

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС)

На правах рукописи



ИЖБУЛДИН ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

СОЗДАНИЕ РУЧНОЙ УДАРНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ  
СТРОИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-  
транспортные машины

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Андрей Дмитриевич Абрамов

Новосибирск – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	11
1.1 Классификация ударных машин и технологий.....	11
1.2 Анализ способов соединения строительной арматуры.....	14
1.3 Выбор оборудования для соединения арматуры.....	22
Выводы по главе.....	32
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОЕДИНЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ.....	33
2.1 Анализ известных моделей деформируемых тел.....	33
2.2 Обоснование целесообразности исследований по вибробезопасности ручных ударных импульсных машин.....	44
2.3 Циклы работы ручных ударных машин.....	48
2.3.1 Математическая модель ручной ударной машины.....	48
2.3.2 Фазы рабочего цикла ударной машины.....	50
Выводы по главе.....	58
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПРЕССОВКИ СТРОИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ В СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВТУЛКАХ.....	60
3.1 Получение статической нагрузочной характеристики процесса опрессовки арматуры.....	60
3.2 Проверка возможности соединения арматуры с помощью ручных ударных линейных электромагнитных машин.....	76
3.3 Проверка разрывной силы полученного соединения.....	78
3.3.1 Проверка на разрыв образцов, соединенных разными типами креплений.....	78
3.3.2 Проверка разрывной силы с заливкой образцов в бетон.....	81

3.4 Проверка уровня вибрационной нагрузки, передаваемой на корпус ударной машины.....	83
3.5 Результаты экспериментальных исследований.....	91
Выводы по главе.....	93
4 РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ОПРЕССОВКИ СТРОИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ И ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ.....	94
4.1 Процесс опрессовки арматуры.....	94
4.2 Инженерная методика проектирования ручных ударных машин для соединения арматуры.....	96
4.3 Создание инструмента для соединения строительной арматуры ...	97
4.4 Расчет элементов ударной машины для соединения арматуры.....	101
4.4.1 Расчет возвратной пружины.....	101
4.4.2 Расчет демпфирующего элемента.....	104
4.5 Новые конструктивные решения в машине для соединения строительной арматуры.....	105
4.6 Технологические операции, реализуемые с помощью ударных машин.....	108
4.7 Расчет экономического эффекта .....	110
Выводы по главе.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	129
Акт практического использования результатов диссертационной работы в производственном процессе ООО СЗ «КМС».....	130
Акт внедрения результатов работы в учебный процесс.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Патент на изобретение «Способ монтажа арматурных стержней».....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Патент на полезную модель «Устройство для соединения контактов».....	135

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** При строительстве различных объектов существует необходимость повышения скорости соединения арматуры. Одной из проблем при формировании вертикальных и наклонных армирующих стержней или контуров, является стыкование арматуры, так как при соединении внахлест для сварки или вязки присоединяемый стержень арматуры необходимо удерживать в вертикальном положении или под нужным углом. К тому же некоторые повсеместно применяемые типы арматуры из-за свойств металла не подлежат соединению с помощью сварки. Эти проблемы решаются при соединении арматуры встык с помощью трубчатых муфт, когда присоединяемый конец с закрепленной на нем муфтой стыкуется с зафиксированным (залитым в бетон) в вертикальном или наклонном положении концом. Такая технология существенно облегчает заливку высотных монолитных конструкций опор мостов и является на данный момент основной в мостостроении, чего нельзя сказать о монолитном домостроении, где и сегодня применяется сварка и вязка. Это связано с тем, что в России только на рубеже 2000-х годов началось активное строительство высотных (более 10-15 этажей) зданий в городах, тогда как за рубежом опыт такого строительства существует с 20-х – 30-х годов XX века. Учитывая, что сооружение монолитных зданий в нашей стране имеет больший объем относительно мостостроения, очевидна необходимость внедрения передовых менее затратных способов в промышленное и гражданское строительство.

Для решения этой проблемы необходимо провести анализ накопленного мирового опыта, связанного с соединением арматуры: рассмотреть основные технологии стыковки и инструмент, используемый для их реализации, относящийся согласно ГОСТ ISO/TR 12603-2014 [39] к строительным машинам; определить типоразмеры арматуры, применяемой в монолитном домостроении, а также выбрать наиболее предпочтительный с практической и экономической точки зрения механизированный инструмент, способный решать поставленную задачу в условиях строительных площадок с ограниченными трудовыми ресурсами.

В данный момент в мостостроении для соединения арматуры применяется переносной пневматический и гидравлический инструмент. Электромагнитные машины обладают малой массой, их рабочие характеристики не зависят от температурных условий, однако они не получили распространения в качестве ручного ударного электроинструмента.

Таким образом, создание ручного ударного инструмента для соединения строительной арматуры, обладающего повышенной производительностью, **является актуальной задачей.**

**Степень разработанности темы исследования.** Большой вклад в развитие машин с линейным электромагнитным приводом внесли П.М. Алабужев, Н.П. Ряшенцев, О.Д. Алимов, А.Д. Абрамов, В.А. Каргин, А.И. Москвитин, А.В. Фролов, Ю.З. Ковалев, Ф.Н. Сарапулов, О.Н. Веселовский, В.В. Ивашин, Г.Г. Угаров, Б.Ф. Симонов, Е.М. Тимошенко, А.Т. Малов, В.И. Малинин, К.М. Усанов, Ю.В. Нейман, Б.Н. Стихановский, В.И. Мошкин и другие учёные. Труды указанных авторов направлены главным образом на изучение процессов, проходящих в редкоударных переносных и стационарных линейных электромагнитных прессах, улучшение эффективности токопотребления и усовершенствование систем управления электромагнитом.

Диссертация соответствует специальности 05.05.04 - «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины», пункт 2: методы моделирования, прогнозирования, расчета технологических параметров, проектирования, испытания машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения.

**Целью диссертационной работы** является расчет параметров ручных машин с электромагнитным приводом для деформирования стальной втулки на арматуре и создание на основе полученных результатов ручного вибробезопасного ударного электроинструмента для соединения строительной арматуры.

Для достижения поставленной цели исследования были решены следующие **задачи:**

1. Выбрать и обосновать тип привода ручного ударного инструмента, способного соединять строительную арматуру. Выполнить аналитический обзор применяемых в

строительстве типоразмеров арматуры, пригодных для соединения ручным инструментом.

2. Разработать математическую модель рабочего цикла ручной ударной машины, учитывающую свойства обрабатываемой детали.

3. Выявить зависимости, устанавливающие взаимосвязь между основными параметрами ручных ударных машин и временем выполнения операции соединения строительной арматуры.

4. Экспериментально определить численные значения коэффициентов, необходимых для расчета технологических параметров выполнения операции соединения строительной арматуры.

5. Разработать инженерную методику проектирования ручной ударной машины для соединения арматуры.

6. Оценить экономический эффект от внедрения технологии соединения арматуры с помощью ручных ударных машин.

**Объектом исследования** являются ручные ударные машины.

**Предметом исследования** являются закономерности протекания рабочих процессов ручных ударных машин.

**Научная новизна работы.**

1. Создана математическая модель взаимодействия ударной машины с обрабатываемой средой, описывающая динамику рабочих процессов ударной машины при выполнении технологической операции соединения арматуры, отражающая основные характеристики ударного привода и деформируемой стальной втулки, раскрывающая фазы рабочего цикла ударной машины, имеющая сходимость с экспериментом в пределах 8%.

2. Получены зависимости величины осадки стальной втулки при ее деформировании на стержне арматуры от силы сдавливания, позволившие определить значения коэффициентов, необходимых для расчета характеристик динамических режимов деформирования втулки на арматуре (энергии удара, количества ударов, величины осадки).

3. Выявлены зависимости времени выполнения операции соединения арматуры от характеристик ударного привода (энергии удара, массы машины, количества ударов), позволяющие при проектировании определить параметры ручной ударной машины.

4. Доказана возможность реализации операции соединения строительной арматуры диаметром от 10 до 20 мм одним типоразмером машин с энергией удара 50 Дж с массой бойка 0,72 кг.

5. Установлено, что применение пружины, работающей по принципу сжатия в конструктивной схеме, в которой рабочий ход бойка осуществляется с помощью электромагнитной катушки, а обратный – с помощью возвратной пружины, обеспечивает реализацию энергии удара 50 Дж при массе 6 кг, а увеличение площади демпфера в 3,2 раза - снижение ударной нагрузки на оператора в 2,25 раза.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов работы.**

1. Разработана инженерная методика проектирования ручной ударной машины, основанная на зависимости времени выполнения операции соединения арматуры от параметров ударного привода (энергия единичного удара, масса бойка, скорость бойка) и характеристик осадки стальной втулки на арматуре.

2. Создана ручная ударная машина для соединения строительной арматуры, в которой применены новые конструктивные решения системы возврата бойка ударного привода, позволившие применять вибродемпфер увеличенной в 3,2 раза площади. Разработанная машина позволяет соединять арматурные стержни диаметром от 10 до 20 мм опрессовкой в стальных втулках за время меньшее, чем при их соединении сваркой.

3. Разработан новый способ соединения строительной арматуры в стальных обжимных втулках с помощью ручных ударных машин, подтвержденный патентом на изобретение. Новое конструктивное решение системы возврата бойка подтверждено патентом на полезную модель.

4. Предложенная инженерная методика проектирования может быть использована для создания ручной ударной машины с любым типом привода. Результаты диссертационных исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО СГУПС, на строительных площадках ООО СЗ «КМС».

**Методология и методы исследования.** Основные результаты диссертационной работы получены на базе фундаментальных законов механики, используемых для исследования процессов деформирования материалов и взаимного воздействия машины и обрабатываемого тела. Теоретические исследования проводились на базе научных основ технологии машиностроения, теории статического и виброударного деформирования материалов. При разработке общей методики поиска решений использовались основные положения системного анализа, методология поискового конструирования, методы научно-технического творчества. Поиск количественных соотношений между исследуемыми параметрами осуществлялся с помощью аналитических методов математического анализа. Результаты экспериментальных исследований получены на сертифицированном оборудовании, с использованием многократного повторения опытов и проведения испытаний в условиях производственного предприятия.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Математическая модель, учитывающая основные параметры ударного привода, деформируемой стальной втулки на арматуре, технологические параметры выполнения операции соединения арматуры (энергию удара, количество ударов, величину осадки втулки), описывающая рабочий цикл машины, разбитый на 6 фаз (разгон, неупругий удар бойка, деформирование втулки, передача ударного движения корпусу, обратный разгон бойка, удар бойка о корпус).

2. Зависимости величины осадки стальной втулки от силы сдавливания при ее деформировании на стержне арматуры, позволившие определить значения коэффициентов условной жесткости и силы начала пластического деформирования, необходимых для расчета динамических режимов деформирования втулки (энергии удара, количества ударов, величины осадки втулки).

3. Функциональные зависимости энергии удара, массы машины и количества ударов, необходимых для опрессовывания стальной втулки на арматуре, которые позволяют рассчитать основные параметры ударного привода.



