных уравнений позволяет получать распределение физических полей исследуемых процессов.

Преимуществами КЭМ является возможность учета необходимых граничных условий, которые повышают точность производимых расчетов. Кроме того, повышение точности моделирования возможно за счет обоснованного выбора вида конечных элементов и их количества.

Большинство современных систем инженерного анализа на данный момент работают на основе МКЭ. Данные системы принято разделять на универсальные, такие как: ABAQUS, MSC.Nastran, ANSYS, LS-DYNA, Dytran и т.д., а также специализированные: Deform, Qform 3D, MSC.SuperForm, Pam-Stamp, MSC.SuperForge и т.д. [6-8, 14].

Данное программное обеспечение помогает исследовать процессы пластического изменения материала, определять напряженно-деформированное состояние (НДС) детали в результате воздействия, подбирать рациональные и наиболее эффективные технологические режимы при обработке ППД, при этом учитывая и задавая свойства исследуемого материала, НДС всей конструкции, характеристики упрочнения и т.д. [7, 14, 40, 41].

Для исследования волновых процессов, происходящих при динамической обработке ППД целесообразно использовать универсальные решатели, так как из-за сложности происходящих во время обработки изменений задачу можно отнести к нестандартным.

Одним из лидеров среди универсальных программ в последние 30 лет является ANSYS, разработанный американской компанией ANSYS, Inc. ANSYS включает в себя несколько программных модулей, разработанных сторонними организациями. Среди этих модулей необходимо выделить ANSYS/LS-DYNA. LS-DYNA является многоцелевым универсальным решателем, разрабатываемым компанией Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

ANSYS/LS-DYNA позволяет исследовать нелинейные быстротечные динамические процессы, происходящие в неупругих средах. Данный программный комплекс решает задачу моделирования в явном виде, что эффективно при исследовании кратковременных быстропротекающих процессов контактного взаимодействия тел. К данным процессам относится и поверхностное пластическое деформирование.

Адекватность моделирования процессов ППД в ANSYS/LS-DYNA установлена в работах [19, 55, 71] на примерах обкатки роликами, алмазного выглаживания, дробеструйной обработки. Основные выходные данные – эквивалентные напряжения. Расхождение опытных и теоретических результатов данных методов ППД не превысило 5%.

В работе [71] исследована модель процесса ППД сложнопрофильным мультирадиусным инструментом. Установлена высокая сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных по распределению микротвердости. Установлены закономерности формирования напряжений и деформаций в очаге деформации в зависимости от радиуса упрочняющего инструмента.

Данные примеры подтверждают перспективность использования универсальных систем инженерного анализа, в частности ANSYS/LS-DYNA, для моделирования процессов ППД.

В программе ANSYS/LS-DYNA одними из основных выходных данных являются эквивалентные напряжения (Equivalent Stress (vonMises)), эффективные пластические деформации, остаточные напряжения первого, второго и третьего рода в узлах и элементах модели.

Согласно гипотезе об удельной потенциальной энергии изменения формы (пятая теория прочности, гипотеза Мизеса-Генки), для определения эквивалентного напряжения бесконечно малой частицы тела необходимо учитывать не всю удельную энергию, а только ту ее часть, которая направлена на изменения формы элемента (рисунок 10). Согласно этой теории, $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ определяется как [15]:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Данная теория хорошо согласуется с опытными данными для пластичных материалов.

Так как $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ направлено на изменение формы элемента, то $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ связано с предельным напряженным состоянием и возникновением текучести материала. Отсюда:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sigma_T, \quad (4)$$

где σ_T – предел текучести материала.

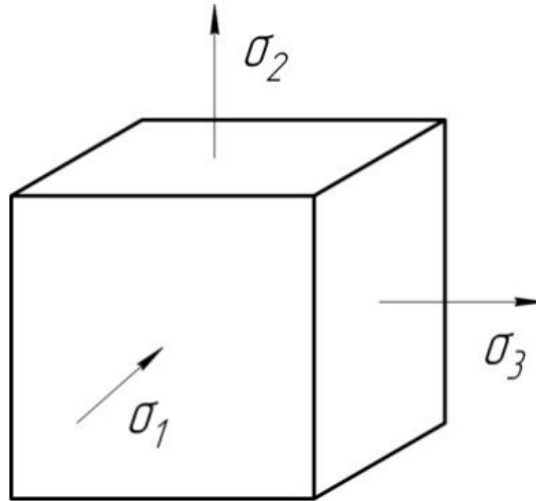


Рисунок 10 – Главные напряжения

Мерой степени деформации является эквивалентная пластическая деформация, которая определяется как:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_2)^2 + (\Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_3)^2 + (\Delta\varepsilon_3 - \Delta\varepsilon_1)^2 + \frac{3}{2} (\Delta\varepsilon_{12}^2 + \Delta\varepsilon_{23}^2 + \Delta\varepsilon_{13}^2) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где $\Delta\varepsilon$ - эквивалентная пластическая деформация;

$\varepsilon_1 \dots \varepsilon_3$ - главные деформации.

Данные параметры $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ и $\Delta\varepsilon$ применяются для определения глубины и степени упрочнения поверхностного слоя, которые рассчитываются на основе устоявшихся методик [35, 64].

1.6 Цель и задачи исследований

На основании проведенного анализа по обработке каркасных плоских сложнопрофильных поверхностей деталей машин различными методами сформулированы цель работы и задачи необходимые для ее решения.

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. Разработать теоретическую 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.

Выводы

1. 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.

2. Выполнен анализ технологических методов упрочнения поверхностного слоя, определяющих значения параметров качества поверхностного слоя детали.

3. 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.

4. Установлено, что волновое деформационное упрочнение является наиболее эффективным из методов ППД, позволяет формировать глубину упрочненного слоя на большую глубину (до 6...10 мм) и обеспечивать повышение параметров качества исследуемой группы деталей.

5. Установлена необходимость адаптации ВДУ для условий обработки деталей из АМг сплавов, которая должна быть направлена на снижение давления инструмента на материал в очаге деформации применением многоконтактной инструментальной оснастки, что позволит управлять энергетическими параметрами ВДУ в широком диапазоне, снизить давление в очаге деформации, обеспечить заданную производительность обработки.

6. Проведен анализ программного обеспечения для конечно-элементного моделирования процессов ППД и установлено, что ANSYS/LS-DYNA является наиболее перспективным программным комплексом, который позволяет исследовать нелинейные быстротечные динамические процессы, происходящие в неупругих средах.

2 Разработка теоретической модели многоконтактного волнового деформационного нагружения

2.1 Общая методика исследования повышения параметров качества каркасных плоских сложнопрофильных деталей из АМг сплавов многоконтактным ВДУ

Исследование повышения параметров качества каркасных плоских сложнопрофильных деталей из АМг сплавов многоконтактным ВДУ проводилось в соответствии со схемой на рисунке 11.

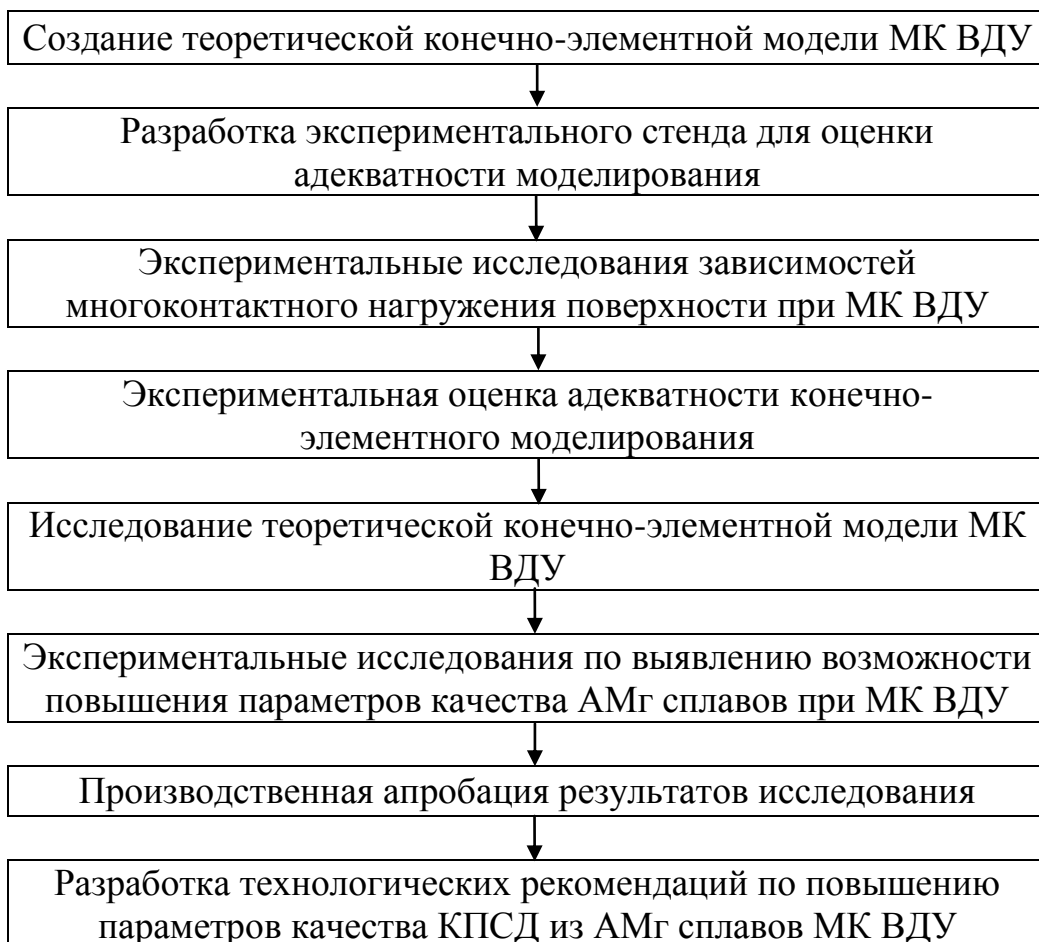


Рисунок 11 – Схема исследований

Создание теоретической конечно-элементной модели МК ВДУ осуществляется в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA. При этом определяются исходные свойства материала, которые впоследствии учитываются при создании модели и в расчетах. Графическими средствами программы

создается трехмерная модель процесса МК ВДУ, задаются требуемые перемещения, нагрузки и граничные условия.

Для оценки адекватности моделирования разрабатывается экспериментальный стенд, позволяющий исследовать зависимость распределения ударного импульса (форму, амплитуду и длительность) в очаге деформации, а также глубину и степень упрочнения при многоконтактной схеме нагружения.

Экспериментальные исследования многоконтактного нагружения поверхности при МК ВДУ проводятся для выявления рационального количества инструментов в ударной системе, а также их формы и геометрии. Кроме того, устанавливается зависимость многоконтактного нагружения на форму, амплитуду и длительность ударных импульсов.

Также разработанный стенд позволяет провести экспериментальную оценку адекватности конечно-элементного моделирования. Оценка адекватности осуществляется на основании сопоставления теоретических и экспериментальных исследований по коэффициенту передачи энергии, глубине и степени упрочнения.

На следующем этапе осуществляется исследование теоретической конечно-элементной модели МК ВДУ. Впервые во внимание приняты конструкторско-технологические параметры применительно для МК ВДУ, оказывающие влияние на характер эпюры упрочнения и производительность обработки. По результатам исследования предложена регрессионная математическая модель, устанавливающая влияние параметров МК ВДУ на степень упрочнения поверхностного слоя АМг сплавов.

Экспериментальные исследования по выявлению возможности повышения параметров качества, в дополнение к теоретическим, позволяют установить рациональную область технологических режимов упрочнения.

Производственная апробация результатов исследования подразумевает внедрение в технологический процесс изготовления КПСД из АМг сплавов МК ВДУ наиболее тяжело нагруженных локальных плоских участков поверхности. Данные участки определены при помощи конечно-элементной модели детали с приложенными к ней эксплуатационными нагрузками.

Заключительным этапом исследований является разработка технологических рекомендаций по повышению параметров качества КПСД из АМг сплавов и создание многоконтактной инструментальной оснастки для МК ВДУ.

2.2 Создание конечно-элементной модели многоконтактного ВДУ

Для начала моделирования в программе ANSYS/LS-DYNA необходимо выбрать явный метод решения задачи (Explicit). Выбор осуществляется в разделе Preferences.

Создание проекта в программе ANSYS/LS-DYNA начинается с подготовки в разделе Preprocessor: в нем происходит создание геометрической модели, конечно-элементной сетки, определение типов элементов, задания модели материалов.

Раздел Solution предназначен для подготовки проекта к расчету: задания контакта объектов, приложения нагрузок, задания граничных условий, параметров расчета, а также формирования k-файла и запуска решения.

В разделе General Postproc осуществляется вывод графической и текстовой информации полученных результатов (энергия, напряжения, деформации и т.д.) для конкретного момента времени.

Раздел Time Hist Postproc предназначен для вывода вывод графической и текстовой информации полученных результатов решения поставленной задачи на протяжении всего времени расчета. Чаще всего информация выводится в виде графиков зависимости какого-либо параметра от времени.

Создание модели начинается в раздел Preprocessor. Сначала осуществляется выбор типов элементов (ElementType), вещественных констант (RealConstants), подготовка модели (Modeling), выбор модели материала (MaterialProps), разбиение модели на конечные элементы (Meshing).

В ANSYS/LS-DYNA при решении задач в явной постановке используются только 2 типа элементов: ThinShell 163 (для оболоченных структур) и 3DSolid 164 (для твердотельных объектов). Для объектов типа ThinShell 163 необходимо создание вещественных констант, где указывается фактор сдвига, количество точек интеграции и толщина оболочки в узлах.

Следующим шагом является создание геометрической модели. ANSYS/LS-DYNA обладает возможностью создания различных примитивов: как плоских, так и объемных. Также существует возможность сложения, вычитания, удаления, перемещения геометрических объектов в зависимости от требуемой цели.

Однако, возможен экспорт модели из других CAD-системам в различных форматах: CATIA, Parasolid, Pro/ENGINEER, Solid Works, Autodesk Inventor. Наиболее удобным считается формат .x_t, соответствующий программе Parasolid. Данный формат обеспечивает перенос как оболочковых, так и твердотельных геометрических объектов.

Твердотельная модель волнового деформационного упрочнения представлена на рисунке 12а. Данная модель создается графическими средствами ANSYS/LS-DYNA.

Следующим шагом является разбиение объектов на конечные элементы (рисунок 12б).

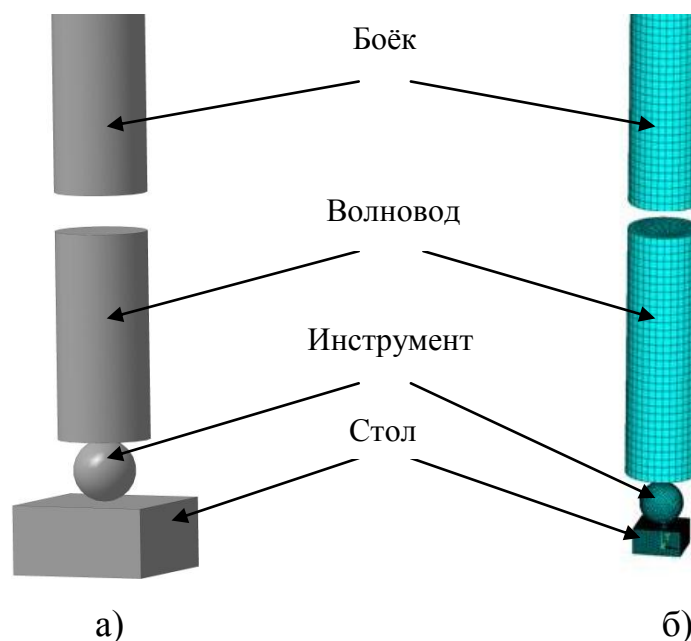


Рисунок 12 – Твердотельная (а) и конечно-элементная (б) модели ВДУ

При добавлении в схему нагружения дополнительных инструментов система становится многоконтактной (рисунок 13).

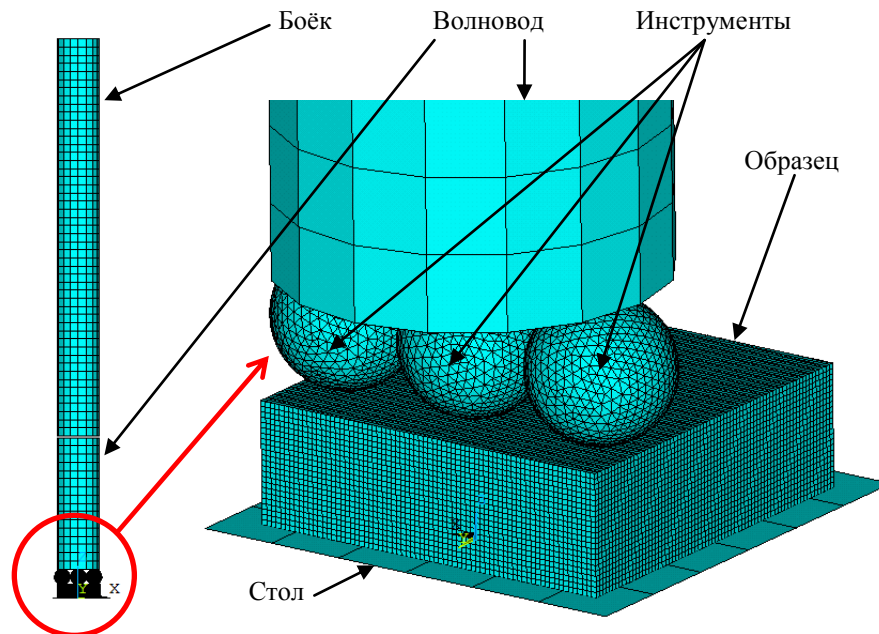


Рисунок 13 – Конечно-элементная модель МК ВДУ

Упрочняемый образец, инструмент, волновод и боёк разбивается объемными конечными элементами. Размер сетки зависит от требуемой точности исследований. В данном случае размер конечно элементной сетки для образца составляет 0,35 мм. Так как инструмент непосредственно контактирует с упрочняемой поверхностью, то для повышения точности расчетов размер конечных элементов должен быть сопоставим с размерами конечных элементов образца. Для инструмента размер элементов принят равным 0,6 мм. Боек и волновод не контактируют с упрочняемой поверхностью, поэтому размер конечных элементов для них принят равным 5 мм.

Для ускорения расчетов боек, волновод и инструмент принимаются абсолютно жесткими телами - их напряженно деформированное состояние в процессе упрочнения не исследуется.

После создания объектов задаются модели материалов. Для получения высокой сходимости экспериментальных результатов с результатами моделирования необходимо задавать модель материала в ANSYS/LS-DYNA в соответствии с моделируемым процессом. Так, в более простом случае, когда

материал испытывает только упругие деформации, то необходимо применить упругую модель материала, которая подчиняется закону Гука.

В процессе поверхностной пластической деформации (ППД) происходит упругопластическое деформирование поверхности материала. В программном модуле ANSYS/LS-DYNA существует несколько вариантов моделей материала, используемых для описания данных деформаций. Точность моделирования обеспечивается введением в программу параметров материала, полученных экспериментальным путем, а также по справочным данным.

Далее необходимо выбрать модель материала. В ANSYS/LS-DYNA существует несколько простых моделей, которые задаются графиками функции вида $\sigma(\varepsilon)$. Виды моделей представлены на рисунке 14 [40, 41].

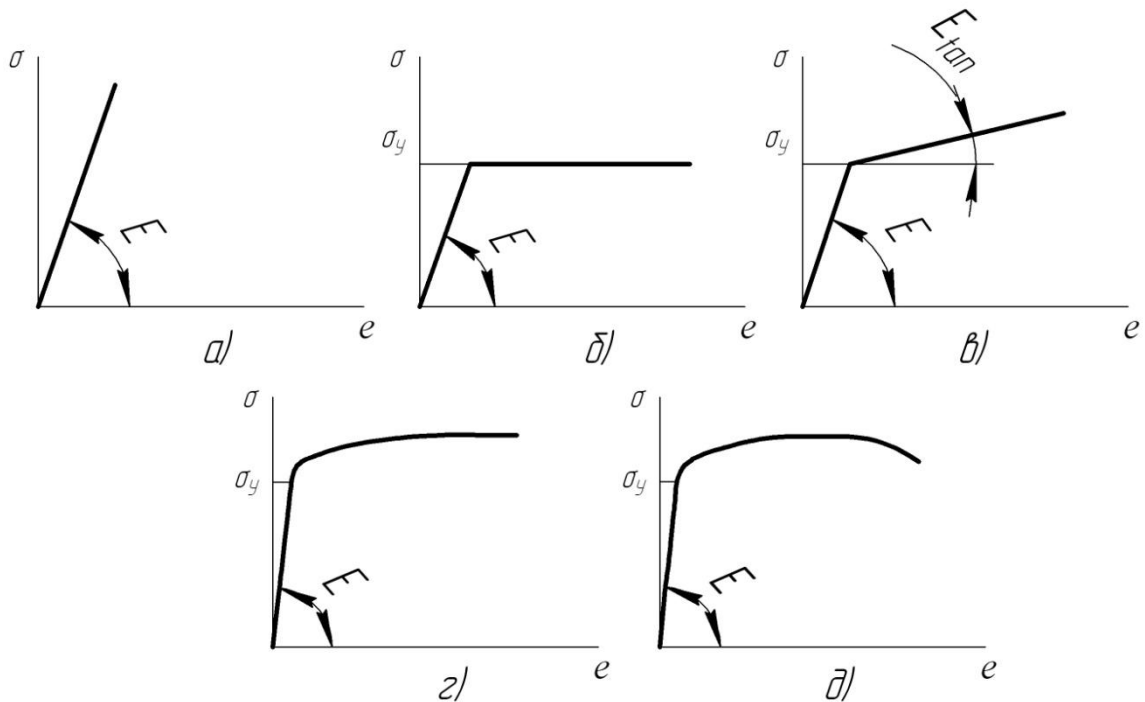


Рисунок 14 – Виды моделей материала: а – упругая модель $\sigma = E\varepsilon$;
 б – упругая – идеально пластическая модель; в – упругопластическая (билинейная) модель, г - упругопластическая модель в степенном виде, д - упругопластическая кусочно-линейная модель

Выбор модели материала осуществляется из следующих моделей:

- Plastic Kinematic Model (пластическая кинематическая модель);

- Strain Rate Dependent Plasticity Model (пластическая модель, зависящая от скорости деформации);
- Piecewise Linear Plasticity Model (кусочно-линейная пластическая модель);
- Power Law Plasticity Model (степенная пластическая модель).

Plastic Kinematic Model (пластическая кинематическая модель) - изотропная, кинематическая модель упрочнения или их комбинация с зависимостью от деформации и скорости разрушения. Изотропную и кинематическую составляющие можно варьировать, регулируя параметр упрочнения β между 0 (кинематическое упрочнение) и 1 (изотропное упрочнение) [66]. Скорость деформации учитывается с использованием модели Купера-Саймондса (Cowper-Symonds model), которая масштабирует предел текучести с помощью коэффициента зависимости скорости деформации [119, 122]:

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{eff}), \quad (6)$$

где σ_0 - начальный предел текучести;

$\dot{\epsilon}$ - скорость деформации;

C и P - параметры скорости деформации Купера-Саймондса;

ε_p^{eff} - эффективная пластическая деформация;

E_p - модуль пластического упрочнения.

$$E_p = \frac{E_{tan} E}{E - E_{tan}}, \quad (7)$$

где E_{tan} - наклон касательной.

Характеристики деформации определяются только при одной температуре. В модель вводится модуль упругости (EX), плотность (DENS) и коэффициент Пуассона (NUXY), предел текучести (σ_Y), наклон касательной (E_{tan}), параметр упрочнения (β), параметры скорости деформации C и P и деформацию разрушения (ε_f).

Strain Rate Dependent Plasticity Model (пластическая модель, зависящая от скорости деформации) используется при моделировании обработки металлических изделий методами пластической деформации.

В этой модели кривая нагрузки используется для описания начального предела текучести, σ_0 , как функции эффективной скорости деформации. Предел текучести для этой модели материала определяется как:

$$\sigma_Y = \sigma_0 \dot{\varepsilon}' + E_p \varepsilon_p^{eff}, \quad (8)$$

где $\dot{\varepsilon}'$ - эффективная скорость деформации.

Остальные исходные данные для Strain Rate Dependent Plasticity Model аналогичны Plastic Kinematic Model.

Piecewise Linear Plasticity Model (кусочно-линейная пластическая модель) представляет аппроксимированную на несколько прямолинейных участков кривую нагружения упругопластического материала. Данная модель позволяет вводить кривую зависимости напряжения от деформации и зависимость скорости деформации. Кусочно-линейная модель широко применяется при моделировании упрочнения изделий из стали.

Кусочно-линейная пластическая модель использует модель Купера-Саймондса, которая оценивает предел текучести:

$$\sigma_Y (\varepsilon_{eff}^P, \dot{\varepsilon}_{eff}^P) = \sigma_Y (\varepsilon_{eff}^P) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^P}{c} \right)^{\frac{1}{P}} \right], \quad (9)$$

где $\dot{\varepsilon}$ - эффективная скорость пластической деформации;

ε_{eff}^P - предел текучести без учета скорости деформации.

Величина предела текучести вводится либо в виде σ_Y и E_{tan} , либо в виде кривой полного истинного напряжения относительно эффективной пластической деформации.

Power Law Plasticity Model (степенная пластическая модель) широко применяется для расчета в задачах пластического деформирования металлов [41]. Модель учитывает упругопластическое поведение материала с изотропным упрочнением. Модель представляет собой степенную функцию с учетом модели Купера-Саймондса:

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{c} \right)^{\frac{1}{P}} \right] k [\varepsilon_e + \varepsilon_{eff}^P]^n, \quad (10)$$

где k - коэффициент прочности;
 n - коэффициент упрочнения.

Для получения адекватных результатов моделирования требуется выбрать одну из моделей материалов, которая с требуемой точностью отражает результаты экспериментальных исследований.

Проведены предварительные исследования по выбору одной из моделей материала в ANSYS/LS-DYNA.

В качестве объекта исследований использовались плоские образцы из алюминиевых сплавов АМг2.

Справочные данные по свойствам сплава АМг2 в соответствии с ГОСТ 4784-97 [32] представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Химический состав в % алюминивно-магниевого сплава АМг2 ГОСТ 4784-97

Fe	Si	Mn	Al	Cu	Mg	Примеси
до 0,5	до 0,4	0,1-0,5	95,7-98,2	до 0,15	1,7-2,4	прочие, каждая до 0,15

Таблица 3 – Механические свойства алюминивно-магниевого сплава АМг2 при $T=20^{\circ}\text{C}$

Сортамент	Предел кратковременной прочности, σ_B , МПа	Предел пропорциональности, $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
Плита, ГОСТ 17232-99	175	59	7

Примечание: Твердость АМг2: $\text{HV } 10^{-1} = 45 \text{ МПа}$.

Модуль упругости: $E \cdot 10^{-5} = 0,69 \text{ МПа}$.

Плотность материала 2690 кг/м^3 .

Так, для установления вида диаграммы зависимости напряжений от деформаций рекомендуется провести испытания на одноосное растяжение исследуемого материала в соответствии с ГОСТ 4784-97, перевести инженерные (полученные экспериментальным путем) значения в истинные

(логарифмические), заложить рассчитанные параметры в ANSYS/LS-DYNA и смоделировать процесс растяжения в программном модуле. При совпадении результатов (расхождение в пределах погрешности) полученные параметры используются для рабочей модели процесса ППД, при расхождении результатов требуется их проверка и корректировка [40, 41].

Для определения характеристик, необходимых для введения в модель материала в ANSYS/LS-DYNA было проведено испытание образца на сопротивление статическому растяжению. В результате были получены данные, по которым был построен график инженерных напряжений (рисунок 15).

Инженерные напряжения (σ (МПа) от ε (%))

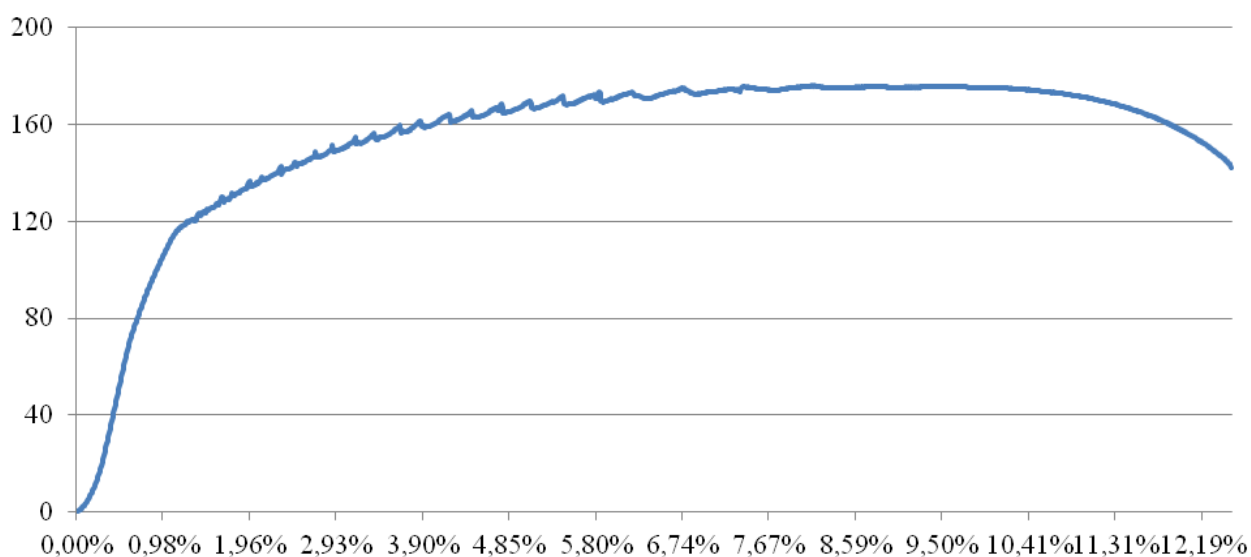


Рисунок 15 – График зависимости инженерных напряжений от деформаций

Значения напряжений и деформаций определялись в соответствии с формулами [41]:

$$\sigma_{\text{eng}} = P/F, \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\text{eng}} = \Delta L/L, \quad (12)$$

где σ_{eng} - инженерные напряжения,
 P - приложенная нагрузка,
 F - площадь поперечного сечения,
 ε_{eng} - инженерные деформации,
 ΔL - изменение длины,

L - начальная длина.

В ANSYS/LS-DYNA при моделировании учитываются только истинные (логарифмические) значения σ и ε . При малых значениях ε значения инженерных и истинных параметров практически совпадают. Однако по мере возрастания деформаций эти значения расходятся. Истинные параметры рассчитываются в соответствии с формулами [41]:

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{eng}}(1 + \varepsilon_{\text{eng}}), \quad (13)$$

$$\varepsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{eng}}), \quad (14)$$

где σ_{true} - истинные напряжения;

$\varepsilon_{\text{true}}$ - истинные деформации.

График истинных (логарифмических) напряжений представлен на рисунке 16.

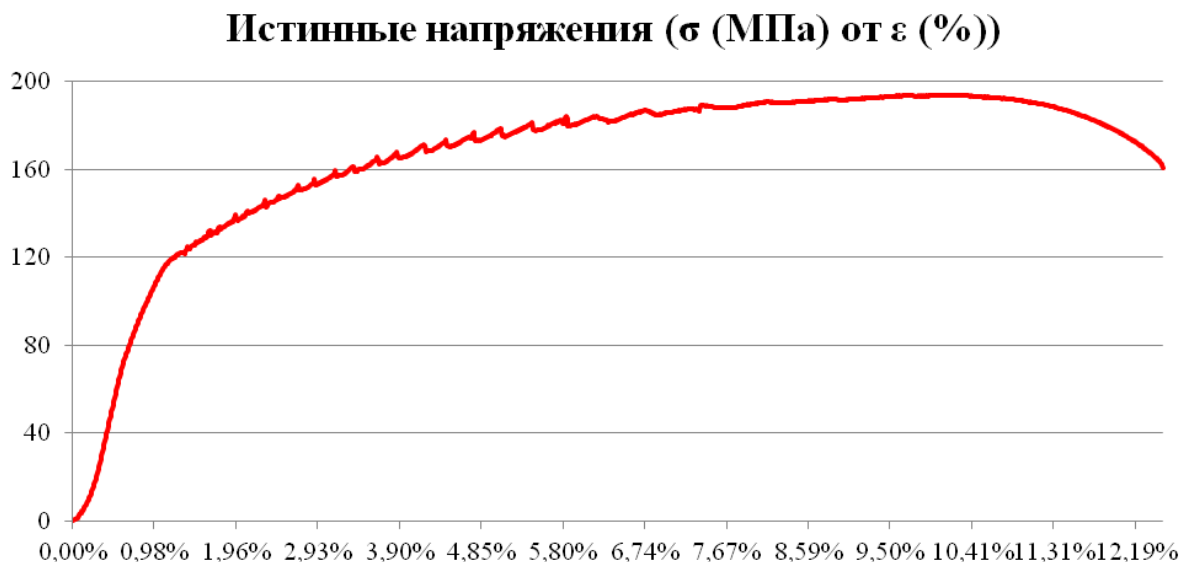


Рисунок 16 - График зависимости истинных напряжений от деформаций

Проведенные предварительные сравнения моделей материалов показали, что для моделирования упрочнения волной деформации наилучшим образом подходит упругопластическая модель, заданная в степенном виде, так как она обеспечивает наибольшую адекватность результатов. Оценка адекватности проводилась на основании следующих параметров, полученных экспериментально и теоретически: размер пластического отпечатка, глубина и степень упрочненного поверхностного слоя.

График функции, заданный в степенном виде соответствует в ANSYS/LS-DYNA модели материала Power Law Plasticity Model. Функция задается в общем виде $\sigma = k\varepsilon^n$. Для определения коэффициентов k и n проводится аппроксимация данных. Расчет ведется до значения, соответствующего пределу прочности σ_B . В результате вычислений получены следующие значения: $k = 355$, $n = 0,24$ (рисунок 17).

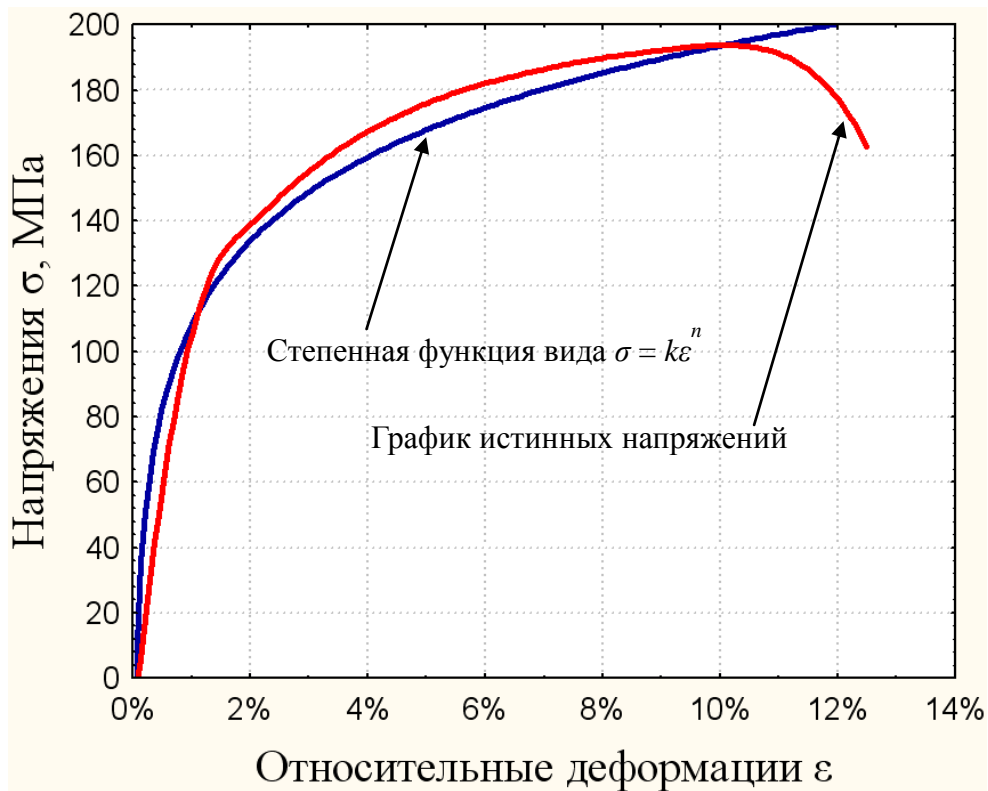


Рисунок 17 – Аппроксимированная степенная функция

Далее в модель Power Law вводятся необходимые параметры, а материал присваивается упрочняемому образцу. Для инструмента, бойка и волновода выбирается модель Rigid (абсолютно жесткие тела), так как в данном случае протекающие в них процессы не требуют изучения.

Далее задаются граничные условия, нагрузки и перемещения.

При моделировании процесса волнового деформационного упрочнения инструмент (шар или стержень) перемещается только в вертикальной плоскости и предварительно статически поджимается к упрочняемой поверхности образца. Образец поступательно перемещается только в горизонтальной плоскости со

скоростью подачи s . Волновод и боёк также как и инструмент перемещаются только в вертикальной плоскости. Боёк, совершая возвратно-поступательные движения, наносит удара по волноводу с частотой f . Ударный импульс через волновод передается статически поджатому инструменту и далее в очаг деформации.

Движение бойка задается в виде функции зависимости нагрузки от времени (рисунок 18), методика определения которых описана авторами работы для гидравлического ударного устройства, применяемого для ВДУ [43, 47, 51, 68, 6, 8].

Скорость поступательного движения заготовки s является постоянной и определяется как:

$$s = X f 60, \quad (15)$$

где X – расстояние между центрами отпечатков, мм;

f – частота ударов, Гц.

Так, например, при обработке волновым деформационным упрочнением шаром диаметром 27 мм с силой ударов бойка $P_{\text{дин}} = 20000$ Н, частотой ударов $f = 9$ Гц, и силой статического поджатия инструмента к заготовке $P_{\text{ст}} = 2000$ Н, моделирование одного удара инструмента по заготовке будет включать в себя взвод, удар и задержку бойка (таблица 4). Для создания серии ударов с формированием нескольких пластических отпечатков, в ANSYS/LS-DYNA движение инструмента задается таким же образом требуемое количество раз.

Таблица 4 – Задание зависимости нагрузки от времени в матричном виде в ANSYS/LS-DYNA

	Время процесса, с	Сила, Н	
1 удар	$t_{\text{вз}} + t_{\text{T}} + t_{\text{н.вз}} = 0,1$	2000	Взвод бойка
	$t_{\text{разг}} = 0,01$	2000	Разгон бойка
	$t_{\text{вд}} = 0,0005$	20000	Удар
	$t_{\text{н.вд}} = 0,001$	20000	Задержка бойка

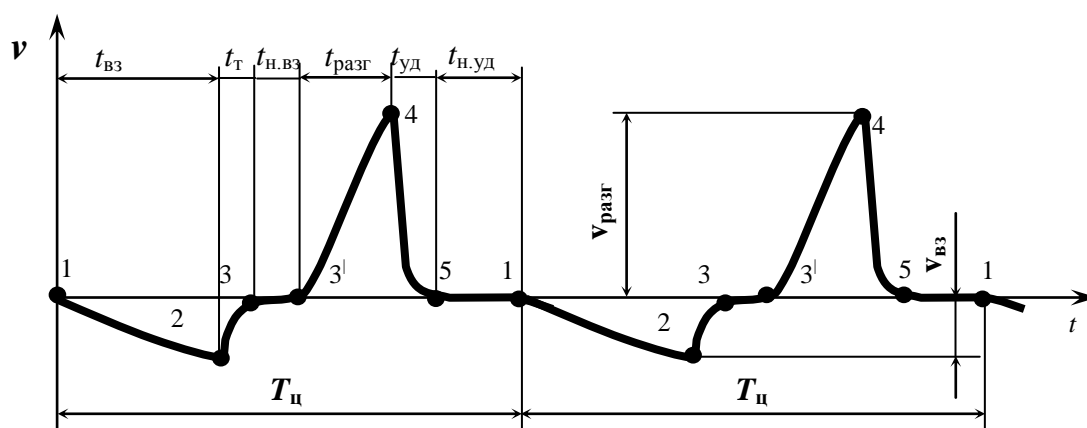


Рисунок 18 – Зависимость скорости движения v бойка по времени t при нагружении гидравлической ударной системой: $T_{ц}$ - период движения бойка, $t_{вз}$ - время взвода бойка, $t_{т}$ - время остановки бойка в тормозной камере, $t_{н.вз}$ - время стояния бойка в положении взвода, $t_{разг}$ - время разгона бойка, $t_{уд}$ - время удара, $t_{н.уд}$ - время стояния бойка после удара, $v_{разг}$ и $v_{вз}$ – скорость разгона и взвода бойка

После заполнения массива данных, задаются необходимые граничные условия, нагрузки и перемещения, и в зависимости от времени присваиваются каждому из объектов. Устанавливается значение контроля искажений Hourglass, для снижения влияния деформаций сетки конечных элементов на итоговые результаты. Несмотря на устойчивость к значительным деформациям и экономии большого количества компьютерного времени, одноточечные (уменьшенные) интегральные твердотельные и оболочечные элементы, используемые в ANSYS LS-DYNA, подвержены разрушению (рисунок 19).