4. Энергия единичного удара, равная 50 Дж, развиваемая ручной ударной машиной с массой бойка 0,72 кг является достаточной для совершения технологической операции соединения строительной арматуры.

5. Результаты экспериментальных исследований оценки величины ударного импульса показывают сходимость с значениями, рассчитанными в математической модели ударной машины, в пределах 8%.

6. Конструктивная схема привода системы возврата ударника с пружиной, работающей по принципу сжатия, расположенной в отдельном корпусе, позволяет за счет увеличения в 3,2 раза площади демпфера, снизить вибрационную нагрузку на оператора до санитарных норм.

**Степень достоверности научных положений** обеспечивается подтверждением адекватности математической модели, принятием корректных допущений, корректным использованием методов математического моделирования и экспериментальными исследованиями.

**Личный вклад автора** заключается в анализе основных существующих способов соединения строительной арматуры; выборе и обосновании способа соединения арматуры с помощью электромагнитных ручных машин ударного действия; в создании математической модели взаимодействия ударной машины и обрабатываемой детали; разработке методики проектирования ударной машины; экспериментальном определении зависимости величины осадки стальной втулки от усилия удара и проверке качественных характеристик полученной детали; в создании новой конструкции возвратного механизма электромагнитной линейной ручной ударной машины.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты исследования доложены на IX Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы. Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке» (Новосибирск, 2016); Международной научно-технической конференции «Транспортные и транспортно-технологические системы» (Тюмень, 2017); Международной научно-практической конференции «Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика» (Новосибирск, 2017); II Международной научно-технической конференции «Mechanical Science and Technology

Update» «Проблемы машиноведения» (Омск, 2018); X Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (Новосибирск, 2018); Региональной научно – практической конференции «Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования» (Новосибирск, 2017); Университетской научно-практической конференции СГУПС «Дни науки 2016» (Новосибирск, 2016).

**Реализация работы.** Основные результаты диссертационного исследования используются:

- ООО Специализированный застройщик «Краснообск. Монтажспецстрой» для соединения арматуры при строительстве высотных жилых зданий;

- в учебном процессе ФГБОУ ВО «СГУПС» специальностей и направлений 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»; 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» при изучении дисциплин «Основы технологии производства и ремонта транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования» (бакалавры); «Технология производства подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования» (специалисты); «Строительные и дорожные машины и оборудование» (специалисты).

**Публикации по работе.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе пять работ в изданиях, внесенных в перечень ВАК РФ, одна работа в издании, индексируемом наукометрической базой «Scopus», один патент на изобретение и один патент на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 135 страницах машинописного текста и содержит 71 рисунок, 18 таблиц, список литературы из 118 наименований и приложений на 6 страницах.

Работа выполнена на кафедре «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС).

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

## 1.1 Классификация ударных машин и технологий

Механизация ручного труда в различных отраслях деятельности направлена на увеличение производительности, повышение качества работ, сбережение ресурсов производства. Большинство технологических процессов без участия машин либо невозможны в принципе, либо время, затраченное на выполнение, и качество работ не могут удовлетворить потребности современного производства. Одним из важнейших средств механизации являются строительные и дорожные машины. В ГОСТ ISO/TR 12603-2014 для строительных машин предусмотрена следующая классификация:



Рисунок 1.1 - Классификация строительных машин

Таким образом, ручной ударный механизированный инструмент для соединения арматуры относится к пункту 3.9.3 «Оборудование для сварки и фиксации арматурных стержней» указанного стандарта.

В различных сферах производства находят свое применение технологии с использованием ударного воздействия, оказываемого на обрабатываемую деталь. Самое широкое распространение они получили в строительстве, ремонте подъемно-строительных и дорожных машин, специализированного железнодорожного подвижного состава.

Существуют несколько групп технологий, связанных с импульсным силовым воздействием на деталь. Основными из них являются: опрессовка (создание неразъемного соединения двух и более деталей); пробивка отверстий в различных материалах; погружение твердого тела в различные основания.

Сферы применения ударных технологий различны:

- в строительстве такие технологии находят применение для пробивки отверстий в различных основаниях – бетонных, металлических, из многослойных и композитных материалов, крепления конструктивных элементов к стенам и перекрытиям с помощью дюбелей, соединения арматуры в стальных втулках, медных и алюминиевых многожильных кабелей, разрушения бетонных и кирпичных конструкций, виброударного уплотнения бетона и сыпучих оснований [2, 55, 65, 86, 105];

- в эксплуатации железных дорог – для создания контактных соединений, оконцевания стальных тросов, применяемых в щеточных питателях на снегоуборочных машинах, дроссельных межрельсовых перемычек, забивки костылей в деревянные шпалы, упрочнения сварных швов при соединении рельсов (рисунок 1.2) [16, 29, 56, 101, 106];

- при ремонте строительного-дорожного, горного, автомобильного и железнодорожного парка машин, используются операции по оконцеванию резинометаллических рукавов высокого давления и соединению и обработке концов грузовых тросов и строп [26, 99].

- при восстановительном ремонте металлических деталей ударные машины используются для поверхностного упрочнения [30, 58, 67].

- в горной промышленности используются, в основном, машины большой размерной группы для таких операций, как бурение скважин и шпуров, забивка и извлечение обсадных труб, виброударного разрушения породы [94].

- при контроле качественных характеристик материалов деталей [96, 97].



а)



б)



в)

а) костыль, забитый в шпалу, б) рукав гидроаппаратуры с опрессованными на концах фиттингами, в) кабель с опрессованной клеммой

Рисунок 1.2 - Детали, обработанные с помощью энергии удара

К основным характеристикам указанных технологических операций относятся свойства материалов деталей, подвергающихся обработке, количество энергии, необходимое для совершения операции, массогабаритные характеристики детали, способ и количество циклов силового воздействия, вид конечного результата обработки – изменение формы или разрушение [13]. Увеличение энергии единичного удара машин позволяет не только повышать эффективность существующих ударных технологий обработки деталей, но и создавать новые технологические операции [110], которые могут быть осуществлены только при достижении необходимого высокого уровня ударной энергии, например соединение арматуры стальными втулками ударным опрессованием.

## 1.2 Анализ способов соединения строительной арматуры

По данным проектных организаций г. Новосибирска при возведении зданий в монолитных железобетонных конструкциях наиболее часто используется арматура типоразмеров, указанных в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Тип и диаметр арматуры, применяемой в различных конструкциях

Тип конструкции	Диаметр арматуры, мм
Фундамент	
Монолитный ростверк	12, 14, 16, 20
Выпуски из ростверка	6, 10, 12, 14, 16, 20
Стены подвала	10, 12, 16, 20
Диафрагмы	6, 12, 16, 20
Фундаменты под вентблоки	10
Колонны	
Каркасы колонн	10, 12, 20, 25, 28, 32, 36, 40,
Перекрытия	
Плиты перекрытия	8, 10, 12, 14
Фундамент	
Монолитный ростверк	12, 14, 16, 20

Из таблицы 1.1 можно сделать вывод, что наиболее часто применяемой является арматура диаметром от 10 до 20 мм.

Около двадцати лет назад в зарубежных странах строители, в случаях скоростного возведения масштабных железобетонных конструкций, начали активно применять для соединения арматуры, помимо повсеместно используемого метода – сваривания внахлест, стыковку в муфтах различного типа. Применение такой технологии принесло существенный экономический эффект за счет увеличения скорости монтажа армирующих конструкций. Операция соединения строительной арматуры в продольной оси необходима в первую очередь при

создании так называемых выпусков – основного вертикального каркаса сооружения, производимого из непрерывных стержней арматуры, начинающихся от фундамента и заканчивающихся в верхней точке вертикального железобетонного объекта – стены, колонны, мостовой опоры. На рисунке 1.3 представлен пример бетонного основания с выпусками, которые по мере заливки удлиняются.



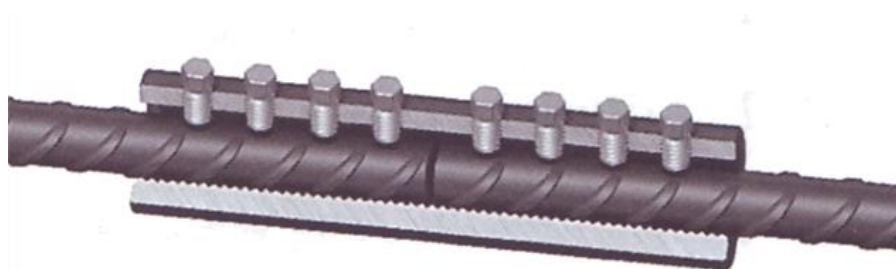
Рисунок 1.3 - Железобетонный фундамент с выпусками

Соединение арматуры в обжимных и винтовых муфтах на территории России и в ближнем зарубежье несколько лет назад начали применять при строительстве мостов. В гражданском же и промышленном строительстве до сих пор применяются традиционные методы сварки и вязки.

Значительные недостатки таких методов соединения послужили поводом для развития способов соединения арматуры с помощью муфт различного типа. Это обусловлено тем, что соединение стержней с помощью сварки является затратным с точки зрения времени выполнения операции, для производства работ допускаются только сварщики с высоким квалификационным уровнем, что делает такую операцию достаточно дорогостоящей. Соединение вязкой продольных вертикальных стержней допускается только в районах с очень низкой сейсмической активностью, что сильно ограничивает применение такого способа. Общим недостатком таких способов является создание нахлеста в месте соединения, достигающего 15-30 диаметров стержня, что увеличивает расход арматуры и с каждым соединением смещает ось вертикального стержня.

Первыми технологиями соединения арматуры, заменившими сварку, были обжимные и конусные муфты. Их применение дало толчок к развитию направления, в результате чего появились более совершенные способы, такие как резьбовые и комбинированные муфты.

Строители в США, Канаде, Германии, Австрии, Китае и Южной Корее в начале XXI века стали использовать такие типы соединения, как болтовые муфты (рисунок 1.4 а), резьбовые муфты с конусной и прямой резьбой (рисунок 1.4 б), обжимные муфты с резьбовой вставкой, а также муфты, представляющие собой различные комбинации представленных типов соединения [88].



а)



б)

а – соединение болтовыми муфтами; б – соединение резьбовыми муфтами.

Рисунок 1.4 – Типы муфтового соединения

Помимо способов, описанных ранее, применение нашли еще несколько методов муфтового соединения – стыковка в муфтах с цементным раствором, обжатие в муфтах с применением клина и еще несколько технологий, применение которых существенно ограничено или несет большие временные или финансовые затраты.