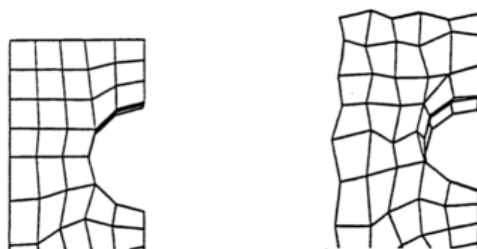


Рисунок 19 – Недеформированная и деформированная конечно-элементная сетка с эффектом “Hourglass”

Эти режимы, обычно называемые режимами “песочных часов” (Hourglass), имеют колебательный характер и, как правило, имеют периоды, которые

значительно короче, чем периоды общего структурного отклика. Они приводят к математическим состояниям, которые физически невозможны. Возникновение данных деформаций в анализе может сделать недействительными результаты и всегда должно сводиться к минимуму.

В связи с этим вводится коэффициент, который повышает жесткость элементов и противостоит их искажению, однако не влияет на результаты расчета.

Далее определяются дополнительные выходные файлы базы ASCII.

Далее выбирается количество шагов расчета. Шаг расчета устанавливается в зависимости расчетного времени и размера конечных элементов. Выбор количества шагов в решении определяется на основании условия: расстояние, на которое смещается заготовка относительно инструмента за один шаг не должно превышать размер минимальной величины конечного элемента заготовки.

В результате подготовки модели к расчету формируется k-файл, который затем запускается на расчет.

Обработка рассчитанных данных осуществляется в постпроцессорах POST1(визуализация и извлечение численных данных) и POST26 (построение графиков). С их помощью возможно просмотреть полученный пошаговый ход расчета и определить различные выходные данные, например эквивалентные напряжения Мизеса (рисунок 20).

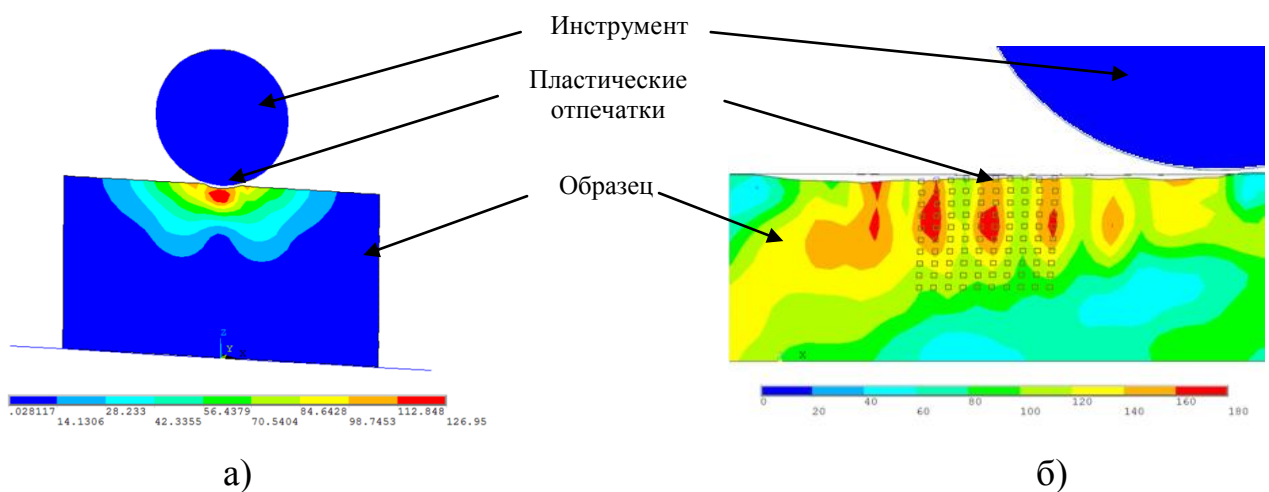


Рисунок 20 – Эквивалентные напряжения в материале после единичного удара (а) и распределение полей эквивалентных напряжений после моделирования серии ударов (б)

Таким образом создается модель МК ВДУ в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA.

Для оценки адекватности моделирования разработан экспериментальный стенд.

2.3 Разработка экспериментального стенда для исследования закономерностей многоконтактного нагружения и оценки адекватности моделирования многоконтактного ВДУ

Одной из основных характеристик эффективности схемы нагружения является количество энергии удара, затрачиваемое на деформацию материала в очаге деформации. Предполагается, что ее перераспределение возможно за счет использования энергии волн деформации в ударной системе. Известно, что при нагружении материала ударными импульсами с равной энергией могут быть получены различные результаты, это связано с волновыми процессами, происходящими в ударной системе, которыми можно управлять изменением геометрии, формы и количества инструментов и материалов элементов ударной системы [25, 48, 56, 59, 111].

В методах ППД широко известен и эффективно применяется подвод энергии ударного импульса в зону деформации, через промежуточное звено (волновод). Это позволяет повысить эффективность нагружения, за счет рационального использования энергии волновых процессов и увеличить коэффициент передачи энергии ударного импульса в очаг деформации. При таком способе подвода энергии параметры ударной системы боек-волновод-инструмент оказывают непосредственное влияние на форму ударного импульса. Форма импульса, в свою очередь, влияет на процесс ударного воздействия на нагружаемую поверхность и определяет количество энергии удара, затрачиваемое на упругопластическую деформацию [21, 45, 51].

Метод ВДУ отличается возможностью воздействия на упрочняемую поверхность пролонгированными ударными импульсами. Увеличение

передаваемой энергии осуществляется за счет отражения с последующим наложением друг на друга ударных волн, формирующихся в системе нагружения с промежуточным звеном – волноводом.

Сущность метода заключается в периодическом импульсном воздействии на нагружаемую среду бойком через статически нагруженный волновод и инструмент. Предварительное статическое нагружение не позволяет волноводу (инструменту) выходить из контакта с обрабатываемой поверхностью после удара, обеспечивая тем самым интерференцию отраженных волн деформации. При ВДУ использование нагружения управляемыми ударными импульсами дает более широкие возможности по формированию упрочненного поверхностно слоя с большой глубиной и степенью упрочнения.

Ранее для одноконттактных схем нагружения при ВДУ проведены исследования, позволяющие установить закономерности воздействия ударной волны на параметры качества поверхностного слоя, а также на форму, амплитуду и длительность ударного импульса при изменении конструкторско-технологических и технологических параметров обработки [48, 51, 104].

Однако, обладающая рядом достоинств, схема одновременного воздействия на упрочняемую поверхность несколькими волноводами при ВДУ на данный момент не исследована. Имеющиеся данные не позволяют в полной мере установить закономерности формирования ударного импульса в многоконттактной ударной системе.

Целью исследований является установление энергетической закономерности распределения импульсного нагружения в многоконттактных системах. Для достижения поставленной цели разработан экспериментальный стенд. Данный стенд позволяет установить закономерности распределения энергии ударных импульсов в зависимости от параметров системы нагружения (числа волноводов в ударной системе, их типа (шары, стержни) и т.д.).

Экспериментальный стенд (комплекс), который позволяет исследовать зависимость распределения ударного импульса в очаге деформации, представлен на рисунке 21.

Измерительный комплекс состоит из основания *1*, на котором расположен виброгасящий элемент *2* и нагружаемые образцы *3*. В пазах на нагружаемых образцах *3*, находятся вклеенные пьезоэлектрические датчики *4*, которые позволяют проводить измерения характеристик ударного импульса, преобразуя механическое воздействие в электрический заряд. Схема расположения пьезоэлектрического датчика *4* в нагружаемом образце *3* представлена на рисунке 21. Образцы с датчиками полностью изолированы виброгасящими элементами от внешнего воздействия на регистрируемые волновые процессы и подсоединены к осциллографу АСК-3107L позволяющему фиксировать основные параметры ударного импульса (форму, амплитуду, длительность).

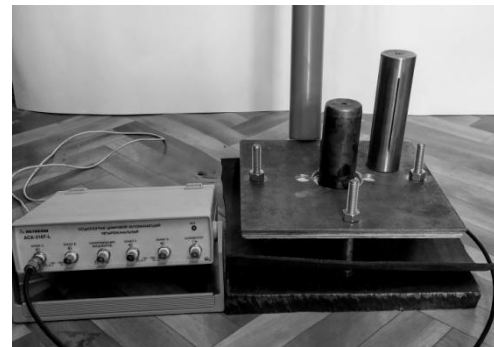
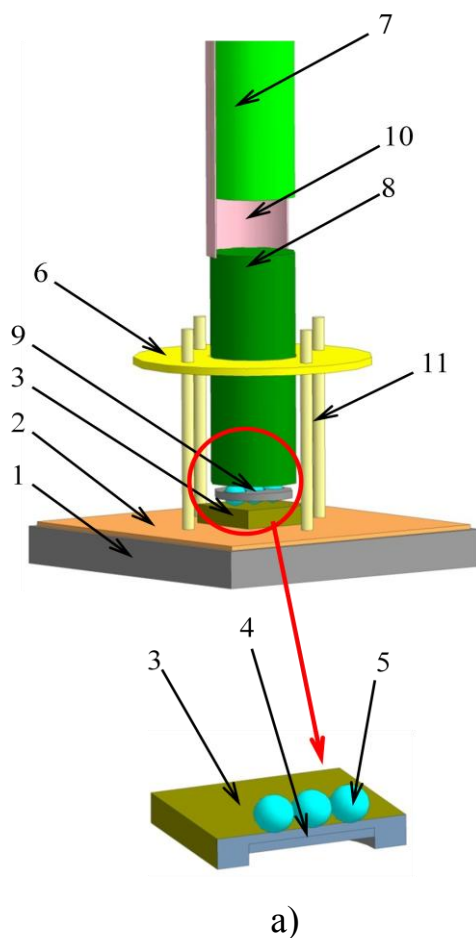


Рисунок 21 – Схема экспериментального стенда (а), стенд в сборе (б) и в разобранном состоянии (в): 1 – основание; 2 – виброгасящий элемент; 3 – образцы; 4 – пьезоэлектрические датчики; 5 – инструменты; 6 – пластина; 7 – боёк; 8 – волновод; 9 – сепаратор; 10 – направляющая труба; 11 – винты для статического поджатия

На нагружаемых образцах 3 размещены инструменты 5. Инструменты статически поджимаются к нагружаемой поверхности с помощью волновода 8. Инструменты устанавливаются в определенной последовательности и удерживаются с помощью сепаратора 9. Величина предварительного статического поджатия регулируется при помощи пластины 6 и винтов 11. Статическое поджатие необходимо для более полной передачи в очаг деформации энергии ударного импульса [51]. Нагружение образца 3 ударным воздействием осуществляется через волновод бойком 7, который свободно под действием гравитации перемещается по направляющей трубе 10.

В общем виде система нагружения состоит из бойка, волновода – промежуточного звена между бойком и инструментом, инструмента – шаров и цилиндрических стержней со сферическим торцом. На данном стенде возможна реализация как осевого, так и внецентренного торцевого соударения. Ранее установлено, что при осевом соударении в очаг деформации передается больший ударный импульс, чем при внецентренном.

В экспериментальных исследованиях геометрические параметры бойка и волновода постоянны, изменяются только геометрия, форма и размеры инструментов. Применены шары диаметром 12, 19 и 27 мм и цилиндрические стержни с полусферическим торцом радиусом 27 мм и высотой 15 мм. Количество используемых в ударной системе инструментов ограничивается размерами датчика и волновода и варьируется от 1 до 8 штук (для шара диаметром 12 мм – 4 штуки, шара 19 мм – 4 штуки, шара 27 мм – 3 штуки, цилиндрических стержней со сферическим торцом 27 мм – 8 штук).

Датчик изолирован от внешнего влияния на регистрируемые ударные импульсы и подключен к регистрирующему цифровому осциллографу и компьютеру. При ударном воздействии на датчик осуществляется регистрация импульса, форма, амплитуда и длительность импульса отображается на экране, данные записываются и в дальнейшем обрабатываются в программах Microsoft Excel и Statistica.

Исходя из поставленной задачи, сначала исследования производились для одного индентора. Каждый опыт повторялся 7 раз, определялось среднее значение, строились диаграммы. Затем в систему добавлялся второй индентор и опыт повторялся. Далее поочередно добавлялись инденторы от 3 до 8. Осциллограммы построены в одном и том же масштабе.

Учитывая особенности использования пьезоэлектрических датчиков, энергия удара при всех схемах нагружения составляет 0,15 Дж [51].

По полученным осциллограммам можно оценить форму ударных импульсов в очаге деформации, а также возможность передачи энергии при различных схемах нагружения.

Ударные импульсы имеют параболическую форму с характерными фронтами нарастания и спада энергии. Наличие нескольких локальных максимумов на графике обуславливается наличием отраженных волн.

По оси абсцисс откладывается время t , мс (10^{-3} с). По оси ординат откладывается напряжение U , В. Для перевода напряжения в значения силы необходимо провести градуировку пьезоэлектрического датчика по методике, описанной в [51]. В результате датчик нагружался известными значениями энергии (боек сбрасывался с различной известной высоты), а на выходе получался ударный импульс с различными значениями напряжений. По формуле определялось значение силы:

$$P_k = -C_1 \times v \times e^{-ba2T}, \quad (16)$$

где $v = \sqrt{2gh_{\text{выс}}}$;

T – длительность ударного импульса, с.

По полученным значениям U и P_k проведен корреляционный анализ и установлен вид связи между ними. Результаты анализа представлены на рисунке 22.

Полученные осциллограммы ударных импульсов в пятне контакте, в соответствии с полученным на рисунке 22 графиком, масштабировались. Весь импульс равномерно разбивался на единичные прямоугольные импульсы длительностью 10^{-4} с (рисунок 23).

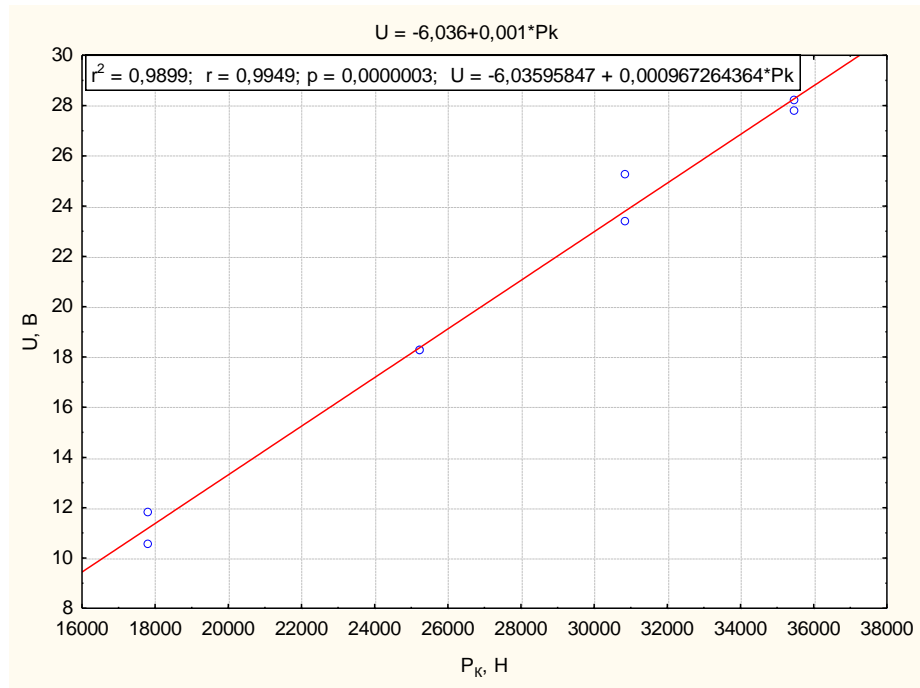


Рисунок 22 – Зависимость напряжения, регистрируемого пьезоэлектрическим датчиком от силы удара

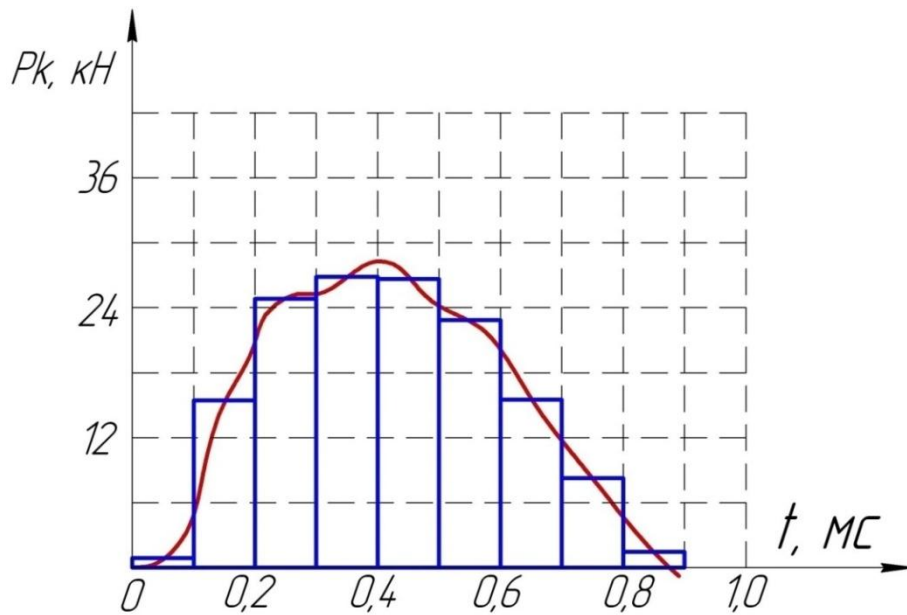


Рисунок 23 – Определение энергии ударного импульса, формируемого в системе нагружения

Энергия рассматриваемого импульса A_{II} определялась по формуле [51]:

$$A_{II} = \frac{\sum(P_i^2 t_i)}{\rho_2 F_2 a_2}, \quad (17)$$

где P_i – амплитуда импульса, Н;

t_i – длительность i -го единичного прямоугольного 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.

По полученным ударным импульсам можно оценить способность к передаче ударного импульса ударных систем и инструментов различных типов.

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 (бойка и волновода) приняты постоянными, формирующийся в такой ударной системе импульс, а также энергия, сообщаемая в очаг деформации ($A_{ЭТ}$), приняты эталонными. На основании этого, оценку способности ударной системы к передаче энергии можно производить относительно данного эталонного импульса. В результате генерировался эталонный импульс и производился расчет энергии ударного импульса.

В остальных исследуемых системах «бок-волновод-инструмент» максимальная площадь поперечного сечения инструмента (либо сумма площадей поперечных сечений инструментов для многоконтактной схемы нагружения) всегда меньше площади поперечного сечения бойка. Способность к передаче энергии каждой из систем оценивалась по отношению к эталонному импульсу. Характеристикой эффективности процесса многоконтактного нагружения является $K_Э$ – коэффициент передачи энергии ударного импульса, который определяется как отношение энергий исследуемого и эталонного ударного импульса:

$$K_Э = A_{И} / A_{ЭТ}. \quad (18)$$

Примеры полученных ударных импульсов приведены на рисунке 24.

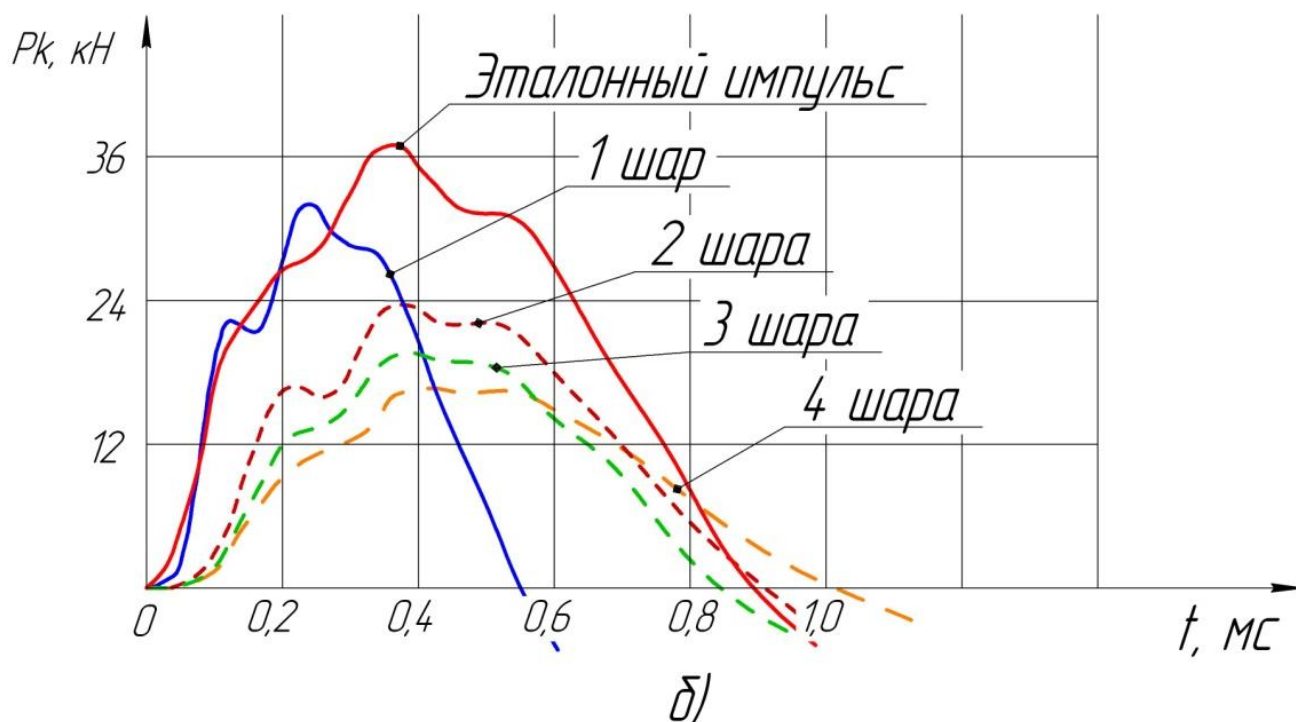
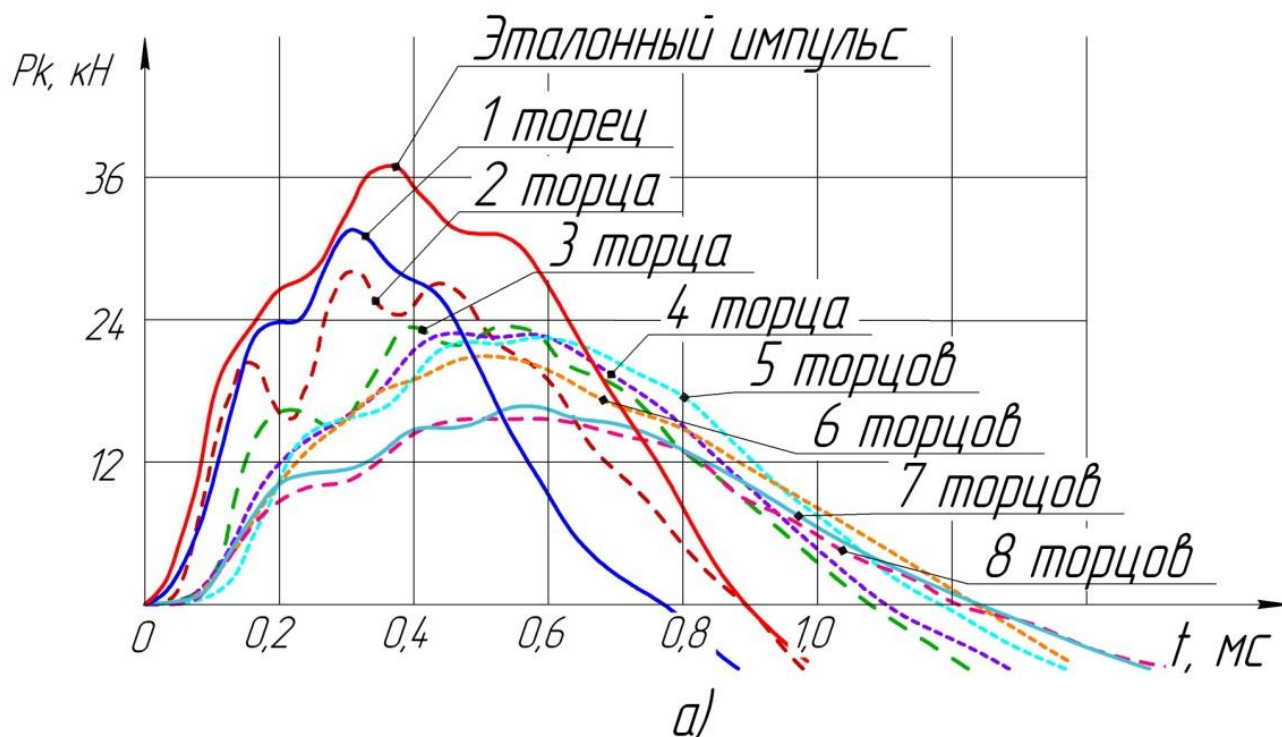
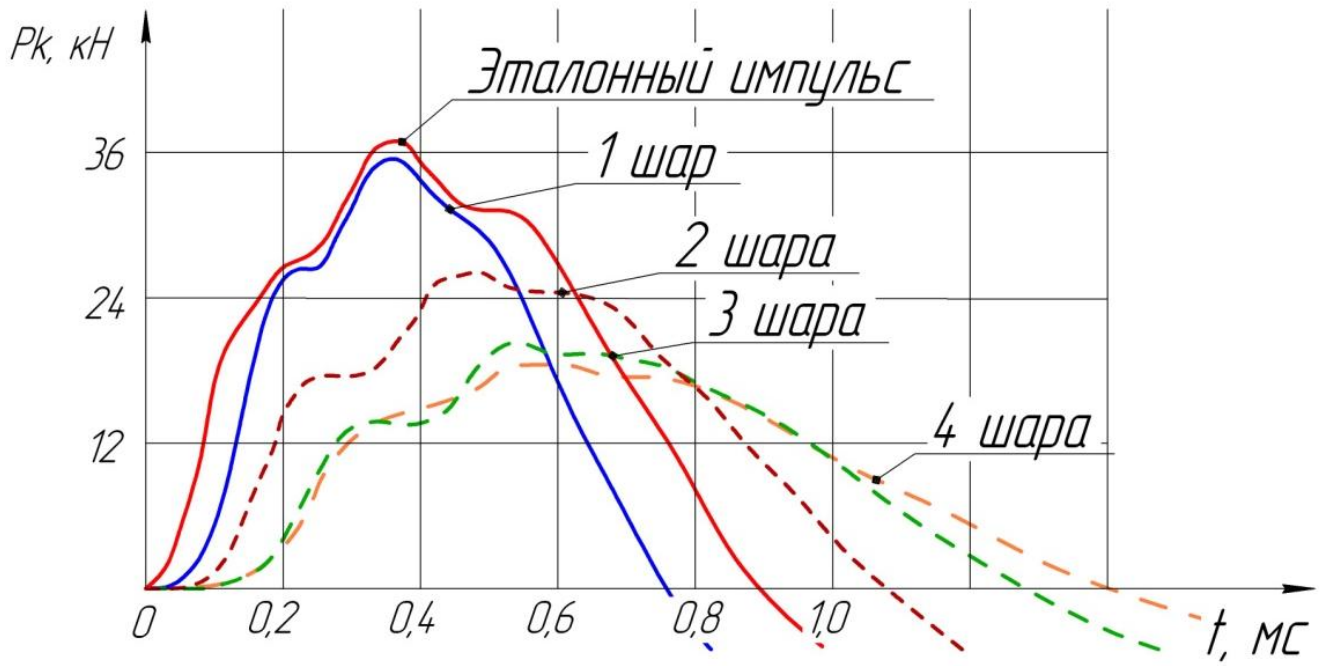
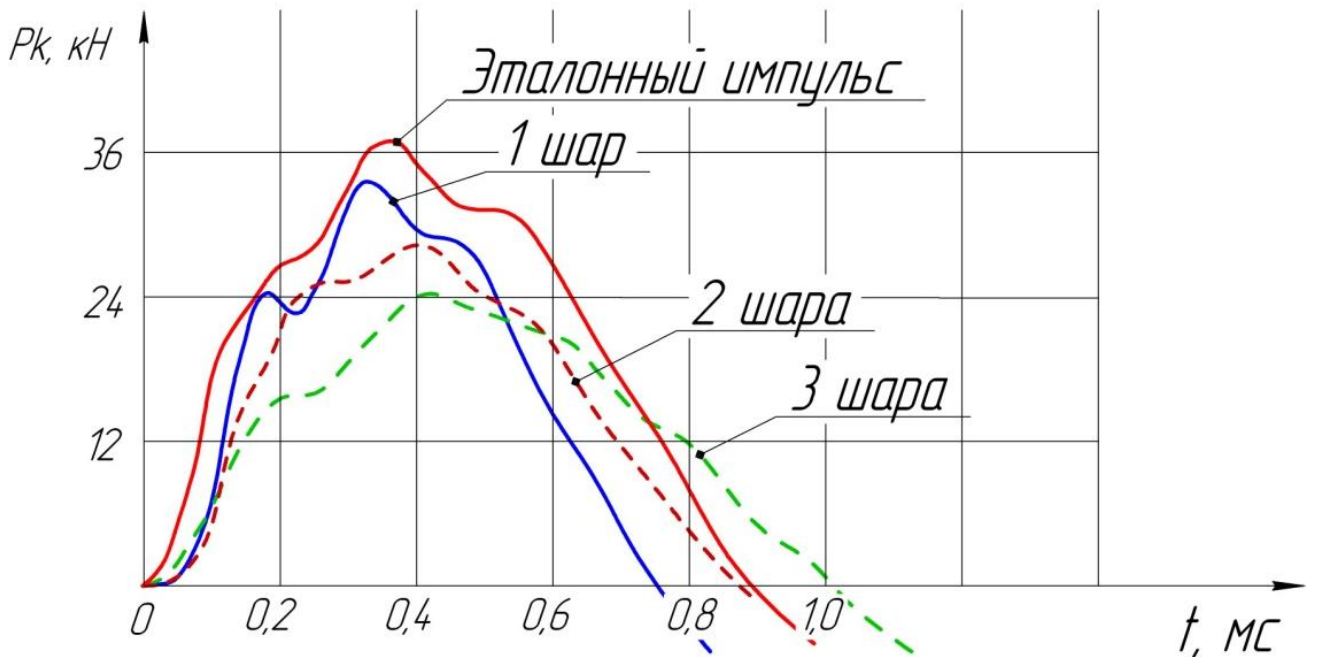


Рисунок 24 –Зависимость формы, амплитуды и длительности ударных импульсов от типа инструмента и их количества в системе нагружения: а) для инструментов-стержней со сферическим торцом $\varnothing 27$ мм, б) для инструментов-шаров $\varnothing 12$ мм



в)



г)

Рисунок 24 – Продолжение. Зависимость формы, амплитуды и длительности ударных импульсов от типа инструмента и их количества в системе нагружения:

в) для инструментов-шаров $\varnothing 19$ мм, г) для инструментов-шаров $\varnothing 27$ мм

Далее устанавливается зависимость распределения энергии ударного импульса в очаге деформации при многоконтактном нагружении.

При внедрении каждого последующего инструмента в систему уменьшается амплитуда ударного импульса и увеличивается его длительность. В случае одноинденторной схемы нагружения с инструментом-стержнем со сферическим торцом амплитуда ударного импульса в 1,4 и 1,9 раза превышает амплитуду импульса при четырех- и восьмиинденторной схеме нагружения соответственно. Однако, длительность импульса для одноинденторной схемы в данном случае меньше в 1,2 и 1,6 раза в отличие от четырех- и восьмиинденторной схем нагружения соответственно.

Для более полной оценки эффективности схем нагружения производится расчет коэффициента передачи энергии $K_{\text{Э}}$ в очаг деформации. Результаты расчетов $K_{\text{Э}}$ приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Значения коэффициента передачи энергии $K_{\text{Э}}$ (в %) при различных типах инструмента и их количестве

Инструмент	Количество инструментов							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Шар								
Диаметр 12 мм	42	37	24	21	-	-	-	-
Диаметр 19 мм	63	56	37	35	-	-	-	-
Диаметр 27 мм	56	54	44	-	-	-	-	-
Цилиндрический стержень со сферическим торцом								
Диаметр 27 мм	53	51	49	47	48	46	29	28

На основании таблицы 5 построен график зависимости передачи ударного импульса от количества инструментов в ударной системе (рисунок 25, 26).

Установлено, что наибольшим коэффициентом передачи энергии обладают системы с одним инструментом, как для шаров, так и для стержней со сферическим торцом.

Внедрение дополнительного инструмента снижает коэффициент передачи энергии для инструментов в виде шара. При введении второго и третьего

инструмента в инструментальную систему уменьшение $K_{Э}$ по сравнению с одноконтактной системой составляет менее 5%, что допустимо, при дальнейшем увеличении количества инструментов наблюдается значительное уменьшение $K_{Э}$, что снижает энергетическую эффективность процесса.

Для инструмента в виде стержня со сферическим торцом при внедрении с 3-го по 6-ой инструмент включительно снижение $K_{Э}$ практически не наблюдается.

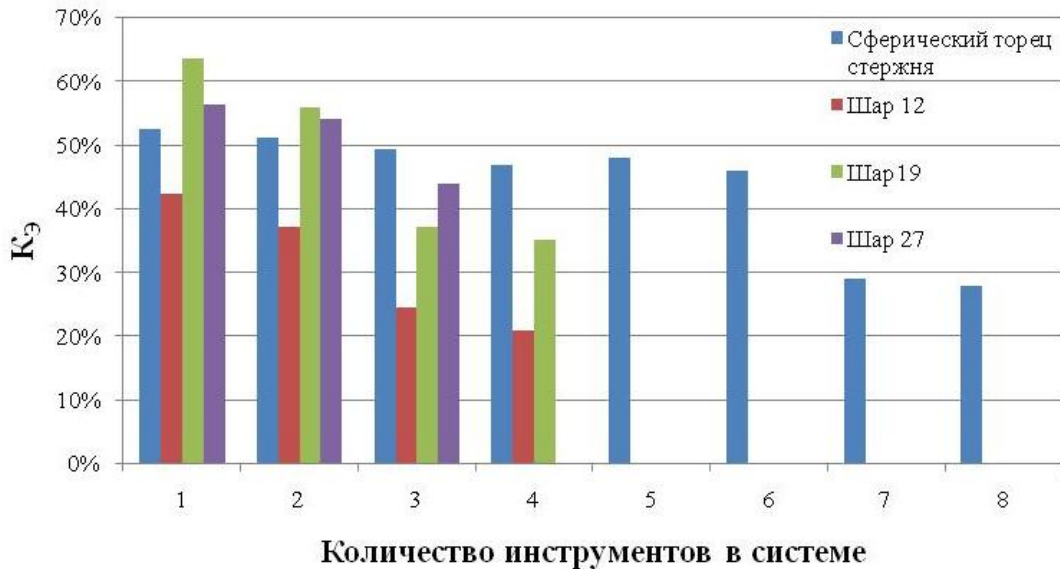


Рисунок 25 – Зависимости передачи ударного импульса $K_{Э}$ от количества инструментов в ударной системе

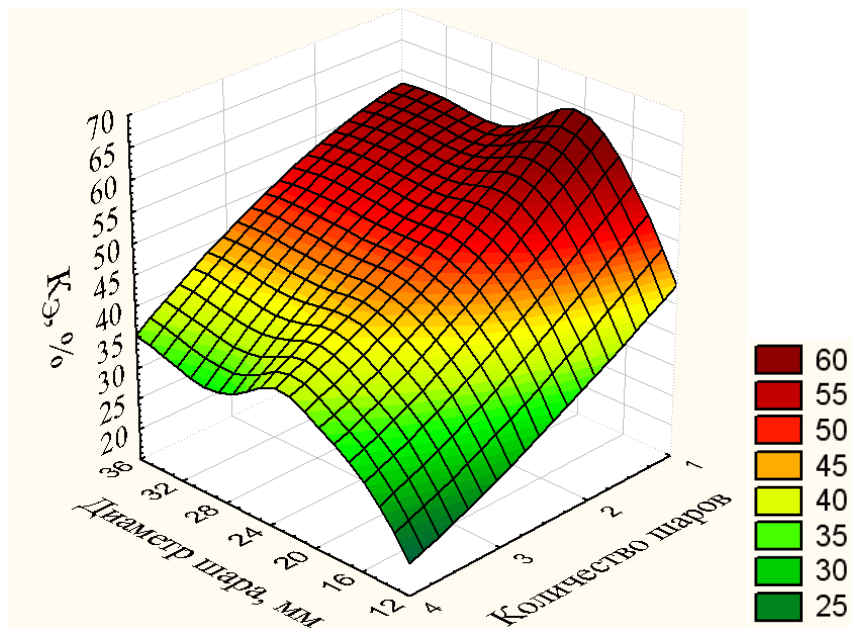


Рисунок 26 – Зависимость передачи ударного импульса от диаметра инструмента и количества инструментов в ударной системе (для шаров)

Так для шаров с помощью регрессионного анализа установлен упрощенный вид зависимости $K_{Э}$ от количества инструментов в системе нагружения, а также их диаметра:

$$K_{Э} = 40,63 - 8N_{И} + 1,12D_{И}, \quad (19)$$

где $N_{И}$ – количество инструментов, шт.;

$D_{И}$ – диаметр инструмента, мм.

Для инструментов в виде цилиндрических стержней со сферическим торцом установлено, что наибольшее влияние на величину $K_{Э}$ оказывает амплитуда и длительность ударного импульса (рисунок 27).

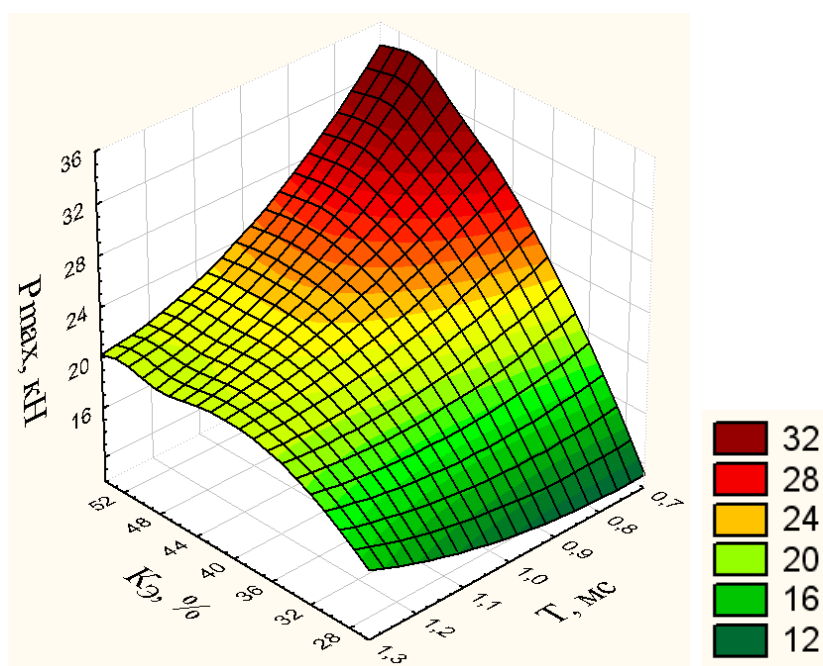


Рисунок 27 – Зависимость коэффициента передачи энергии $K_{Э}$ от амплитуды P_{\max} и длительности ударного импульса T для стержней со сферическим торцом диаметром 27 мм

Упрощенная зависимость между $K_{Э}$, длительностью и амплитудой ударного импульса для всех инструментов имеет вид:

$$K_{Э} = -87,85 + 66,63P_{\max} + 2,95T, \quad (20)$$

где P_{\max} – амплитуда ударного импульса, кН,

T – длительность ударного импульса, мс.

Выявлено, что применение шаров и стержней со сферическим торцом диаметрами 19...27 мм в качестве инструмента позволяет эффективно перераспределять энергию ударного импульса и управлять давлением в пятне контакта, тем самым обеспечивая наибольшие показатели коэффициента передачи энергии $K_Э$.

Кроме исследования влияния формы и количества инструментов на эффективность схемы нагружения, необходимо исследовать влияние расположения и расстояния между инструментами.

Для оценки влияния расстояния между инструментами в ударной системе на формирование эпюры упрочнения в поверхностном слое использовались различные виды сепараторов 9 (рисунок 21). Сепараторы позволяют располагать инструменты 5 либо непосредственно рядом друг с другом без зазоров, либо на определенном расстоянии, например, равном половине диаметра инструмента d (рисунок 28). Эксперименты проводились с применением инструментов в виде цилиндрических стержней со сферическим торцом различного диаметра, что обуславливается большим $K_Э$ в очаг деформации при многоконтактной схеме нагружения с количеством инструментов более 3.

Применялось два вида инструмента: цилиндрические стержни со сферическим торцом диаметром 6 мм и цилиндрические стержни со сферическим торцом, радиус кривизны которого стремится к бесконечности и близок к плоскости (далее – стержень с плоским торцом).