Основными типами соединений, наиболее часто применяемых при строительстве различных объектов, можно назвать обжимные, резьбовые, болтовые и комбинированные [15]. Резьбовые и болтовые соединения, показанные на рисунке 1.4, изготавливаются с использованием разъемных муфт, закрепляемых на концах арматуры. Резьбовые (рисунок 1.5) выполняются с использованием арматуры с предварительно нарезанной прямой или конусной резьбой на соединяемых концах, и металлических втулок с аналогичной внутренней резьбой. Уже несколько лет на европейском и азиатском рынке присутствуют образцы таких муфт, производимые компаниями «ArmFix» (рисунок 1.6), «Hebei Yida Steel Bar Connecting Technology Co.,Ltd», «Lenton» и др. Российская промышленность представлена в этом сегменте муфтами «Град».



Рисунок 1.5 - Готовое соединение с помощью резьбовой муфты



Рисунок 1.6 - Муфты «ArmFix»

Болтовые соединения предполагают закрепление на концах арматуры муфты, прижимающейся к стержням с помощью стяжных болтов, направленных перпендикулярно. Наиболее ярким примером таких соединений служат муфты, производимые фирмами «Lenton» и «Ancon». На рисунке 1.7 представлен пример такой технологии стыковки. Она предполагает поочередное погружение концов арматуры внутрь муфты и затяжку болтов. Существенным отличием технологий «Lenton» и «Ancon NBT» является способ затяжки болтов: первые затягиваются пневматическим или электрическим гайковертом до обламывания шестигранной головки болта, а вторые затягиваются динамометрическим ключом для исключения превышения момента затяжки.



Рисунок 1.7 Болтовые муфты фирмы «Lenton»

Обжимные соединения получают, согласно нормативным данным, с помощью гидравлического пресса многократным или однократным обжатием на обоих концах арматуры стальной цилиндрической втулки, изготовленной из отрезка стальной трубы.

На европейском рынке, помимо прессового обжатия применяется соединение по технологии «Flimu», представленное на рисунке 1.8, предполагающее протяжку муфты вальцами на скрепляемых стержнях с последующим осевым выравниванием.

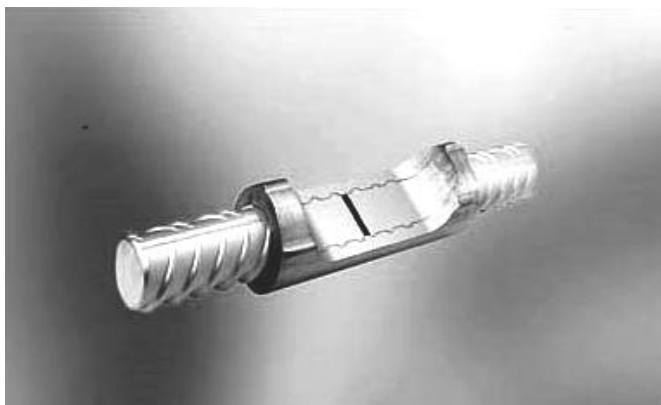


Рисунок 1.8 Соединение по технологии протяжки «Flimu»

Обжимные соединения, также как винтовые и болтовые, применяются для арматуры диаметром от 10 до 40 мм. Помимо гидравлического пресса для получения такого соединения активно применяются пиротехнические переносные прессы, а также ручные прессы (для малых диаметров арматуры). Оснастка для опрессовки также имеет разные виды.

Известны муфты отечественного производства «PRESCO», разработанные группой компаний «ПромСтройКонтракт», предназначенные для соединения арматуры А500С, А400С и А400 (А-III), соответствующей по качеству нормативам [35, 38, 98, 104] диаметром от 18 до 40 мм. Такая технология впервые широко применялась при строительстве олимпийских объектов в г. Сочи. Общий вид готовой продукции представлен на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 - Арматура, соединенная с помощью опрессовки в стальной втулке

Комбинированные муфты представляют собой втулки, соединяющиеся разными типами скреплений на разных концах или использующие несколько типов соединения одновременно. Наиболее часто используются комбинированные муфты в виде втулки, закрепленной с помощью обжима на одном из концов, и с помощью резьбы на втором конце. Встречаются муфты, одна часть которых обжимается на одном конце, вторая часть аналогично закрепляется на втором, и далее соединяются части между собой резьбовой вставкой, также входящей в состав муфты.

Выбор наиболее предпочтительного способа соединения арматуры среди представленных (рисунок 1.10) можно сделать исходя из характеристик оборудования и трудозатрат на производство работ. Наиболее технологичным способом можно назвать обжимное соединение в стальных втулках. Такая технология позволяет производить стыковку без предварительной подготовки концов стержней. При этом соединительная муфта может быть изготовлена из отрезка стальной трубы в непосредственной близости от места проведения работ. Это позволяет производить весь комплекс подготовительных операций в условиях строительной площадки. Следовательно, такая технология позволяет снизить трудовые и материальные затраты на создание армирующих конструкций зданий.



Рисунок 1.10 - Арматура различного диаметра, соединенная разными типами скрепления

В отличие от сварного и вязочного соединения, стыковое предполагает экономию арматуры за счет отсутствия расхода на нахлест, который составляет в соответствии со стандартом [95] от 100 до 500 мм в зависимости от диаметра и длины стержней. Также не требуется фиксация соединяемого стержня арматуры специальным приспособлением или силами второго рабочего в положении соединения, отличном от горизонтального.

К другим преимуществам стыкового соединения стоит отнести возможность его применения в бытовом строительстве. Это обусловлено отсутствием в технологическом процессе операций, требующих от производителя работ специфических навыков использования сварочного или вязочного оборудования, приспособлений для нарезания внутренней и наружной резьбы.

Одной из задач работы является изучение процессов, происходящих при формоизменении заготовки в процессе опрессовки втулки на арматуру, а также разработка технологического процесса соединения арматуры.

На основе анализа технологий соединения арматуры сформулированы основные преимущества стыковки строительной арматуры в обжимных втулках, относительно сварного и проволочного соединения:

- снижение расхода арматуры за счет скрепления встык;
- сокращение времени операции соединения;
- низкие требования к квалификации работников;
- в вертикальном и наклонном положении для фиксации арматуры не требуются дополнительные трудовые ресурсы и оборудование;
- прочность арматуры соответствует прочности стыка;
- температурные и усадочные трещины не образуются [4].

Такие преимущества дают право говорить о том, что соединение арматуры в стальных цилиндрических втулках является наиболее предпочтительным как для транспортного машиностроения, так и для гражданского монолитного бытового строительства.

### 1.3 Выбор оборудования для соединения арматуры

Основными требованиями технологической операции к оборудованию для ее производства являются высокая удельная энергия единичного удара, низкая масса машины, высокие показатели эксплуатационного ресурса и ремонтпригодности, низкая потребность в обслуживании, соответствие нормам безопасности. В таблице 1.2 приведено оборудование, которое используется в данный момент для обжимного соединения арматуры.

Таблица 1.2 - Оборудование, применяемое для опрессовки арматуры

Тип оборудования	Масса, кг
1. Пресс ручной гидравлический обжимной СН-90/80 с насосной станцией СГС-1-80Э380/3	40
2. Пресс гидравлический помповый ПГ-60	22
3. Пресс арматурный ПА-18	15

Однако гидравлические прессы требуют наличия насосных станций, что влечет за собой увеличение массы прессы, а, соответственно, снижает мобильность устройства. Основными техническими средствами, которые могут являться прототипами для создания нового инструмента для опрессовки строительной арматуры на данный момент можно назвать машины, приведенные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Инструменты, применение которых возможно для соединения строительной арматуры.

Тип оборудования, назначение	Масса, кг
1. Пиротехническая колонка УК-2М	8
2. Пресс ручной гидравлический ПГР-20М1 для контактных соединений с сечением до 240 мм <sup>2</sup>	5,6
3. Пресс гидравлический с электроприводом ПГЭ-20 для контактных соединений с сечением до 240 мм <sup>2</sup>	6,5
4. Пресс пиротехнический ППО-240 для контактных соединений с сечением до 240 мм <sup>2</sup>	4,3
5. Опрессователь контактных соединений с сечением до 240 мм <sup>2</sup>	4,2

На рисунке 1.11 приведены примеры оборудования для соединения арматуры в обжимных муфтах.



а) пресс ручной гидравлический обжимной СН-90/80 с насосной станцией СГС-1-80Э380/3, б) пресс арматурный ПА-18, в) пресс гидравлический помповый ПГ-60

Рисунок 1.11 - Основное оборудование для опрессовки арматуры

Для большинства образцов существующего оборудования характерны конструктивные недостатки, главным из которых является большая снаряженная масса. Например, стационарные молоты или прессы, имеющие различные источники энергии приведения в действие, не могут быть использованы на удаленных строительных площадках, ввиду имеющейся на таких объектах необходимости постоянного перемещения. Ручные и переносные гидравлические прессы (рисунок 1.12) требуют высокой точности изготовления узлов, что ведет к удорожанию конструкции и снижению ремонтпригодности, и, соответственно, невозможности использования на строительных объектах, ввиду их повышенного износа в условиях такого производства. К тому же работа с такими устройствами

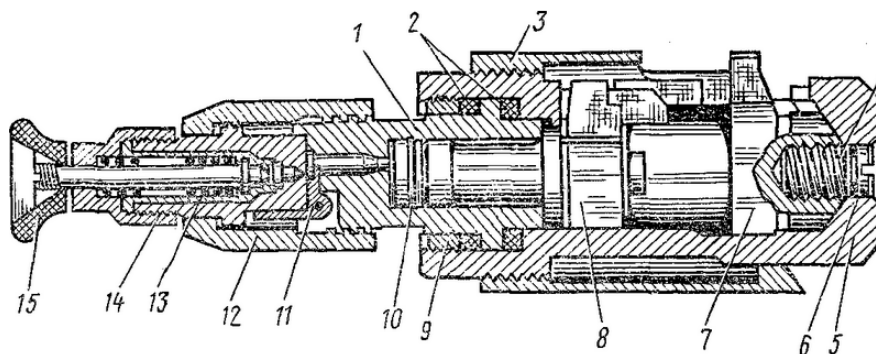


затруднена в условиях низких температур вследствие слабой прокачиваемости и высокой вязкости масла.



Рисунок 1.12 - Пресс ручной гидравлический ПГР-20М

Пороховые прессы (рисунок 1.13), применяемые на данный момент мостостроителями, также имеют несколько очевидных недостатков, таких как высокая стоимость пиропатрона, а, следовательно, и операции, к тому же в случае необходимости соединения арматуры различных диаметров существует потребность в регулировании энергии удара такого прессы [8]. Требования безопасности проведения работ накладывают дополнительные ограничения на применение такого оборудования.



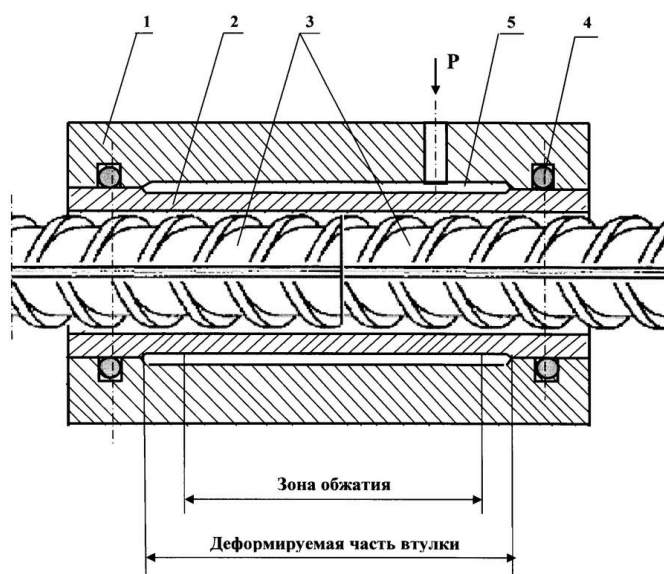
1 - ствол; 2 - резиновые демпферы; 3 - защитный кожух; 4 и 10 - пружинные стопорные кольца; 5 – корпус; 6 -упорный винт; 7 – матрица; 8 – пуансон; 9 - удерживающая гайка; 11 - экстрактор; 12 - затвор; 13 - пружина; 14 - ударник; 15 – пуговка

Рисунок 1.13 - Пресс пороховой ППО-240М



Известны способы стыкового соединения арматуры путем опрессовки втулки сразу на обоих концах арматуры при помощи надевающейся на втулку герметичной пневмокамеры и последующей подачей в полость между камерой и втулкой сжатого воздуха, под давлением которого и происходит обжатие втулки [78]. Схема такого способа представлена на рисунке 1.14 Основными недостатками данного способа можно назвать очевидный низкий ресурс герметизирующих манжет пневмокамеры, а как следствие – снижение качества произведенных работ. А также при использовании для реализации такой технологии ручного или переносного пневмоинструмента возможна обработка только типоразмеров арматуры с диаметрами от 6 до 8 мм. Схема способа соединения арматуры с помощью пневматических машин приведен на рисунке 1.14.

Устройства, содержащие в своем составе преобразователь электрической энергии вращательного движения двигателя в поступательное движение ударника, конструктивно сложны и имеют большую массу и габаритные размеры. Пневматические машины в свою очередь могут использоваться, как правило, только на объектах, оборудованных стационарной магистралью сжатого воздуха. Использование же переносного компрессора, совместно с устройством, связано с трудностями, и, фактически, позволяет классифицировать такой комплекс как переносной инструмент.



1 - обойма; 2 - втулка; 3 - концы арматуры; 4 - уплотнения; 5 - внутренняя полость

Рисунок 1.14 - Пример способа опрессовки втулки на арматуру

Известны другие способы и оборудование для формоизменения деталей трубчатой формы, к которым относятся переносные прокатные станки с вальцами и гибридные механическо-гидравлические прессы [117], однако их также нельзя отнести к классу ручных машин, что ограничивает применение такого оборудования и технологий в условиях строительной площадки.

Как было ранее сказано, для соединения арматуры обжимными втулками, в соответствии с нормативной документацией, применяются переносные гидравлические прессы. Помимо высокой массой комплекта для опрессовки, возможность использования таких устройств ограничена невозможностью их применения в условиях вертикально установленных стержней, концы которых находятся на некотором расстоянии от плоскости поверхности (пола). В таком случае наиболее предпочтительным является ручной инструмент, нагружающий соединение с помощью энергии удара.

Поскольку ручной ударный инструмент может применяться на строительных площадках со слабо развитой инфраструктурой, к нему предъявляются и такие, дополнительные к вышеперечисленным, требования, как возможность работы при отрицательных температурах, питание от источников ограниченной мощности (переносных генераторных установок), мобильность и быстрое приведение в рабочее состояние [5]. Соблюдение таких условий способствует наиболее правильному дозированию энергетического воздействия на обрабатываемый объект и обеспечивает высокое качество обработки детали.

Поэтому для реализации таких технологий целесообразно использовать электрический ручной или переносной инструмент, так как электрическая сеть является наиболее компактным и распространенным источником энергии [114].

Наибольшее внимание стоит уделить линейным электрическим машинам ударного действия, поскольку они надежны, удобны и безопасны. Удельная энергия единичного удара таких машин является, по сравнению с другими типами оборудования, наиболее предпочтительной, её уровень может достигать 60 Дж при частоте ударов до 2 Гц. Конструктивная схема привода ударного механизма в таком инструменте реализована без дополнительных энергопреобразователей, что

повышает ресурс, увеличивает ремонтпригодность, снижает материалоемкость при производстве. Указанные машины имеют и другие существенные преимущества, такие как простота конструкции (подвижным является только сопряжение якорь - боек), отсутствие дополнительных энергопреобразователей (как, например, в машинах, превращающих вращательное движение ротора в поступательное движение бойка), массогабаритные показатели, соответствующие требованиям к ручному инструменту [72, 107].

Ручные машины с линейным электромагнитным приводом начали применяться еще в двадцатых годах XX века. Первыми серийно выпускавшимися образцами являлись «Sintron» производства американской фирмы «National Electric», германские «AEG», «BEWI», и итальянские «SIMBI». Однако дальнейшее развитие зарубежных электрических ударных машин пошло по пути применения вращательно–поступательных машин.

На данный момент существует значительный опыт в разработке и практическом применении ударных машин с электромагнитным приводом. Большой вклад в их развитие внесли П.М. Алабужев, Н.П. Ряшенцев, О.Д. Алимов, В.А. Каргин, А.И. Москвитин, А.В. Фролов, А.Д. Абрамов, Ю.З. Ковалев, Ф.Н. Сарапулов, О.Н. Веселовский, В.В. Ивашин, Г.Г. Угаров, Б.Ф. Симонов, Е.М. Тимошенко, А.Т. Малов, В.И. Малинин, К.М. Усанов, Ю.В. Нейман, Б.Н. Стихановский и другие. Работы этих авторов содержат исследование линейных электрических машин, методы их проектирования и примеры практического использования.

Существуют различные схемы конструктивного исполнения двигателей ручного ударного инструмента [108]. Рабочий цикл таких машин, как правило, представляет собой несколько стадий: начальное положение бойка без воздействия на него электромагнитных сил, подача тока на обмотку, рабочий ход ударника с воздействием на материал, обратный (холостой ход) с приведением бойка в начальное положение. Описываемые в работе устройства отличаются механизмами возврата бойка. На данный момент известны несколько принципиальных схем таких машин [43].

Первая схема – электромагнитные машины с пружинным механизмом возврата (рисунок 1.15). Рабочий ход в таких машинах совершается за счет воздействия энергии обмотки статора машины на боек. Обратный ход совершается под воздействием сил упругости возвратной пружины. Пружина на верхней части рисунков является буфером, защищающим корпус машины от удара бойка на холостом ходу [87].

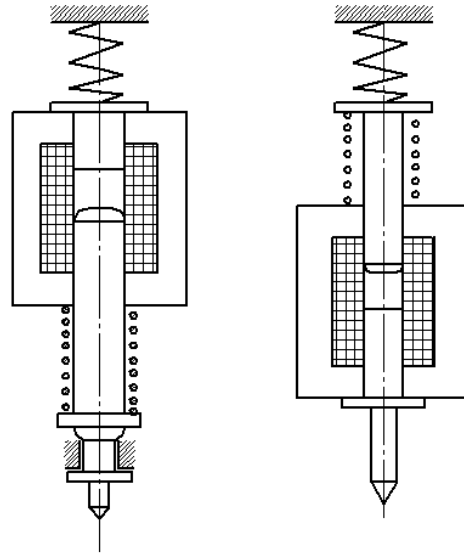


Рисунок 1.15 - Принципиальная схема машин с возвратной пружиной

Вторая схема – машины, имеющие в своем составе две катушки. Одна из них, как и на предыдущей схеме, предназначена для совершения рабочего хода ударника, вторая – для возвращения бойка в исходное положение за счет электромагнитных сил второй обмотки [21].

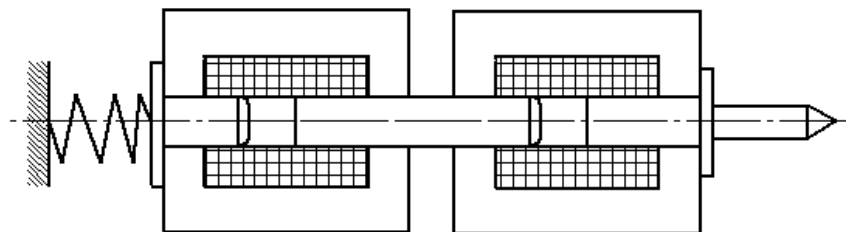


Рисунок 1.16 - Принципиальная схема машины с катушками рабочего и холостого ходов

Третья схема – машины, в которых перемещение бойка реализовано следующим образом: ударник относительно катушки перемещается до среднего

положения катушки за счет электромагнитных сил самой катушки, а в сторону рабочего органа за счет электромагнитных сил катушки и упругих сил пружины. Оборудование с такой конструктивной схемой привода называется машинами со свободным выбегом ударника. Схема такого исполнения представлена на рисунке 1.17.

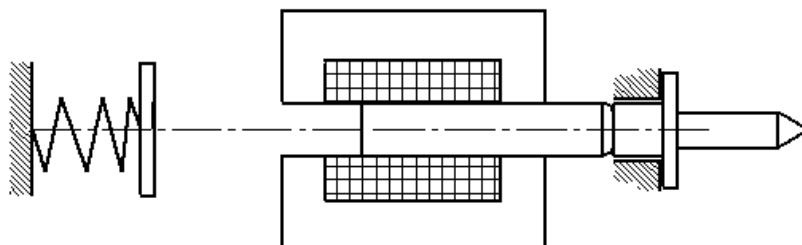


Рисунок 1.17 - Машина со свободным выбегом ударника

Принципиально системы возврата бойка машины в начальное положение можно разделить на электрические и автономные. Первые характерны для устройств с двумя электромагнитными катушками – силовой и возвратной, вторые – для устройств, в которых ударник возвращается в исходное положение посредством неэлектрических сил (силы тяжести, силы упругости пружины, постоянных магнитов) [91].

На основании результатов анализа конструктивных исполнений можно сделать вывод, что наиболее предпочтительными являются устройства с возвратом бойка, выполненным посредством пружины. Такой выбор можно объяснить несколькими причинами: двухкатушечные машины несколько сложнее конструктивно; также существует необходимость наличия более сложной системы управления. Другим существенным недостатком такой схемы является сильный нагрев, обусловленный разностью периодов работы силовой и возвратной катушек – первая используется только для совершения полезной работы, вторая же, помимо возвращения бойка в исходное положения, используется для удержания бойка в начальном положении, соответственно разогрев машины происходит не только во время использования машины непосредственно для совершения работы, но и в перерыве между операциями, то есть в период, когда инструмент включен в сеть.