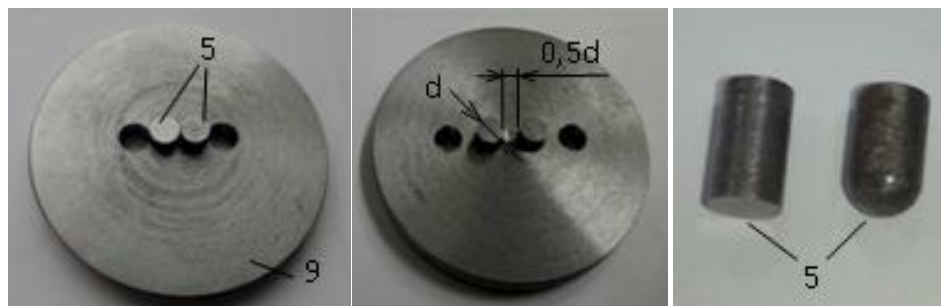


Рисунок 28 – Сепараторы и инструмент для экспериментальных исследований

Сначала ударная система состояла из одного инструмента. Затем поочередно добавлялись второй, третий, четвертый инструменты. Во всех случаях

удар бойка по волноводу наносился с одной и той же энергией 30 Дж. Суммирующий эффект от наложения ударных волн и эффективность ударной системы в данном случае оценивалась по формирующейся эпюре распределения микротвердости в поверхностном слое.

В результате анализа эпюр распределения микротвердости в поверхностном слое установлено, что после удара одним инструментом в виде стержня с плоским торцом, по сравнению с ударом двумя инструментами, расположенными рядом друг с другом и на расстоянии равном половине диаметра инструмента ($0,5d$) друг от друга, максимальное значение микротвердости $H_{\mu\max}$ в первом случае выше на 12% (рисунок 29а, 30). При этом глубина упрочнения h практически не уменьшается и составляет 7 мм.

Установка третьего и четвертого инструмента не влияет на величину $H_{\mu\max}$ и приводит к уменьшению глубины упрочнения с 7 мм до 4,5 мм. Толщина области с максимальной микротвердостью составляет $h_{\max} = 0,25 \dots 0,6$ мм (рисунок 30, 31).

Увеличение расстояния между инструментами на величину $0,5d$ для трех и четырех инструментов снизило величину $H_{\mu\max}$ с $90HV$ до $80HV$, при этом уменьшается толщина области с максимальным упрочнением до 0,4 мм, а общая глубина упрочнения составляет порядка 5 мм (рисунок 30, 31).

Далее проведены исследования для инструментов со сферическим торцом диаметром 6 мм.

Сравнение эпюр распределения микротвердости в поверхностном слое при ударном воздействии одним инструментом со сферическим торцом диаметром 6 мм (рисунок 29,б) с эпюрами ударов двумя инструментами, расположенных рядом друг с другом (рисунок 32,б) выявило, что установка второго индентора привела к уменьшению в поверхностном слое максимального значения микротвердости на 12% при незначительном уменьшении глубины упрочненного слоя.

Увеличение расстояния между двумя и тремя инструментами со сферическим торцом на величину до половины диаметра инструмента (рисунок 33,б), привело к повышению максимального значения микротвердости на 17% и

глубины упрочнения до 1,8 раза по сравнению с аналогичной схемой нагружения с двумя инструментами, расположенными рядом.

Увеличение расстояния на величину половины диаметра инструмента между инструментами-стержнями со сферическим торцом (рисунок 32,33), привело к формированию после удара локальных пластических отпечатков, которые не перекрываются между собой и не формируют единой упрочненной области. Это вызвало уменьшение максимального значения микротвердости на 20% и глубины упрочненного слоя поверхностного слоя с 5 мм до 2,5 мм.

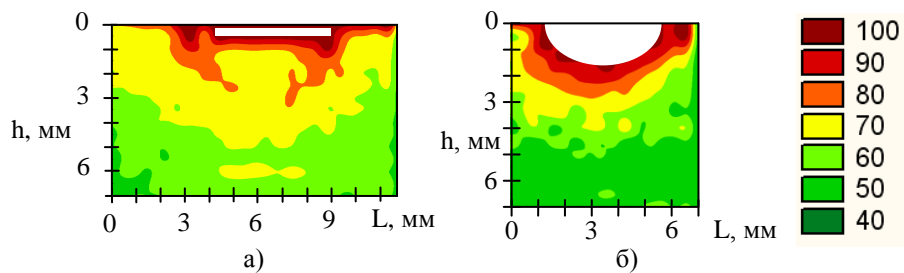


Рисунок 29 – Эпюры распределения микротвердости (HV) в поверхностном слое после одиночного удара инструментом: а) со сферическим торцом с радиусом кривизны, стремящимся к бесконечности; б) со сферическим торцом диаметром 6 мм

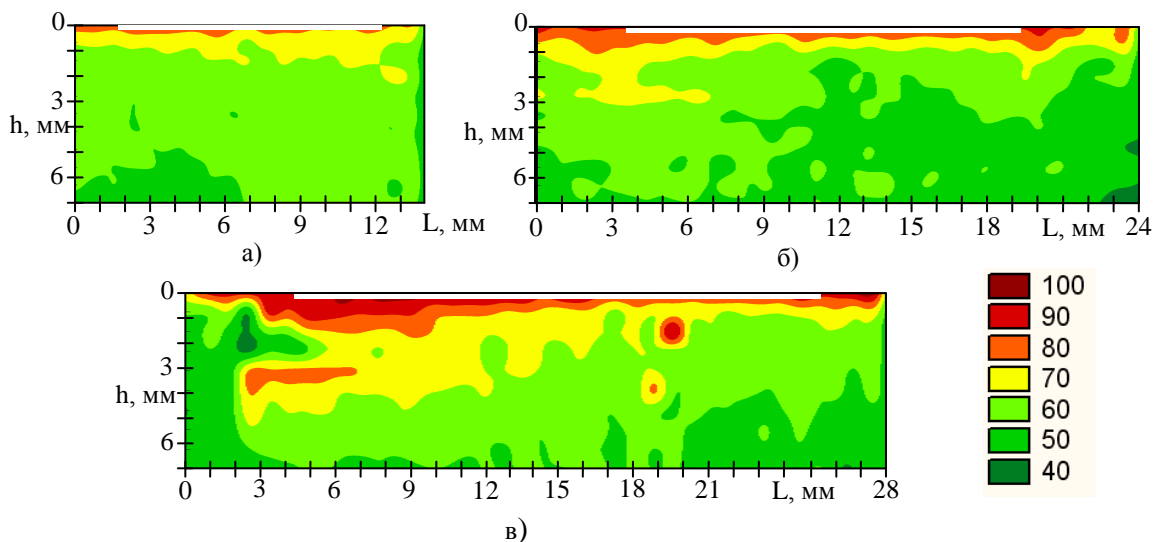


Рисунок 30 – Эпюры распределения микротвердости (HV) в поверхностном слое после удара: а) двумя; б) тремя; в) четырьмя рядом расположенными инструментами со сферическим торцом с радиусом кривизны, стремящимся к бесконечности

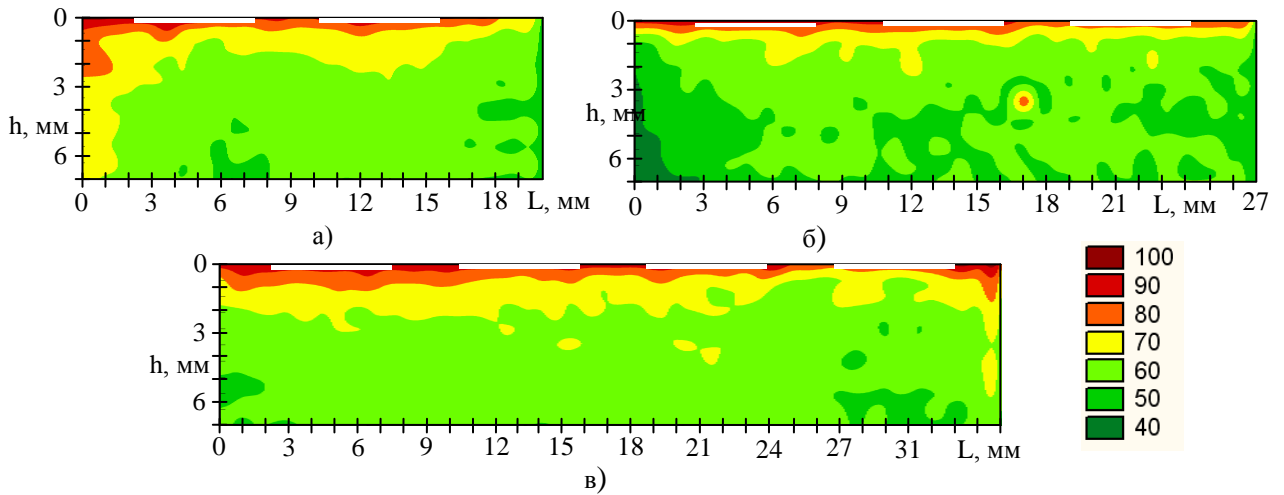


Рисунок 31 – Эпюры распределения микротвердости (HV) в поверхностном слое после удара: а) двумя; б) тремя; в) четырьмя инструментами со сферическим торцом с радиусом кривизны, стремящимся к бесконечности, расположенными на расстоянии половины диаметра инструмента

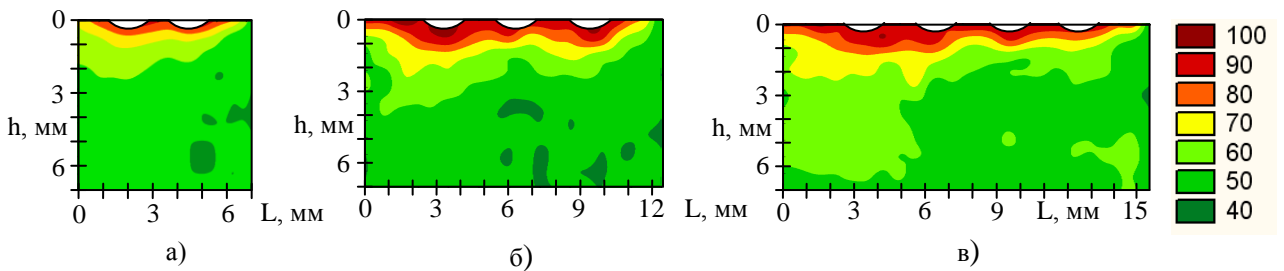


Рисунок 32 – Эпюры распределения микротвердости (HV) в поверхностном слое после удара: а) двумя; б) тремя; в) четырьмя рядом расположенными инструментами со сферическим торцом

Установка без зазора четвертого инструмента (рисунок 32,в) не изменила величину $H_{\mu\max}$ по сравнению с трехинструментальной схемой, и привела лишь к уменьшению глубины упрочнения с 2,5мм до 2мм.

Увеличение расстояния на величину половины диаметра инструмента между четырьмя инструментами со сферическим торцом (рисунок 33,в), привело к формированию после удара локальных пластических отпечатков, которые не перекрываются между собой и не формируют единой упрочненной области. Это

вызвало уменьшение максимального значения микротвердости на 20% и глубины упрочненного слоя поверхностного слоя с 5 мм до 2 мм.

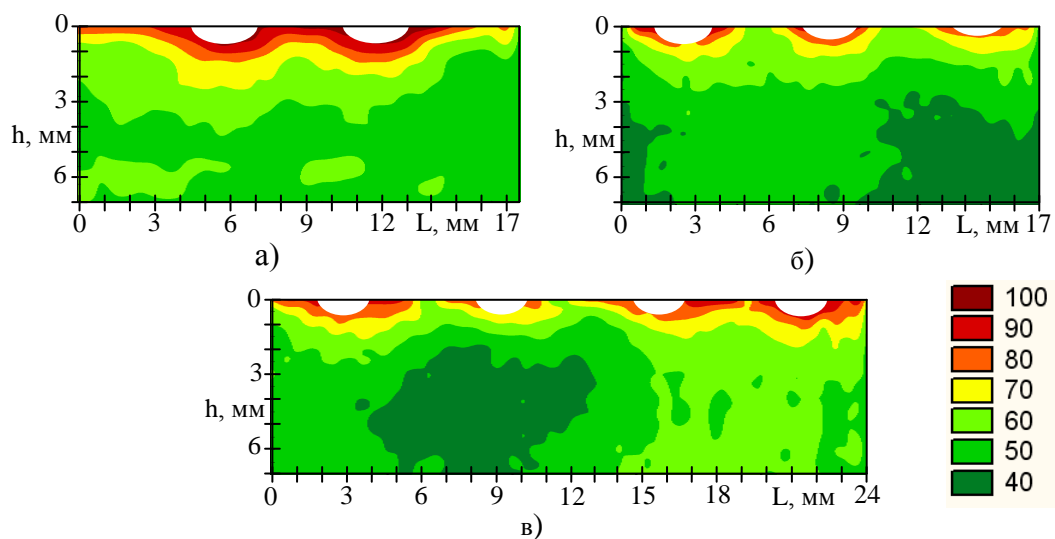


Рисунок 33 – Эпюры распределения микротвердости (HV) в поверхностном слое после удара: а) двумя; б) тремя; в) четырьмя инструментами со сферическим торцом, расположенными на расстоянии половины диаметра инструмента

Все результаты экспериментальных исследований по влиянию расположения инструментов на глубину и степень упрочнения представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Значения $H_{\mu\max}$, h_{\max} и h в зависимости от количества и формы инструментов

Количество инструментов	Инструменты-стержни с торцом, радиус кривизны которых стремится к бесконечности						Инструменты-стержни со сферическим торцом диаметром 6 мм					
	установка без зазора			установка с зазором			установка без зазора			установка с зазором		
	$H_{\mu\max}$		Глубина упрочнения h , мм	$H_{\mu\max}$		Глубина упрочнения h , мм	$H_{\mu\max}$		Глубина упрочнения h , мм	$H_{\mu\max}$		Глубина упрочнения h , мм
	ΔH_{μ} , %	h , мм		ΔH_{μ} , %	h , мм		ΔH_{μ} , %	h , мм		ΔH_{μ} , %	h , мм	
1	90	0,6	7			90	0,25	6				
2	80	0,25	6,5	80	0,8	7	80	0,25	5	90	0,25	5
3	80	0,5	4,5	80	0,25	4	80	0,4	2,5	70	0,4	2
4	90	0,4	4	80	0,4	5	90	0,6	2	70	0,6	2

На основании экспериментальных данных по исследованию влияния

расположения инструментов, их количества и вида на формирование карты распределения микротвердости в поверхностном слое в программе Statistica получены регрессионные математические модели для ударных систем, с использованием инструментов с плоским торцом (21) и со сферическим торцом (22). В виду сложности проводимого эксперимента, такие значимые параметры в происходящем процессе, как энергия ударов, геометрические соотношения бойка и волновода, свойства нагружаемой среды, стабилизированы.

Регрессионный анализ полученных моделей показал, что параметры являются значимыми, а коэффициент объясненной вариации моделей (21) и (22) составил 86% и 91% соответственно. Данные регрессии свидетельствуют об адекватности использования полученных математических моделей.

$$\Delta H_{\mu} = 1,3 + 0,008e - 0,02N_{и}, \quad (21)$$

$$\Delta H_{\mu} = 1,5 + 0,008e - 0,03N_{и}, \quad (22)$$

где ΔH_{μ} - степень упрочнения, %;

e – расстояние между осями инструментов, мм;

$N_{и}$ – количество инструментов, шт.

$$\Delta H_{\mu} = (HV - HV_0)/HV_0 \times 100\%, \quad (23)$$

где HV – микротвердость материала после упрочнения;

HV_0 – исходная микротвердость материала.

Исходя из полученных экспериментальных данных, можно выделить следующие доминирующие параметры: степень упрочнения ΔH_{μ} , глубина упрочнения h , производительность обработки (обрабатываемая площадь за один удар) S .

Далее получены регрессионные уравнения, которые показывают:

- как влияет на формирование степени упрочнения ΔH_{μ} количество инструментов $N_{и}$ и расстояние между осями инструментов e в ударных системах, использующих инструменты с плоской формой торца (21) и с формой торца, заправленной под сферу (22);

- как влияет на формирование глубины упрочнения h количество инструментов $N_{и}$ и расстояние между осями инструментов e в ударных системах,

использующих инструменты с плоской формой торца (24) и со сферическим торцом (25);

- как влияет на производительность обработки S количество инструментов $N_{и}$ и расстояние между осями инструментов e в ударных системах, использующих инструменты с плоской формой торца (26) и с формой торца, заправленной под сферу (27).

$$h = 4,76 + 0,36e - 0,41N_{и}, \quad (24)$$

$$h = 2,23 + 0,13e - 0,26N_{и}, \quad (25)$$

$$S = -96,2 + 12,04e - 41,51N_{и}, \quad (26)$$

$$S = -46,8 + 5,3e - 14,33N_{и}, \quad (27)$$

где S – производительность обработки (обрабатываемая площадь за один удар), мм².

Так, для повышения эффективности обработки по параметру ΔH_{μ} рекомендуется использовать, в случае единичного удара, инструменты со сферической формой торца. В случае, если ударная система состоит из нескольких инструментов рекомендуется использовать четыре инструмента с плоской формой торца, и располагать их рядом друг с другом (без зазора).

Для повышения эффективности обработки по параметру h рекомендуется применять, в случае единичного удара, в ударной системе инструмент с плоской формой торца. В случае, если ударная система состоит из нескольких инструментов рекомендуется использовать два инструмента с плоской формой торца и располагать их на расстоянии друг от друга равном половине их диаметра.

Для повышения эффективности обработки по параметру S рекомендуется использовать в ударной системе четыре инструмента с плоской формой торца, и располагать их на расстоянии равном половине их диаметра друг от друга.

Данные рекомендации эффективны только в случае единичного удара. Так, при серии ударов стержнями с плоским торцом возникнет сложность выхода инструмента из углубления, сформированного пластическим отпечатком. Поэтому, для обработки МК ВДУ с серией ударов инструмент должен закругленный торец с радиусом кривизны, обеспечивающим выход инструмента

из сформированного пластического отпечатка. Исследования по выбору необходимых геометрических параметров инструмента проведены далее с помощью конечно-элементного моделирования.

2.4 Оценка адекватности моделирования многоконтактного ВДУ

Для оценки адекватности результатов, полученных в результате моделирования процесса МК ВДУ в ANSYS/LS-DYNA, проведен сравнительный анализ экспериментальных данных и данных, полученных конечно-элементным моделированием.

Контролируемые параметры: коэффициент передачи энергии ударного импульса $K_{\text{Э}}$, глубина h и степень упрочнения ΔH_{μ} поверхностного слоя.

Экспериментальные данные получены на созданном стенде.

Ударные импульсы для расчета $K_{\text{Э}}$ получены при различных схемах нагружения с количеством инструментов от 1 до 8. Энергия удара постоянна и составляет 0,15 Дж.

Для определения h и ΔH_{μ} проведена серия экспериментов. Инструмент устанавливается на упрочняемую поверхность – образец из сплава АМг2. Затем инструмент статически поджимается волноводом и по волноводу наносится удар бойком. В результате на упрочняемой поверхности формируется пластический отпечаток. Эксперимент повторялся не менее 7 раз. Образец распиливался по центру отпечатка. Под отпечатком производились измерения микротвердости в соответствии со схемой, представленной на рисунке 34. Расстояние между двумя смежными отпечатками в горизонтальной и вертикальной плоскости составляет 0,7 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 2999-75 [31].

В качестве инструмента применялись шары диаметром 9, 19, 27 мм, а также стержни со сферическим торцом диаметром 19 и 27 мм. Энергия удара постоянна и составляет 30 Дж.



Рисунок 34 – Схема измерения микротвердости под отпечатком

По трем измерениям на одной глубине h рассчитывалось среднее значение, которое пересчитывалось в значения ΔH_μ и затем использовалось для расчетов. На основании экспериментов строилась диаграмма рассеяния в программе Statistica. Результаты эксперимента аппроксимировались кубической параболой, которая с наибольшей степенью достоверности отображает закономерность изменения степень упрочнения по глубине.

Для получения данных по конечно-элементной теоретической модели, аналогичные процессы исследованы в программе ANSYS/LS-DYNA. Соответствующие энергии удара A задаются через силу $P_{\text{ДИН}}$, значения которой рассчитываются в соответствии со следующими формулами:

$$A = E_{\text{КИН}}, \quad (28)$$

$$E_{\text{КИН}} = \frac{m_1 v_1^2}{2}, \quad (29)$$

$$v_1 = \sqrt{2gh_{\text{ВЫС}}}, \quad (30)$$

$$a = \frac{v_1}{t}, \quad (31)$$

$$P_{\text{ДИН}} = m_1 a, \quad (32)$$

где $E_{\text{КИН}}$ – кинетическая энергия удара бойком;

m_1 и v_1 – масса и скорость бойка в момент удара соответственно;

$h_{\text{ВЫС}}$ – высота падения бойка;

a – ускорение бойка в момент удара;

t – время удара (принимается равным в соответствии с полученными ударными импульсами);

$P_{\text{дин}}$ – сила удара бойка по волноводу.

В соответствии с методикой предложенной выше создана расчетная конечно-элементная модель, заданы граничные условия соответствующие условиям эксперимента (сила удара, длительность ударного воздействия). Один из примеров результатов расчета представлен на рисунке 35.

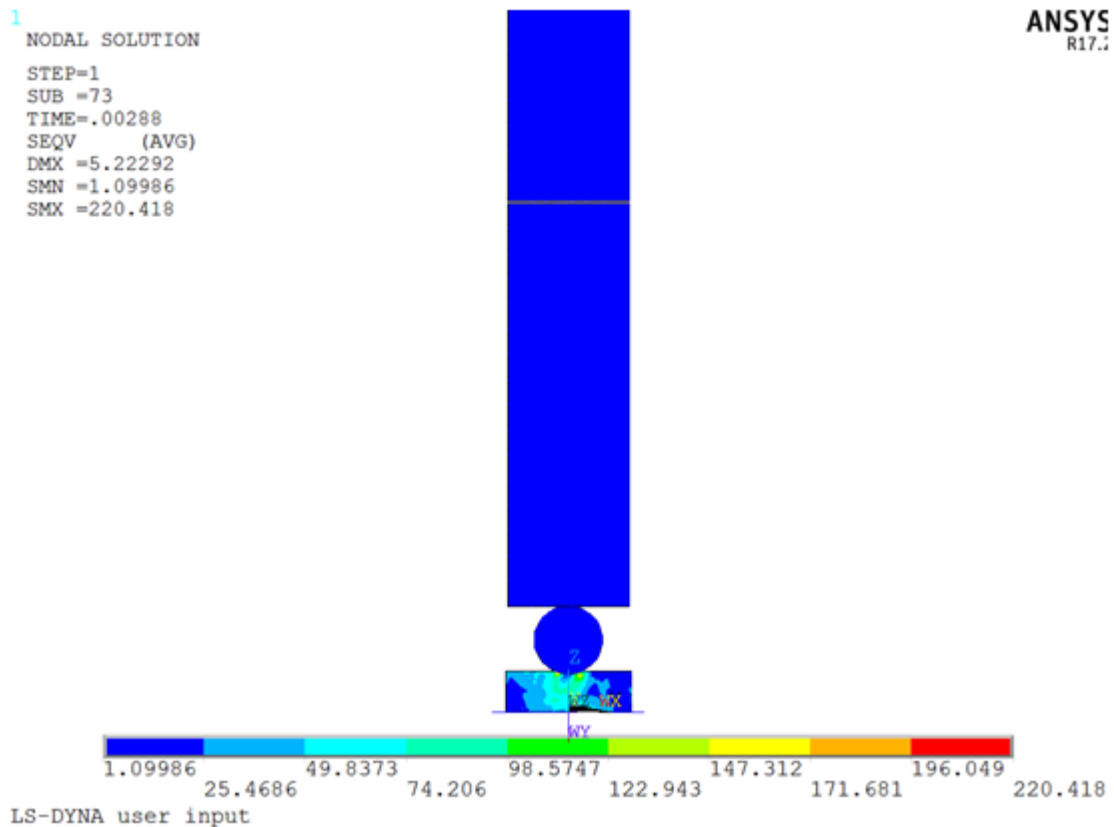


Рисунок 35 – Распределение полей эквивалентных напряжений в образце из сплава АМг2 после ударного воздействия

В ходе вычислений получены значения эквивалентных напряжений (Мизеса), которые в соответствии с методикой М.П. Марковца и А.Ю. Ишлинского переведены в значения микротвердости [64]. Определение значений напряжений производилось в точках аналогичных точкам измерения микротвердости экспериментальным путем (под пластическим отпечатком, по трем линиям с аналогичными интервалами).

При помощи постпроцессора POST26 в ANSYS/LS-DYNA получены графики зависимости кинетической энергии от времени в момент удара. Данные графики представляют собой ударные импульсы, формирующиеся в очаге деформации (рисунок 36). В соответствии с формулами 28-32 графики преобразованы и приведены к виду «сила-время».

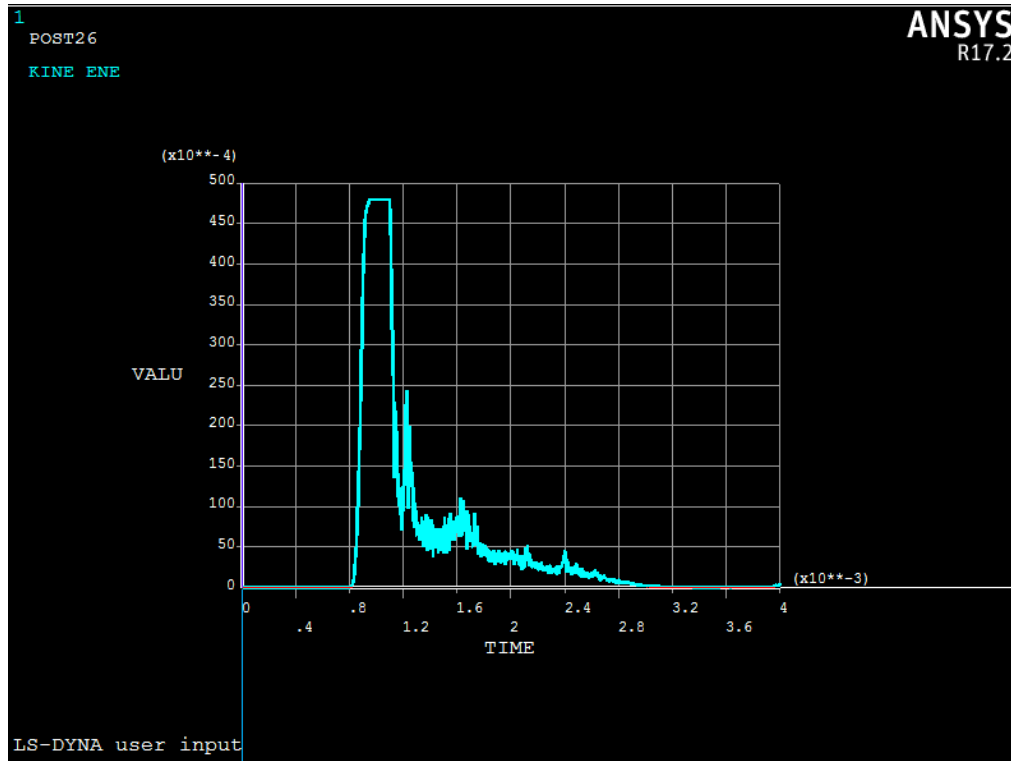


Рисунок 36 – График зависимости кинетической энергии от времени

В результате анализа установлено, что параметры глубины h и степени упрочнения ΔH_μ , определенные по конечно-элементной модели, соответствуют результатам эксперимента при уровне доверительной вероятности 0,95 (рисунок 37).

Также установлено, что параметры K_Θ , полученные моделированием соответствуют экспериментальным при уровне доверительной вероятности 0,8 (рисунок 38).

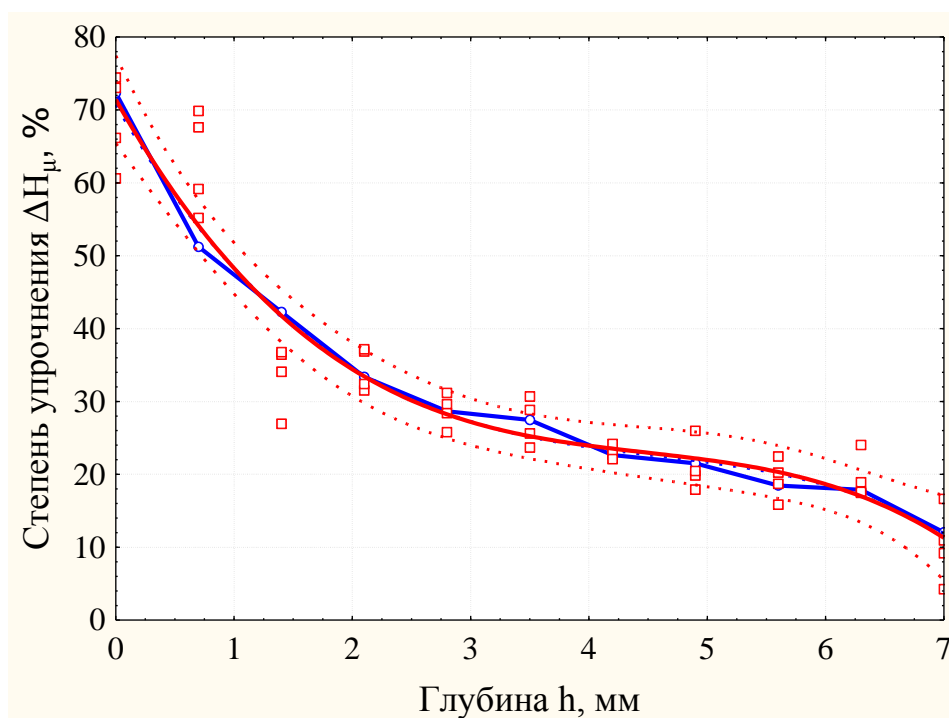


Рисунок 37 – Оценка адекватности моделирования по параметрам h и ΔH_μ



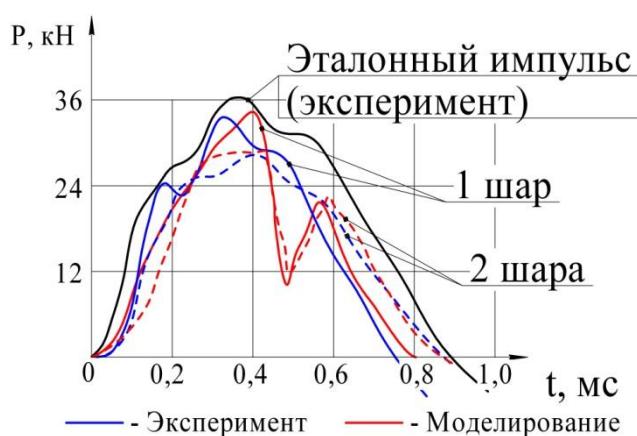
– график по значениям ΔH_μ , полученных в результате моделирования;



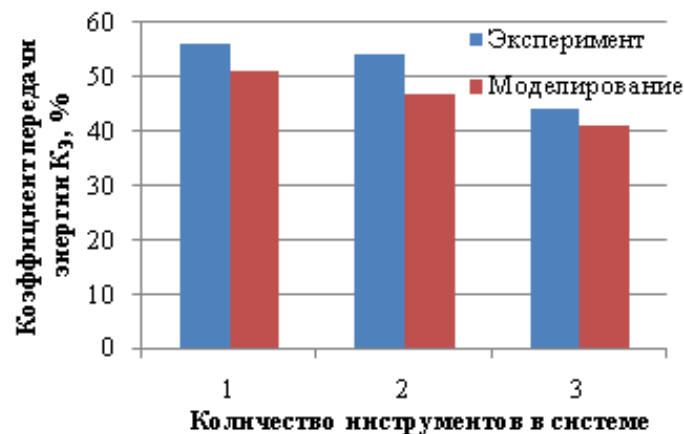
– экспериментальные результаты ΔH_μ ;

– аппроксимированный график ΔH_μ по средним значениям экспериментов (кубическая парабола);

– границы доверительного интервала с вероятностью 0,95.



а)



б)

Рисунок 38 – Ударные импульсы при одно- и многоконтактной схеме нагружения с инструментами-шарами $\varnothing 27$ мм (а) и зависимость коэффициента передачи энергии K_E от количества инструментов в ударной системе для инструментов-шаров $\varnothing 27$ мм (б)

В результате проведенного анализа сделан вывод об адекватности разработанной модели и достоверности получаемых результатов.

Выводы

1. 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 h и степень упрочнения ΔH_μ , коэффициент передачи энергии в очаг деформации K_Σ .

2. Разработан экспериментальный стенд для исследования распределения удара при многоконтактной схеме нагружения очага деформации и изменения формы, амплитуды и длительности ударного импульса, а также оценки влияния МК ВДУ на глубину и степень упрочнения поверхностного слоя.

3. Установлено, что 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_Σ по сравнению с одноконтактной системой составляет менее 5%, что допустимо, при дальнейшем увеличении количества инструментов наблюдается значительное уменьшение K_Σ , что снижает энергетическую эффективность процесса.

4. 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.

5. Для повышения эффективности обработки по параметру ΔH_{μ} рекомендуется использовать, в случае единичного удара, инструменты со сферической формой торца. В случае, если ударная система состоит из нескольких инструментов рекомендуется использовать четыре инструмента с плоской формой торца, и располагать их рядом друг с другом.

6. Для повышения эффективности обработки по параметру S рекомендуется использовать в ударной системе четыре инструмента с плоской формой торца, и располагать их на расстояния равном половине их диаметра друг от друга.

3 Анализ теоретической модели и экспериментальные исследования повышения качества деталей из АМг сплавов многоконтактным волновым деформационным упрочнением

3.1 Анализ конструктивных и конструктивно-технологических параметров, влияющих на процесс многоконтактного ВДУ

При моделировании многоконтактного ВДУ приняты во внимание следующие технологические и конструктивно-технологические параметры, оказывающие доминирующее влияние на процесс (таблица 7):

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

где L_1, d_1 и L_2, d_2 – длина и диаметр бойка и волновода соответственно, мм;

$D_{\text{И}}$ – диаметр инструмента, мм;

$P_{\text{СТ}}$ – статическое поджатие инструмента, Н;

A – энергия удара, Дж;

f – частота ударов, Гц;

s – скорость подачи заготовки относительно инструмента, м/с.

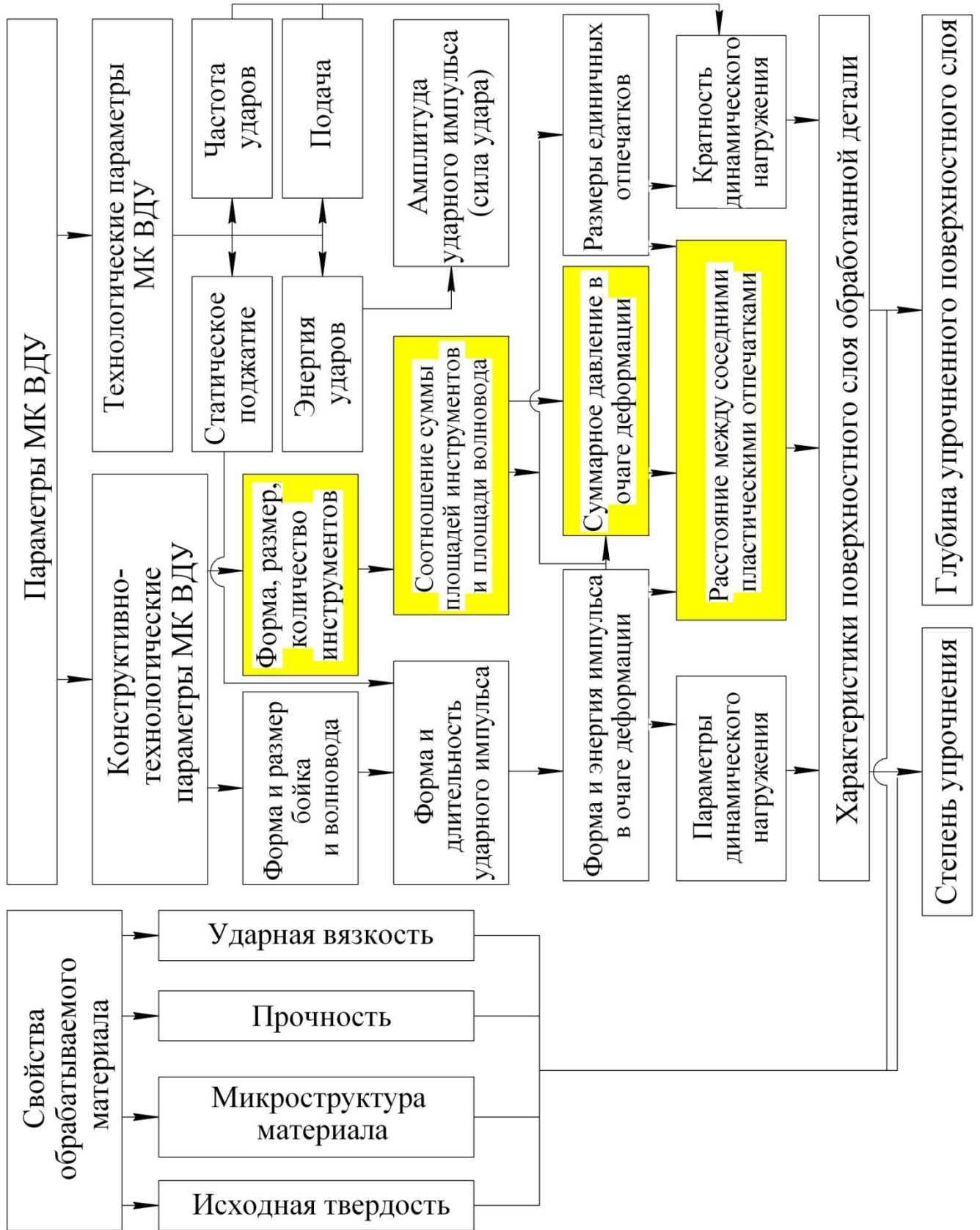
Боек и волновод в известном генераторе импульсов для ВДУ имеют следующие конструктивные параметры: $L_1 = 480$ мм, $L_2 = 160$ мм, $d_1 = d_2 = 48,5$ мм, обеспечивающие высокую эффективность процесса обработки. Изменение данных параметров затруднительно и экономически не рационально, поэтому они принимаются за исходные. Эффективный параметр $P_{\text{СТ}}$ 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:

$$K = 1 - \frac{s}{\delta f 60}, \quad (33)$$

где δ – характерный размер пластического отпечатка, мм.

Определены области варьирования значений основных конструктивно-технологических и технологических факторов МК ВДУ при обработке АМг сплавов: $A_{\text{min}} \dots A_{\text{max}} = 5 \dots 80$ Дж; $D_{\text{Иmin}} \dots D_{\text{Иmax}} = 8 \dots \infty$; $K_{\text{min}} \dots K_{\text{max}} = 0,2 \dots 0,8$ [51, 69, 104].

Таблица 7 – Конструктивно-технологические и технологические параметры МК ВДУ



Кроме того, для МК ВДУ исследовалось влияние дополнительных технологических параметров (выделены цветом в таблице 7): $S_{\text{ОТН}}$ – соотношение суммы площадей поперечного сечения инструментов и площади поперечного сечения волновода; $N_{\text{И}}$ – 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 $S_{\text{ОТН}}$ определяется как (рисунок 39):

$$S_{\text{ОТН}} = \frac{S_{N_1} + S_{N_2} + \dots + S_{N_{N_{\text{И}}}}}{S_{\text{ВОЛН}}}, \quad (34)$$

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

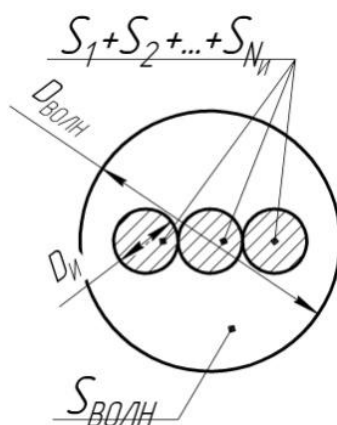


Рисунок 39 – Схема для определения соотношения суммы площадей поперечного сечения инструментов и площади поперечного сечения волновода $S_{\text{ОТН}}$

Применяемый инструмент представлен на рисунке 40.

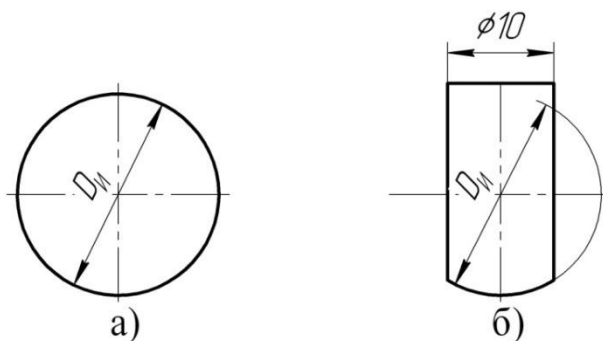


Рисунок 40 – Форма инструментов: а) шар, б) цилиндрический стержень со сферическим торцом

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

$$P = \frac{P_{уд}}{S_{од}}, \quad (35)$$

где $P_{уд}$ – сила удара, Н;

$S_{од}$ – площадь пластического отпечатка в очаге деформации, мм^2 .

$$P_{уд} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \sqrt{\frac{2A}{m_1}}, \quad (36)$$

где C_1, C_2 – акустическая жесткость бойка и волновода соответственно, кг/с.

Схема для определения параметра δ' представлена на рисунке 41.