Это обстоятельство ведет к обязательным перерывам в работе, отрицательно сказываясь на производительности труда. Важное отличие однообмоточных машин, с точки зрения характеристик производительности линейного электромагнитного двигателя, заключается в том, что такие машины обладают несколько большим КПД, относительно двухкатушечных, за счет того, что в последних присутствуют так называемые потери на перемагничивание подвижного элемента двигателя. Напротив, на преодоление сопротивления пружины тратится значительно меньше энергии. Другим преимуществом машин с пружинным возвратом является значительно меньшая масса (за счет разницы масс пружинного механизма и второй катушки) [14].

Так как для электромагнитного двигателя пороговое значение энергии единичного удара составляет 50-55 Дж при массе, позволяющей машине с таким двигателем считаться ручной, то полученные результаты позволяют считать, что для реализации ударного деформирования стальных втулок необходимо создание ручной электромагнитной машины ударного действия с энергией, не превышающей этого уровня. Дальнейшее увеличение энергии удара может привести к существенному росту массы машины. На основе изложенного, сформулированы требования к проектируемым электромагнитным машинам ударного действия, приведенные в таблице 1.4.

Таблица 1.4 Требования к ручным машинам

Масса машины	$\leq 10$ кг
Удельная энергия удара	$\geq 7$ Дж/кг
Скорость бойка	$\geq 10-20$ м/с
Виброскорость корпуса машины (в октавной полосе 8Гц)	$\leq 2,8$ м/с
Виброускорение корпуса (в октавной полосе 8Гц)	$\leq 1,4$ м/с <sup>2</sup>
Усилие нажатия	$\leq 200$ Н
Электрическая сеть	220 В; 50 Гц

Яркими примерами машин, соответствующих таким параметрам, являются универсальные виброударные машины типа ОЭМ и УИМ, разработанные В.А.

Каргиным, А.Д. Абрамовым и другими учеными. Такие машины с комплектом технологической оснастки представлены на рисунке 1.18.

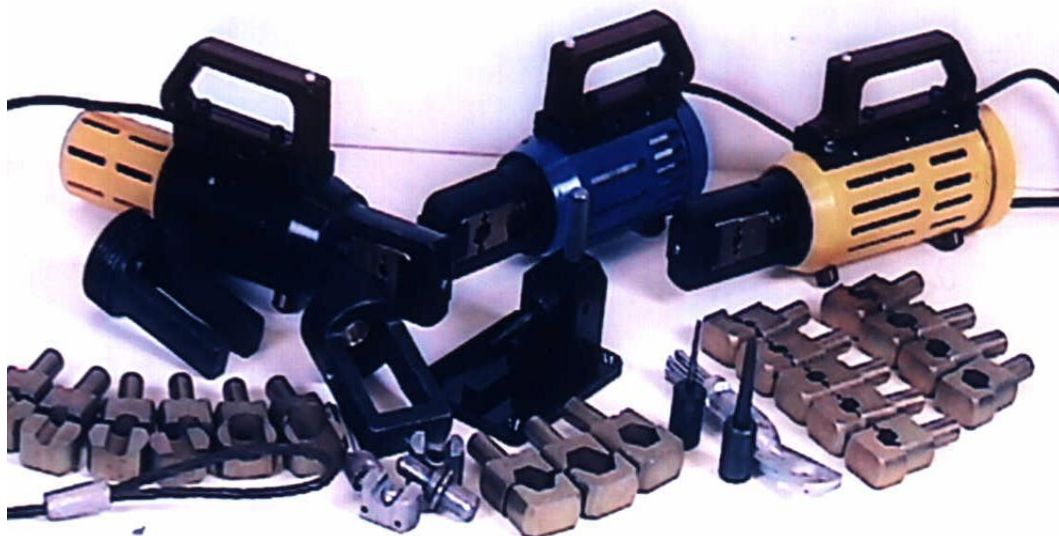


Рисунок 1.18 - Виброударные машины типа ОЭМ и УИМ

Накопленный опыт проектирования подобных машин дает право утверждать, что использование в конструкции инструмента для неразъемной стыковки стальной арматуры в цилиндрических втулках линейного электромагнитного привода позволит производить работы по соединению арматуры силами одного рабочего с допуском к работе с электроустановками мощностью до 1000 В с низкими трудовыми затратами.

Одним из главных достоинств таких машин является возможность производить стыковку арматуры в различном пространственном положении, что является определяющим при формировании непрерывных стержней вертикальных и наклонных конструкций зданий и сооружений. Помимо этого, ручные ударные машины с линейным электромагнитным приводом могут применяться при работе в широком температурном диапазоне – от минус 45 до плюс 50° С без изменения выходных характеристик. Низкая масса устройства и невысокая виброн нагруженность, дает возможность продолжительной работы оператору с незначительными регламентированными перерывами.

Стоит отметить, что данные машины, помимо неоспоримых достоинств, обладают некоторыми конструктивными недостатками. Для машины типа ОЭМ таковыми являются: перегрев возвратной катушки в режиме ожидания, то есть когда устройство включено в сеть, но не происходит рабочих ходов якоря; высокая масса и сложная схема управления работой за счет применения двух катушек. В машинах УИМ в качестве недостатков следует обозначить низкий ресурс пружинного возвратного механизма и быстрый перегрев катушки прямого хода за счет высокой степени «форсирования» электромагнитного двигателя.

Выводы по главе:

1. Определены диаметры арматуры от 10 до 20 мм, которые наиболее часто применяются при строительстве высотных зданий.
2. На основе анализа способов соединения строительной арматуры можно сделать вывод, что опрессовка в стальных цилиндрических втулках является наименее затратным с точки зрения времени и стоимости совершения операции.
3. Ручные ударные машины с линейным электромагнитным приводом, конструктивно выполненные с одной катушкой рабочего хода и пружинным возвратным механизмом являются инструментом, способным выполнять соединение строительной арматуры.



## 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОЕДИНЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

### 2.1 Анализ известных моделей деформируемых тел

Для изучения процесса соединения строительной арматуры необходимо смоделировать процесс опрессовки ударной машиной стальной цилиндрической втулки на стержне. Модель должна содержать в себе элементы, имитирующие руку оператора, саму машину, а также непосредственно обрабатываемое тело, имеющее определенные физические свойства. Если задача моделирования движения рабочих частей машины с учетом масс подвижных и неподвижных элементов, а также скорости движения подвижных частей является достаточно просто решаемой, то моделирование руки оператора уже представляет некоторые трудности, а формоизменения заготовки, из-за нелинейности процесса, сложно решается даже при условии некоторых допущений.

Для создания или адаптации готового оборудования для производства работ по соединению строительной арматуры необходимо определить условия работы машины. Главными задачами при создании устройств являются способность качественно и максимально быстро производить работу и не оказывать вредное воздействие на руку оператора. Изучение процессов взаимодействия всех элементов модели необходимо разбить на несколько основных этапов – определение энергии удара, необходимой для производства работ; определение массы и скорости движения бойка, при которой вибрационное воздействие на оператора не будет превышать установленных нормативами значений.

Основной задачей на первом этапе является анализ механизмов деформирования твердых тел, выявление на его основе типа деформации, и моделирование процесса деформирования объекта, обрабатываемого с помощью ударной машины.

Для изучения процесса деформирования твердых тел необходимо провести анализ видов и механизмов его протекания. Случай, когда расстояния между

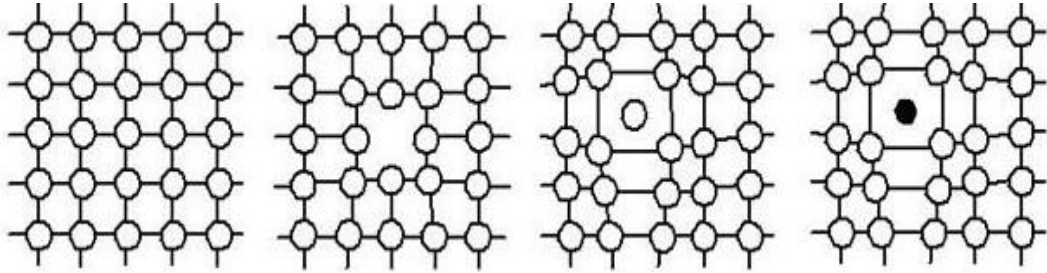
точками тела при нагружении внешней силой, изменяются, называется деформацией. Деформированное состояние тела определяется как удлинением элементов, так и поворотом одних элементов относительно других. Также деформирование может сопровождаться или не сопровождаться изменением объема тела. Второй случай имеет название сдвиг. Случай чистого сдвига – деформация, происходящая только с изменением формы тела, без изменения объема. В теории упругости доказывается, что любая деформация может быть разложена на объёмную и сдвиговую составляющие.

Если после снятия нагрузки, тело возвращается к первоначальному (до приложения нагрузки) состоянию, то оно считается упругим. Реальные твердые тела являются, как правило, частично упругими, поскольку после снятия нагрузки восстанавливают свою форму лишь частично, образуя остаточные деформации. По мере возрастания прилагаемых к телу нагрузок, упругие деформации возрастают по сравнению с пластическими [23].

Пластичностью является свойство твердых тел изменять свою форму без разрушения. Пластической деформации тел всегда соответствует изменение внутренней структуры тела – его кинетических единиц, направленное перемещение таких единиц является процессом течения, а тело, в котором происходят такие изменения, является текущим. Такое перемещение внутренних составляющих тела является необратимым. Если тело в результате механического воздействия необратимо изменяет форму и размеры, и после прекращения этого воздействия в течение длительного временного промежутка сохраняет полученную форму и размеры, такой вид деформации называется пластическим [40].

Любое твердое тело обладает такими свойствами, как размеры, форма и целостность. Деформация тела может быть упругая и пластическая. Упругая предполагает возвращение телом формы и размеров после снятия нагрузки. Пластическая же деформация происходит с достижением предела текучести материала и связана с началом необратимых изменений с неполным восстановлением телом исходной формы после снятия нагрузки, и может продолжаться до достижения предела прочности, после которого происходит

потеря целостности детали. Известно, что любая металлическая деталь имеет свою кристаллическую решетку, которая в свою очередь имеет нелинейную структуру (рисунок 2.1). Этим объясняется сложность процесса деформации, поскольку сдвиг определенных частей решетки, за счет неодинакового пространственного расположения, происходит с разной интенсивностью (рисунок 2.2).



а) идеальная, б) имеющая вакансию, в) имеющая межузельный атом, г) с атомом внедрения.

Рисунок 2.1 Кристаллические решетки

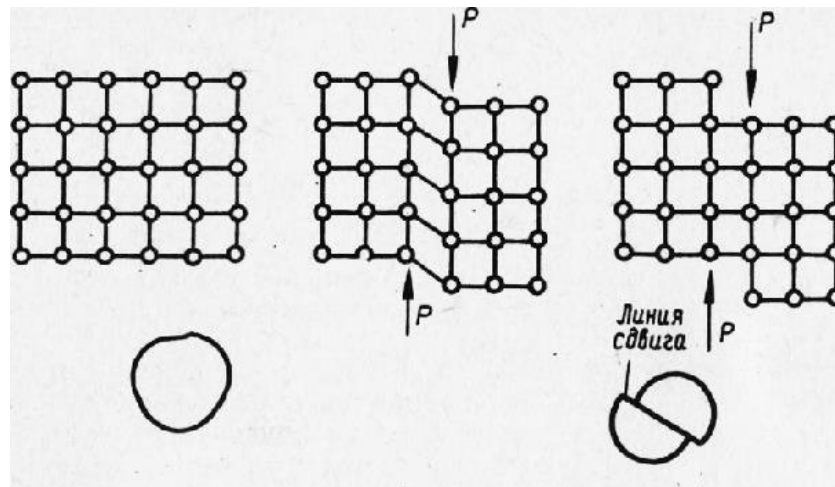


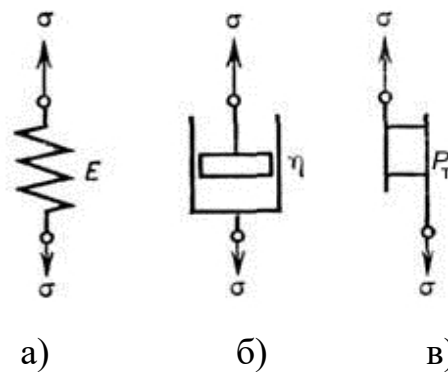
Рисунок 2.2 Деформация кристаллической решетки

Основным законом, описывающим деформирование различных материалов под действием нагрузки, является закон Гука, который говорит о том, что сила сопротивления тела деформации прямо пропорциональна степени деформации и коэффициенту жесткости тела.

Тела по их однородности классифицируются как изотропные – имеющие однородное строение, количество упругих постоянных в них равняется двум, и

анизотропные – тела, где количество упругих постоянных, согласно закону Гука, составляет более двух. В работе принято допущение о том, что рассматриваемое деформируемое тело является изотропным.

В общем, процесс деформации и поведение тел в процессе деформации описывают несколько моделей идеальных тел: абсолютно упругое тело Гука, абсолютно вязкая жидкость Ньютона, жесткопластическое тело Сан-Веннана (рисунок 2.3). Поскольку на данных трех механических моделях различных реологических сред основываются модели всех деформируемых тел, о них стоит рассказать подробнее.



а) тело Гука, б) тело Ньютона, в) тело Сан-Веннана.

Рисунок 2.3 - Модели реологических сред

Простейший случай упругого тела может быть описан законом Ньютона о том, что напряжение пропорционально деформации, а энергия равна квадрату скорости деформации. Тело Гука (рисунок 2.4) характеризует идеально упругое тело, которое деформируется под нагрузкой, а после снятия нагрузки со скоростью распространения звука в материале принимает исходную форму. Такая реологическая среда описывается поведением идеальной пружины.

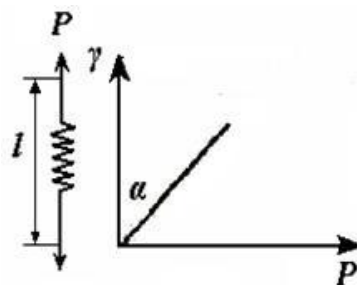


Рисунок 2.4 – Модель тела Гука и его нагрузочная характеристика

Данная модель характеризуется зависимостями:

$$\gamma = \frac{P}{E}; P = E\gamma; E = \frac{P}{\gamma} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.1)$$

где  $\gamma$  – степень деформации,  $P$  – усилие,  $E$  – модуль Юнга, характеризующий упругие свойства деформируемого материала. В работе принято допущение о том, что для анализа фундаментальных законов реологии условные обозначения аналогичны общепринятым. Далее в работе при составлении модели реального деформируемого тела и взаимодействия тела, машины и оператора, условные для обозначения удобства расчетов будут отличаться.

Идеальное пластическое тело, или жидкость Ньютона (рисунок 2.5) характеризуется поведением поршня, погруженного в жидкость. Напряжение сдвига в такой жидкости с вязкостью  $\eta$  пропорционально градиенту скорости сдвига.

$$P = \eta \frac{dU}{dx}, \text{ где } \frac{dU}{dx} = \dot{\gamma}; \operatorname{tg} \alpha = \frac{P}{\dot{\gamma}} \quad (2.2)$$

где  $\dot{\gamma}$  – скорость нарастания нагрузки.

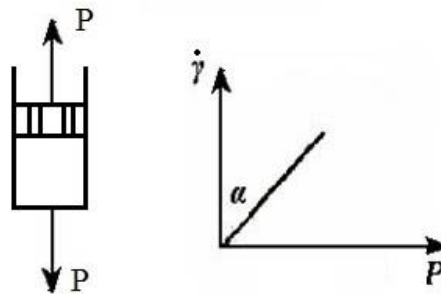


Рисунок 2.5 – Модель жидкости Ньютона

Обратной характеристикой вязкости является величина  $\frac{1}{\eta}$  – текучесть, характеризующая подвижность жидкости под действием нагрузки.

Модель идеального сухого трения Сен-Веннана (рисунок 2.6) предполагает постоянство силы трения, вне зависимости от величины приложенной нормальной силы. Данная модель основана на законе сухого трения, который говорит об отсутствии деформации в случае, если напряжение, прикладываемое к телу, ниже

определенного уровня, характеризующего предел текучести  $P_T$ , то есть если  $P < P_T$ , то  $\gamma = 0$ . Если  $P = P_T$ , то деформация, происходящая в идеально пластическом теле, развивается с любой скоростью и не имеет предела.

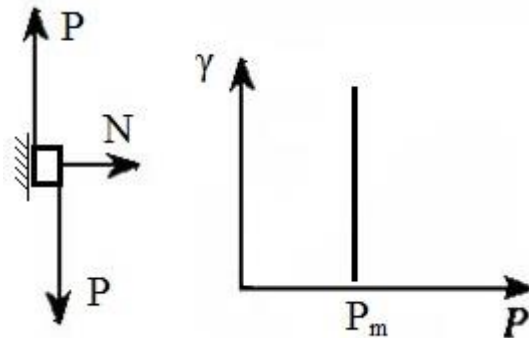


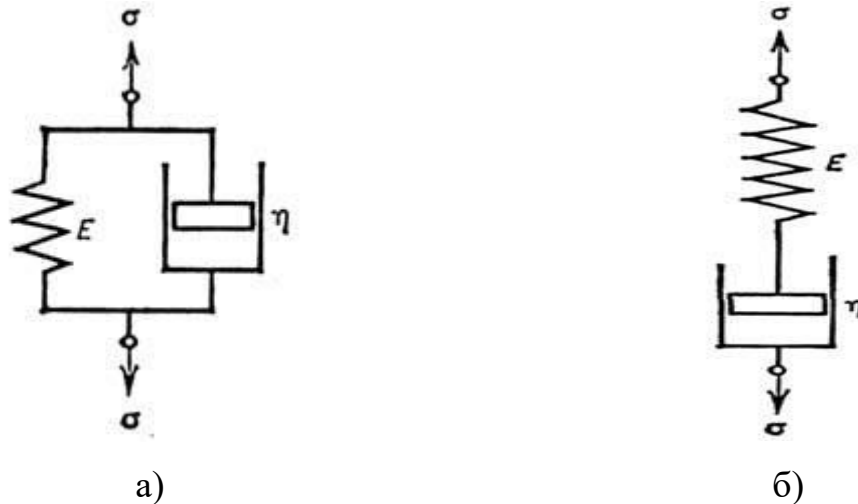
Рисунок 2.6 - Модель тела Сен-Веннана

Случай, когда  $P > P_T$ , будет связан с разрушением структуры обрабатываемой детали, поэтому дозирование нагрузки является неотъемлемой задачей при разработке технологических операций. Анализ трех идеальных тел говорит о том, что энергия, затрачиваемая на деформирование идеально упругого тела переходит из потенциальной в кинетическую и обратно без потерь, в случае же с двумя другими моделями, процесс деформации необратим и сопровождается выделением тепла в атмосферу.

Однако такие предельные случаи, как три идеальных тела, являются сильными упрощениями, поскольку любое реальное тело, как правило, обладает набором свойств, отвечающих за его поведение в процессе деформации. Например, различные материалы в процессе деформирования могут по-разному реагировать на скорость деформации, от сильной зависимости до отсутствия зависимости, как в случае с идеально упругим телом Гука.

Главной особенностью пластического течения можно назвать то, что оно появляется в твердом теле под действием напряжений, превышающих определенное критическое значение, и прекращается, если напряжение снижается ниже предела [25]. К тому же величина требуемой энергии, как правило, в большей степени зависит от предела текучести, нежели от скорости нарастания усилия [103].

Также, помимо приведенных ранее, существуют несколько производных моделей деформируемых сред, которые сочетают в себе свойства основных тел, представляя собой их комбинацию. Первым примером, представленным на рисунке 2.7 (а) служит модель деформируемого тела Фойгта, представляющую собой параллельное соединение моделей тел Гука и Ньютона



а) модель Фойгта, б) модель Максвелла

Рисунок 2.7 - Производные модели деформируемых сред

Следующим частным случаем является модель последовательно соединенных упругого и вязкого элемента, показанная на рисунке 2.7 (б), предложенная Максвеллом.

Механизм деформации, предложенный Максвеллом, описывает такое свойство материалов, как ползучесть – случай, когда под действием определенного напряжения в теле возникает деформация, и в дальнейшем эта деформация является постоянной, а после постепенного снятия напряжения, в случае с длинным периодом релаксации, тело не полностью возвращает свою первоначальную форму.

В реологии такие модели зачастую рассматриваются как исходные составные части для создания более сложных моделей, отражающих поведение материалов в процессе деформирования. Модель Фойгта (рисунок 2.7 а) описывает свойство упругого последствия – случай, когда деформация происходит с запаздыванием, относительно прикладываемому усилию. Модель Максвелла (рисунок 2.7 б)

применяется для изучения процесса постепенной релаксации напряжения. Поскольку данные модели являются удовлетворяющими принципу суперпозиции, их можно считать линейными. Однако их существенным недостатком является невозможность определения влияния на ход деформации состояния, предшествующего данной деформации. Поэтому необходимы были дальнейшие исследования, итогом которых стали еще несколько моделей, реализующие возможность изучения сложных процессов. Сочетание таких свойств тел, как вязкость и упругость было описано Кельвином, предложившим модель жесткопластического тела. Упругость такого тела (рисунок 2.8 а) при деформации запаздывает, относительно прикладываемой нагрузки, процесс сопровождается тепловыделением. Существует так же случай вязкопластичного тела, описанный Бингамом (рисунок 2.8 б), когда деформация не происходит вообще до достижения определенного предела нагрузки, а по достижении такого предела начинается течение по законам вязкой жидкости.