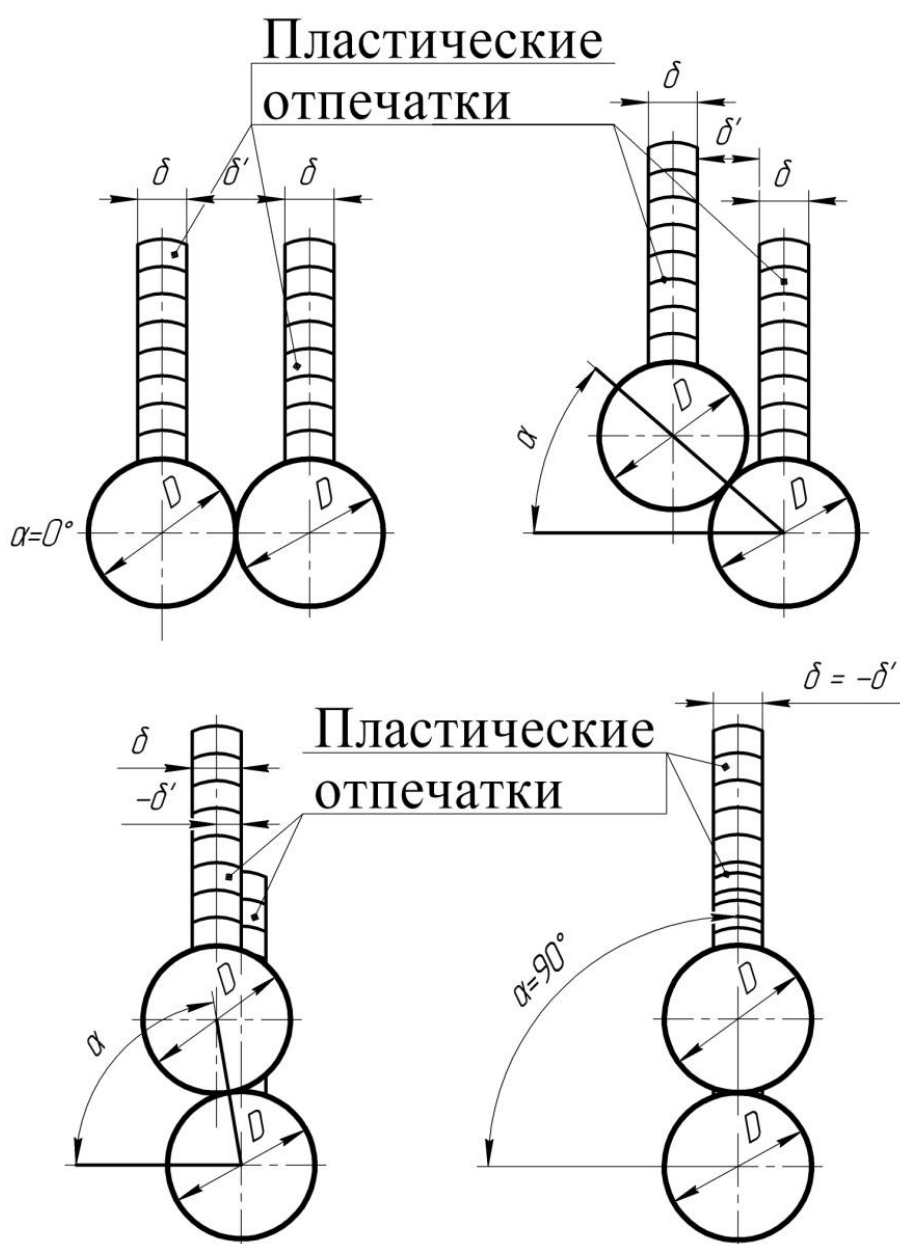


Рисунок 41 – Схема для определения δ' и α (вид в сечении инструмента)

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.

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\delta \pm \delta'}{D_{\text{и}}}\right), \quad (37)$$

где δ – размер пластического отпечатка,

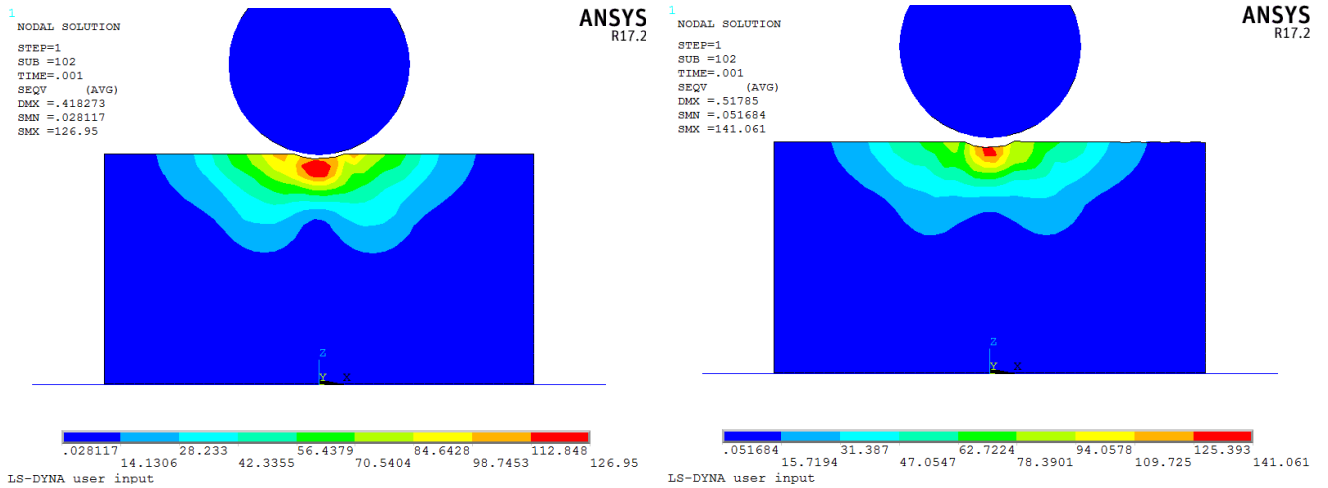
δ' – боковой зазор между соседними пластическими отпечатками.

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

3.2 Исследование конечно-элементной модели многоконтактного ВДУ

На первом этапе исследований определена область технологических и конструктивно-технологических параметров: энергия удара A , форма и размер инструмента ($D_{\text{и}}$), которые обеспечивают наибольшую глубину (h) и степень упрочнения (ΔH_{μ}).

Проведены исследования для инструментов-шаров (рисунок 42). По результатам расчетов установлено, что наибольшая степень упрочнения достигается при ударном воздействии инструмента в виде шара диаметром 19 мм. Энергия удара при этом составляет 30-40 Дж. Значение максимальной степени упрочнения $\Delta H_{\mu\text{max}}$ при ударе по шару диаметром 19 мм превышает аналогичные значения при ударном воздействии шарами диаметром 9, 12 и 27 мм на 10-20% (рисунок 43). Глубина области $\Delta H_{\mu\text{max}}$ составляет порядка 0,2...0,3 мм (рисунок 44). На глубине $h = 0,3 \dots 1,0$ мм область с наибольшими значениями смещается в сторону большей энергии удара при меньшем диаметре инструмента. Так, инструмент-шар диаметром 12 мм обеспечивает $\Delta H_{\mu} = 70\%$ на глубине до 1 мм, что больше на 10% по сравнению с упрочнением шарами другого диаметра.



а) б)
Рисунок 42 – Удар шаром діаметром 12 мм с енергией: а) 30 Дж, б) 40 Дж

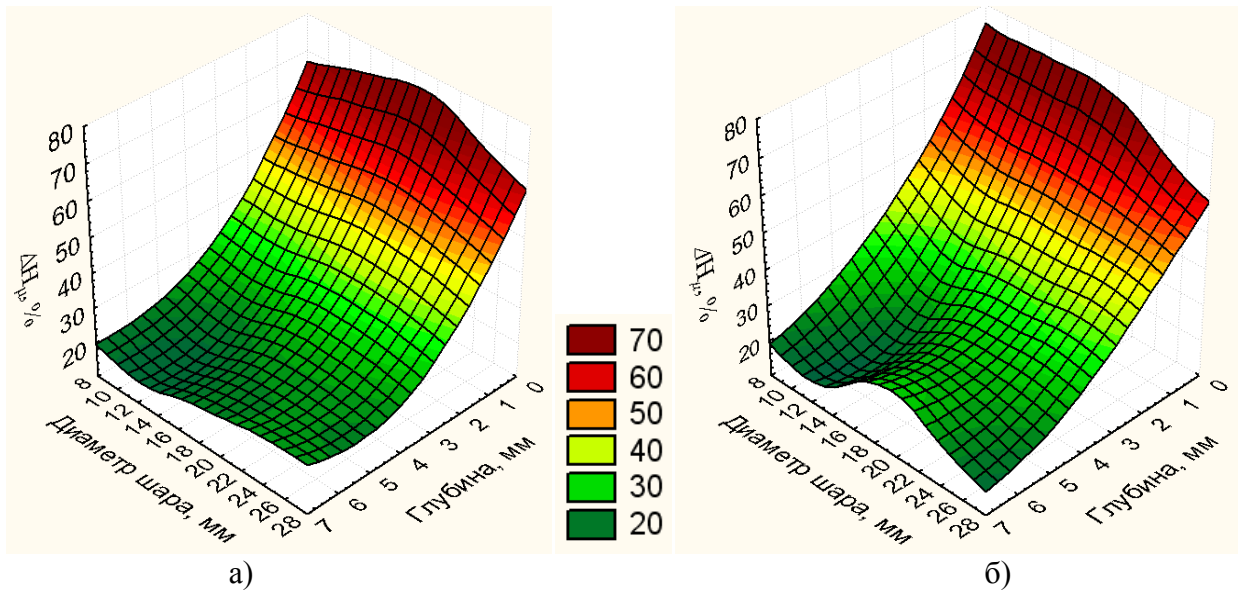


Рисунок 43 – Зависимость степени упрочнения ΔH_μ поверхностного слоя от диаметра шара и глубины слоя при энергии удара: а) 30 Дж, б) 40 Дж

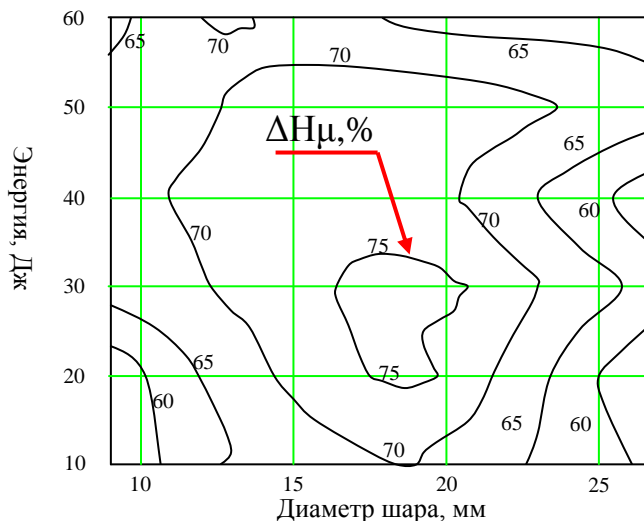


Рисунок 44 – Зависимость распределения степени упрочнения ΔH_μ на поверхности от энергии удара и диаметра шара

При $h > 1,5$ мм область наибольших значений ΔH_μ смещается в сторону инструментов-шаров диаметром 19...27 мм при энергиях ударного воздействия от 30 до 50 Дж. В данном диапазоне геометрических размеров инструмента и энергий удара результаты ΔH_μ превышают остальные на 15-20% при $4,5 < h < 10$ мм. Результаты $\Delta H_\mu < 10\%$ за упрочнение не принимаются. Определена глубина формирующихся пластических отпечатков, которая составляет 0,8...1,4 мм. Большие значения глубины пластических отпечатков соответствуют меньшему диаметру инструмента, при этом не обеспечивается технологичность процесса упрочнения – в связи с формированием дефектного слоя возможно заклинивание инструмента, поэтому необходимо стремиться к применению инструмента большего диаметра ($D_{и} > 19$ мм). При энергии удара более 50 Дж происходит исчерпание пластических свойств материала, что неизбежно ведет к образованию микротрещин в поверхностном слое и снижению эксплуатационных характеристик. Кроме того происходит увеличение размеров пластического отпечатка при снижении степени упрочнения.

Далее проведены исследования для инструментов-стержней со сферическим торцом. Исходя из формируемых размеров пластических отпечатков, выбраны диаметры сферического торца, которые составляют 12, 19, 27, 36 (рисунок 45). Частным случаем является плоский торец (сферический торец, радиус кривизны которого стремится к бесконечности).

Максимальная степень упрочнения $\Delta H_{\mu max}$ формируется при деформационном воздействии стержнем с диаметром сферы на торце 19 мм и энергии удара 40 Дж. Максимальное значение $\Delta H_{\mu max}$ наблюдается до глубины $h = 0,5$ мм. На глубине 1,4-2,1 мм наибольшее значение ΔH_μ наблюдается при диаметре сферы на торце инструмента равной 19 мм (рисунок 46).

На глубине $h > 2,8$ мм область с наибольшими значениями ΔH_μ смещается в сторону инструментов-стержней с большим диаметром сферы на торце. Глубина упрочнения стержнями составляет до 6 мм, что меньше чем при упрочнении шарами.

Инструмент-стержень с плоским торцом обеспечивает наименьшую степень упрочнения на поверхности, однако, сопоставимую глубину h порядка 5 мм. Как установлено ранее, данный вид инструмента не может применяться при серии ударов ввиду геометрических особенностей.

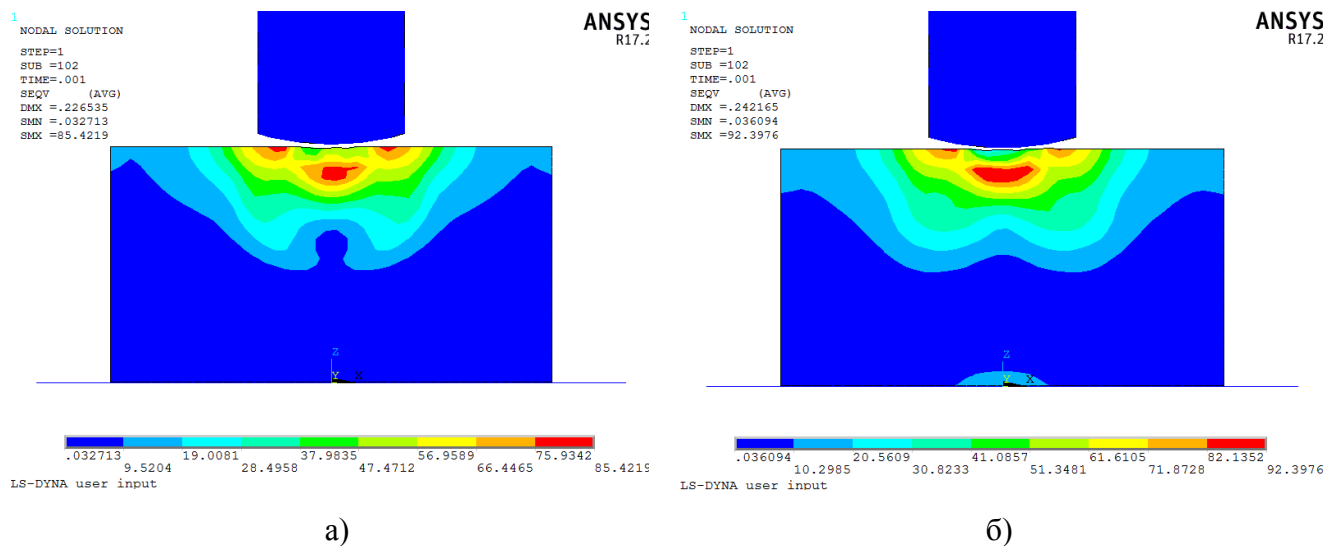


Рисунок 45 – Удар стержнем со сферическим торцом диаметром 19 мм с энергией: а) 30 Дж, б) 40 Дж

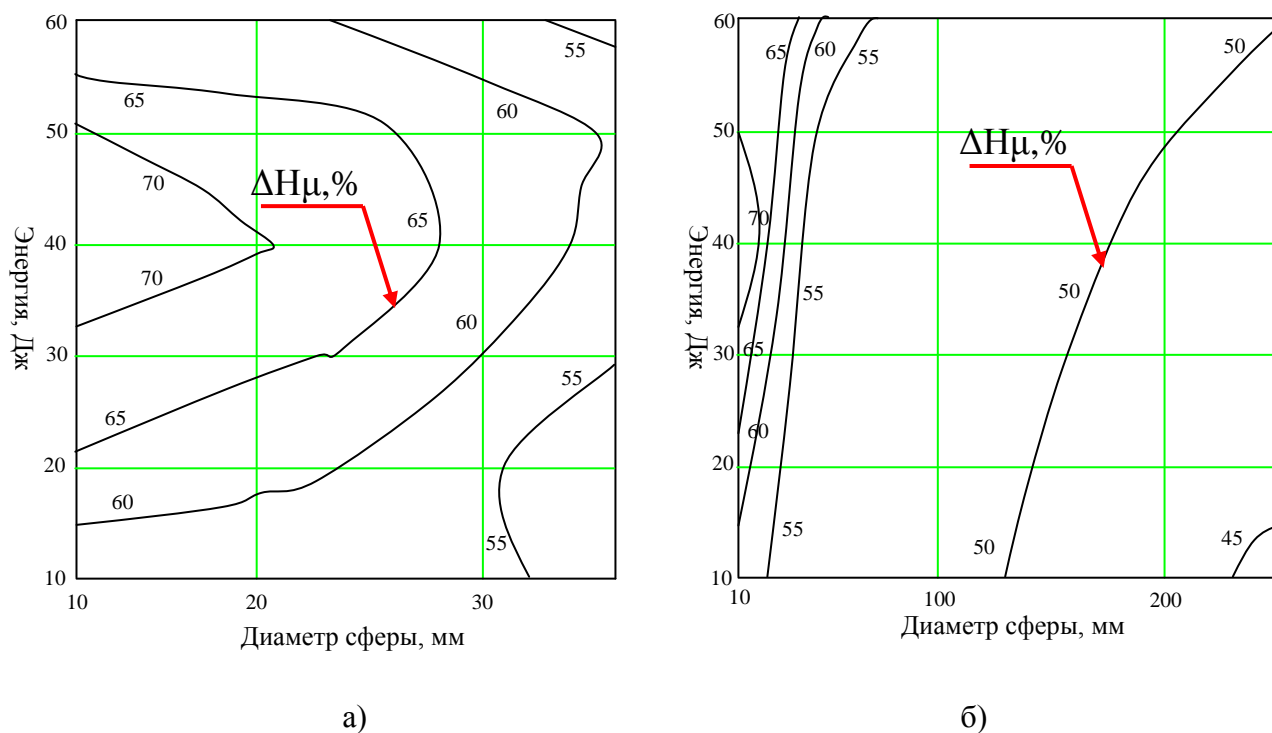


Рисунок 46 – Зависимость распределения степени упрочнения ΔH_{μ} на поверхности от энергии удара и диаметра сферы на торце стержня для диапазонов диаметра сферы: а) от 10 до 36 мм, б) от 10 до 250 мм

Обработка инструментами-стержнями со сферическим торцом позволяет создать наклепанный поверхностный слой со степенью упрочнения до 70% с глубиной упрочнения до 6 мм.

В результате исследования конечно-элементной модели таким по конструктивно-технологическим и технологическим параметрам МК ВДУ как энергия удара A и диаметр инструмента $D_{И}$ установлено, что при единичном ударе наиболее эффективными являются инструменты в виде шара и цилиндрического стержня со сферическим торцом при следующих значениях $D_{И} = 19...27$ мм и $A = 30...50$ Дж. В результате деформационного воздействия формируется упрочненный поверхностный слой глубиной h до 10 мм и максимальной степенью упрочнения $\Delta H_{\mu max}$ до 80%.

Установленный диапазон параметров позволит повысить эффективность процесса МК ВДУ и обеспечит формирование благоприятной структуры материала. Сведения о максимальной формируемой степени упрочнения в поверхностном слое в зависимости от энергии удара, формы и размера инструмента представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Распределение максимальной степени упрочнения $\Delta H_{\mu max}$ (в %) на поверхности в зависимости от энергии удара, формы и диаметра инструмента

Тип инструмента	A , Дж	$D_{И}$, мм					
		9	12	19	27	36	∞
Шар	10	56	64	70	60	-	-
	20	58	69	76	56	-	-
	30	69	72	80	62	-	-
	40	71	72	71	55	-	-
	50	69	79	74	67	-	-
	60	62	71	62	61	-	-
Цилиндрический стержень со сферическим торцом	10	-	57	61	54	54	45
	20	-	67	62	58	53	53
	30	-	68	64	67	56	51
	40	-	73	66	71	57	47
	50	-	72	65	68	61	47
	60	-	62	55	64	52	48

На втором этапе исследования конечно-элементной модели определяется область эффективных значений коэффициента перекрытия пластических отпечатков K .

Для получения $K = 0,2 \dots 0,8$ моделировалась серия из 5 ударов. Схема нанесения ударов представлена на рисунке 47.

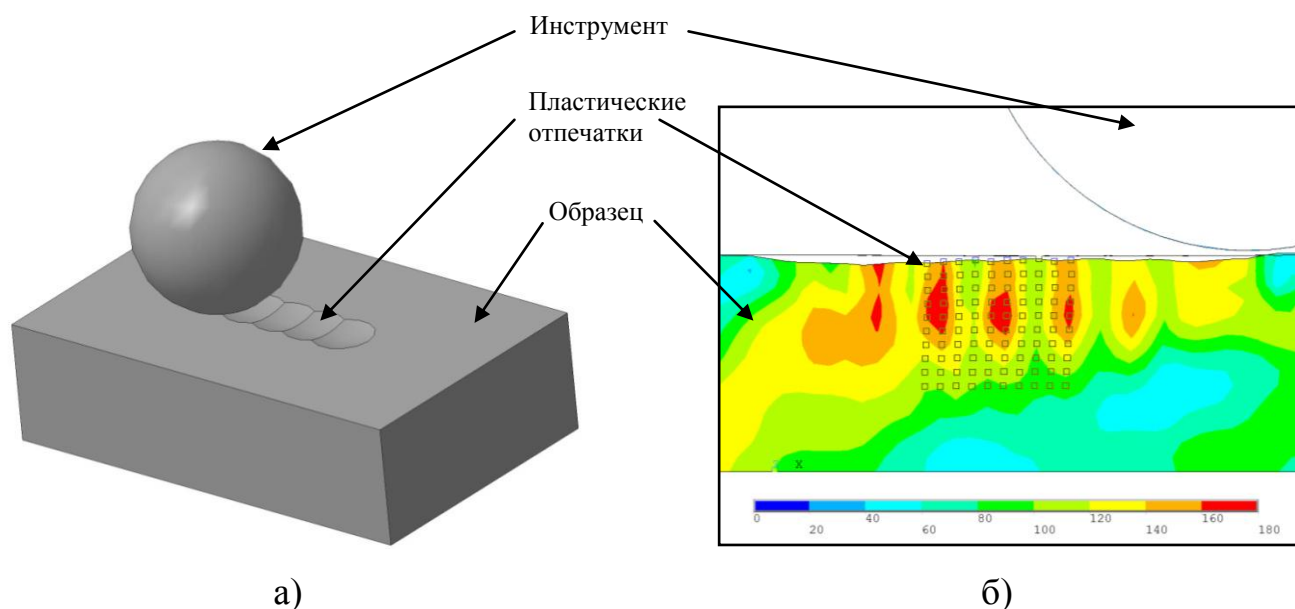
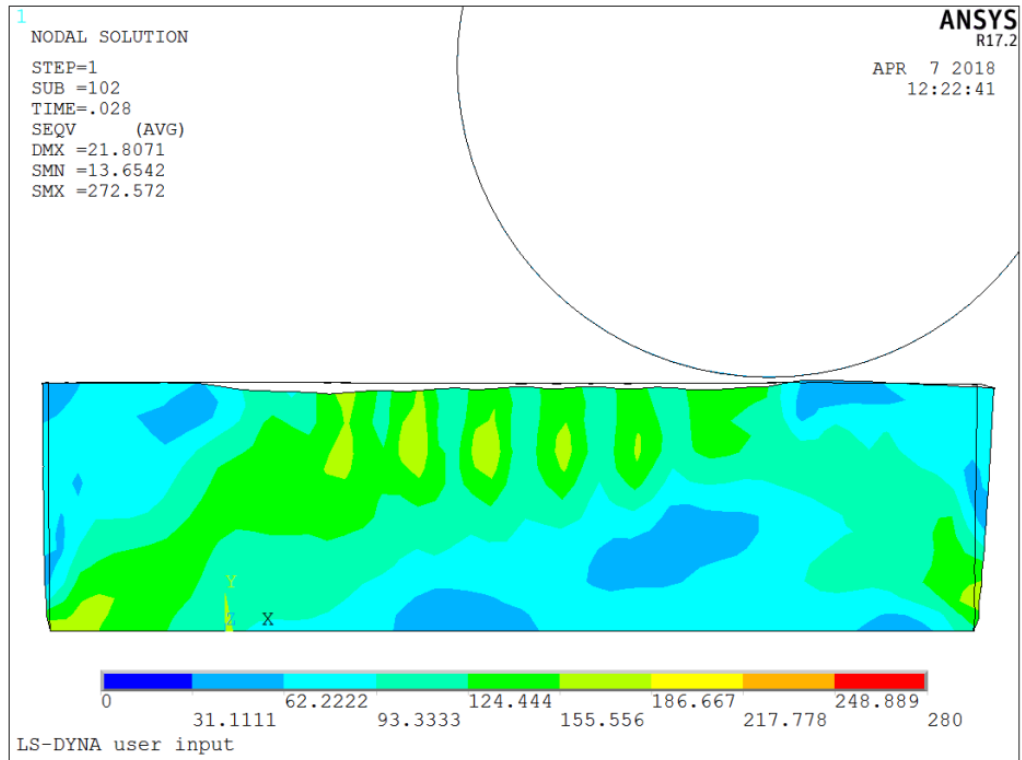


Рисунок 47 – Схема моделируемого процесса упрочнения и результаты моделирования: а) схема процесса упрочнения, б) распределение полей эквивалентных напряжений (в МПа) после моделирования упрочнения с $K = 0,2$

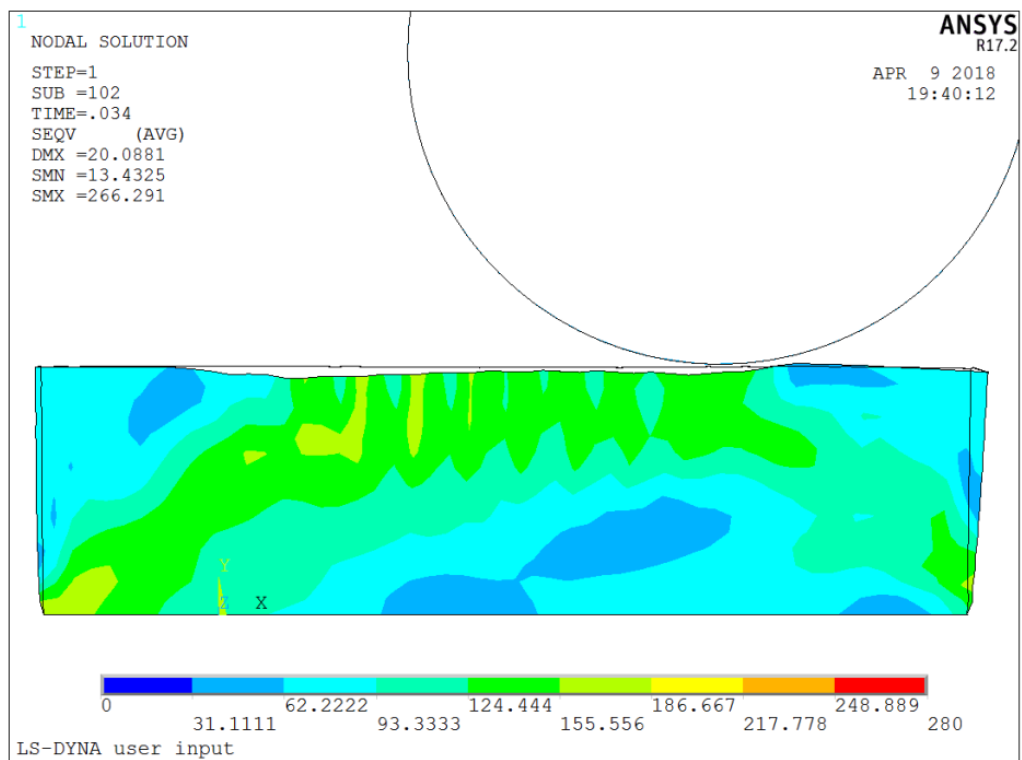
В результате моделирования получены следующие картины распределения эквивалентных напряжений в поверхностном слое при моделировании упрочнения с различными коэффициентами перекрытия пластических отпечатков K (рисунок 48) шарами с энергией ударов 30...50 Дж.

Аналогичные картины упрочнения получены и при упрочнении стержнями со сферическим торцом.

В соответствии с рисунком 49 в указанных точках под пластическими отпечатками определены значения эквивалентных напряжений, которые переведены в значения микротвердости. По полученным результатам строятся эпюры и графики распределения степени упрочнения в поверхностном слое (рисунки 50-52), на основании которых и производится сравнительный анализ.

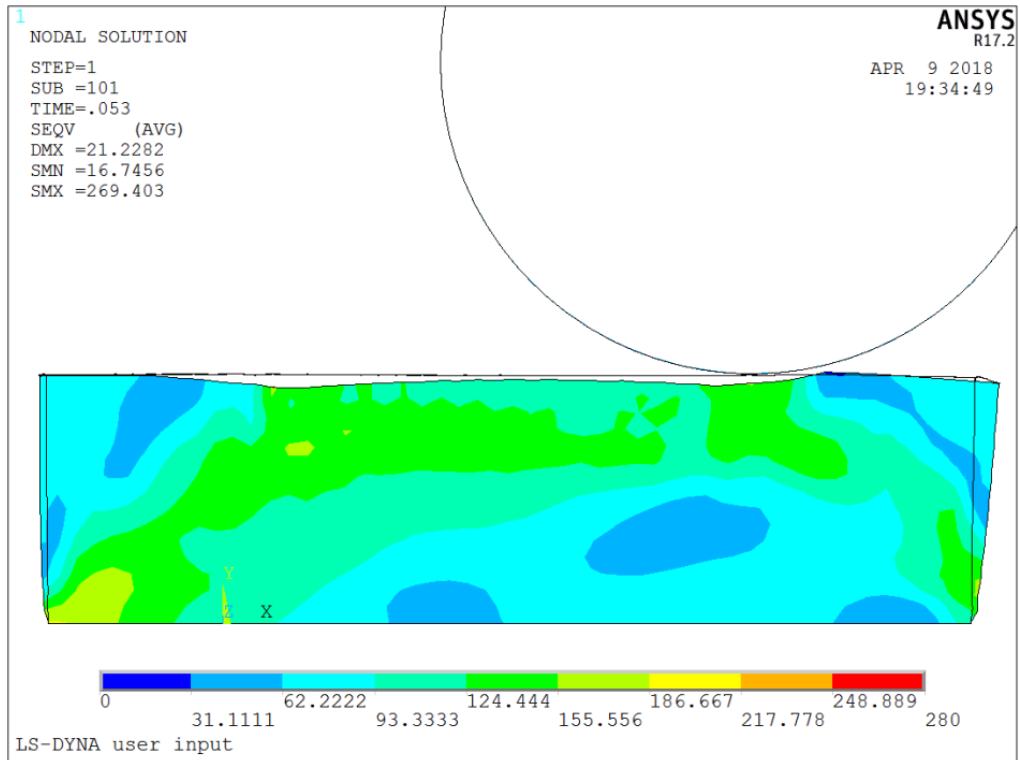


$$K = 0,2$$

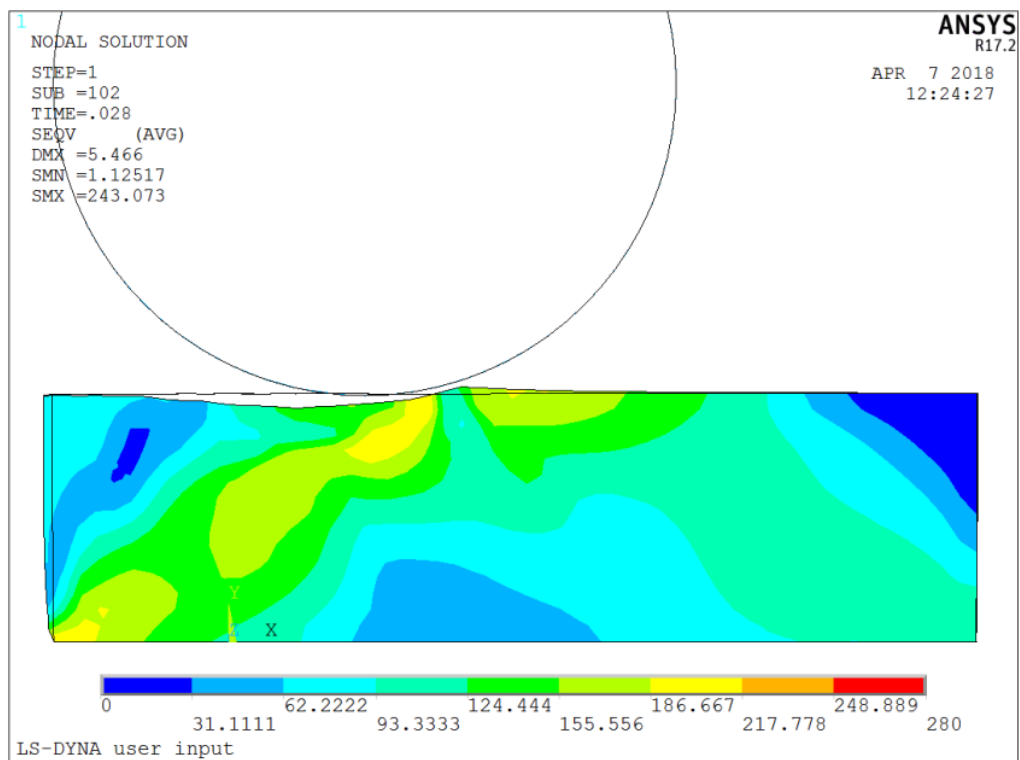


$$K = 0,4$$

Рисунок 48 - Результаты моделирования упрочнения (в МПа) с различными значениями K



$$K = 0,6$$



$$K = 0,8$$

Рисунок 48 – Продолжение. Результаты моделирования упрочнения (в МПа) с различными значениями K

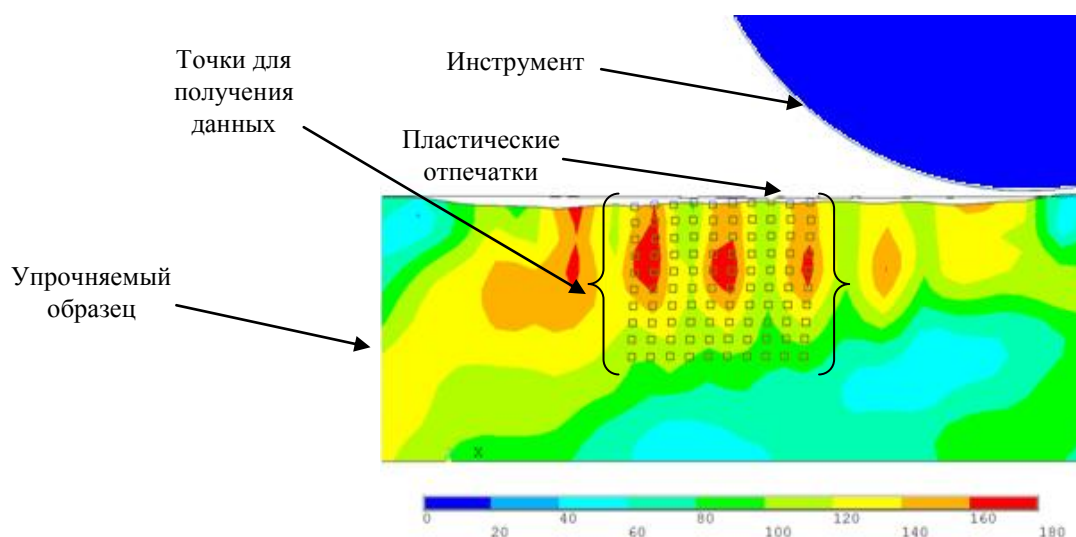


Рисунок 49 – Распределение полей эквивалентных напряжений (в МПа) после моделирования упрочнения с коэффициентом перекрытия $K = 0,2$

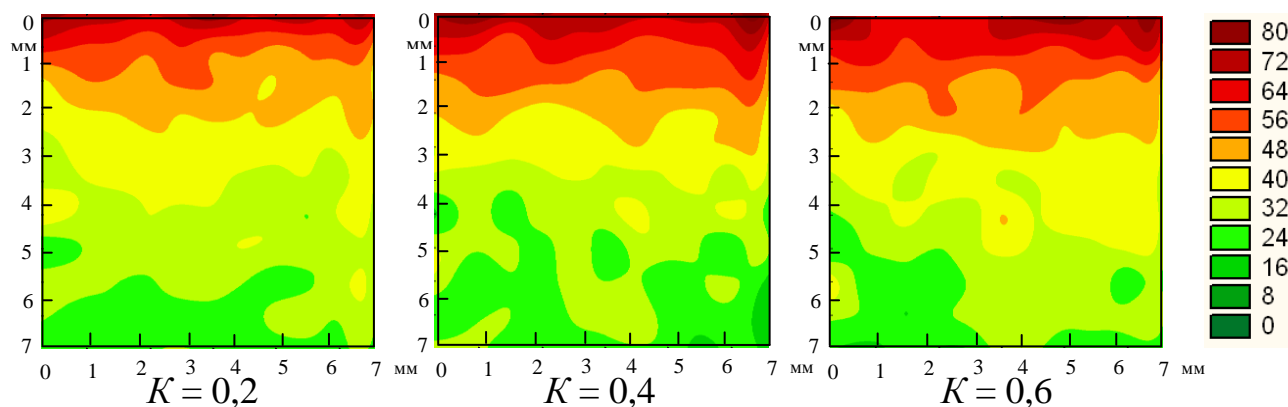


Рисунок 50 – Карта распределения степени упрочнения ΔH_{μ} в поверхностном слое МК ВДУ шаром

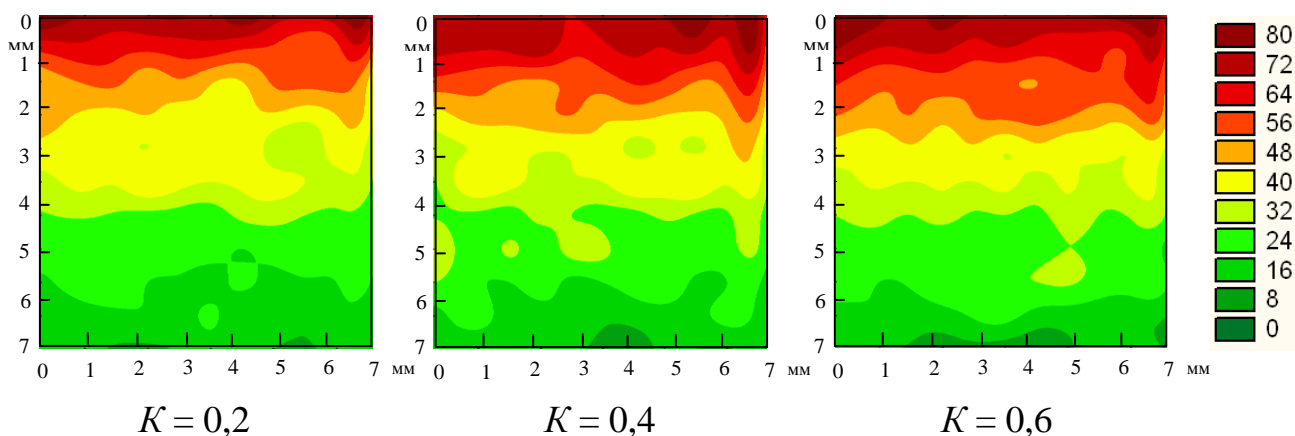


Рисунок 51 – Карта распределения степени упрочнения ΔH_{μ} в поверхностном слое после МК ВДУ стержнем со сферическим торцом

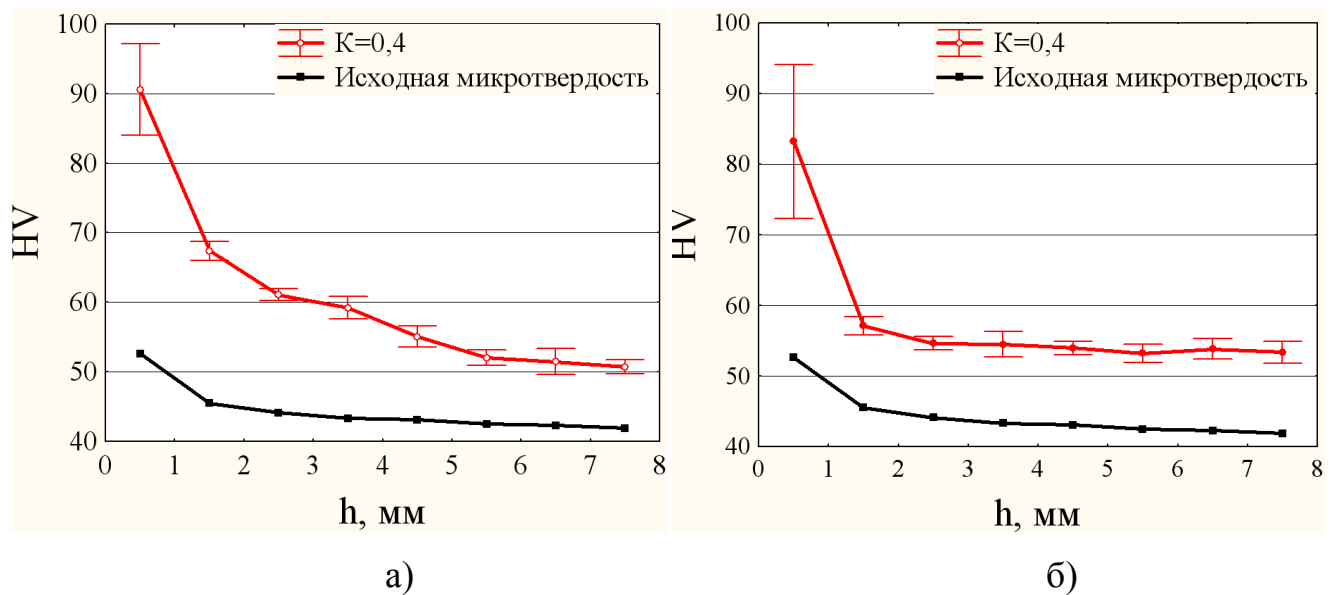


Рисунок 52 – Микротвердость в поверхностном слое после МК ВДУ: а) шаром, б) стержнем со сферическим торцом

Карты распределения степени упрочнения в поверхностном слое строились с учетом того, что дефектный слой материала после упрочнения удаляется на глубину 1 мм, так как глубина пластических отпечатков достигает 0,8 мм. Учет результатов моделирования ведется, начиная с глубины 1 мм. На графиках за нулевую поверхность принята поверхность образца после удаления слоя дефектного материала.