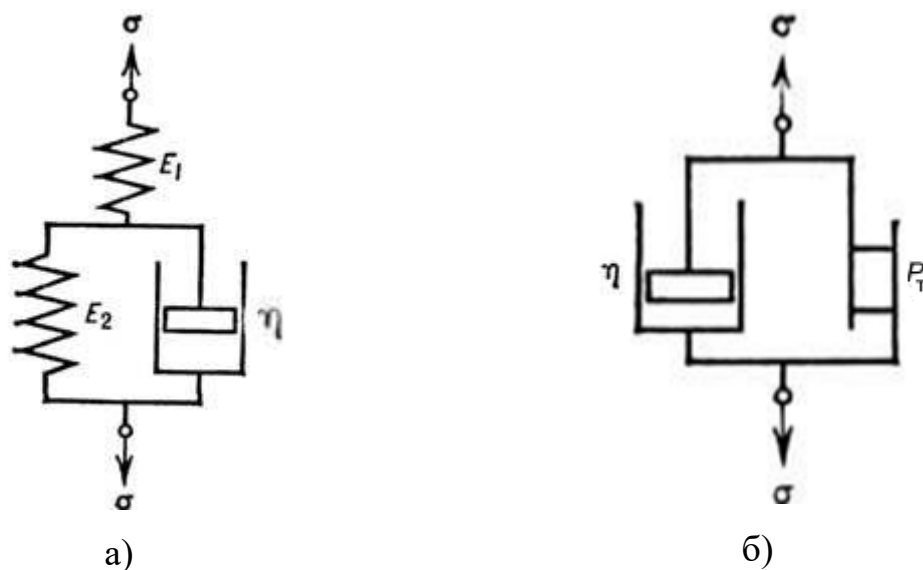
Случай пластически-вязких тел, описанный Бингамом, заключается в том, что существуют такие материалы, которые под действием определенного усилия, превышающего критический предел, полностью превращаются по своему поведению в жидкость, а при снятии нагрузки сохраняют форму, которая получилась в процессе деформирования.

Жестко-вязкое тело Кельвина характеризуется поведением упругого тела – после снятия нагрузки тело принимает свою исходную форму, однако поскольку оно обладает определенной вязкостью, и деформация и процесс возвращения додеформационной формы у тела будет сопровождаться определенной «задержкой», пропорциональной вязкости материала. Такое явление получило название «запаздывающая упругость» [85].

Также известны комбинации из трех и более простейших тел. Они названы в соответствии с именами ученых, открывших те или иные свойства деформируемого тела – модели тел Шведова, Пойтинга-Томсона, Летерзиха, Траутона-Ренкина, Джеффриса, Бюргерса, Шофилда-Скотт Блейра. Все



перечисленные ученые внесли огромный вклад в развитие реологии и изучение поведения тел с различной структурой и подвергающихся деформации.



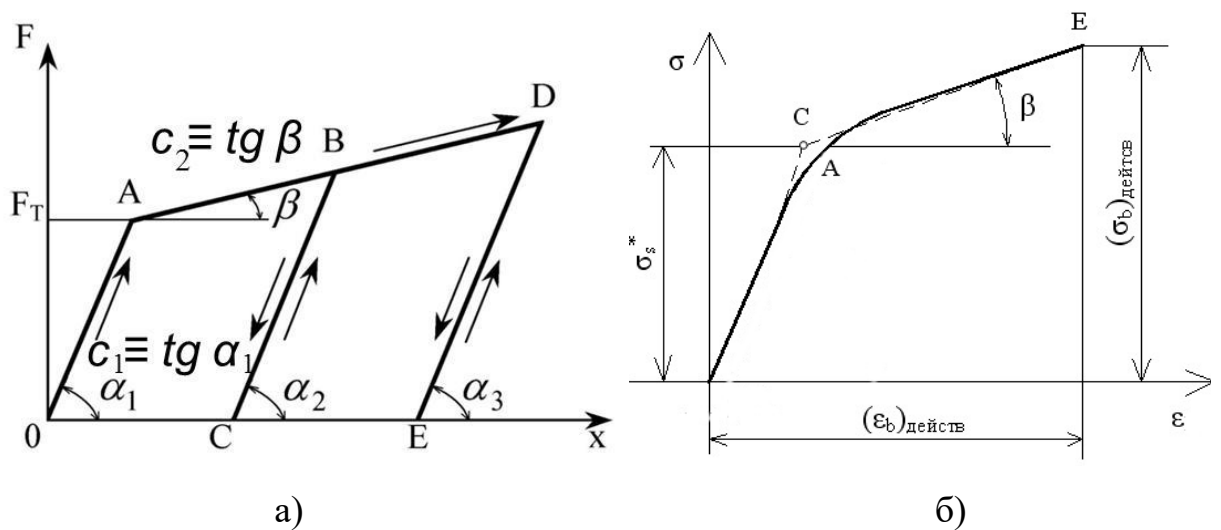
а) модель Кельвина, б) модель Бингама

Рисунок 2.8 - Модели сложных процессов

Анализируя физико-механические свойства материалов, можно сделать заключение, что нет прямой взаимосвязи прочности и пластичности. Однако при оценке обрабатываемости металлических и композитных материалов ударом необходимо учитывать оба данных свойства [19, 102]. Каждая ударная технология обладает особенностями поведения тел при формоизменении, что ведет к необходимости решать задачу поиска и моделирования наиболее значимых свойств, влияющих на характер протекания процесса [64].

При рассмотрении конкретных примеров поведения различных материалов и деталей различных форм в процессе деформирования, стоит отметить несколько важных факторов [24]. Одним из них являются геометрические особенности детали и воздействующего на нее инструмента. Так, при шестигранном обжатии сплошного горизонтального алюминиевого цилиндра, его упругие свойства наиболее ярко выражены. Напротив, при обжатии того же цилиндра в вертикальном положении между двумя плоскими поверхностями, упругая составляющая деформации, относительно пластической, ничтожно мала. Случай же упругопластического деформирования деталей сложной формы и составных

деталей вносит достаточно большие сложности в расчеты [63]. Другим обстоятельством является изменение свойств самого материала изделия по мере формоизменения [74]. Так, при циклическом нагружении образца с каждым циклом возрастает предел текучести материала, а, соответственно, увеличиваются упругие свойства [28]. Ввиду большой нелинейности расчетов, связанной с указанными обстоятельствами, есть необходимость принять некоторые допущения: при моделировании процессов взаимодействия элементов машин, обрабатываемой детали, и оператора есть возможность использования упрощенной модели деформируемого тела [22]. Зная, что любое тело при силовом воздействии имеет как упругие, так и пластические свойства [84], характеризующиеся диаграммами  $F-x$  и  $\sigma-\varepsilon$ , представленными на рисунке 2.9, подчиняющиеся одним законам и имеющие только различные числовые значения, имеется возможность заменить для расчета технологических параметров машины составное тело втулка - арматура на одно цельное тело с похожими характеристиками. Дискретная модель упругопластического деформируемого тела, предложенная А.Д. Абрамовым, описывающая представленные зависимости, представлена на рисунке 2.10.



а) статическая характеристика циклического нагружения, б)

схематизированная диаграмма деформирования упрочняющегося тела

Рисунок 2.9 - Графические характеристики упругодеформируемых тел

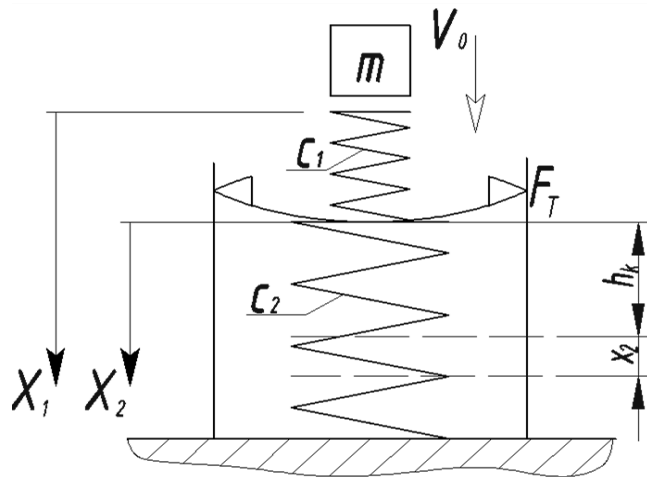


Рисунок 2.10 - Модель упругопластического деформируемого тела

Модель состоит из двух пружин, первая из которых характеризует условную жесткость детали  $c_1$  в упругой зоне деформирования, вторая – условную жесткость в пластической зоне деформирования  $c_2$ . На данные пружины воздействует груз массой  $m$  движущийся со скоростью  $V_0$ . Демпфер сухого трения  $F_T$  в данной схеме моделирует силу сопротивления детали пластическому деформированию и характеризуется точкой А на диаграмме статической характеристики циклического нагружения (рисунок 2.9 а).

Данной модели соответствует формула (2.3), описывающая зависимость между величиной деформации, энергией и количеством ударов.

$$h_k = (\pm 1) \left\{ \sqrt{\left(\frac{F_T}{c_2}\right)^2 \left(\frac{c_1}{c_1 + c_2}\right)^k + \frac{mV_0^2 c_1}{c_2^2} \left[1 - \left(\frac{c_1}{c_1 + c_2}\right)^k\right]} - \frac{F_T}{c_2} \right\}, \quad (2.3)$$

Знак (+) применяется при описании упрочняющегося по мере деформирования тела, (-) при описании разупрочняющегося тела.

При расчете необходимого усилия и количества циклов нагружения для реального технологического процесса, например, обжатия строительной арматуры в цилиндрических втулках, необходимо использовать экспериментальные данные нагрузочной статической характеристики для необходимого типоразмера обрабатываемой детали.

## 2.2 Обоснование целесообразности исследований по вибробезопасности ручных ударных импульсных машин

При работе ручной импульсной машины происходят интенсивные ударные процессы, необходимые для выполнения рабочих операций с обрабатываемой деталью [115]. При этом возбуждаются вибрации корпуса, передаваемые на руку оператора, которые при работе машины не должны превышать санитарные нормы.

Согласно СанПиН 2.2.2.540 – 96 [92], такую вибрацию можно классифицировать, как локальную. В нормировании вибрации на рабочих местах используются следующие термины и определения:

- а) абсолютное значение виброускорения  $a$ ,  $\text{м/с}^2$ ;
- б) скорректированное виброускорение,  $a_w$ ,  $\text{м/с}^2$  - значение виброускорения, измеренное с применением стандартизованной частотной коррекции;
- в) скорректированный уровень виброускорения,  $L_{aw}$ , дБ - десять десятичных логарифмов отношения квадрата скорректированного ускорения к квадрату опорного значения виброускорения;
- г) эквивалентное виброускорение - среднеквадратичное значение ускорения на заданном интервале времени.

Нормируемые значения виброускорения корпуса машины, в зависимости от среднегеометрической частоты октавных полос, представлены в таблице 2.1

Работа в условиях воздействия локальной вибрации с уровнями виброускорения, превышающими нормированное значение для среднегеометрической частоты более чем в 4 раза, не допускается.