Установлено, что шар и стержень со сферическим торцом диаметром 19 мм обеспечивают максимальную степень упрочнения более 110%, однако меньшую глубину упрочнения. При увеличении диаметра инструмента снижается максимальная степень упрочнения, но возрастает глубина упрочнения и достигает 10 мм. В качестве инструмента рекомендуется использование шаров диаметром 27 мм и цилиндрических стержней с диаметром сферы на торце 27 мм при $K = 0,2...0,6$. Учитывая необходимость дальнейшей механической обработки, энергия удара должна составлять 30...50 Дж для обеспечения большей глубины упрочнения.

Коэффициент перекрытия $K = 0,8$ является критическим при обработке АМг сплавов, так как в пятне контакта возникает избыточное давление и происходит разрушение материала.

Для выявления возможности дальнейшего повышения глубины и степени упрочнения поверхностного слоя осуществлено моделирование многопроходной обработки МК ВДУ. При моделировании многопроходной обработки установлено предельное количество проходов для каждого из режимов: для $K = 0,2 - 3$ прохода, для $K = 0,4$ и $0,6 -$ по 2 прохода. Дальнейшая обработка приводит к переупрочнению и разрушению поверхности детали.

На основании проведенных расчетов предложена регрессионная математическая модель, описывающая распределение степени упрочнения по глубине в зависимости от технологических и конструктивно-технологических параметров МК ВДУ.

Вид уравнения $\Delta H_\mu = f(h, D_{И}, A, K)$:

$$\Delta H_\mu = a_1 - a_2h + a_3hA + a_4hD_{И} + a_5h^2 - a_6D_{И}^2 + a_7hK. \quad (38)$$

Значения коэффициентов $a_1 - a_7$ для подстановки в математическую модель сведены в таблицу 9.

Таблица 9 – Значения коэффициентов для подстановки в математическую модель

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

Предложенная математическая модель для расчета степени упрочнения объясняет 96,86% и 97,5% вариации зависимой величины (для шара и стержня соответственно). Адекватность модели оценивается по степени совпадения предсказанного и наблюдаемого значений зависимой величины. Систематических отклонений не наблюдается. Разброс остатков (расхождение предсказанных и

наблюдаемых значений в факторном пространстве) имеет хаотичный характер, что говорит об отсутствии корреляции между ними. Ошибки модели подчиняются нормальному закону распределения (рисунок 53). Можно сделать вывод о том, что модель достаточно адекватно описывает расчетные данные.

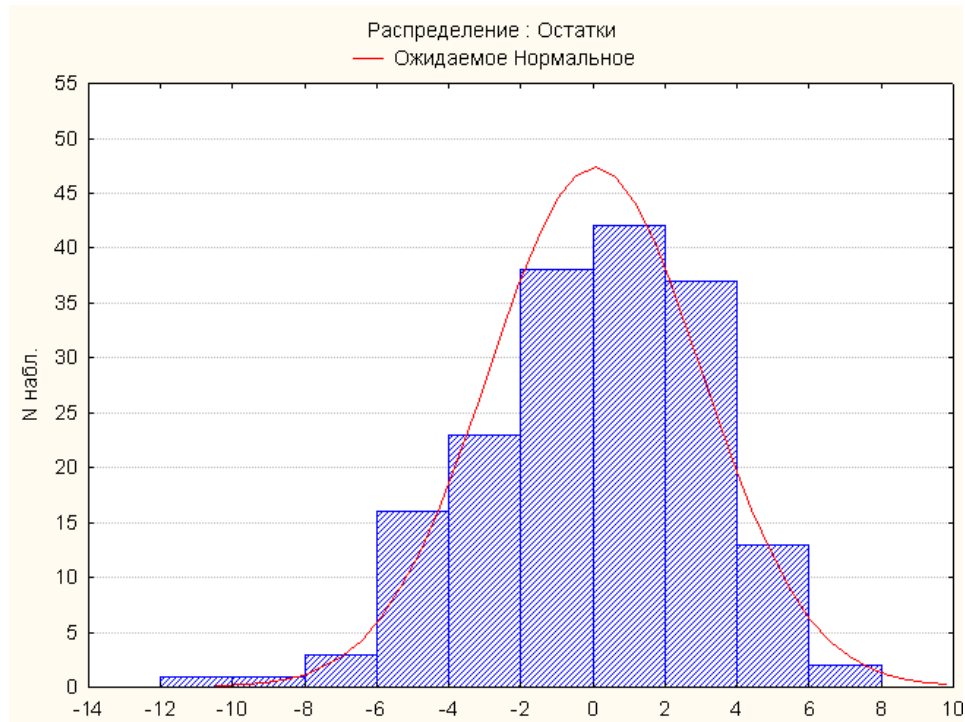


Рисунок 53 – Закон распределения остатков

На следующем этапе производится моделирование МК ВДУ, позволяющее определить эффективные значения таких конструктивно-технологических параметров как суммарное давление p в очаге деформации, соотношение суммы площадей поперечного сечения инструментов и волновода $S_{\text{ОТН}}$ и боковой зазор между соседними пластическими отпечатками δ' .

Давление в очаге деформации оценивалось по отношению силы удара к площади пластического отпечатка, формируемого в результате ударного воздействия инструмента на упрочняемую поверхность (35). При этом также учитывалось соотношение суммы площадей поперечного сечения инструментов и волновода $S_{\text{ОТН}}$. Значение силы удара $P_{\text{УД}}$ неизменно и рассчитано на основании соотношений (28-32) при энергии удара 50 Дж.

Результаты исследований представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты исследований p и $S_{\text{отн}}$

$N_{\text{и}}$, шт	Инструмент											
	Шар 27 мм			Шар 19 мм				Стержень со сферическим торцом диаметром 27 мм				
	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	5
Площадь инструмента в наибольшем сечении, мм ²	572	1144	1716	283	566	849	1132	78	156	234	312	390
$S_{\text{отн}}$	0,32	0,63	0,95	0,16	0,31	0,47	0,63	0,04	0,09	0,13	0,17	0,22
Площадь пятна контакта, мм ²	107	130	142	35	70	105	135	33	66	99	132	165
p , Н/мм ²	590	347	130	870	567	345	90	950	689	360	295	130

При неизменной силе удара и изменении $S_{\text{отн}} = 0,32 \dots 0,95$ происходит увеличение площади пятна (пятен) контакта инструментов и упрочняемой поверхности и снижение давления в пятне контакта в 4,5 раза для шаров диаметром 27 мм. При увеличении параметра $S_{\text{отн}}$ в диапазоне 0,16...0,63 давление p уменьшается в 9,7 раза для шаров диаметром 19 мм. Для инструментов-стержней со сферическим торцом диаметром 27 мм возможно снижение параметра p в 7,3 раз при увеличении значения параметра $S_{\text{отн}}$ от 0,04 до 0,22.

При данных значениях параметров p и $S_{\text{отн}}$ установлены значения параметров $K_{\text{э}}$, ΔH_{μ} , h . Графики зависимостей ΔH_{μ} и h от $S_{\text{отн}}$ представлены на рисунках 54 и 55.

Установлено, что при неизменной энергии удара, ΔH_{μ} более 80% и h более 8 мм обеспечивается, когда соотношение суммарной площади инструментов к площади волновода лежит в диапазоне от 0,2 до 0,8, при условии что количество инструментов в системе нагружения не более 3.

Также установлен эффективный диапазон значений параметра δ' , обеспечивающий наибольшие глубину и степень упрочнения. Так, величина δ' зависит от размера пластического отпечатка (δ) формируемого инструментом в процессе упрочнения и составляет от 0 до $\delta/2$.

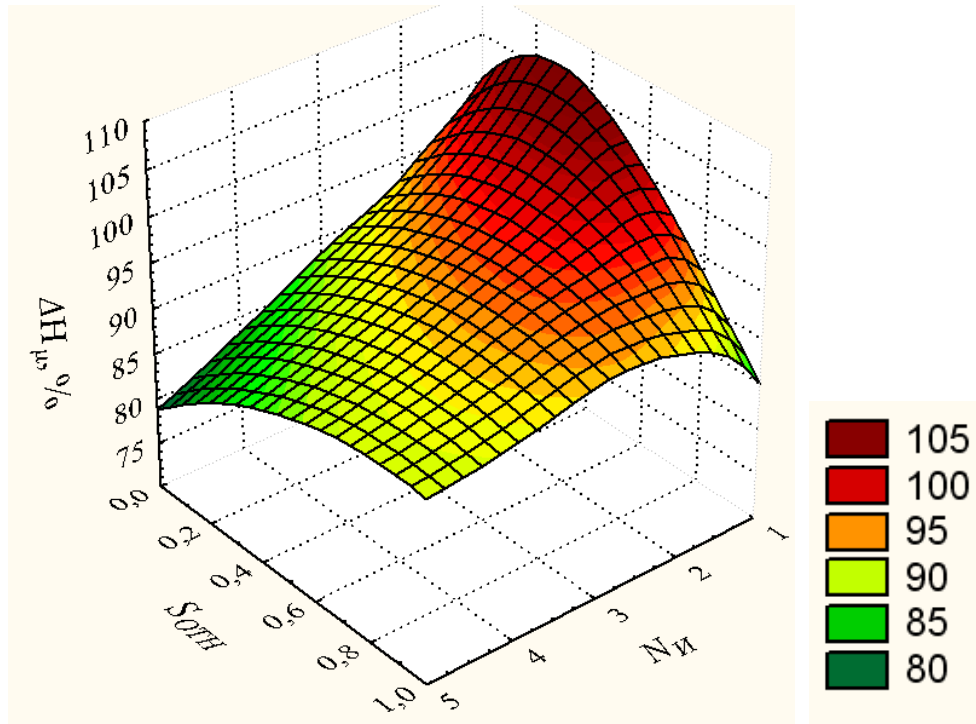


Рисунок 54 – Зависимость степени упрочнения ΔH_{μ} от соотношения суммы площадей поперечного сечения инструментов и волновода $S_{отн}$ и количества инструментов $N_{и}$

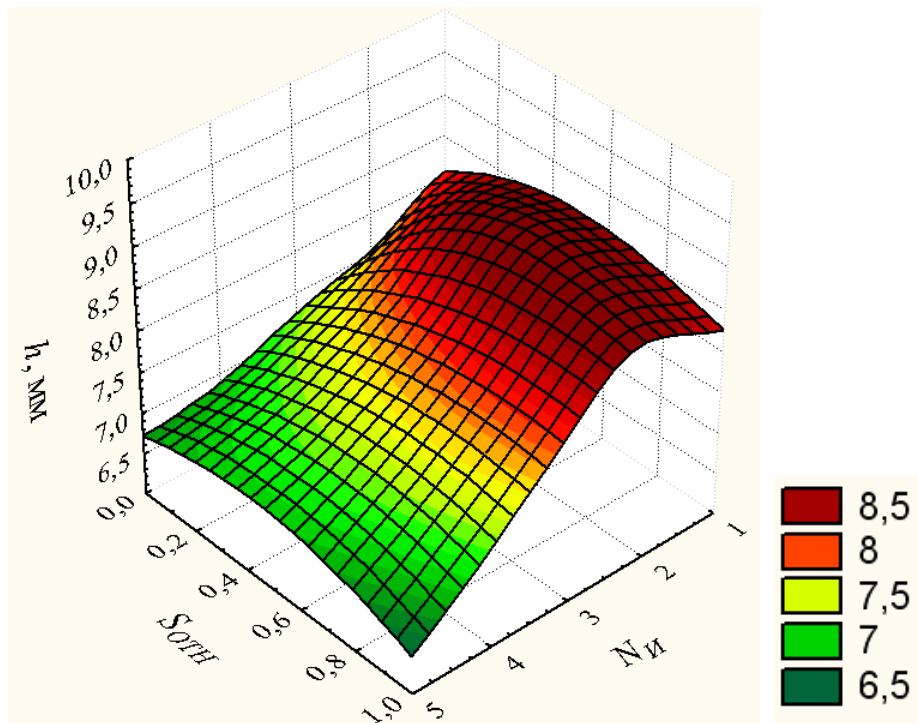


Рисунок 55 – Зависимость глубины упрочнения h от соотношения суммы площадей поперечного сечения инструментов и волновода $S_{отн}$ и количества инструментов $N_{и}$

Установлено, что при неизменной энергии удара наибольшие коэффициент передачи энергии, глубина и степень упрочнения ($K\varepsilon > 45\%$; $\Delta H_\mu > 80\%$; $h > 8\text{мм}$) обеспечивается при условии, что в системе нагружения находится от 2 до 3 инструментов, а отношение суммарной площади инструментов к суммарной площади волноводов лежит в диапазоне от 0,2 до 0,8.

Установлены рациональные значения суммарных давлений p в очаге деформации и соотношения суммы площадей поперечного сечения инструментов и волновода $S_{\text{ОТН}}$ 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 диаметре 19 мм – $90 < p < 870$ МПа (давление снижено в 1,3...9,6 раза по сравнению с одноконтakтным вариантом), при диаметре 27 мм – $130 < p < 590$ МПа (давление снижено в 1,45...4,5 раза);

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

3.3 Технологическое оборудование для экспериментальных исследований

Для обеспечения необходимых параметров качества КПСД, изготавливаемых из АМг сплавов, и внедрения МК ВДУ в технологический процесс, необходимо провести следующие экспериментальные исследования по определению: глубины h и степени упрочнения ΔH_μ поверхностного слоя, ударной вязкости KCU материала, условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и предела прочности σ_B , микроструктуры материала, а также доминирующего эксплуатационного параметра – сопротивления усталости. Исследования осуществляются на специально подготовленных образцах из сплава АМг2 в соответствии со стандартными методиками. Испытания проводились как на неупрочненных, так и обработанных МК ВДУ образцах. Выбор эффективных режимов МК ВДУ основан на результатах анализа конечно-элементной модели.

При подготовке образцов для испытаний учитывались особенности материала: при нагреве в алюминиевых деформируемых сплавах могут протекать рекристаллизационные процессы, приводящие, как правило, к некоторой потере прочности в результате уменьшения плотности дефектов кристаллической решетки и роста зерна. Таким образом, с целью сохранения упрочненного поверхностного слоя следует избегать интенсивной механической обработки и применять охлаждение.

Предварительная подготовка образцов для МК ВДУ осуществлялась на трехкоординатном обрабатывающем центре с ЧПУ Akira Mi 745 для обеспечения необходимых геометрических параметров.

Обработка МК ВДУ осуществлялась на известной установке (рисунок 56) [69, 104]. Основным рабочим органом установки является генератор механических импульсов (ГМИ) 1 (рисунок 57). В носовой части ГМИ 1 устанавливается волновод с инструментом 2, который статически поджимается к образцу 3 ГМИ через виброгасящий элемент 4. ГМИ 1 крепится к вертикальной плите 5, имеющей возможность перемещения по направляющим 6 при помощи гидроцилиндра 7, прикрепленного к накладкам 11 через траверсу 8 пальцем 9. Накладки 10 позволяют жестко фиксировать плиту 5 на направляющих 6. Накладки 11 позволяют регулировать исходное положение плиты 5 с учетом высоты образца 3. Направляющие 6 устанавливаются на основании 13, к которому жестко крепятся направляющие 14 для подачи рабочего стола 15. Закрепление образца 3 на рабочем столе 15 осуществляется прихватами 16 с помощью шпилек 17 и гаек 18. Стол 15 перемещается по направляющим 14 гидроцилиндром 20. Приводы гидроцилиндров 7 и 20, а также привод ГМИ 1 присоединены к маслостанции 21, расположенной отдельно с выносным пультом управления 12. Управление технологическими параметрами МК ВДУ: частотой ударов f , энергией ударов A и величиной подачи s осуществляется блоком гидрораспределителей 22 и дросселей 19 расположенных на маслостанции 21.

После МК ВДУ осуществлялась вырезка образцов требуемых размеров на ленточнопильном станке S-380 с применением СОЖ.

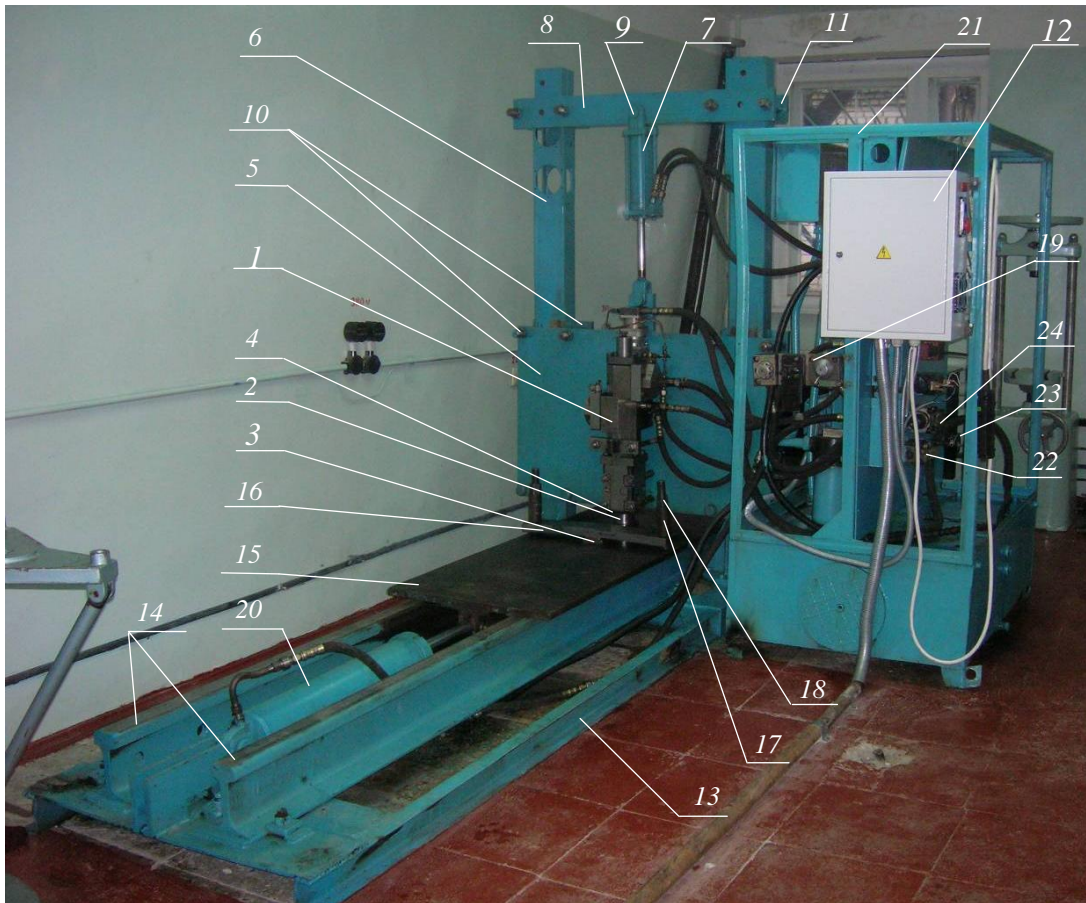


Рисунок 56 – Установка для МК ВДУ

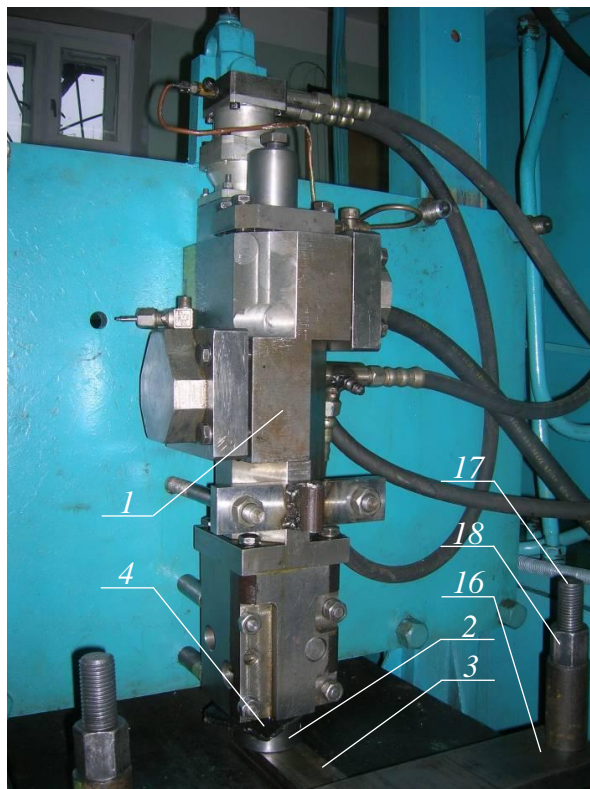


Рисунок 57 – ГМИ для процесса МК ВДУ

Последующие экспериментальные исследования проводились с применением стандартного технологического оборудования.

Измерение микротвердости методом Виккерса осуществлялось в соответствии с ГОСТ 2999-75 [31].

Ударная вязкость определялась в Дж/см² (кгс·м/см²). Для испытания применялись образцы, форма, размер и качество поверхности которых соответствуют указанным в ГОСТ 9454-78 в п. 1.1 [33].

Испытания образцов на статическое растяжение проводились на разрывной машине в соответствии с ГОСТ 1497-84 [28].

Микроструктурные исследования производились на моторизованном цифровом микроскопе на специально подготовленных микрошлифах.

Испытания по определению сопротивления усталости проводились на серво-гидравлической испытательной машине в соответствии с ГОСТ 25.502-79 [30].

Характеристики оборудования, а также методика осуществления экспериментальных исследований представлены в Приложении А.

3.4 Экспериментальные исследования повышения качества деталей из АМг сплавов многоконтактным ВДУ

При помощи конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA установлены рациональные конструктивные и конструктивно-технологические параметры МК ВДУ, обеспечивающие максимальные значения глубины h и степени упрочнения ΔH_μ поверхностного слоя, однако влияние данных параметров на другие показатели качества не установлено. В связи с этим, для обеспечения комплекса показателей качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств, необходимо определить эффективные режимы МК ВДУ.

Для проведения экспериментальных исследований выбраны следующие режимы МК ВДУ: энергия удара $A = 140 \dots 160$ Дж (общая) – рабочий диапазон

ГМИ; инструменты – шары диаметром 19 мм (4 штуки) и 27 мм (3 штуки), стержни со сферическим торцом диаметром 27 мм (5 штук) – на основании исследований конечно-элементной модели и на экспериментальном стенде; коэффициент перекрытия $K = 0,2...0,6$; количество проходов – один и два (двухпроходная обработка осуществляется в одном ($K + K$) и поперечном ($K \times K$) направлениях). Более полно исследуемые режимы представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Инструменты и режимы для МК ВДУ

Инструменты	Режимы (коэффициент перекрытия K)					
	0,2	0,4	0,6	2 прохода: 0,2 и 0,4	2 прохода: 0,4 и 0,4	2 прохода: 0,4 и 0,6
Шар диаметром 19 мм	+	+	+	-	-	-
Шар диаметром 27 мм	+	+	+	+	+	+
Стержень со сферическим торцом диаметром 27 мм	+	+	+	+	+	+

Примеры упрочненной поверхности представлены на рисунке 58.

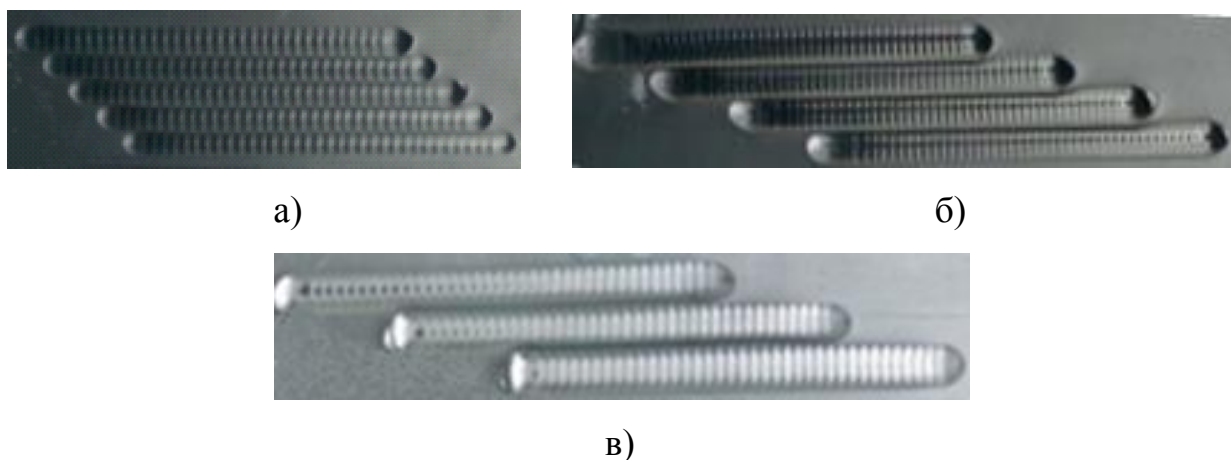


Рисунок 58 – Примеры упрочненной поверхности: а) стержнями со сферическим торцом диаметром 27 мм, б) шарами диаметром 19 мм, в) шарами диаметром 27

мм

После МК ВДУ происходит удаление дефектного поверхностного слоя на глубину 1 мм для обеспечения требований, предъявляемых к КПСД по параметру шероховатости. В связи с этим предпочтительными являются режимы, обеспечивающие наибольшую глубину упрочнения, а не максимальную микротвердость на поверхности.

Результаты экспериментальных исследований глубины упрочнения и микротвердости представлены на рисунке 59.

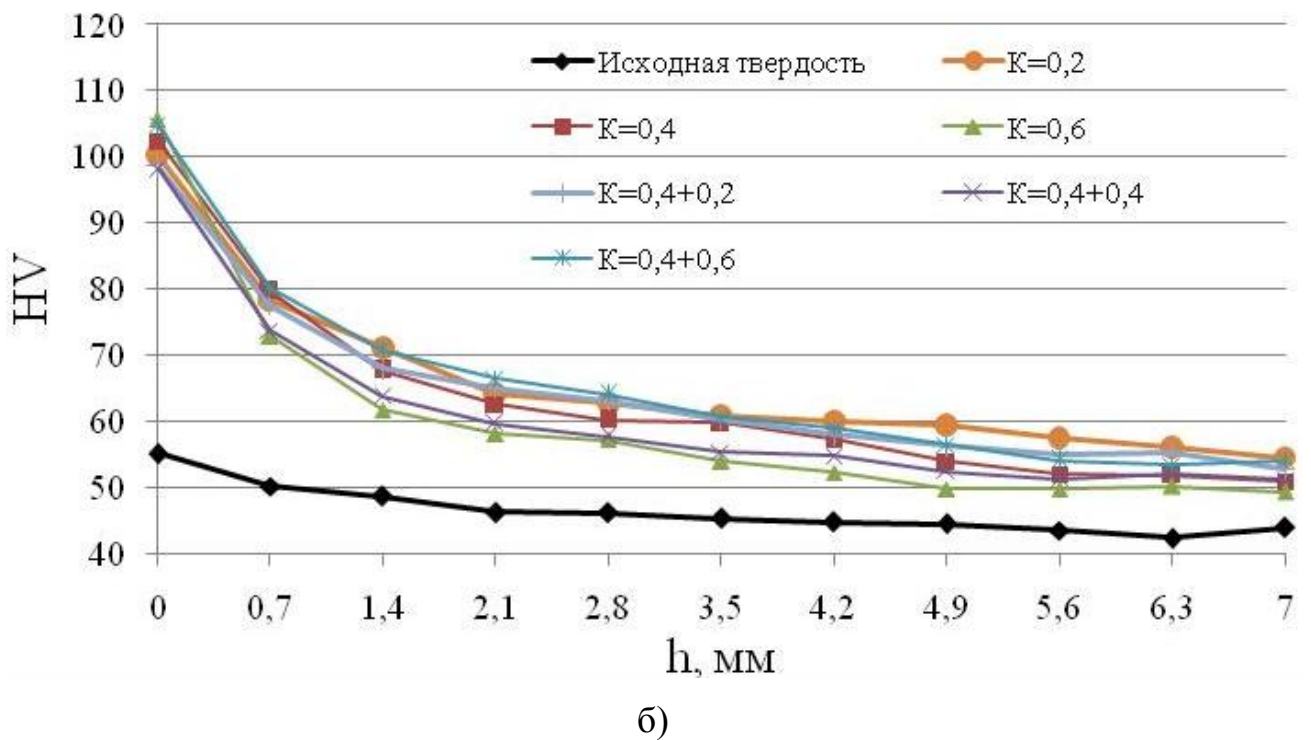
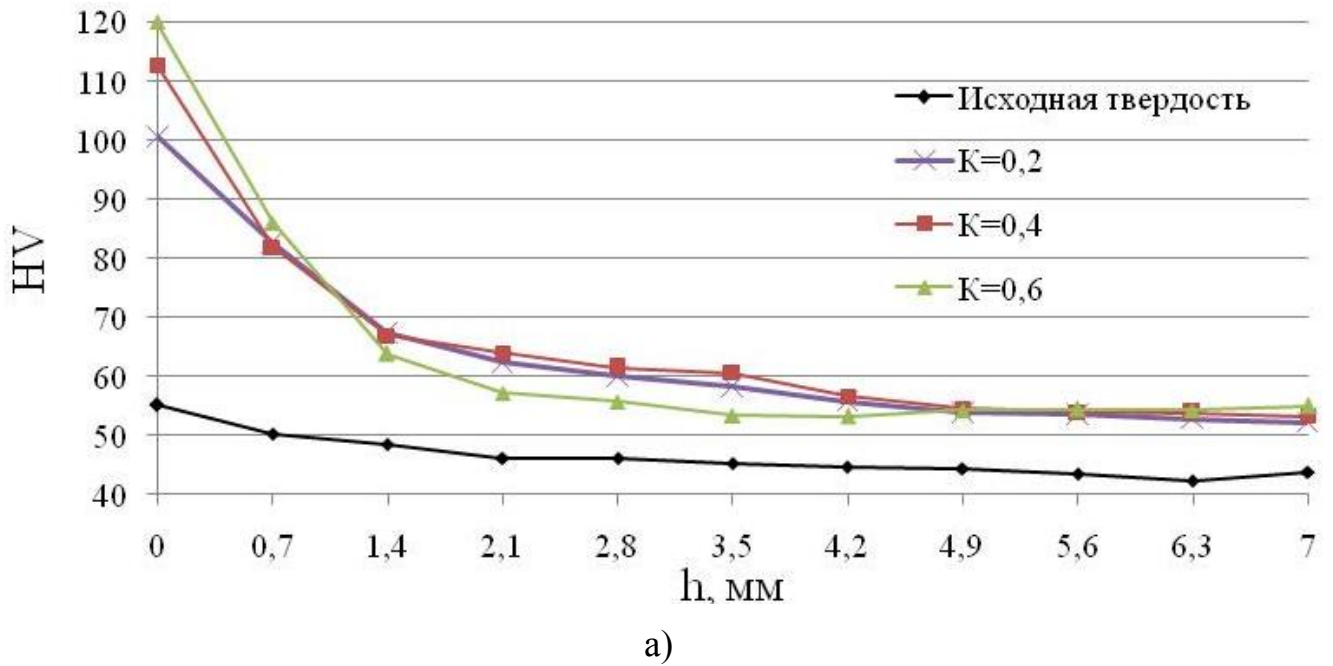
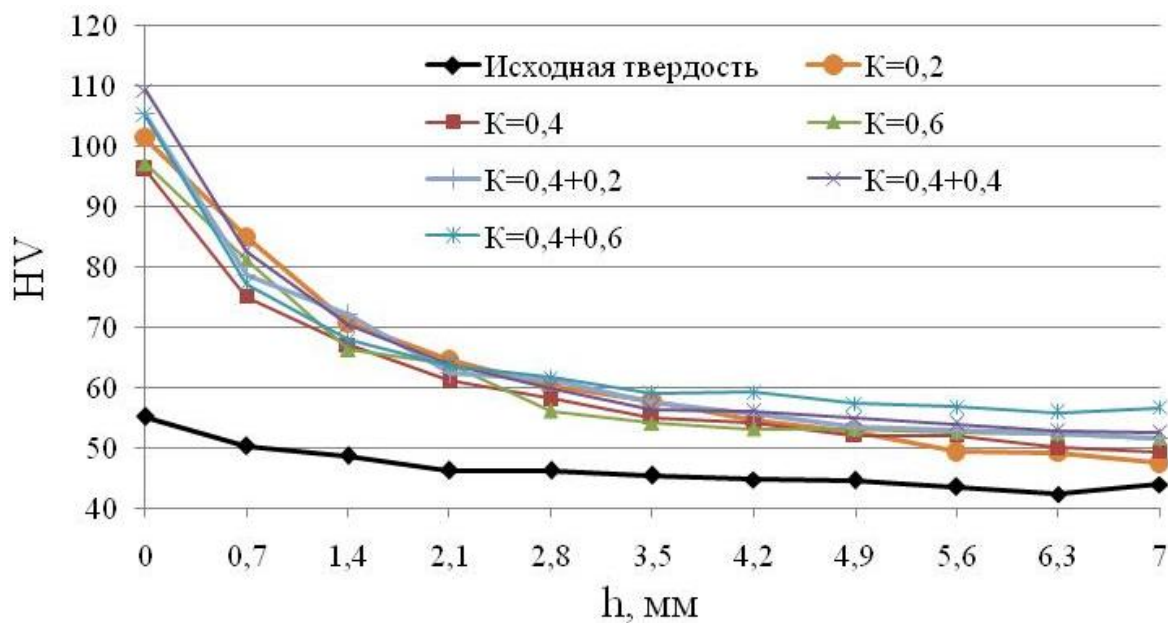


Рисунок 59 - Изменение микротвердости в поверхностном слое после МК ВДУ шарами: а) диаметром 19 мм, б) диаметром 27 мм



в)

Рисунок 59 – Продолжение. Изменение микротвердости в поверхностном слое после МК ВДУ: в) стержнями со сферическим торцом диаметром 27 мм

Из-за близости полученных результатов невозможно определить наиболее эффективный режим. Необходимо провести анализ и установить диапазон режимов, который обеспечит наибольшие значения глубины упрочнения и микротвердости поверхностного слоя. Для этого для каждого из инструментов значения HV после МК ВДУ усреднены, аппроксимированы полиномом третьей степени и определены границы доверительного интервала с вероятностью 0,95. Далее все режимы исследовались на попадание в доверительный интервал: при попадании значений в границы доверительного интервала делался вывод о возможности включения данного режима в диапазон эффективных режимов. Пример графика представлен на рисунке 60, где красная линия – усредненное значение микротвердости, красная пунктирная линия – границы доверительного интервала с вероятностью 0,95, синяя линия – исследуемый режим.

Таким образом, можно выделить следующие диапазоны наиболее эффективных режимов:

- для шаров диаметром 19 мм: $K = 0,2 \dots 0,6$;

- для шаров диаметром 27 мм: $K = 0,2 \dots 0,4$ и режимы с двумя проходами: $K = 0,4$ и $(0,2 \dots 0,6)$;

- для стержней со сферическим торцом диаметром 27 мм: $K = 0,2 \dots 0,6$ и режимы с двумя проходами: $K = 0,4 + (0,2 \dots 0,4)$.

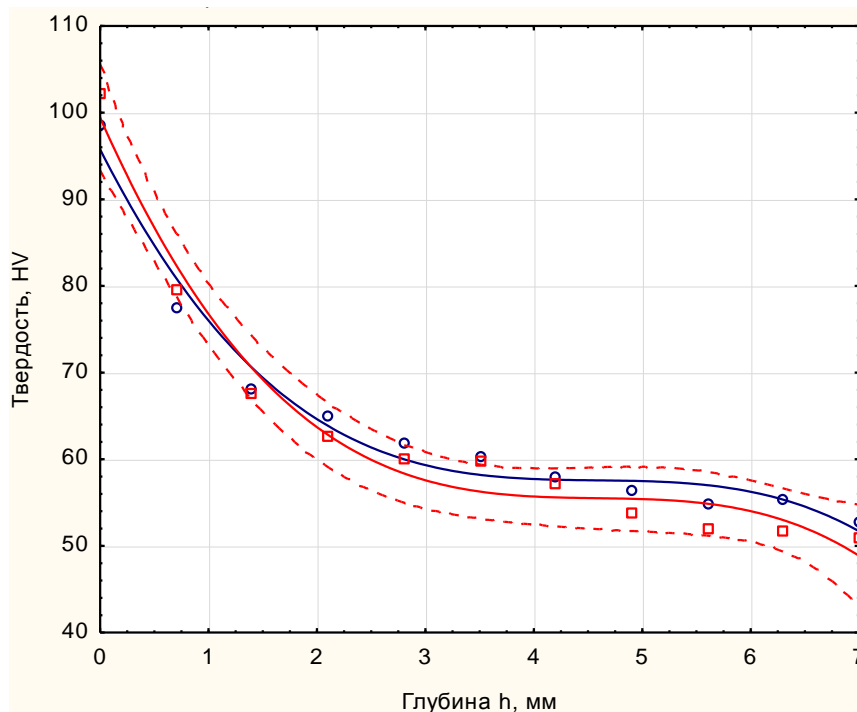


Рисунок 60 – Попадание в доверительный интервал режима $K = 0,4$ при МК ВДУ шарами диаметром 27 мм

Также проведено сравнение карт распределения степени упрочнения в поверхностном слое, полученных моделированием и экспериментальными исследованиями (рисунок 61).

Полученные теоретические данные по распределению степени упрочнения в поверхностном слое с удовлетворительной вероятностью (91%) соответствуют экспериментальным значениям. Полученные результаты можно считать значимыми.

Основные результаты испытаний упрочненных образцов на ударную вязкость представлены на рисунке 63. Для каждого режима испытывалось по 2 образца. Фотографии образцов до и после испытаний представлены на рисунке 62.

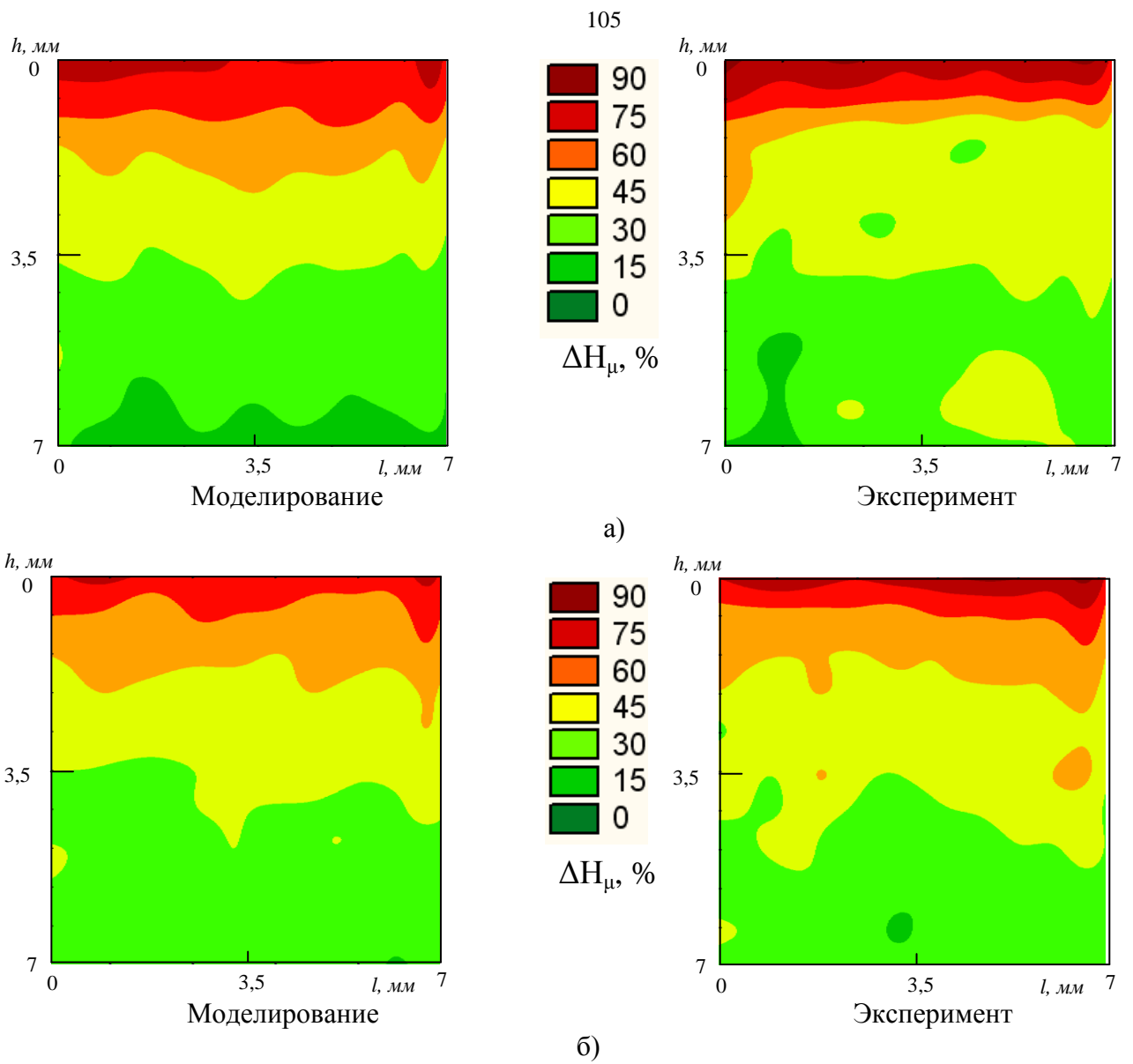
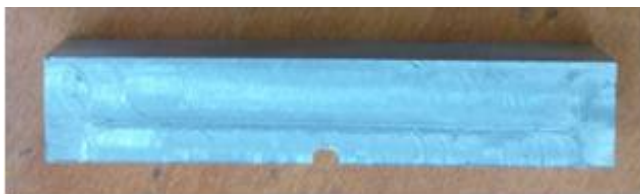
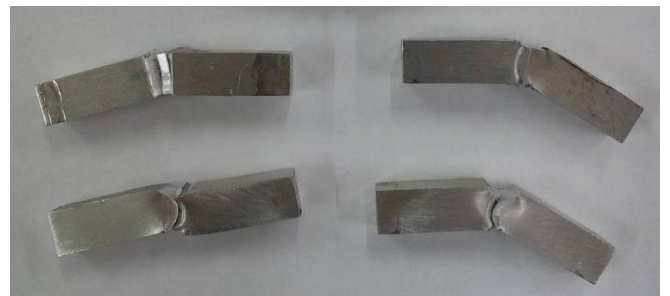


Рисунок 61 - Карты распределения ΔH_{μ} в поверхностном слое после МК ВДУ:

а) шарами диаметром 19 мм, $K = 0,4$; б) шарами диаметром 27 мм, $K = 0,4$



а)



б)

Рисунок 62 – Образец для испытаний на ударную вязкость (а)

и образцы после испытаний (б)

Значительного снижения пластических свойств не обнаружено. Максимальное снижение ударной вязкости составило более 13%, при этом твердость повысилась в 1,78 раза. Максимальное повышение твердости составило в 2,1 раза, при этом снижение ударной вязкости составило 4,01% (для $K = 0,6$ шаром диаметром 19 мм).

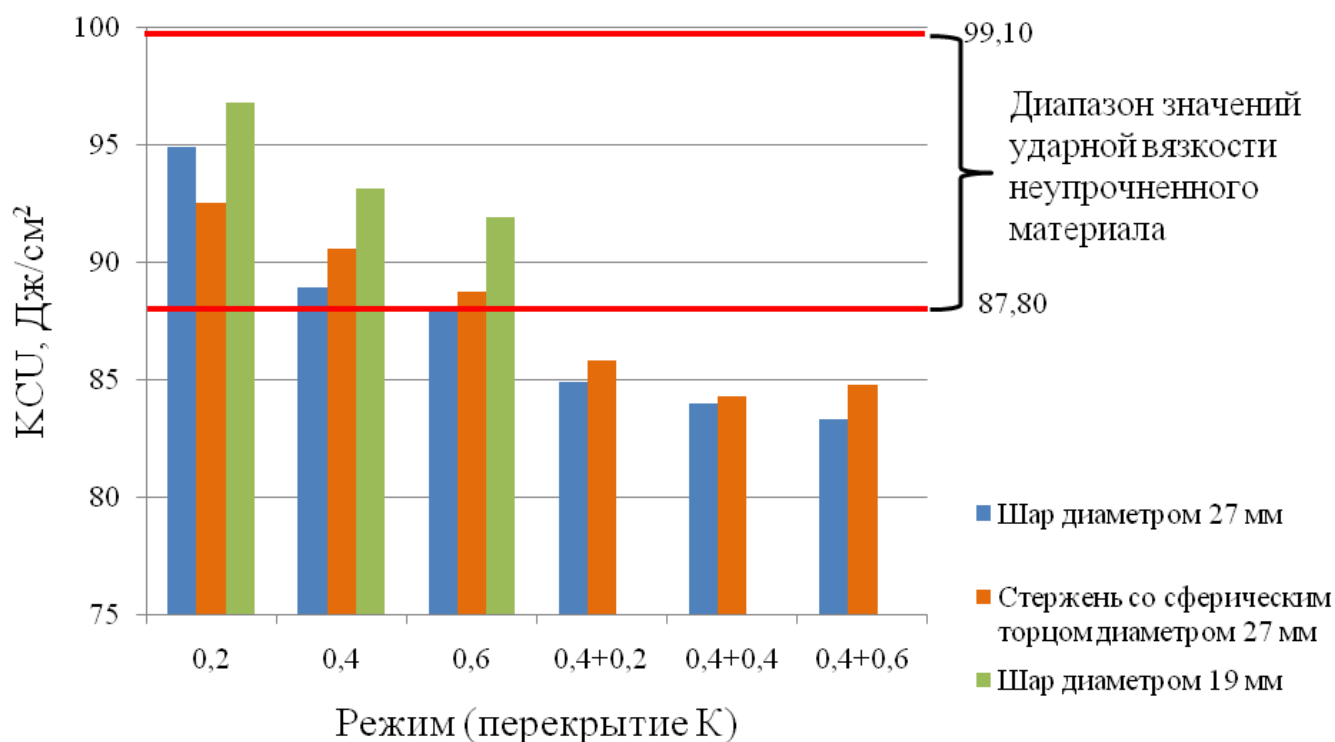


Рисунок 63 – Изменение ударной вязкости образцов после упрочнения

После МК ВДУ при однократной обработке значения ударной вязкости материала попадают в диапазон исходных значений при всех типах инструмента. Двукратная обработка ведет к снижению ударной вязкости более 13%, что отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах материала, таким образом, однократная обработка является более предпочтительной.

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.

Основные результаты испытаний на прочность представлены в таблице 12. Так, при упрочнении сплава АМг2 шарами диаметром 27 мм с $K = 0,2 \dots 0,4$, σ_B

повышается на 19,8%, а $\sigma_{0,2}$ на 48,8% (рисунок 64). При этом относительное удлинение материала в среднем уменьшается на 7-8%.

Таблица 12 – Результаты прочностных испытаний образцов

Коэффициент перекрытия K	Шар диаметром 19 мм			Шар диаметром 27 мм				
	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,4+0,4	0,4×0,4
σ_B	198,4	199,8	200,8	206,3	210,3	194,6	190	190,9
Увеличение σ_B в %	+12,7	+13,5	+14,1	+17,2	+19,8	+10,6	+8,0	+8,5

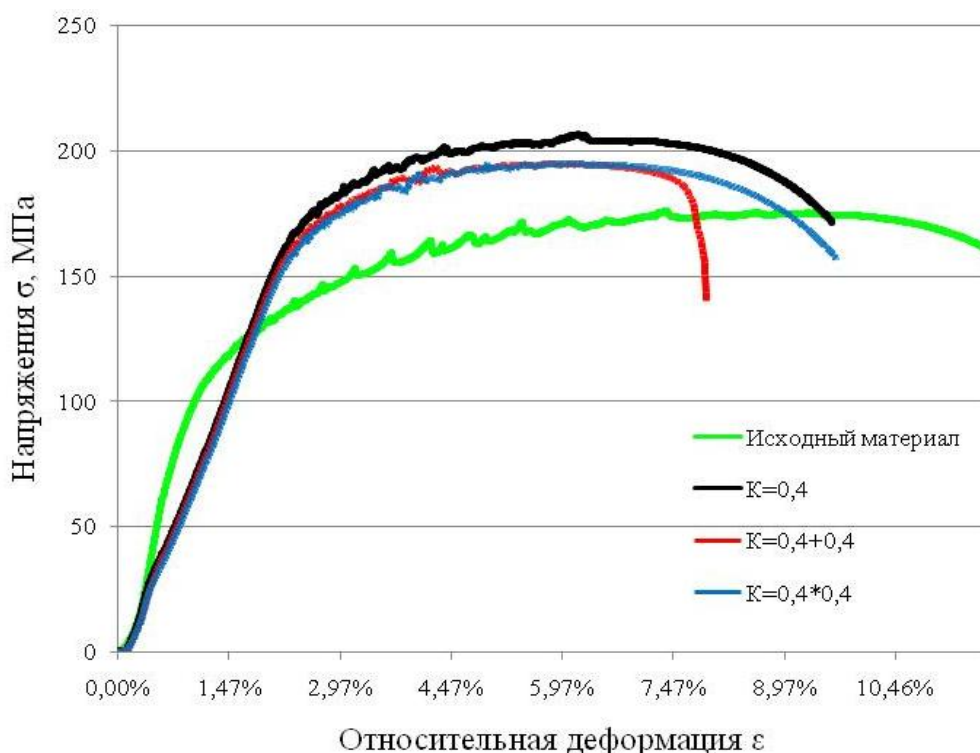


Рисунок 64 - Результаты испытаний на прочность

Повышение предела текучести и предела прочности без существенного снижения пластичности материала положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках детали, в том числе и на сопротивлении усталости.

На основании проведенного комплекса экспериментальных исследований установлено, что наиболее перспективно применение в качестве инструмента для МК ВДУ шаров диаметром 27 мм, так как данный тип инструмента обеспечивает наибольшую глубину упрочнения и степень упрочнения ($h = 8,5 \dots 10$ мм и $\Delta H_{\mu} =$

75...80%), а также повышение прочностных характеристик без потери пластичности при условии однократной обработки с $K = 0,4$.

Следующим шагом проводились исследования микроструктуры материала. Для металлографических исследований подготовлены микрошлифы в соответствии со стандартными методиками [22, 54, 57]. Исследовались образцы из материала АМг2 в состоянии поставки и после обработки МК ВДУ. Режимы упрочнения – однократное и двукратное упрочнение с $K = 0,4$, инструмент – шары диаметром 27 мм. Упрочненные образцы вырезались в плоскости перпендикулярной по отношению к направлению подачи.

Исходная микроструктура материала в состоянии поставки представлена на рисунке. Структура сплава АМг состоит из твердого раствора (α) и вторичных выделений фазы Mg_2Al_3 (интерметаллиды), которые при повышении температуры переходят в твердый раствор (рисунок 65).

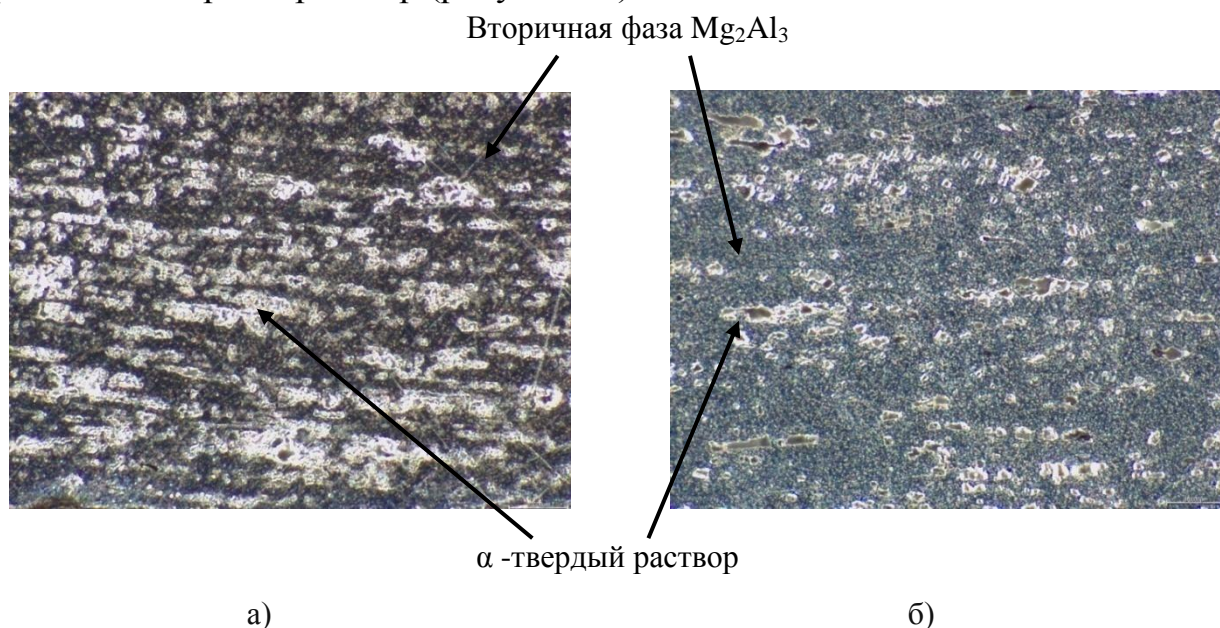


Рисунок 65 – Микроструктура сплава АМг2 в состоянии поставки: а) у края образца, б) в сердцевине образца, $\times 1500$

Материал поставляется в виде листа в нагартованном состоянии. Степень нагартовки составляет 40%. У большинства зерен в данном случае наблюдаются линии скольжения. У края образца линии скольжения наблюдаются более отчетливо и в большем количестве, чем в сердцевине, что обусловлено нагартовкой при изготовлении. Зерна вытянуты в направлении подачи при

изготовлении алюминиевого листа. Размер зерен варьируется от 60 до 130 мкм в длину и менее 10 мкм в ширину (рисунок 66).

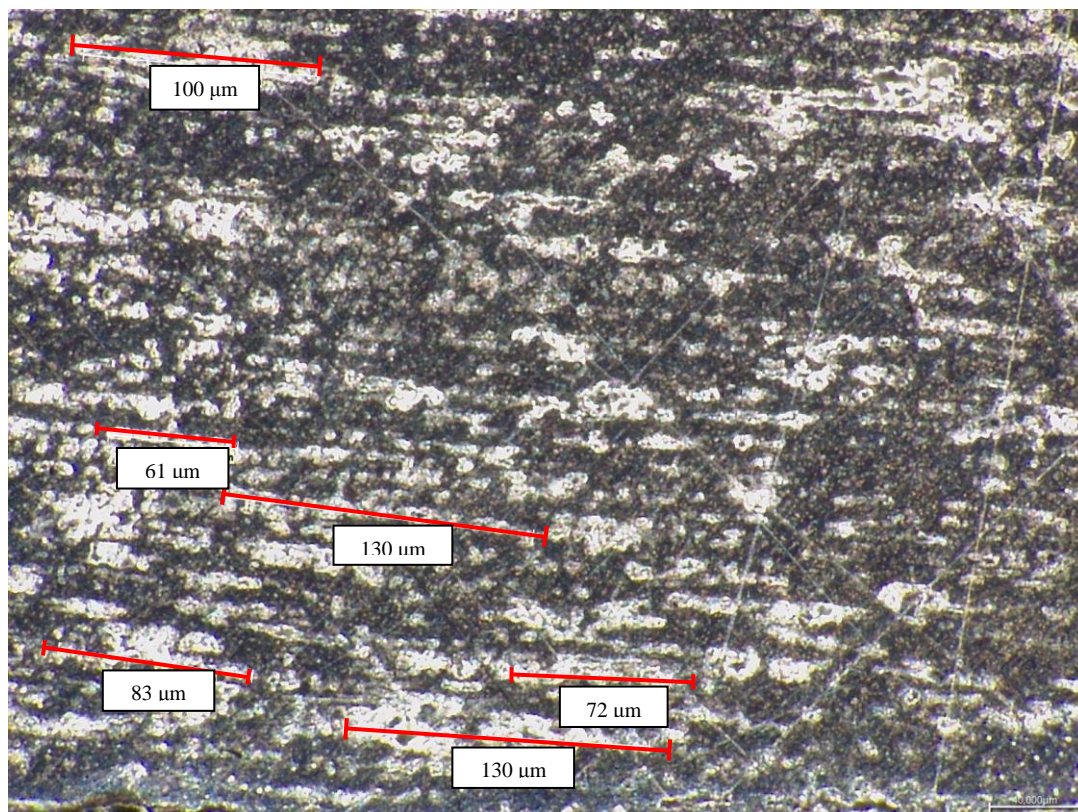


Рисунок 66 – Размер зерен неупрочненного образца, $\times 1000$

Ударное деформационное воздействие на исходный материал ведет к измельчению зерен твердого раствора, что влечет за собой изменение механических свойств. Так, при однократном упрочнении шарами диаметром 27 мм с $K = 0,4$ формируется структура представленная на рисунке 67.

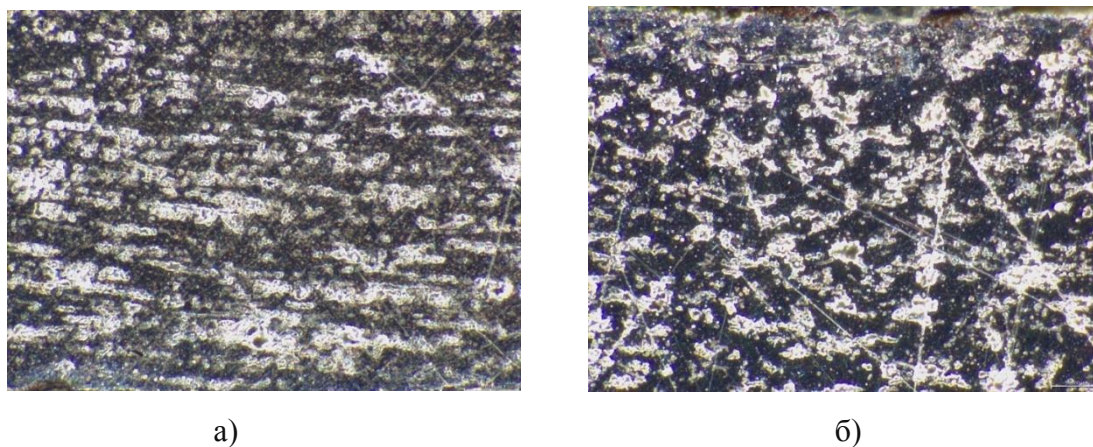


Рисунок 67 – Микроструктура сплава АМг2: а) в состоянии поставки, б) после однократного упрочнения многоконтakтным ВДУ, $\times 1500$

После однократного упрочнения происходит разрушение линий скольжения, формируются отдельные зерна α -твердого раствора с сопоставимыми длиной и шириной. Размер зерен в длину составляет от 12 до 45 мкм, в ширину до 20 мкм (рисунок 68).

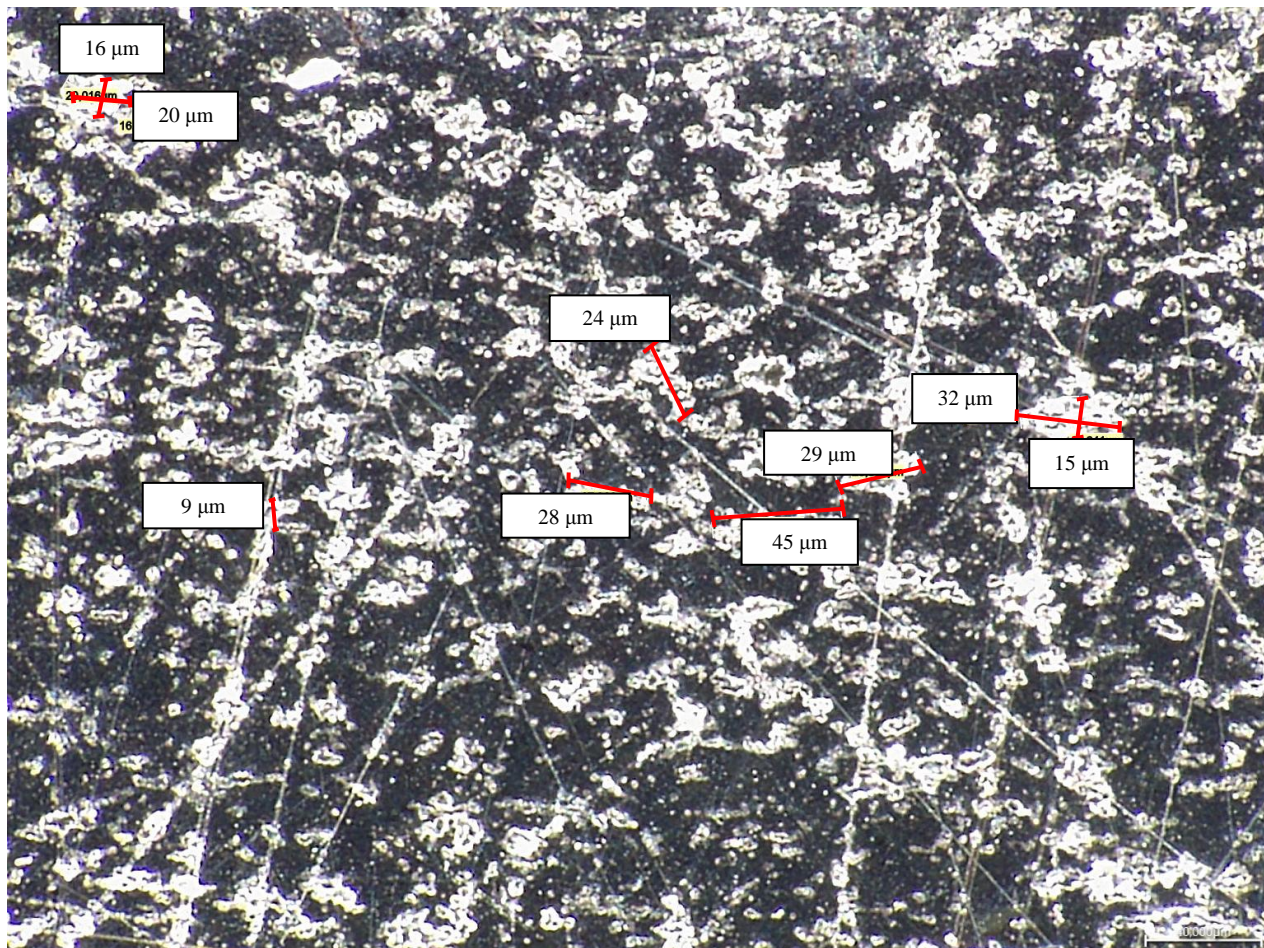


Рисунок 68 – Размер зерен упрочненного образца, $\times 1000$

Характер микроструктуры упрочненного материала отличается от структуры исходного материала, наблюдается измельчение зерен твердого раствора, их размер после деформации уменьшается в 2,5-3 раза, а расположение по всей глубине более равномерно.

При исследовании микроструктуры образца с двукратной обработкой многоконтakтным ВДУ выявлено образование микротрещин (рисунок 69, 70).

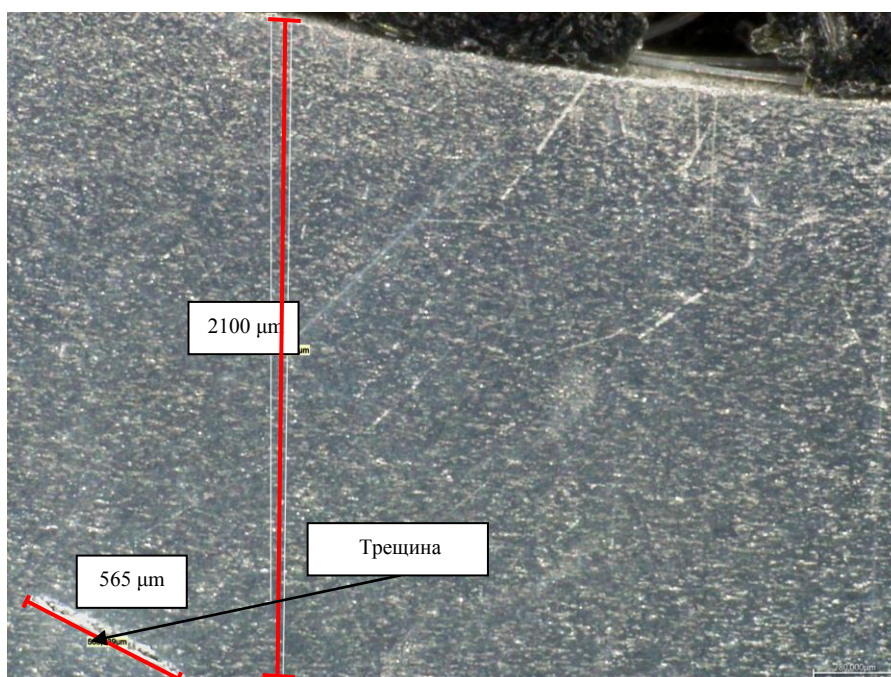


Рисунок 69 – Трещина после двукратного МК ВДУ, $\times 158$

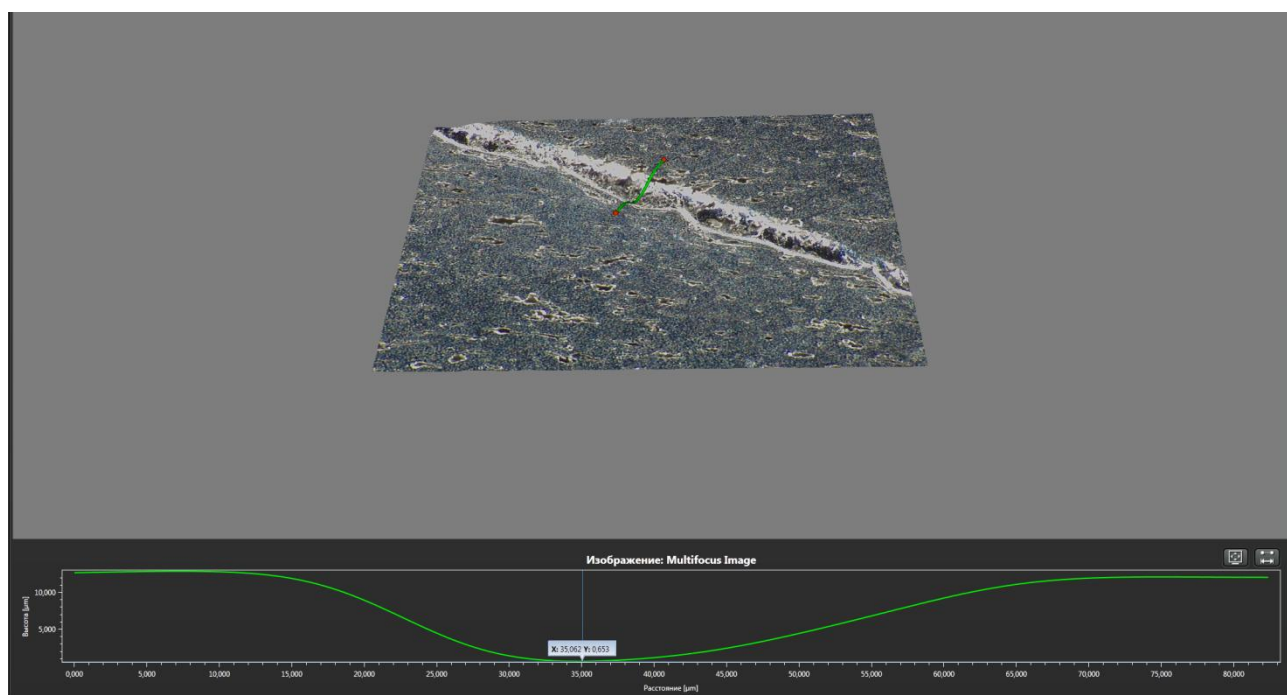


Рисунок 70 – Поперечный профиль микротрещины (глубина 30 мкм)

Микротрещины формируются в подповерхностном слое на глубине от 2 до 4 мм. Данные скрытые дефекты являются недопустимыми, и при эксплуатации детали в последующем приведут к преждевременному выходу из строя. Таким

образом, двукратное упрочнение является избыточным и ведет к разрушению материала.

Металлографические исследования подтверждаются исследованиями на сопротивление усталости. На образцах с двукратным упрочнением наблюдается более раннее образование усталостных трещин и полное разрушение по сравнению с неупрочненными образцами.

Испытания на сопротивление усталости проводились в условиях малоциклового нагружения. При этом разрушение материала возникает при повторных упругопластических деформациях. Разрушение материала при малоциклового усталости происходит при числе циклов повторения нагрузки $N < 5 \cdot 10^4$ [16, 44].

Вид испытаний – повторно-переменное кручение образца. Испытания образцов проводились непрерывно до полного разрушения. Режимы испытаний: крутящий момент – 150 Нм (размах 300 Нм), частота нагружения – 0,2 Гц, угол скручивания (амплитуда) – 2,3..2,5 градусов [95, 107, 108, 110, 117].

Фотографии образцов с формирующимися на них усталостными трещинами представлены на рисунке 71.

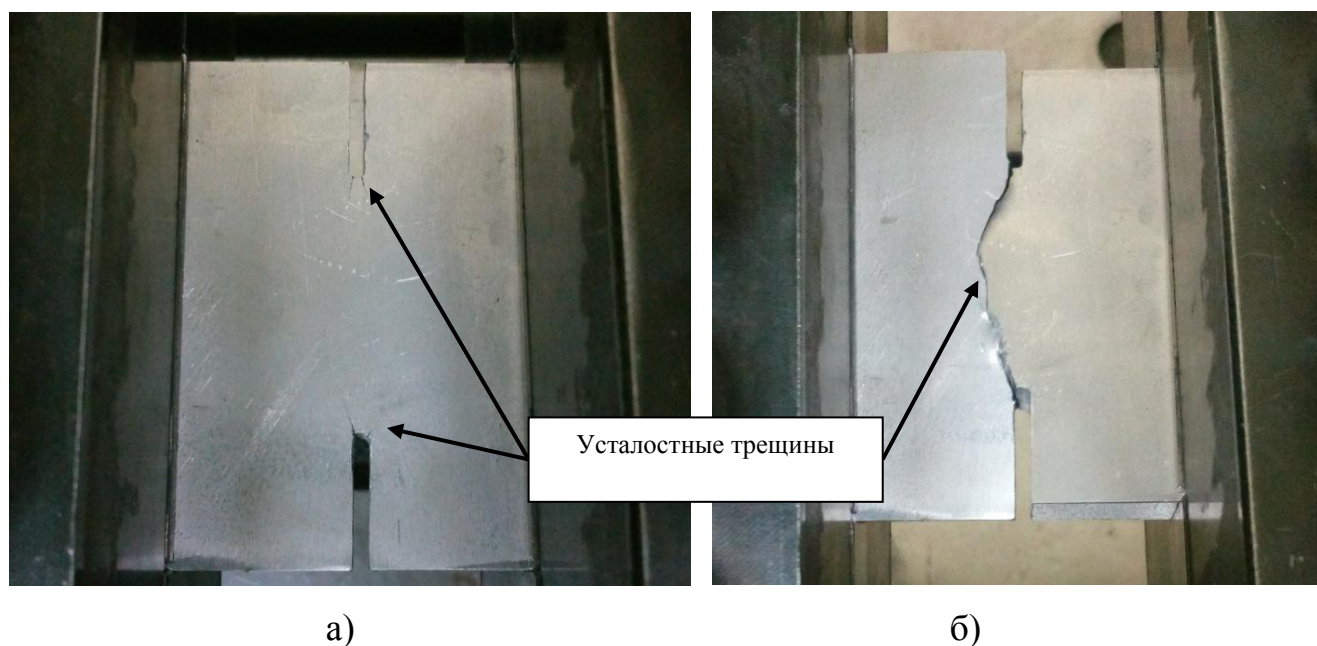


Рисунок 71 – Испытания образца на сопротивление усталости: а) образование усталостных трещин, б) полное разрушение образца

Результаты исследований по сопротивлению усталости представлены в таблице 13 и на рисунках 72, 73.

Таблица 13 – Результаты исследований по сопротивлению усталости

Режим упрочнения (K)	Неупрочненный	0,4	0,6	0,4+0,4	0,4×0,4
Количество циклов	2124	6400	3045	1843	2114
Повышение (снижение) сопротивления усталости	-	3,01	1,43	0,87	1,0

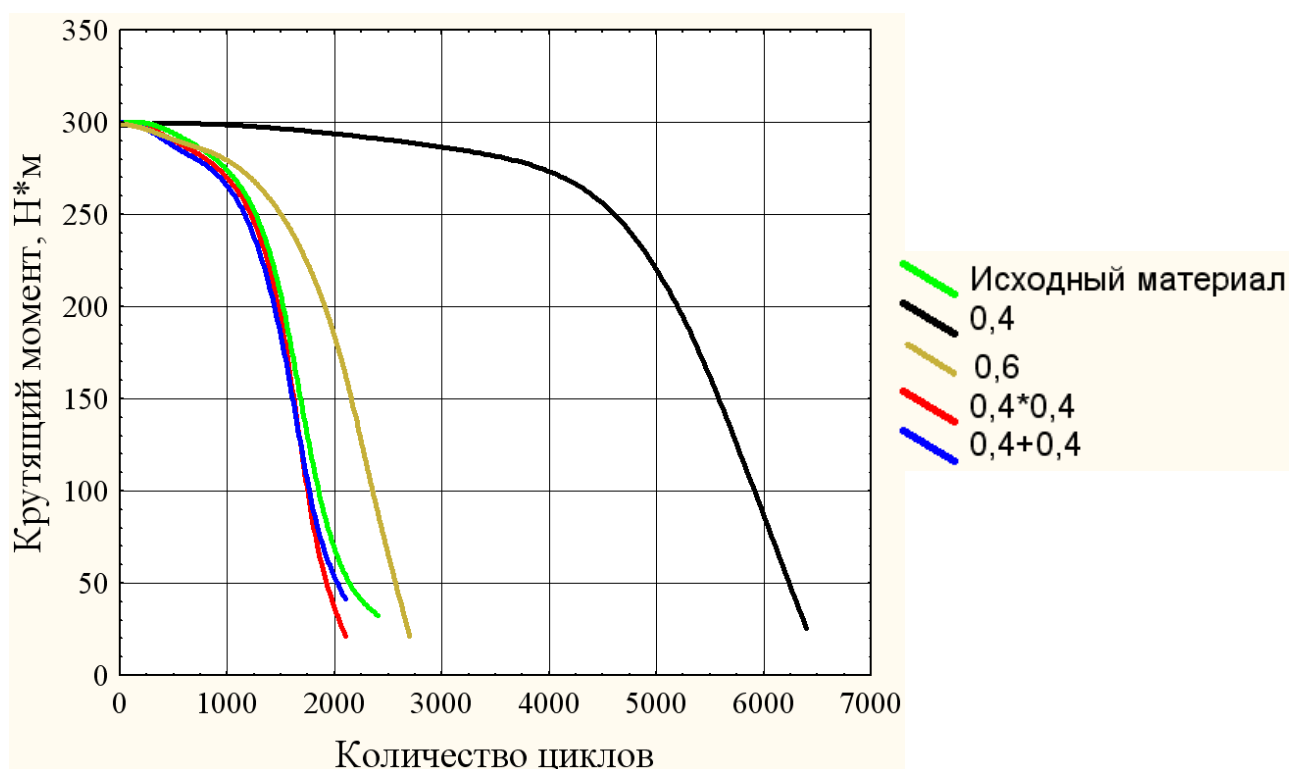


Рисунок 72 – График зависимости сопротивления усталости от режима МК ВДУ

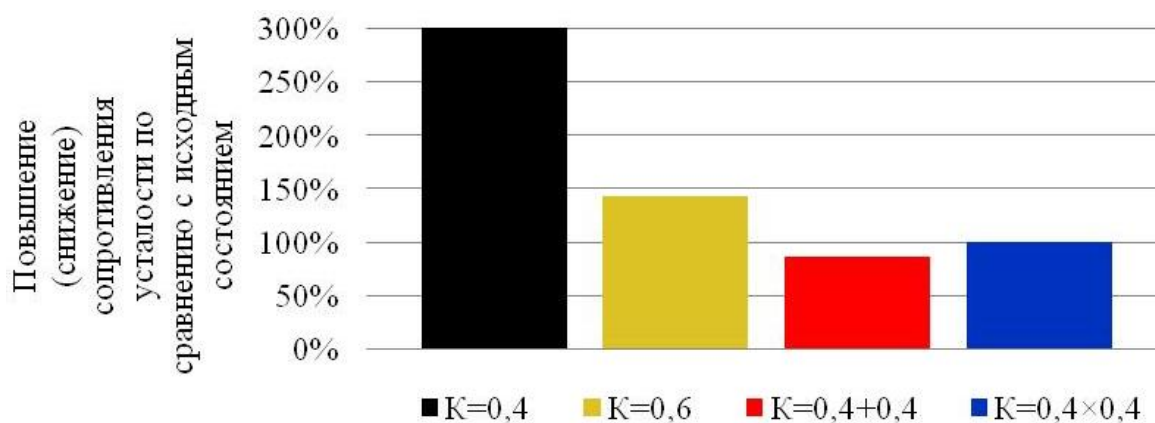


Рисунок 73 - Повышение (снижение) сопротивления усталости

Для обеспечения наибольшего значения сопротивления усталости необходимо проводить однократное упрочнение с двух сторон. Однократное упрочнение с коэффициентом перекрытия $K = 0,4$ обеспечивает повышение сопротивления усталости в 3,01 раза по сравнению с исходной.

Двухпроходное упрочнение с двух сторон с $K = 0,4$ в одном направлении ($K=0,4+0,4$) снижает сопротивление усталости на 14%, а двухпроходное упрочнение с двух сторон в перпендикулярных направлениях с $K = 0,4$ ($K=0,4 \times 0,4$) практически не влияет на сопротивление усталости (расхождение результатов менее 1%).

Выводы

1. Впервые для МК ВДУ установлены дополнительные технологические параметры: $S_{\text{отн}}$ – соотношение суммы площадей поперечного сечения инструментов и площади поперечного сечения волновода, $N_{\text{и}}$ – количество инструментов в системе нагружения, p – суммарное давление в очаге деформации и δ' – расстояние между соседними пластическими отпечатками.

2. Предложена регрессионная математическая модель, описывающая закономерность изменения степени упрочнения по глубине упрочненного слоя в зависимости от технологических и конструктивно-технологических параметров МК ВДУ.

3. Теоретически и экспериментально установлено, что:

- наибольшую глубину упрочнения до 10 мм КПСД 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 ($K_{\text{э}} > 45\%$; $\Delta H_{\mu} > 80\%$; $h = 8 \dots 10$ мм) обеспечиваются при МК ВДУ 2...3 инструментами, при этом соотношение площадей поперечного сечения инструментов и волновода $S_{\text{отн}}$ лежит в диапазоне от 0,2 до 0,8.

4. 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).

5. 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 $0,2 < K < 0,6$ КПСД 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.

4 Производственная апробация и технологические рекомендации по повышению параметров качества деталей из АМг сплавов многоконтактным волновым деформационным упрочнением

4.1 Исследование напряженно-деформированного состояния детали при приложении эксплуатационных нагрузок

Предварительными производственными исследованиями установлено, что для обеспечения качества КПСД из АМг сплавов, предпочтительно локальное, но глубокое упрочнение наиболее нагруженных в процессе эксплуатации участков. Для выявления всех локальных ослабленных участков необходимо проведение дополнительного анализа. Полномасштабные экспериментальные исследования являются экономически невыгодными вследствие высокой стоимости и сложности испытаний, поэтому в данном случае наиболее эффективно применение конечно-элементного анализа. Применяемое для моделирования программное обеспечение – ANSYS/LS-DYNA. Адекватность данных, полученных моделированием, установлена ранее.

Для проведения анализа необходимо определить эксплуатационные нагрузки, прикладываемые к КПСД. В соответствии с классификацией определены три типа деталей:

- легкие (прикладываемые нагрузки $P < 25$ кН);
- средние (прикладываемые нагрузки $25\text{кН} < P < 50\text{кН}$);
- тяжелые (прикладываемые нагрузки $P > 50$ кН).

Так как детали обладают схожими конструктивными особенностями, то для исследования выбран промежуточный типоразмер – средние детали. В качестве эксплуатационной нагрузки принимается предельное для данного типа значение 50 кН.

Разработка модели для исследований осуществляется аналогично с методикой, описанной в главе 2, с учетом рекомендаций для проведения прочностных расчетов, представленных в работах [52, 101, 120, 121, 123].

Моделирование осуществлялось в следующей последовательности:

- графическими средствами ANSYS/LS-DYNA создана трехмерная модель детали;
- детали присвоены свойства материала АМг2;
- создана конечно-элементная сетка (рисунок 74);
- установлены места закрепления детали и приложены эксплуатационные нагрузки;
- установлены требуемые граничные условия: время приложения нагрузки, коэффициент демпфирования, коэффициент искажения и т.д.;
- произведен расчет, получены результаты по эквивалентным напряжениям и перемещениям (рисунок 75);
- определена глубина несущего слоя (рисунок 76).

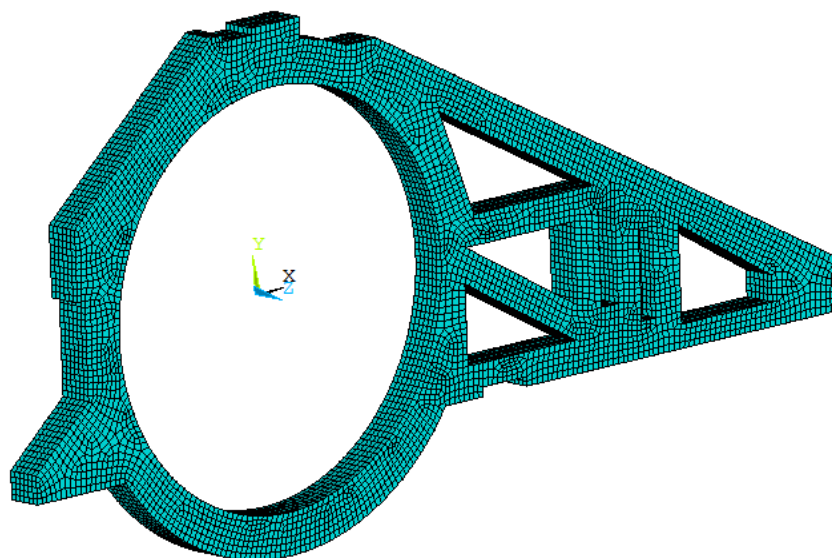


Рисунок 74 – Конечно-элементная модель исследуемой детали
в программном модуле ANSYS/LS-DYNA

В результате разработки и анализа конечно-элементной модели установлены локальные ослабленные участки. Наиболее нагруженными являются поверхности, расположенные рядом с местами закрепления детали. Глубина несущего слоя при предельных нагрузках для данного типа детали составляет порядка 7 мм. Результаты исследований аппроксимированы для двух других типоразмеров детали с учетом прикладываемых нагрузок.

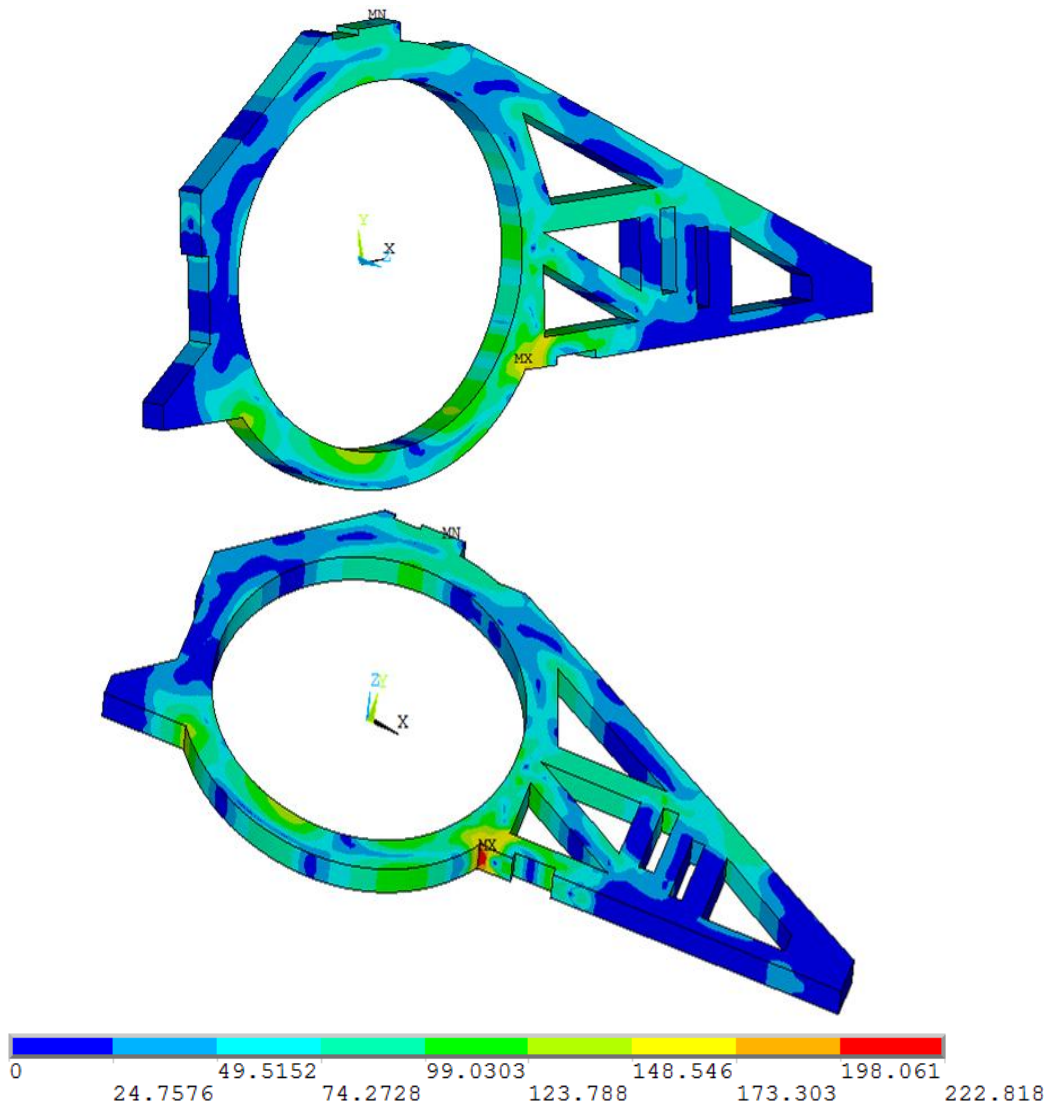


Рисунок 75 – Напряженно-деформированное состояние (НДС) детали при эксплуатационных нагрузках (в МПа)

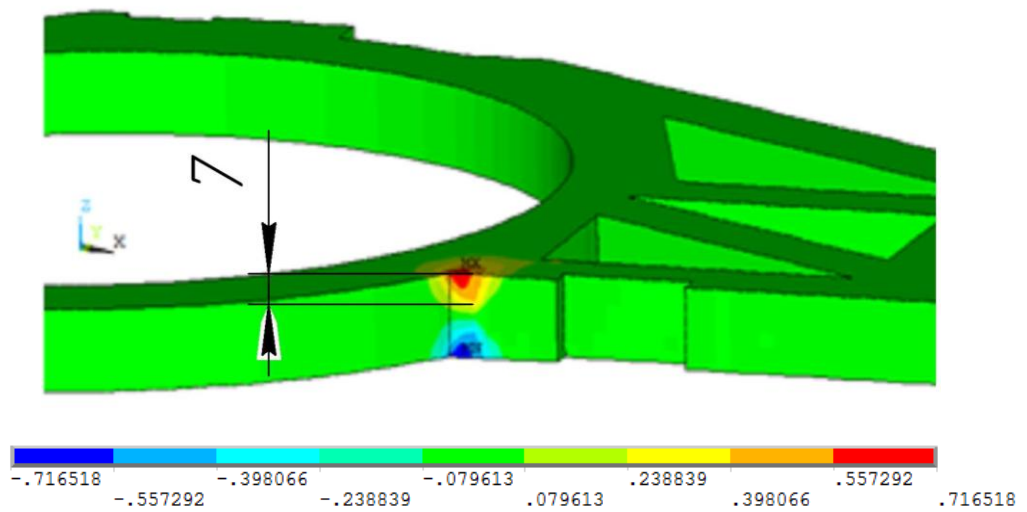


Рисунок 76 – Глубина несущего слоя

С учетом особенностей КПСД необходимо разработать инструмент для локального повышения эксплуатационных характеристик.

4.2 Разработка многоинструментальной оснастки для процесса многоконтактного ВДУ

Разработка инструментальной оснастки для ВДУ осуществляется на базе существующего инструмента. Однако, учитывая особенности обрабатываемого материала и детали, вместо одноконтактной схемы нагружения применяется многоконтактная.

Основным требованием, предъявляемым к конструируемой оснастке, является универсальность. Оснастка должна обладать возможностью быстрого изменения типа инструмента и его расположения в зависимости от необходимых параметров качества.

В соответствии с данными условиями разработана многоконтактная схема нагружения (рисунок 77).

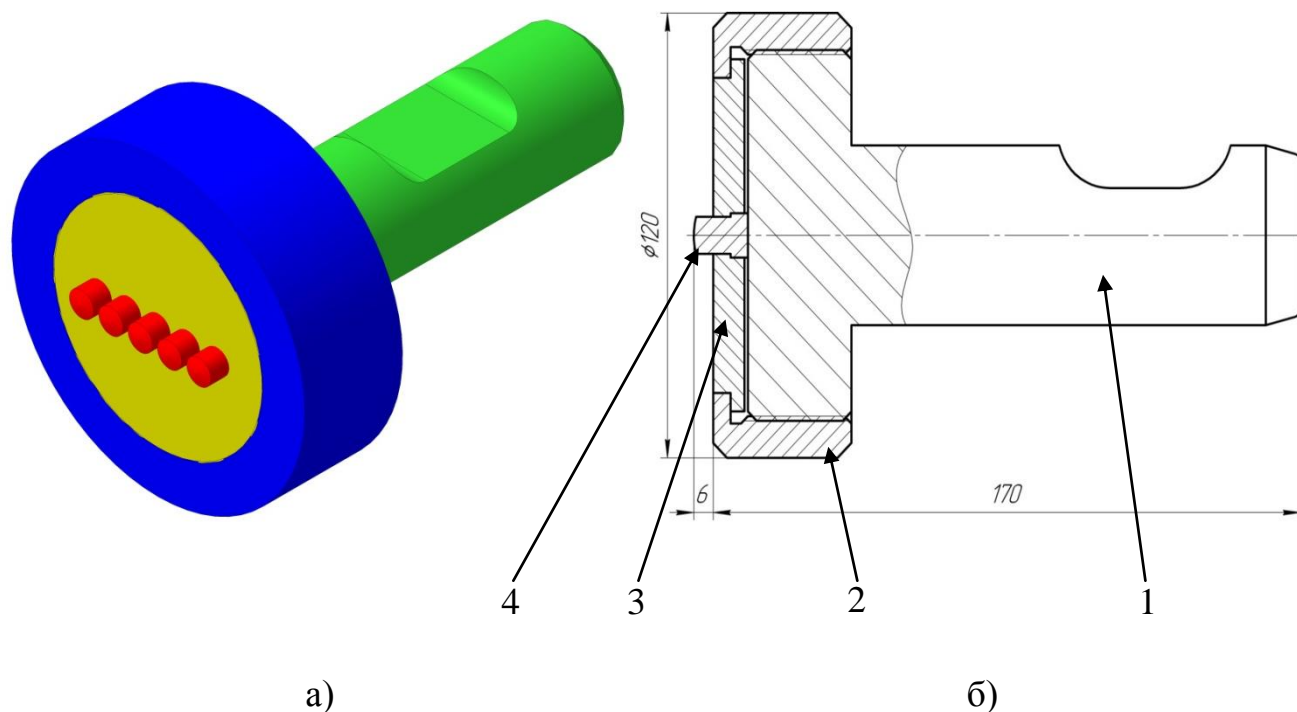


Рисунок 77 – Твердотельная модель (а) и чертеж инструментальной оснастки для МК ВДУ (б): 1 – волновод, 2 – гайка, 3 – сепаратор, 4 – инструменты

На основании предложенной схемы изготовлена многоинструментальная оснастка, представленная на рисунке 78.

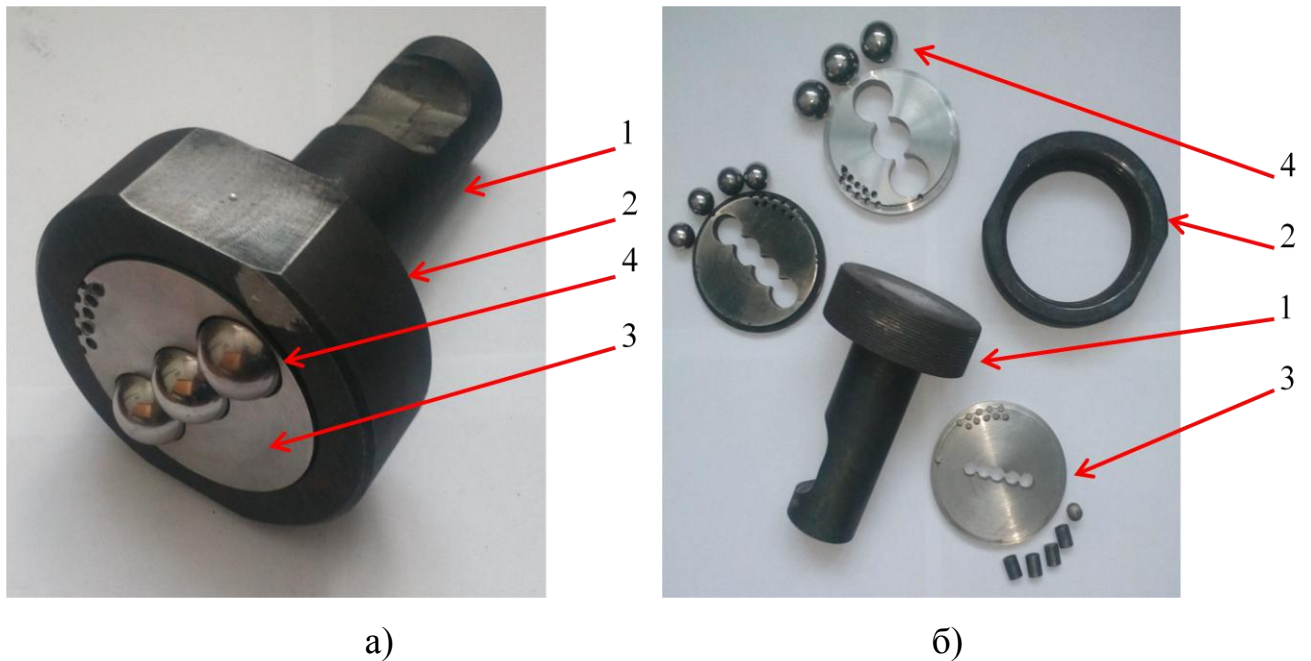


Рисунок 78 – Многоинструментальная оснастка в сборе (а) и в разобранном состоянии (б) с инструментами в виде шаров и стержней со сферическим торцом:

1 – волновод, 2 – гайка, 3 – сепаратор, 4 – инструменты

Сборка и установка оснастки осуществляется в следующем порядке: сепаратор 3 при помощи гайки 2 центрируется и присоединяется к торцу волновода 1. Волновод 1 закрепляется в передней части генератора механических импульсов. Далее производится установка и закрепление обрабатываемой детали на рабочем столе. Следующим шагом с помощью специальной пластины производится установка инструментов в посадочные места в сепараторе 3. Волновод 1 с инструментами 4 через генератор импульсов статически поджимается к детали. Затем включается подача рабочего стола и происходит динамическое воздействие на обрабатываемую поверхность. В результате обработки формируется упрочненный слой с требуемыми показателями качества.

Так как инструменты расположены в ряд, а расстояние между осями двух смежных инструментов (то есть и расстояние между центрами соседних пластических отпечатков, формируемых данными инструментами) равно

диаметру инструмента. Таким образом, расстояние между соседними пластическими отпечатками может превышать рекомендуемое значение равное половине размера пластического отпечатка. В связи с этим предусмотрена возможность изменения расстояния между соседними отпечатками поворотом оси сепаратора относительно оси волновода на определенный угол α (п. 3.1).

Поворот осуществляется с помощью пластины, изображенной на рисунках 79 и 80. Данная пластина имеет возможность поворачиваться на угол от 0° до 90° при помощи отверстий, сделанных с шагом 10° . Плавное регулирование угла поворота в пределах каждых 10° осуществляется при помощи вращения шпильки.

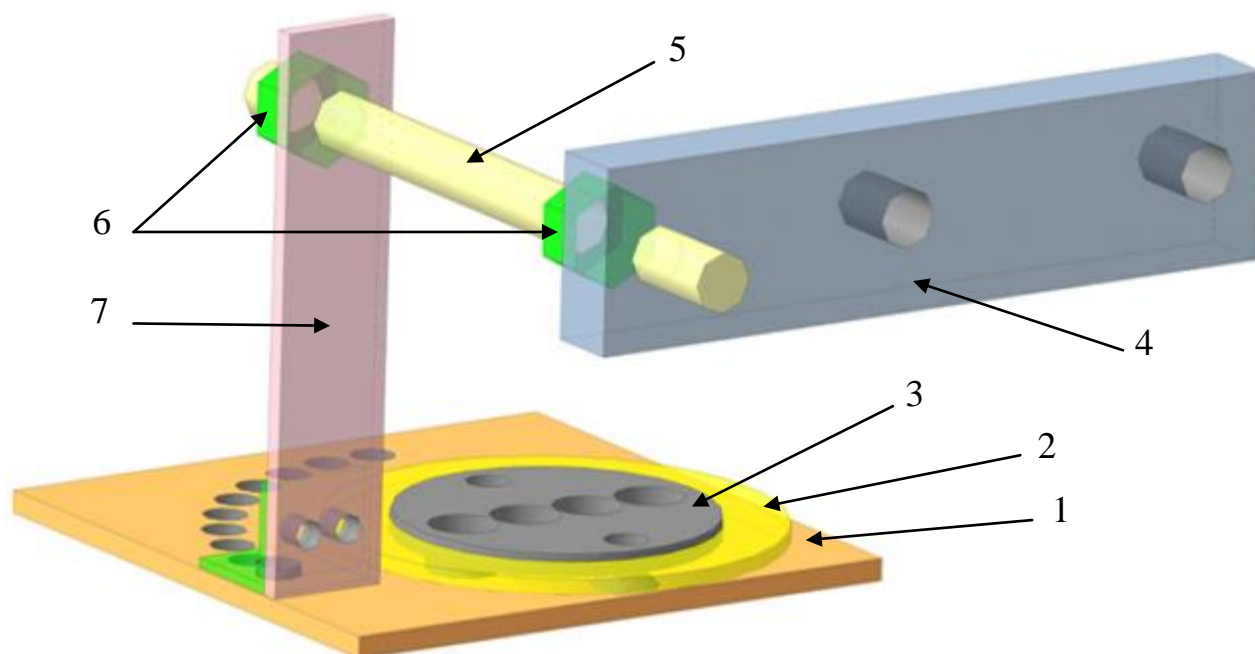


Рисунок 79 – Схема поворота инструментальной оснастки на заданный угол α : 1 – поворотная пластина, 2 – гайка (условное изображение), 3 – сепаратор, 4 – планка, 5 – шпилька, 6 – контргайки, 7 – соединительная планка

Поворотная пластина *1* с помощью винтов крепится к сепаратору *3*. Сепаратор *3* свободно вращается между гайкой *2* и волноводом. Пластина *1* соединена со шпилькой через уголок и планку *7*. Планка *1* присоединена к передней части генератора импульсов. Поворотом шпильки *5* регулируется расстояние между планками *1* и *7*, тем самым плавно изменяется угол поворота. Самооткручивание в процессе обработки предотвращается контргайками *6*.



Рисунок 80 – Поворотный механизм для регулирования угла α

Поворот пластины на угол α осуществляется по шаблону. Один из шаблонов представлен на рисунке 81.

Габариты передней части генератора импульсов

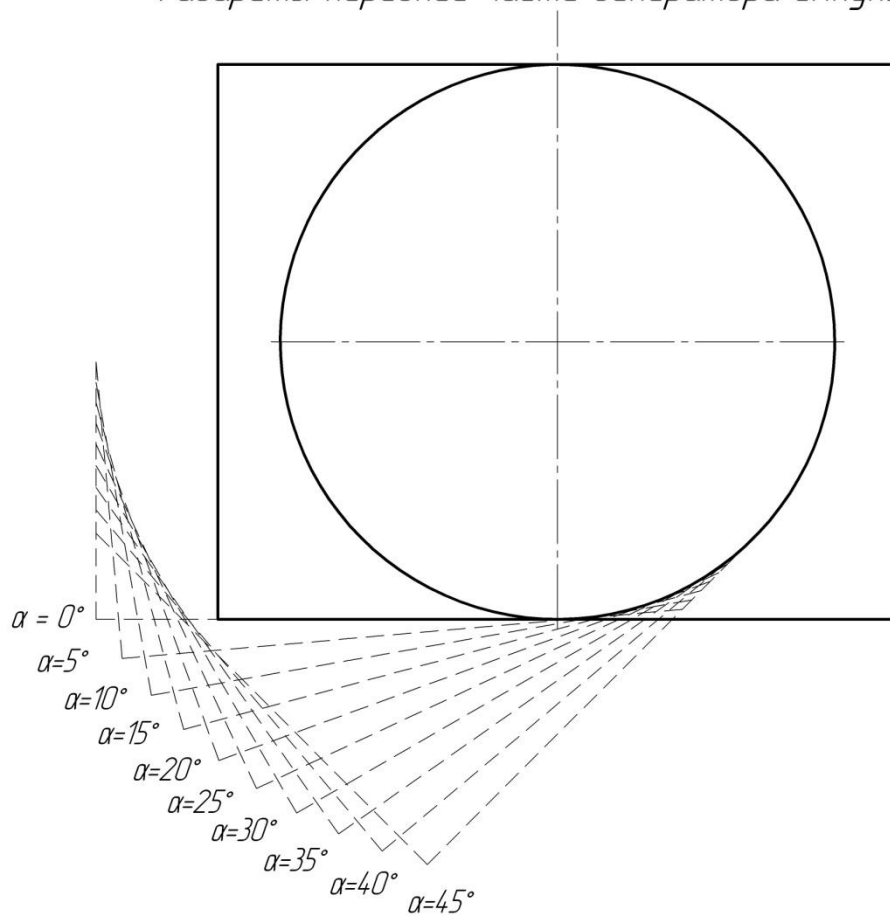


Рисунок 81 – Шаблон для поворота оснастки на угол α

Определение требуемого угла поворота осуществляется следующим образом:

- предварительный проход для определения размера пластического отпечатка;
- расчет требуемого угла поворота α по формуле (37);
- поворот инструментальной оснастки на угол α с помощью шаблона.

Таким образом, разработанная многоинструментальная оснастка позволяет эффективно осуществлять МК ВДУ с учетом требований, предъявляемых к параметрам качества детали.

4.3 Технологические рекомендации по повышению параметров качества каркасных плоских сложнопрофильных деталей многоконтактным ВДУ

В результате комплекса проведенных исследований установлено, что МК ВДУ позволяет эффективно повышать сопротивление усталости КПСД. Назначение технологических режимов МК ВДУ во многом зависит от требуемых показателей качества и условий эксплуатации. В данном случае условия эксплуатации определяются прикладываемыми к детали нагрузками и глубиной несущего слоя, в котором возможно зарождение усталостных трещин, приводящих к разрушению.

Всего выделено 3 группы КПСД.

Легкие детали, эксплуатационные нагрузки на которые не превышают 25 кН при габаритах (Д×Ш×В) 800×400×28 мм. Глубина несущего легких деталей составляет порядка 5 мм.

Средние детали, эксплуатационные нагрузки на которые больше 25 кН, но не превышают 50 кН при габаритах (Д×Ш×В) 1100×500×38 мм. Глубина несущего слоя данного типа деталей составляет около 7 мм.

Тяжелые детали, эксплуатационные нагрузки на которые составляют более 50 кН при габаритах (Д×Ш×В) 1500×7500×48 мм. Глубина несущего слоя тяжелых деталей составляет около 9 мм.

На основании данных исходных данных осуществляется подбор конструктивных и конструктивно-технологических параметров МК ВДУ – тип и размеры инструмента, количество инструментов, энергия ударов, перекрытие пластических отпечатков, расстояние между соседними пластическими отпечатками.

Основным для выбора режимов МК ВДУ является параметр глубины упрочнения h . Глубина упрочненного поверхностного слоя должна перекрывать глубину несущего слоя под воздействием эксплуатационных нагрузок.

Таким образом, можно выделить параметры МК ВДУ общие для каждого типа детали:

- длина и диаметр бойка и волновода соответственно: $L_1 = 480$ мм, $L_2 = 160$ мм, $d_1=d_2 = 48,5$ мм;
- энергия удара $A = 150$ Дж (общая);
- статическое поджатие $P_{ст} = 0,1 P_{дин}$ (рассчитывается исходя из энергии удара);
- частота ударов $f = 9$ Гц.

Параметры ВДУ отличные для каждого типоразмера КПСД, а также формируемые параметры качества поверхностного слоя сведены в таблицу 14.

Таблица 14 - Технологические рекомендации для обработки МК ВДУ КПСД из АМг сплавов

Тип КПСД	Условия эксплуатации КПСД		
	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); $D_{и} = 27$ мм; инструмент – стержень со сферическим торцом; $N_{и} = 5$ шт.; $K = 0,2 \dots 0,4$; $\delta' = 0 \dots 3$ мм.	$A = 40$ Дж (на один инструмент); $D_{и} = 19$ мм; инструмент – шар; $N_{и} = 4$ шт.; $K = 0,4 \dots 0,6$; $\delta' = 0 \dots 3,5$ мм.	$A = 50$ Дж (на один инструмент); $D_{и} = 27$ мм; инструмент – шар; $N_{и} = 3$ 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

Упрочнение наиболее нагруженных в процессе эксплуатации локальных участков рекомендовано производить сразу после получения окончательного контура заготовки на фрезерной операции, 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.

Базовый технологический процесс изготовления КПСД не включает в себя операции МК ВДУ. Таким образом, необходимо определить место упрочняющей обработки в процессе изготовления деталей. Технологический процесс КПСД, локальные участки которых подвергаются обработке МК ВДУ, состоит из следующих операций, представленных в таблице 15.

Таблица 15 – Порядок операций технологического процесса изготовления КПСД

Наименование операции	Оборудование
005 Заготовка	Ленточная пила
010 Слесарная	Верстак
015 Фрезерная ЧПУ	Tornado НСМС - 15
020 Упрочняющая (МК ВДУ)	Установка для МК ВДУ
025 Фрезерная ЧПУ	Tornado НСМС - 15
030 Фрезерно–сверлильная с ЧПУ.	НХ 805А/НТ
035 Расточная ЧПУ	НХ 805А/НТ
040 Слесарная	Верстак
045 Контроль ОТК	Контрольный стол
050 Гальванопокрытие	Ванна
055 Окраска	Камера окраски
060 Контроль ОТК	Контрольный стол

В соответствии с разработанной последовательностью операций изготовлена КПСД среднего типоразмера. На рисунках 82-85 представлены: эскиз заготовки перед операцией МК ВДУ, эскиз с указанием локальных участков (заштрихованные зоны), подвергаемых упрочнению (на основании прочностных расчетов из ANSYS/LS-DYNA), фотографии процесса упрочнения и его результат.

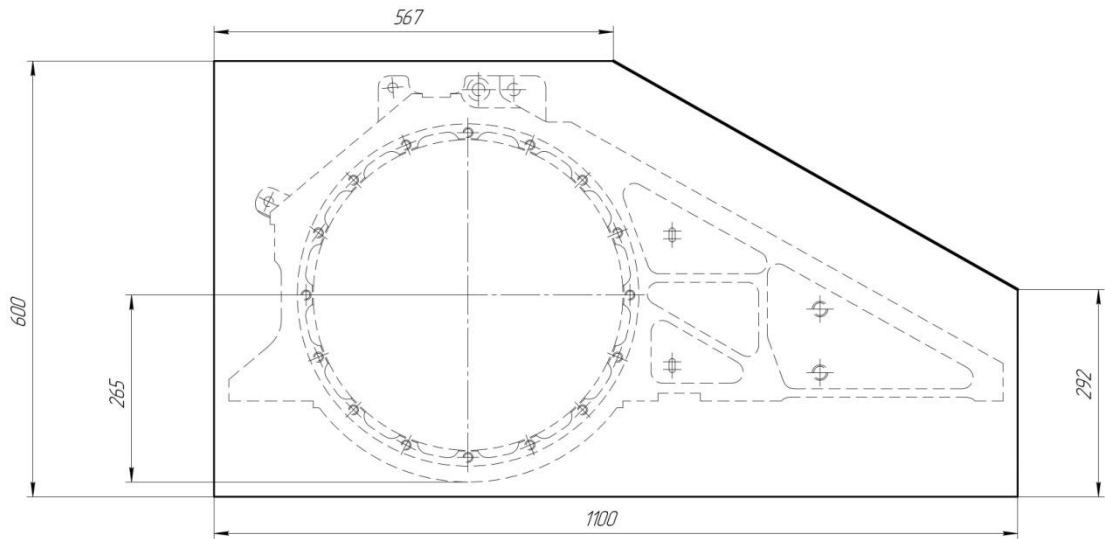


Рисунок 82 – Эскиз заготовки до упрочняющей операции

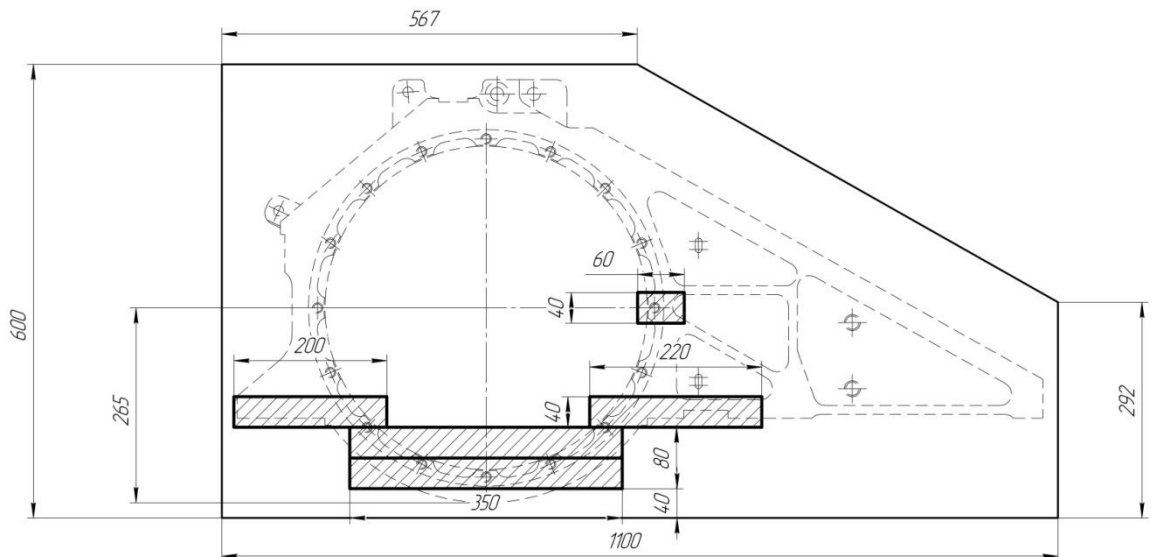


Рисунок 83 – Эскиз с указанием локальных участков для упрочнения



Рисунок 84 – Заготовка перед упрочняющей обработкой



Рисунок 85 – Деталь, обработанная МК ВДУ

В результате в соответствии с разработанными технологическими рекомендациями упрочнена КПСД среднего типоразмера.

Технология МК ВДУ внедрена в условия реального производства. Акты промышленного внедрения представлены в Приложении Б.

4.4 Технико-экономический расчет эффективности применения многоконтактного ВДУ

Технико-экономический расчет эффективности применения МК ВДУ проведен в сравнении с базовой технологией. Экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии ожидается за счет увеличения срока эксплуатации КПСД.

Для расчета экономического эффекта применялись данные завода-изготовителя. По данным завода себестоимость двух деталей составляет 68400 руб., так как в единицу изделия входит две каркасных детали.

Увеличение срока эксплуатации T упрочненных деталей снижает необходимость потребителя в их замене. Однако, введение дополнительной операции в технологический процесс изготовления КПСД ведет к увеличению себестоимости C . Расчет себестоимости изготовления КПСД по базовой

технологии и упрочненного МК ВДУ, производился с учетом применяемых на предприятии норм времени и расценок по оплате труда.

Расчет проектной цены нового оборудования, необходимого для упрочняющей обработки (многоинструментальная оснастка), осуществлялся на основе нормативов материальных и трудовых затрат. В стоимость оборудования входят как сборочные единицы, подлежащие механической обработке, так и покупные комплектующие. Расчет себестоимости изготовления оснастки осуществляется в соответствии со следующими формулами:

$$C_{\Pi} = Z_{MT} + Z_{OCH} + Z_{ДОП} + Z_{НАК}, \quad (39)$$

$$Z_{MT} = \sum m_i C_i + \sum N_i C_i, \quad (40)$$

$$Z_{OCH} = C_{\text{ч}} T_{Pi} m_i, \quad (41)$$

$$Z_{ДОП} = Z_{OCH} H, \quad (42)$$

$$Z_{НАК} = Z_{OCH} H_{НР}, \quad (43)$$

где C_{Π} – себестоимость оснастки,

Z_{MT} – материальные затраты,

Z_{OCH} – основная заработная плата рабочих,

$Z_{ДОП}$ – дополнительная заработная плата рабочих,

$Z_{НАК}$ – накладные расходы,

m_i – масса, C_i – цена, N_i – количество покупных деталей,

$C_{\text{ч}}$ – часовая тарифная ставка рабочего,

T_{Pi} – трудоемкость изготовления детали,

H – норматив дополнительной заработной платы (15%),

$H_{НР}$ – норматив накладных расходов (30%).

С учетом затрат на материалы, зарплату и накладные расходы, себестоимость многоинструментальной оснастки составила 12000 руб.

Также введение дополнительной упрочняющей операции в технологический процесс способствует увеличению себестоимости. В результате расчетов установлено, что дополнительная операция упрочнения повысит себестоимость изготовления одной КПСД на 1500 руб.

Конечная стоимость КПСД с учетом операции МК ВДУ составит:

$$C = 68400 + 12000 + 2 \times 1500 = 83400 \text{ руб.}$$

На основании проведенного комплекса экспериментальных исследований установлено, что применение МК ВДУ в технологическом процессе изготовления позволяет повысить сопротивление усталости КПСД до 3 раз. Экономический эффект определяется как разность между затратами на изготовление КПСД по базовой и предлагаемой технологии, с учетом повышения эксплуатационных характеристик. Результаты представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Техничко-экономическое обоснование

Показатель	Обозначение	Единица измерения	КПСД, изготовленная по базовой технологии	КПСД, упрочненная МК ВДУ
Себестоимость производства КПСД, работающих при средних нагрузках ($25\text{кН} < P < 50\text{кН}$)	С	руб.	68400	83400
Повышение сопротивления усталости	n	–	–	3
Экономическая эффективность	Э	руб.	–	121800

Выводы

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

2. Разработана конструкция многоинструментальной оснастки для обработки КПСД с возможностью изменения формы и количества инструментов,

а также с возможностью управления боковым зазором между соседними пластическими отпечатками поворотом на требуемый угол α .

3. Разработаны технологические рекомендации по МК ВДУ каркасных плоских сложнопрофильных деталей, обеспечивающие повышение сопротивления усталости до 3 раз.

4. Предложен альтернативный технологический процесс изготовления КПСД, с включением в состав упрочняющей операции локальных нагруженных участков.

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

Основные результаты и выводы

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

1. Установлено, что в результате МК ВДУ КПСД 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 КПСД 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 КПСД 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 ($S_{\text{отн}}$).

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 КПСД 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 одноконтантным 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 $0,2 < K < 0,6$ КПСД 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 КПСД из АМг сплавов. Выполнена производственная апробация разработанной технологии и технологической оснастки. Экономический эффект от применения разработанной технологии составляет 121800 рублей на одно изделие.

Список использованных источников

1. Аборкин, А. В. Влияние числа проходов при равноканальном угловом прессовании на эксплуатационные свойства алюминиевого сплава / А. В. Аборкин, Д. М. Бабин, А. А. Захаров // Материаловедение. – 2013. – №11. – С. 33-37.
2. Аксенов, В.Н. Совершенствование процесса отделочно-упрочняющей обработки многоконтактным виброударным инструментом с учетом ударно-волновых явлений: дис...канд. техн. наук: 05.02.08 / Аксенов Владимир Николаевич. - Ростов-на-Дону, 2000. - 194 с.
3. Андреев В.В., Головкин А.Н., Бондаренко О.В. Экспериментальное исследование прокатываемости алюминиевого сплава системы Al–Mg–Sc // Технология машиностроения. 2010. № 42. С. 14–19.
4. АО ЦНИИ «Буревестник» / 30-мм дистанционно-управляемый боевой модуль 32В01 [Электронный ресурс]. URL:<http://www.burevestnik.com> (дата обращения: 20.05.2019).
5. А.с. 1539051. Устройство для поверхностной отделочно-упрочняющей обработки деталей / И.А. Бабичев и др. опубл. в БИ, 1989.
6. Афонин, А.Н. Математические модели полей напряжений и деформаций при накатывании резьб и профилей с динамическим нагружением инструмента // Сб. матер. междунар. научно-техн. конф. «Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении», Воронеж: ВГТУ, 2010. – С. 169 – 172.
7. Афонин, А.Н. Повышение эффективности накатывания резьб: дисс ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Афонин Андрей Николаевич. - Орел, 2010. - 408 с.
8. Афонин А.Н., Киричек А.В., Апальков А.Г., Должиков Д.А. Моделирование процесса поверхностно-объемного пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия, №10, 2007, с.29-31.
9. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии [Текст] / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. - Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. - 694 с.

10. Бабичев, А.П. Вибрационная обработка деталей [Текст] / А.П. Бабичев. - Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974. - 136 с.
11. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии [Текст] / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. ДГТУ.: Ростов н/Д, 1999. - 624 с.
12. Бабичев, А.П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом [Текст] / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, И.А. Бабичев. ДГТУ.: Ростов н/Д, 2003. - 192 с.
13. Балтер, М.А. Упрочнение деталей машин [Текст] / М.А. Балтер. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1978. - 184 с.
14. Баринов, С.В. Повышение сопротивления контактному выкрашиванию гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой: дис. . канд. техн. наук: 05.02.08, 05.03.01 / Баринов Сергей Владимирович. - Орел, 2009.- 166 с.
15. Басов, К. А. ANSYS [Текст]: справочник пользователя / А.К. Басов - Москва: ДМК, 2005. - 639 с.
16. Блюменштейн, В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин [Текст] / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.
17. Борщевская, Д. Г. Повышение долговечности сплава АМг6М за счет введения промежуточной пластической деформации / Д. Г. Борщевская, В. Д. Рябчий, В. Ф. Бутенко, И. И. Телегина // Техническая механика. - 2011. - № 1. - С. 70-77.
18. Браславский, В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами [Текст] / В.М. Браславский. М.: Машиностроение, 1966. - 160 с.
19. Букатый, А. С. Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. №6-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-tochnosti-izgotovleniya-otvetstvennyh-detaley-dvigateley-sredstvami-staticheskogo-i-dinamicheskogo-modelirovaniya> (дата обращения: 01.08.2019).

20. Бутенко, В.И. Локальная отделочно-упрочняющая обработка поверхностей деталей машин [Текст] / В.И. Бутенко. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. 126 с.
21. Бутенко, В.И. Физико-технологические основы формирования управляемых структур сталей и сплавов [Текст] / В.И. Бутенко. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. - 264 с.
22. Вашуль, Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов [Текст] / Х. Вашуль. Пер. с нем. - М.: Металлургия, 1988. - 320 с.
23. Величко, Е. В. Повышение качества сварных соединений комбинированной термомодеформационной обработки / Е. В. Величко // IX Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых-металловедов. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. — С. 42-43.
24. Влияние магнитной обработки на механические характеристики и термические напряжения сварных соединений корпусной стали / И. М. Неклюдов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. - 2011. - N 1. - С. 84-88 .
25. Волобуев, А. В. Определение рациональной режимной области статико-импульсной обработки посредством моделирования процесса: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Волобуев Александр Владимирович. - Орел, 2012. - 19 с.
26. Галай, М.С. Совершенствование технологии и инструментального обеспечения формообразования и упрочнения бесстыкового рельсового пути: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Галай Марина Сергеевна. - Новосибирск, 2011. - 159 с.
27. Горячев О.В., Фимушкин В.С., Чуканов К.П. Мобильные сухопутные робототехнические комплексы - основные определения и классификационные признаки, направления и проблемы в создании и применении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 12. Ч. 4. С. 139-151.
28. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Издательство стандартов, 1984. – 22 с.

29. ГОСТ 18296-72. Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1972. – 10 с.
30. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Издательство стандартов, 1981. – 25 с.
31. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. М.: Издательство стандартов, 1976. – 30 с.
32. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М.: Издательство стандартов, 1997. – 32 с.
33. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. - М.: Издательство стандартов, 1979. – 10 с.
34. Григорьянц А. Г., Смирнова Н. А. Упрочнение поверхности стали 45 и литейного алюминиевого сплава АК9 излучением волоконного лазера // Технология машиностроения. 2011. № 11. С. 52-56.
35. Дель, Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости [Текст] / Г.Д. Дель. М.: Машиностроение, 1971. -200 с.
36. Деформационное упрочнение гнутых профилей проката / О.И. Тришевский, А.Н. Янчинский, Ю.С. Томенко и др. // Сталь, 1986. № 8. С. 51-53.
37. Дрозд, М.С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации [Текст] / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. М.: Машиностроение, 1986. - 224 с.
38. Дударева Н. Ю., Мусин Н. Х. Исследование эксплуатационных свойств упрочненного слоя, получаемого методом искрового упрочнения, и их взаимосвязи с технологическими режимами обработки // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. 27-28 октября 2009 г: Материалы конференции. Том 1 / Уфим. гос. авиац. технич. ун-т.– Уфа, 2009. – С.124-125.

39. Зарезин, В.Е. Повышение ресурса соединений сварных узлов и конструкций железнодорожной техники // ТТПС. 2015. №4 (34). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-resursa-soedineniy-svarnyh-uzlov-i-konstruktsiy-zheleznodorozhnoy-tehniki> (дата обращения: 01.08.2019).

40. Илюшкин, М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндрической заготовки) [Текст] // Ульяновск: УлГУ, 2013. - 112 с.

41. Илюшкин, М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA [Текст] // Ульяновск, 2012. - 91 с.

42. Информационно-аналитическое обеспечение упрочнения статико-импульсной обработкой [Текст] / А.В. Киричек [и др.]; -М.: Машиностроение-1, 2009. 170 с.

43. Информационное обеспечение статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.В. Киричек [и др.] // Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2008. - № 4/272 (550). - С. 4-11.

44. Каледин, Б.А. Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием [Текст] / Б.А. Каледин, П.А. Чеп. Минск: Наука и техника, 1974. - 232 с.

45. Киричек А.В., Афонин А.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния резьбонакатного инструмента и заготовки методом конечных элементов // СТИН, №7, 2007, С.21-25.

46. Киричек А.В., Афонин А.Н. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния тел при поверхностно-объемной пластической деформации // Сб. статей по матер. Второй междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». М.: ИМЕТ РАН, 2007. - С. 684-685

47. Киричек, А.В. Деформационное упрочнение управляемыми ударными импульсами [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. - № 10. - С. 3-7.

48. Киричек, А.В. Обеспечение качества несоосных винтовых механизмов деформационным упрочнением их сопрягаемых деталей: дис. . докт. техн. наук: 05.02.08 / Киричек Андрей Викторович. М., 1999. - 439 с.

49. Киричек, А.В. Повышение долговечности деталей машин созданием гетерогенно-наклепанной структуры [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов // Тяжелое машиностроение. 2010. - № 7. - С. 4-7.

50. Киричек, А.В. Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.В. Киричек, А.П. Бабичев, В.Ю. Блюменштейн // Справочник. Инженерный журнал. 2011. - № 5. - С. 47-52.

51. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст]: библиотека технолога / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. М.: Машиностроение, 2004.-288 с.

52. Когаев, В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени [Текст] / М., Машиностроение, 1977. - 232 с.

53. Козулин А.А., Красновейкни В.А., Скрипняк В.В., Хандаев Б.В., Ли Ю.В. Механические свойства алюминий магниевого сплава после интенсивной пластической деформации [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. - 2013. - № 6. - С. 888-895.

54. Контроль и диагностика при обеспечении качества машиностроительных изделий [Текст]: коллективная монография / М.И. Абашин [и др.]; под ред. А.В. Киричека и К.В. Подмастерьева. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. - 338 с.

55. Костичев, В.Э. Повышение сопротивления усталости коленчатых валов тепловых двигателей: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Костичев Владислав Эдуардович. - Самара, 2017. - 16 с.

56. Кочубей, А.А. Технологическое обеспечение упрочняющей обработки деталей во вращающемся электромагнитном поле: автореферат дис. ... канд.техн. наук: 05.02.08 / Кочубей Анатолий Анатольевич. - Ростов-на-Дону, 2017. - 21 с.

57. Лахтин, Ю.М. Материаловедение [Текст] / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. - М.: Машиностроение, 1972. 510 с.

58. Лебедев, В.А. Моделирование процесса ППД свободнодвижущимися инденторами / В.А. Лебедев, А.А. Кочубей, А.А. Ломовцев // Динамика технических систем - 2015: сб. тр. XII Междунар. научно-технической конференции, 16-17 декабря / под ред. А.Д. Лукьянова. - Ростов н/Д, 2015. - С. 295 – 299.

59. Лебедев, В.А. Оценка параметров качества поверхностного слоя, упрочненного в процессе магнитодинамической обработки / В.А. Лебедев, А.А. Кочубей, И.В. Чумак // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. - №8, Ч. 2. - С. 56-63.

60. Лебедев, В.А. Технологическое обеспечение качества поверхности при вибрационной ударно-импульсной обработке: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Лебедев Валерий Александрович. - Тула, 1984. - 185с.

61. Лебедев, В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования [Текст] / В. А. Лебедев. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. - 183 с.

62. Лебедев, В.А. Энергетические аспекты упрочнения деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования [Текст]: монография / В.А.Лебедев. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007.- 156 с.

63. Лукин В. И., Иода Е. Н., Пантелеев М. Д., Скупов А. А. Влияние термической обработки на характеристики сварных соединений высокопрочных алюминийлитиевых сплавов // Труды ВИАМ. 2015. № 4 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/801.pdf>.

64. Марковец, М.П. Определение механических свойств металлов по твердости [Текст] / М.: Машиностроение, 1979. - 191 с.

65. Матлин, М.М. Прогнозирование глубины наклепанного слоя при комбинированном упрочнении [Текст] / М.М. Матлин, С.Л. Лебский // Вестник машиностроения. 2001. - № 4. - С. 56-58.

66. Мейз, Д. Э. Теория и задачи механики сплошных сред [Текст] / Пер. с англ. Е. И. Свешниковой; Под ред. М. Э. Эглит. - Москва: Мир, 1974. - 318 с.

67. Металлургия и металловедение: Справочник [Текст] / Р. Циммерман, К. Гюнтер; Перевод с нем. Б. И. Левина, Г. М. Ашмарина. - М.: Metallurgiya, 1982. - 479 с.

68. Методы определения динамических характеристик генератора импульсов для статико-импульсной обработки [Текст] / А.В. Киричек [и др.] // Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2008. № 4-4/272 (550). - С. 4-7.

69. Механика нагружения поверхности волной деформации [Текст] / А.Г. Лазуткин А.Г. [и др.]. М.: Машиностроение-1, 2005. - 149 с.

70. Механические свойства микросталлического алюминиевого сплава АМг6. / В.Н. Чувильдеев и др. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2008, № 4, с. 35–42.

71. Митрофанова, К.С. Конечно-элементное моделирование поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом [Текст] // Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении. Сб. тр. II Всероссийской молодежной научно-практической школы. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. 2016.

72. Михайлов В.Е., Слепцов О.И. Эффективность методов повышения работоспособности несущих узлов горнотранспортной техники в условиях низких температур. // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 4 (2). Тематический выпуск.- С.519-521.

73. Наземные дистанционно-управляемые боевые модули. Основные определения и классификационные признаки / М.Г. Домаников, М.В. Рябов, А. А. Пикалов // Известия ТулГУ 2017. № 12-3. – С.52-60.

74. Нехорошков, О.Н. Применение метода ультразвуковой ударной обработки для сварных соединений конструкционных сталей / О.Н. Нехорошков, В.П. Першин, Б.С. Семухин // Вестник ТГАСУ. 2006. - №2. -С.120-125.

75. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст]: справочник / Л.Г. Одинцов. М.: Машиностроение, 1987. - 328 с.

76. Папшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Д.Д. Папшев. М.: Машиностроение, 1978.- 152 с.

77. Патент РФ № 2090342 Гидроударное устройство для обработки деталей поверхностным пластическим деформированием / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев. Бюлл. № 26, 1997.

78. Патент РФ № 2317886 Степанов Ю.С., Киричек А.В., Соловьев Д.Л. и др. Способ статико-импульсной обработки фасонных поверхностей ППД / Бюл. №34,2008.

79. Патент РФ № 2319594 Степанов Ю.С., Киричек А.В., Соловьев Д.Л. и др. Устройство для статико-импульсной обработки фасонных поверхностей / Бюл. №34, 2008.

80. Патент РФ 2319596. Степанов Ю.С., Киричек А.В., Афанасьев Б.И. и др. Устройство для статико-импульсного упрочнения сложнопрофильных деталей / Бюл. №8, 2008.

81. Патент РФ №2339704 Овчаренко А. Г., Козлюк А. Ю. Способ комбинированной магнитно-импульсной обработки поверхностей инструментов и деталей машин / Бюл. № 33, 2008. – 6 с.

82. Патент РФ № 2364490 Способ статико-импульсного упрочнения плоских поверхностей / Ю.С. Степанов и др. Бюлл. № 23, 2009.

83. Патент РФ № 2364491 Устройство для статико-импульсного упрочнения плоских поверхностей / Ю.С. Степанов и др. Бюлл. № 23, 2009.

84. Патент РФ № 2387531 Статников Е.С. Способ ультразвуковой ударной станочной обработки поверхностей тела для исправления дефектов и упрочнения рабочих поверхностей / Бюл. №12, 2003.

85. Патент РФ № 2413776 Огури К., Сэкигава Т., Иноэ А. Способ упрочнения металлической детали и конструктивного элемента / Бюл. №7, 2011.

86. Петросов, В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента [Текст] / В.В. Петросов. - М.: Машиностроение, 1977. - 166 с.

87. Плесецов, Ю. А. Анализ прочностных характеристик гнутых профилей при их деформационном упрочнении / Ю. А. Плесецов // Кузнечно-штамповочное производство . – 15/04/2010 . – N 4 . – С. 11-14.

88. Поверхностное упрочнение сварных соединений с целью повышения коррозионно-усталостной долговечности судовых конструкций [Текст]: научное издание / В. Д. Горбач, В. С. Михайлов // Судостроение. - 2000. - N 4. - С. 45-48.

89. Повышение пластичности алюминиевого сплава АМГ6 воздействием лазерного излучения / С.П. Мурзин и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010, Т.12, № 4. – С.178-181.

90. Повышение сопротивления усталости и коррозионной стойкости сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой и электроискровым легированием [Текст] / Г. И. Прокопенко, Б. Н. Мордюк, В. В. Кныш, С. А. Соловей, Т. В. Попова // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. - №3. – С.34-40.

91. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой [Текст] / В. В. Кныш, А. З. Кузьменко, О. В. Войтенко // Автоматическая сварка. - 2006. - №1. - С. . 43-47.

92. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой [Текст] / Л.М. Лобанов, В.И. Кирьян, В.В. Кныш, Г.И. Прокопенко // Автоматическая сварка. — 2006. — № 9 (641). — С. 3-11.

93. Пономарев, И.С. Повышение механических и специальных свойств сварных швов алюминиевых сплавов методом микроплазменного оксидирования: дисс...канд. техн. наук: 05.02.10 / Пономарев Илья Сергеевич. - Пермь, 2015. - 164 с.

94. Поярков, А.П. Повышение точности и работоспособности сварных судовых конструкций из алюминиевых сплавов поверхностным пластическим деформированием, электрогидроимпульсной и вибрационной обработкой: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.03.04 / Поярков Анатолий Павлович. - Санкт-Петербург, 1995. - 19 с.

95. Прогрессивные машиностроительные технологии [Текст]: коллективная монография. Том 1 / А.Н. Афонин [и др.]; под ред. А.В. Киричека. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. - 334 с.

96. Проектирование технологических процессов обработки деталей ШСУ / Р.З. Ягудина, М.Б. Флек // Вестник ДГТУ, 2013 г. №1-2 (70-71) – с. 127-134.

97. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник [Текст] / [С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др.]; Отв. редакторы Ф. И. Квасов, И. Н. Фридляндер. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1984. - 527 с.

98. Русин, Н. М. Влияние термомеханической обработки на структуру и свойства магниевого сплава АМ60 / Н. М. Русин // Перспективные материалы. - 2009. - № 1. - С. 13-17.

99. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин [Текст] / Э.В.Рыжов, А.Г.Суслов, В.П.Федоров. М.: Машиностроение, 1979. - 176 с.

100. Рыковский, Б.П. Местное упрочнение деталей поверхностным пластическим наклепом [Текст] / Б.П. Рыковский, В.А. Смирнов, Г.М. Щетинин. - М.: Машиностроение, 1985. - 152 с.

101. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность [Текст]: руководство и справочное пособие / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. 3-е изд., перераб. и доп.; под ред. С.В. Серенсена. М.: Машиностроение, 1975. - 488 с.

102. Скачков, В.М. Химическое легирование скандием, цирконием и гафнием сплавов на основе алюминия: автореферат дис. ... кандидата химических наук: 02.00.04 / Скачков Владимир Михайлович. - Екатеринбург, 2013. - 19 с.

103. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст] / В.М. Смелянский. М.: Машиностроение, 2002. - 300 с.

104. Соловьев, Д.Л. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: дис...докт. техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / Соловьев Дмитрий Львович. - Орел, 2005. - 384 с.

105. Сплав 1570С – материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК «Энергия» / А.В. Бронз, В.И. Ефремов, А.Д. Плотников, А.Г. Чернявский // Космическая техника и технологии. 2014. № 4 (7). С.62–67.

106. Структура и свойства сварных соединений, выполненных лазерной и точечной сваркой / Л.Б. Зуев и др. // Физ. мезомех. - 2005. - Т. 8. - № СпецВ. - С. 87-90.

107. Сулима, А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов [Текст] / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. М.: Машиностроение, 1974. - 256 с.

108. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин [Текст] / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. М.: Машиностроение, 1988. - 240 с.

109. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин [Текст] / А.Г. Суслов. М.: Машиностроение, 2000. - 320 с.

110. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения [Текст] / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. М.: Машиностроение, 2002. - 684 с.

111. Тарасов, Д. Е. Повышение контактной выносливости комбинированным упрочнением статико-импульсной обработкой и цементацией: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Тарасов Дмитрий Евгеньевич. - Орел, 2013. - 19 с.

112. Технологические методы упрочнения деталей машин Текст.: учеб. пособие [Текст] / А.В. Киричек [и др.]. 2-е изд. - М.: Машиностроение-1, 2009. - 282 с.

113. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений [Текст] / А.Г. Суслов [и др.]; под общей ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. - 448 с.

114. Устранение местных деформаций типа "бухтина" путем электродинамической обработки / Л. М. Лобанов [и др.] // Автоматическая сварка. - 2014. - № 11. - С. 3-9.

115. Цветков, А.С. Повышение надёжности крупногабаритных сварных хладостойких конструкций ответственного назначения за счёт снижения уровня остаточных напряжений: автореферат дис.... канд. техн. наук: 05.16.09 / Цветков Александр Сергеевич. - Санкт-Петербург, 2011. - 31 с.

116. Чепан, П.А. Эксплуатационные свойства упрочнённых деталей [Текст] / П.А. Чепан, В.А. Андрияшин. Минск: Наука и техника, 1988. - 192 с.

117. Школьник, Л.М. Методика усталостных испытаний [Текст]: справочник / Л.М. Школьник. М.: Металлургия, 1978. - 304 с.

118. Эффективность упрочнения высокочастотной механической проковкой стыковых сварных соединений с длительной наработкой / В.В. Кныш, С.А. Соловей, А.З. Кузьменко // Автоматическая сварка. — 2014. — № 11 (737). — С. 46-49.

119. Diitenberger, M. Development of a high strain-rate dependent vehicle model / M. Diitenberger, M. Buyuk, C-D Kan. – LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2005, B-III-1-10.

120. G. Strang and G. J. Fix, An Analysis of the Finite Element Method / Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1973.

121. Kirichek A.V., Afonin A.N. Engineering of thread rolling dies of high wear resistance // Proceedings 2010 Joint China-Russia Symposium on Advanced Materials and Processing Technologies, Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. – P. 137 – 143.

122. Mechanics of plastic deformation in metal processing / Erich Gottfried Thomsen, Charles T. Yang, Shiro Kobayashi. – 1965. – 486 p.

123. Shiro Kobayashi, Soo-Ik Oh, Taylan Altan, Metal Forming And The Finite Element Method / New York: Oxford University Press, 1989. ISBN: 0-19-504402-9. 377 p.

**ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Измерение микротвердости методом Виккерса в соответствии с ГОСТ 2999-75. Измерения производились на автоматическом твердомере КВ 30 S.

В соответствии с рекомендациями ГОСТ 2999-75 для алюминиевых сплавов, была выбрана нагрузка на алмазную пирамиду равная 9,807 Н (1 кгс). Предварительно измерены диагонали отпечатков для определения минимального расстояния от края образца и края смежного отпечатка. Размеры диагоналей отпечатка составили 0,21 мм. В соответствии с требованиями ГОСТ и рекомендациями по эксплуатации твердомера расстояние между центром отпечатка и краем образца принято равным 0,5 мм, расстояние между центром отпечатка и центром соседнего отпечатка принято равным 0,7 мм (рисунок 1).

Минимальная толщина образца составляла 10 мм, что многократно превосходит требование: толщина образца должна составлять не менее 1,5 длины диагонали отпечатка от алмазной пирамиды. Твердость измерялась на микрошлифах с полированной поверхностью. Шероховатость поверхности образцов составила 0,4 мкм [ГОСТ 2999-75, стр. 2].

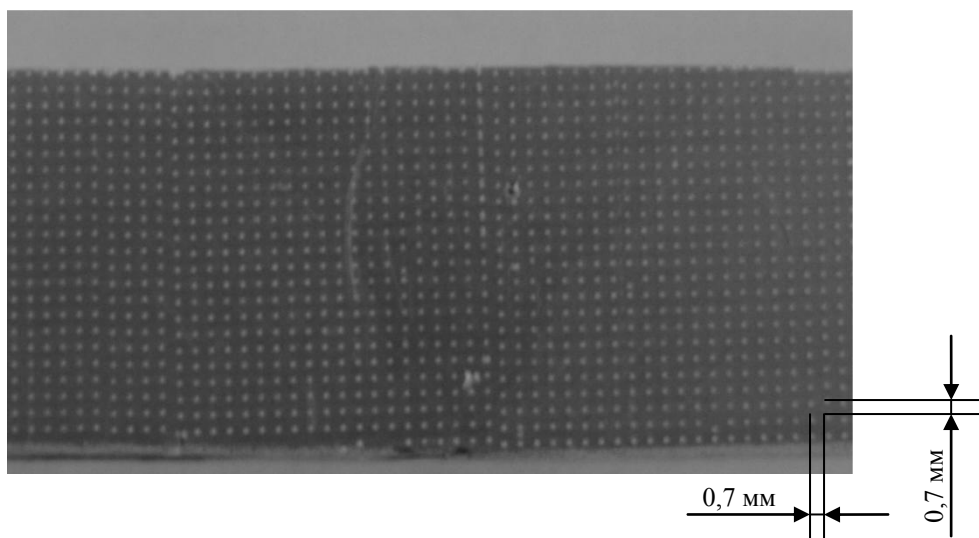


Рисунок 1 – Схема измерения микротвердости
(схема нанесения отпечатков для измерения микротвердости)

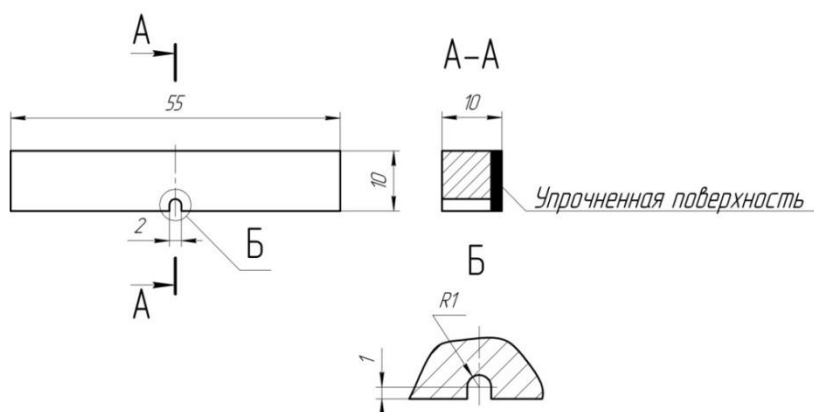
Обработка полученных данных и построение эпюр микротвердости производились с помощью сертифицированной программы Statistica.

Экспериментальные исследования сопротивления ударному изгибу и определение значения ударной вязкости материала производились на ударном копре (рисунок 2, а).

Ударная вязкость определялась в Дж/см² (кгс·м/см²). Для испытания применялись образцы, форма, размер и качество поверхности которых соответствуют указанным в [ГОСТ 9454-78 в п. 1.1].



а)



б)

Рисунок 2 – Ударный копер (а) и чертеж образца для испытаний ударной вязкости материала (б)

Испытания образцов на статическое растяжение проводились на разрывной машине WDW-100E с максимальной нагрузкой 10 кН в соответствии с ГОСТ 1497-84. Общий вид разрывной машины представлен на рисунке 3. Программное обеспечение для оборудования позволяет в автоматическом режиме определять механические характеристики исследуемого материала, в частности условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ и предел прочности σ_B и строить диаграммы нагружения в координатах «Нагрузка – Перемещения» и «Нагрузка – Деформации». Чертеж и общий вид образцов для испытания на сопротивление статическому растяжению представлены на рисунке 4.



а)

б)

Рисунок 3 – Общий вид разрывной машины WDW-100 (а) и испытываемый образец, закрепленный в захватах (б)

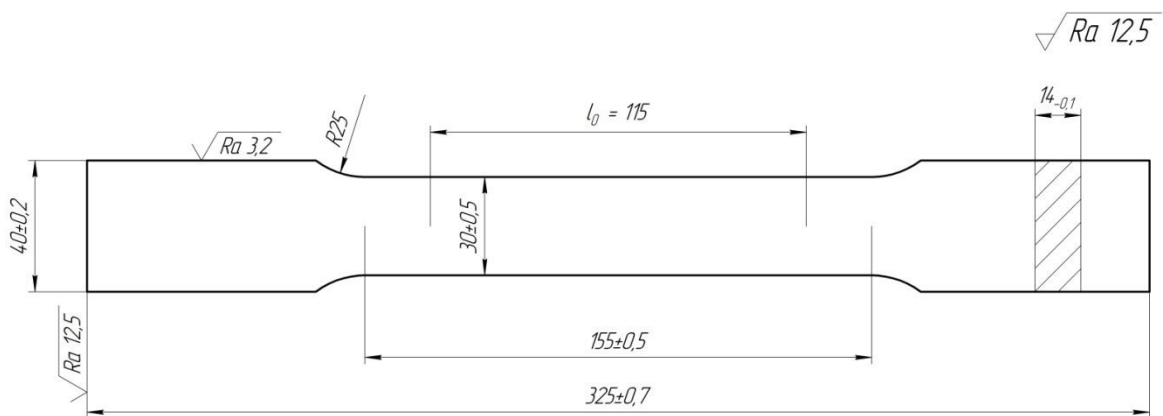


Рисунок 4 – Чертеж и вид образцов для прочностных испытаний

Для выявления структуры материала и дробления зерен в поверхностном слое в результате МК ВДУ необходимо проведение металлографических исследований.

Предварительным этапом для проведения металлографических исследований является подготовка шлифов. Основным моментом при изготовлении шлифов является предотвращение повреждения поверхности из-за микроструктурных изменений в результате влияния высоких температур и деформации.

Шлифы изготавливались в следующей последовательности:

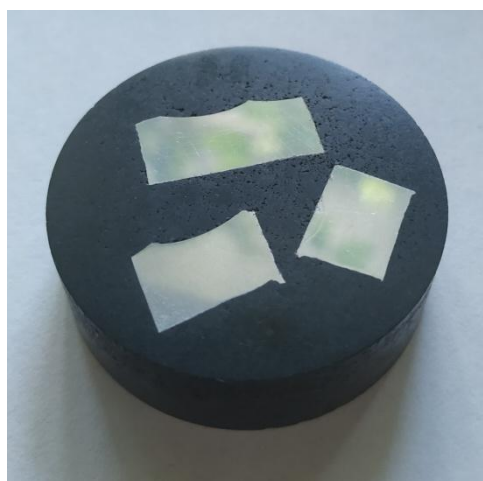
- вырезка и заливка эпоксидной смолой образца, установленного в оправку;
- полирование и травление для выявления микроструктуры.

Каждая последующая операция проводилась до полного удаления повреждений поверхности, внесенных на предыдущей операции.

Микроструктурные исследования производились на моторизованном цифровом микроскопе Leica DVM6A с кратностью увеличения до 2500х (рисунок 5, а).



а)



б)

Рисунок 5 – Цифровой микроскоп Leica DVM6A (а) и образцы для металлографических исследований (б)

Химическое травление для выявления микроструктуры проводилось в течение 0,5-1 мин в реагенте Келлера, состоящем из 2 мл плавиковой кислоты HF (48 %) и 3 мл соляной кислоты HCl на 190 мл воды. После травления следует промывка в проточной воде, а затем осветление в 30-35% растворе азотной кислоты. Продолжительность осветления составляет 10-15 секунд. Данный реагент позволяет выявлять границы зерен и выделения в деформируемых сплавах.

Испытания по определению сопротивления усталости проводились в соответствии с ГОСТ 25.502-79. В качестве технологического оборудования применяется серво-гидравлическая испытательная машина для проведения динамических и статических испытаний (рисунок 6).

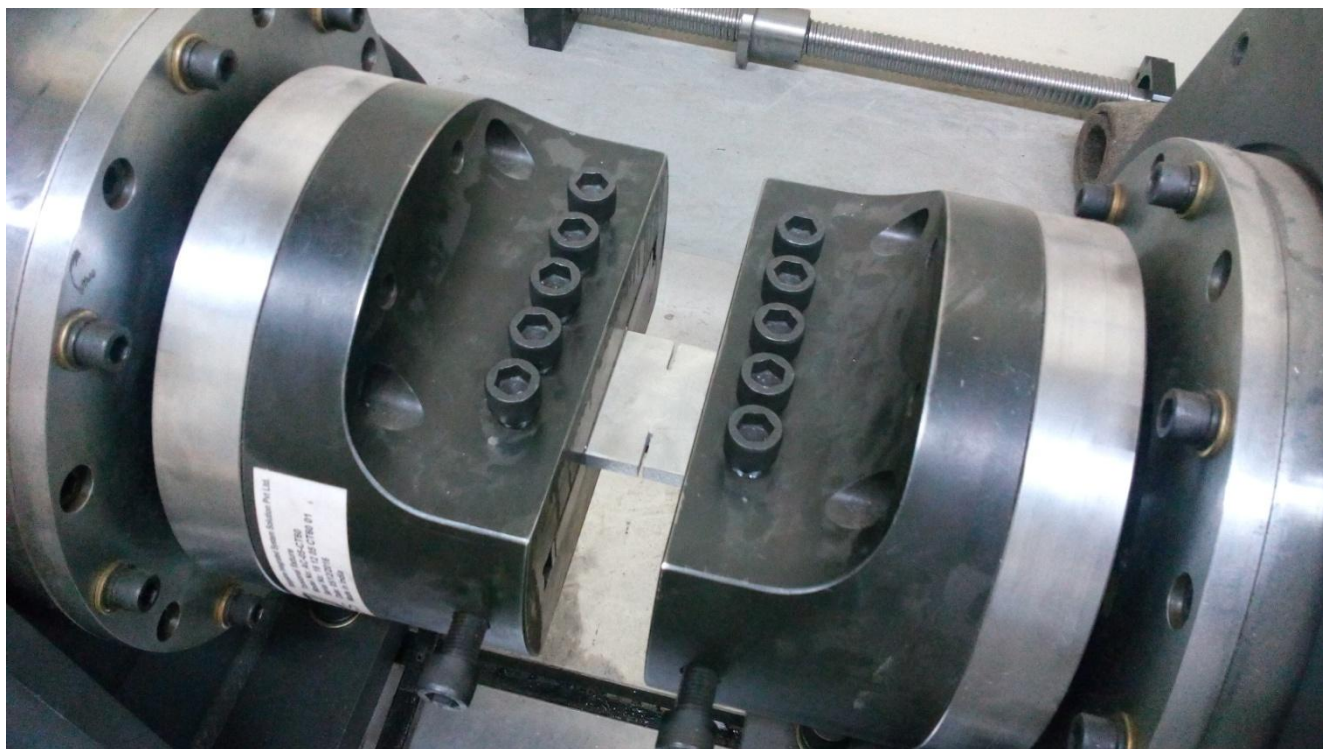


Рисунок 6 – Серво-гидравлическая испытательная машина
с установленным в захватах образцом

Так как каркасные сложнопрофильные детали являются плоскими и подвергаются знакопеременным нагрузкам, то и исследуются образцы плоской формы в условиях повторно-переменного кручения. Схема закрепления образца в захватах представлена на рисунке 7.

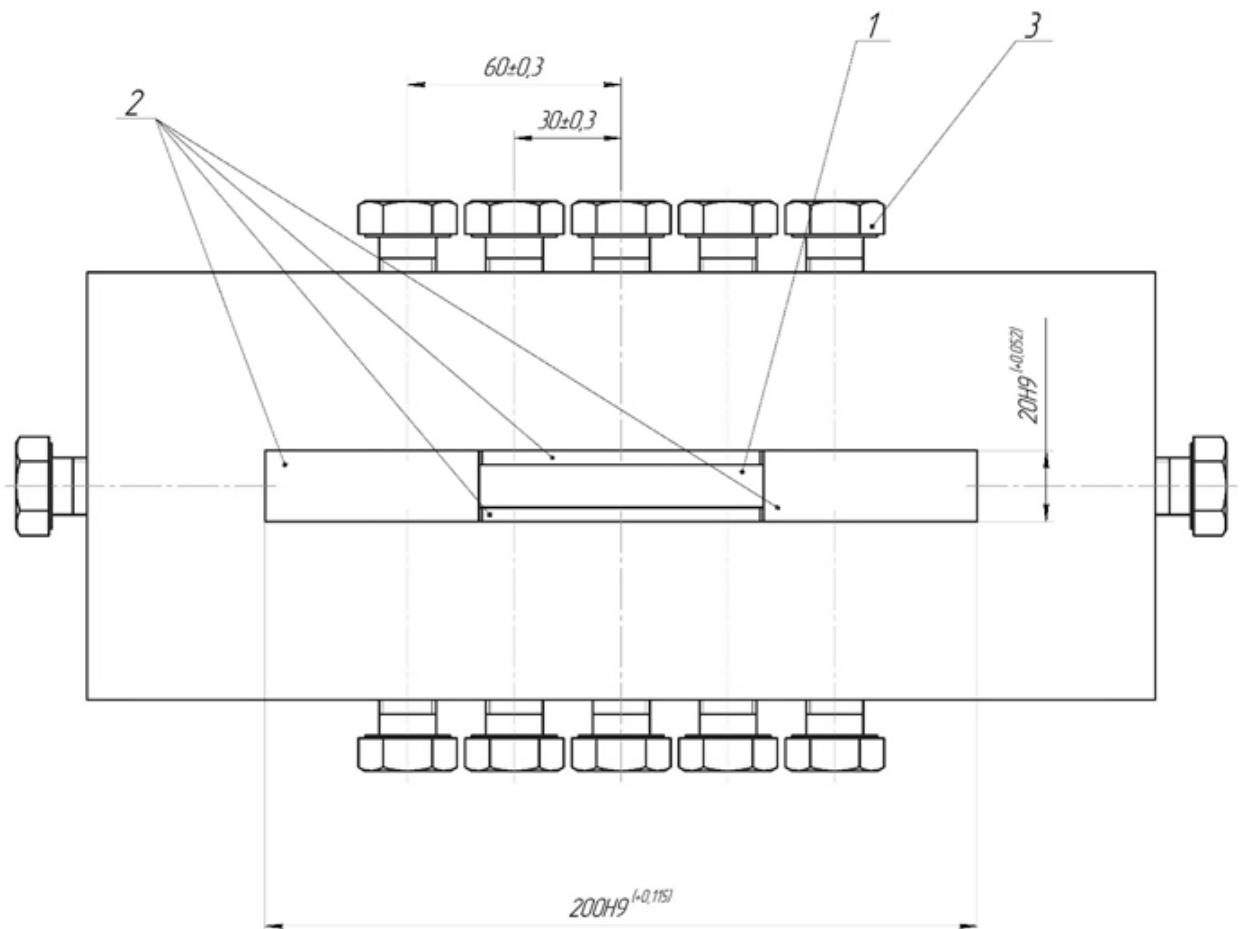
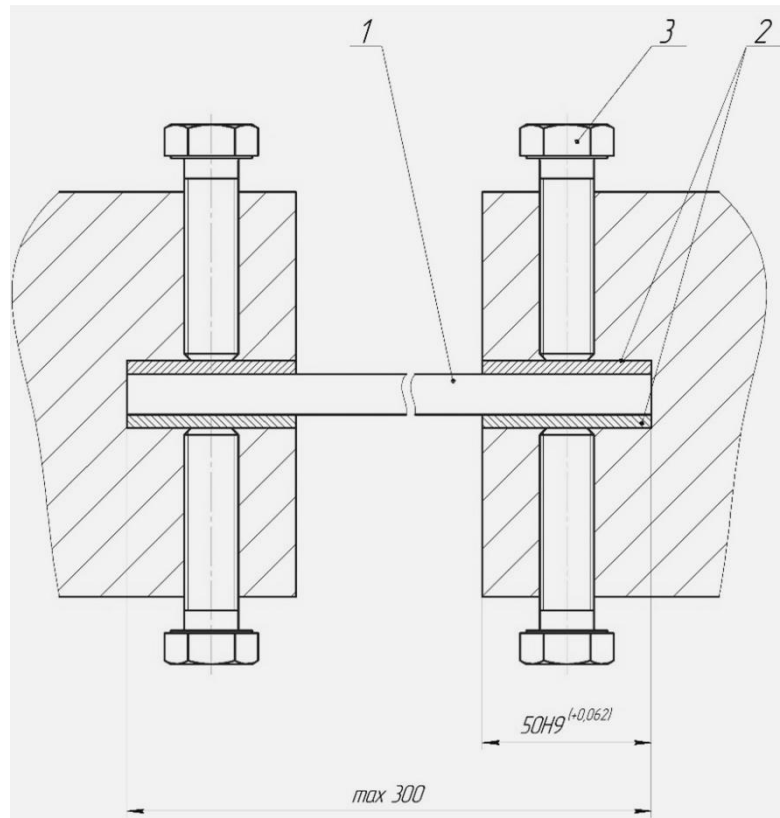


Рисунок 7 – Схема установки и закрепления образца в захватах испытательной машины: 1 – образец, 2 – пластины, 3 – болты

Образец 1 устанавливается в проем захватов и через пластины 2 закрепляется с помощью болты 3. Форма и размеры образца для испытаний сопротивления усталости представлены на рисунке 8.

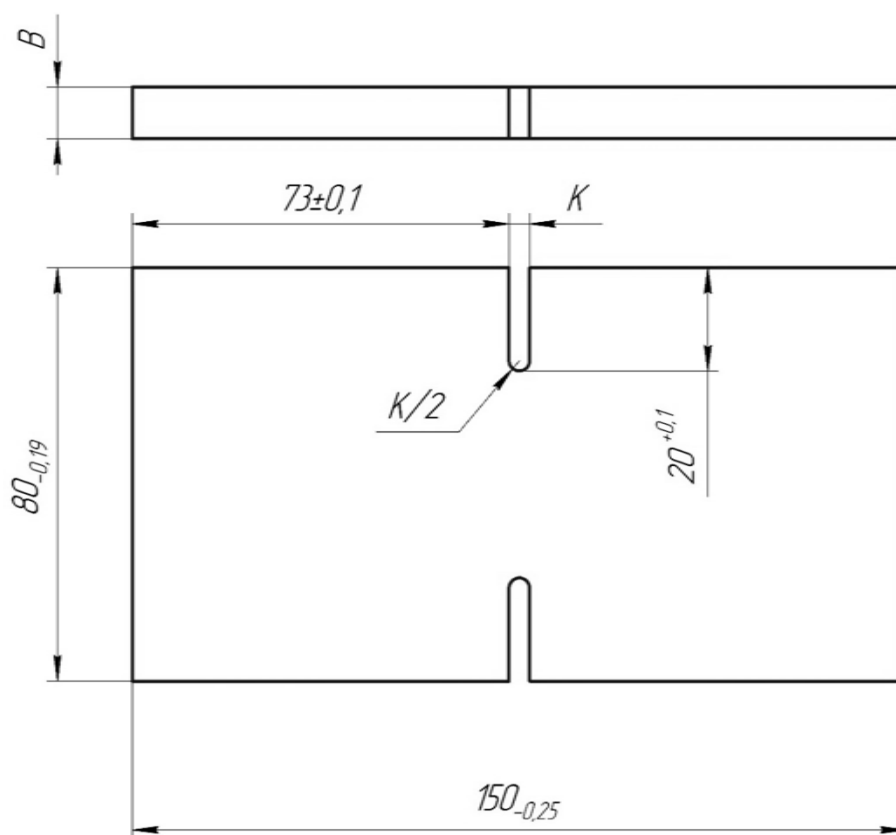


Рисунок 8 – Размеры плоского образца для испытаний на усталостную прочность при кручении (толщина $B = 12$ мм, ширина паза $K = 2$ мм)

**АКТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО АПРОБИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
МНОГОКОНТАКТНОГО ВОЛНОВОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО
УПРОЧНЕНИЯ КАРКАСНЫХ ПЛОСКИХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ
ДЕТАЛЕЙ**

«Утверждаю»
 Генеральный директор АО «ПО Муромский
 Машиностроительный Завод»
 Видонов А.И.
30 мая 2019 г.

АКТ

на внедрение научно-исследовательской работы



Мы, нижеподписавшиеся, представители исполнителя: проректор по перспективному развитию БГТУ, д.т.н., профессор Киричек А.В.; д.т.н., профессор кафедры «ТМС» Муромского института ВлГУ Соловьев Д.Л.; к.т.н., доцент кафедры «ТМС» Муромского института ВлГУ Баринов С.В.; аспирант кафедры «МСИИ» БГТУ Яшин А.В., с одной стороны, и представители заказчика: заместитель генерального директора, начальник ИТЦ Костаков А.А.; главный инженер Демин Д.Г.; начальник технического бюро Диков А.Г., с другой стороны, составили настоящий акт о внедрении результатов поисковой НИР «Технологическое обеспечение качества каркасных деталей из алюминиево-магниевых сплавов многоконтактным волновым деформационным упрочнением».

В результате внедрения НИР: разработки конечно-элементной модели многоконтактного волнового деформационного упрочнения (МК ВДУ) и определения рациональных технологических режимов упрочнения волной деформации; разработки конечно-элементной модели исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) изделия; разработки инструментальной многоконтактной оснастки для упрочняющей обработки; разработки технологических рекомендаций по реализации процесса МК ВДУ достигнуто: Повышение параметров качества поверхностного слоя и сопротивления усталости ответственных изделий изготавливаемых из алюминиево-магниевых сплавов (АМг), упрочненных по предлагаемой многоконтактной технологии в 1,5...3 раза по сравнению с базовой технологией изготовления.

Работа внедрена в производство специального изделия «Лодыга» с экономическим эффектом до 120 тыс. руб./ ед.

Представители заказчика

А.А. Костаков

Д.Г. Демин

А.Г. Диков

Представители исполнителя

А.В. Киричек, д.т.н. проф.

Д.Л. Соловьев, д.т.н., проф.

С.В. Баринов, к.т.н., доц.

А.В. Яшин

«Утверждаю»
 Генеральный директор АО «Муромский
 ремонтно-механический завод»
 _____ Е.Ф. Чумазин
 _____ 23 мая 2019 г.



АКТ

о внедрении научно-исследовательской работы

Комиссия в составе: первого заместителя генерального директора - директора по развитию Хомутова А.В., заместителя директора по развитию - начальника управления по продажам и развитию специальной и коммунальной техники Медникова И.И., заместителя начальника отдела инструментального хозяйства Семёнова А.Ю., проректора по перспективному развитию БГТУ, д.т.н., профессора Киричека А.В.; д.т.н., профессора кафедры «ТМС» Муромского института ВлГУ Соловьева Д.Л.; к.т.н., доцента кафедры «ТМС» Муромского института ВлГУ Барина С.В.; аспиранта кафедры «МСИИ» БГТУ Яшина А.В., рассмотрела результаты испытаний технологии многоконтактного волнового деформационного упрочнения (МК ВДУ), в ходе которых установлена возможность создания упрочненного поверхностного слоя в алюминиево-магниевых сплавах (АМг) глубиной 6-10 мм со степенью упрочнения до 2,1 раза выше исходной.

Принято решение, рекомендовать технологию многоконтактного волнового деформационного упрочнения (МК ВДУ) для повышения эксплуатационных характеристик деталей и изделий из сплавов группы АМг, выпускаемых на АО «МРМЗ».

Представители АО «МРМЗ»

_____ А.В. Хомутов
 _____ И.И. Медников
 _____ А.Ю. Семёнов

Представители

БГТУ и МИ ВлГУ

_____ А.В. Киричек
 _____ Д.Л. Соловьев
 _____ С.В. Барин
 _____ А.В. Яшин