Механические усилия рук оператора не участвуют в технологическом цикле пластической деформации обрабатываемой детали. Роль оператора при совершении операции соединения арматурных стержней путем обжатия в стальных цилиндрических втулках сводится к ориентации и удержанию машины в руках в определенном положении при выполнении технологической операции. Неподвижность стальной втулки обеспечивается пружиной, прижимающей пуансон к матрице.

Таблица 2.1 - Допустимые значения локальной вибрации.

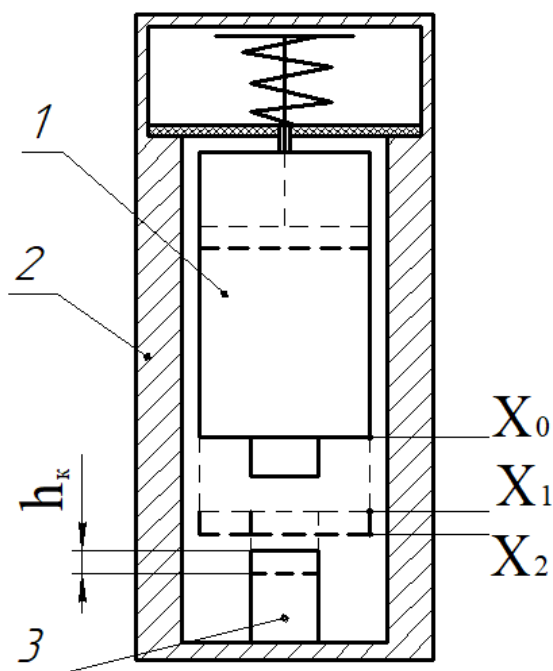
Частота октавной полосы, Гц	Допустимое значение виброускорения, м/с <sup>2</sup>
8	1,4
16	1,4
31,5	2,7
63	5,4
125	10,7
250	21,3
500	42,5
1000	85

Под воздействием сил, происходящих в процессе рабочего хода бойка и соударения с пуансоном и обрабатываемым телом, происходит движение корпуса машины. Движение распространяется в трех осях координат, но поскольку такие машины выпускаются и проектируются в подавляющем числе случаев с ручками пистолетного типа, многолетние исследования и нормативные документы утверждают, что наиболее критичным для оператора машины является направление вибрационного перемещения корпуса машины с рукояткой вдоль оси движения бойка. Это обстоятельство позволяет считать модель взаимодействия оператора и ручки прибора двумерной, что упрощает дальнейшие расчеты.

Для изучения процессов, происходящих при взаимодействии подвижных и неподвижных частей машины и воздействии результирующих сил на оператора, необходимо разложить рабочий цикл машины на отдельные составляющие – фазы.

Труды ученых ИГД СО РАН им. Чинакала [89, 90, 113], НГТУ, ТПУ, связанные с исследованием процессов, происходящих при работе электромагнитных линейных молотов и прессов, говорят о наличии трех основных фаз, иллюстрированных на рисунке 2.11, составляющих рабочий цикл таких машин. Первой фазой является холостой ход бойка из начального положения  $x_0$  до соударения с ударником (пуансоном)  $x_1$ , при котором его перемещение происходит под действием электромагнитных сил, однако не происходит взаимодействие с

обрабатываемой деталью. Вторая фаза является рабочим ходом бойка – его совместное движение с ударником от  $x_1$  до  $x_2$  – конечной точки хода бойка, обусловленной завершением требуемого формоизменения образца или окончанием действия кинетической энергии; этот этап связан с осуществлением ударного воздействия на обрабатываемую деталь. Третьей фазой является возвратное движение бойка из положения  $x_2$  до начального положения  $x_0$ .

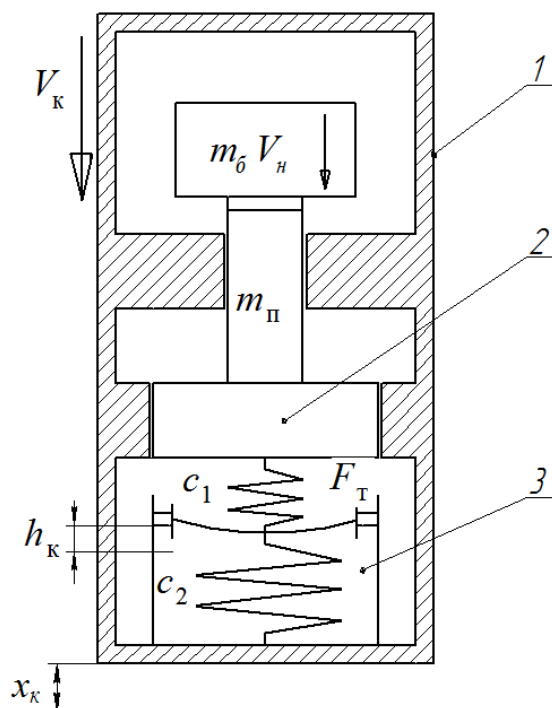


1- боек, 2 – корпус машины, 3 – обрабатываемое изделие

Рисунок 2.11- Модель обработки изделия

Однако такой подход в полной мере не раскрывает все составляющие рабочего цикла. В данной работе предлагается рассмотреть рабочие процессы ударной линейной электромагнитной машины как систему с переменной структурой.

С точки зрения динамики рассматриваемые машины являются сложной колебательной системой, в которой возбуждаются интенсивные ударные и вибрационные процессы [116]. Модель взаимодействия элементов такой машины с обрабатываемой средой в процессе упругопластического деформирования детали представлена на рисунке 2.12.



1 – корпус машины, 2 – пуансон, 3 – модель деформируемого тела,  $m_б$  – масса бойка,  $V_н$  – предупредная скорость,  $m_п$  – масса пуансона,  $x_к$  – величина смещения корпуса,  $V_к$  – скорость смещения корпуса.

Рисунок 2.12 – Модель взаимодействия ударной машины и обрабатываемого тела

Рабочий цикл ручных ударных машин с линейным электромагнитным приводом повторяется через 1 секунду. Этот цикл можно разбить во времени на 6 фаз с существенно различными динамическими процессами.

1 фаза: разгон бойка из состояния равновесия под действием электромагнитной силы;

2 фаза: прямой удар бойка о пуансон;

3 фаза: ударная упругопластическая деформация обрабатываемой детали, установленной между пуансоном и матрицей;

4 фаза: передача прямого удара от обрабатываемого изделия корпусу машины;

5 фаза: обратный разгон бойка с помощью пружины возвратного действия;

6 фаза: обратный удар бойка о корпус через резиновую прокладку.

После прямого удара бойка о пуансон (фаза 2) и упругопластической деформации обрабатываемого изделия (фаза 3) оставшаяся часть кинетической

энергии передается корпусу и преобразуются в нестационарные вибрации корпуса с большим количеством различных гармоник. Аналогично часть кинетической энергии обратного удара бойка через резиновую прокладку так же передается корпусу и преобразуется в нестационарный вибрационный процесс с большим количеством гармоник. Некоторые из этих гармоник совпадают с собственными частотами конструкции машины как колебательной системы. В результате в окрестности таких частот происходит резонансное усиление гармоник. На этих частотах возможно наибольшее нарушение санитарных норм вибробезопасности.

## 2.3 Циклы работы ручных ударных машин

### 2.3.1 Математическая модель ручной ударной машины

Для оценки энергоемкости операции соединения арматуры и расчета параметров ударного привода разработана математическая модель, расчетная схема которой представлена на рисунке 2.13.

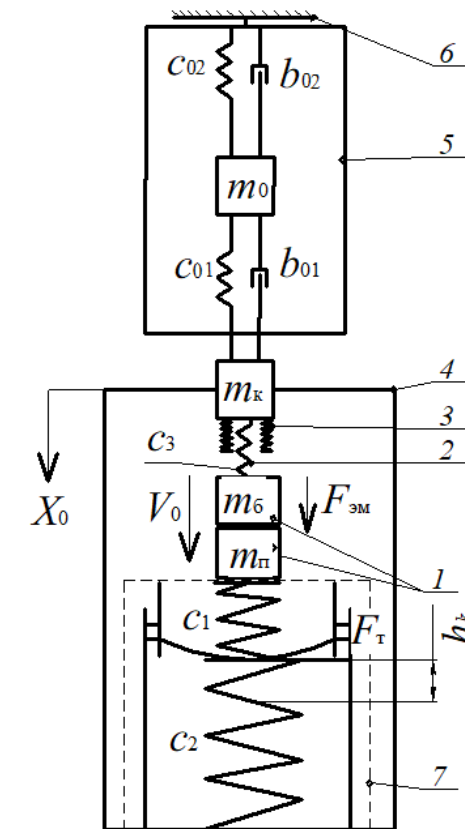
Граничные значения энергии удара определяются минимальной энергией единичного удара, при которой возможна качественная реализация технологической операции и ее максимальным реализуемым значением, при котором используемый инструмент может считаться ручным (массой не более 10 кг), а также значением виброускорения корпуса машины в соответствии с установленным значением для частотного диапазона.

Особенностью такой модели является ее универсальность для всех типов ручных ударных машин и любых тел, подвергающихся ударному воздействию [111]. При составлении расчетной схемы модели были приняты следующие допущения:

- все материалы деформируются по упругопластической модели;
- рассчитывается только комплексная характеристика деформируемости тел, без учета их модуля упругости, неоднородности структуры, коэффициентов трения;



- система машина – обрабатываемая деталь замкнутая.



1 – ударный узел; 2 – возвратная пружина; 3 – вибродемпфер; 4 – корпус; 5 – рука оператора; 6 – ограничитель; 7 – модель обрабатываемого тела;  $c_1$  – жесткость среды в упругой зоне;  $F_T$  – сопротивление среды началу внедрения;  $c_2$  – условная жесткость среды в пластической зоне;  $V_0$  – предупредная скорость бойка,  $F_{эм}$  – электромагнитная сила,  $h_k$  – осадка образца.

Рисунок 2.13 - Модель системы оператор – машина – обрабатываемая деталь

Модель, представленная на рисунке, включает в себя руку оператора 5, удерживающего и приводящего в действие инструмент, саму машину ударного действия, с совокупностью подвижных  $m_6$  и  $m_п$  (боек и пуансон) и неподвижных  $m_k$  масс (корпус машины), и непосредственно модель обрабатываемой детали 7, представляющую собой две пружины с условной жесткостью, в упругой  $c_1$  и пластической  $c_2$  зоне деформации, а также демпфер сухого трения  $F_T$ , описывающими статическую нагрузочную характеристику.

### 2.3.2 Фазы рабочего цикла ударной машины

Первой фазой рабочего цикла в рассматриваемой модели является прямой разгон бойка под действием электромагнитной силы, возникающей вследствие взаимодействия тока в катушке машины с ферромагнитным якорем-бойком. В высокофорсированных низкочастотных машинах с ЛЭМД используется однополупериодная схема выпрямления. При этом В.Ю. Нейманом и В.А. Каргиным [56] доказано, что кривую тока, потребляемого электромагнитной катушкой, с незначительными допущениями, можно описать квадратичной синусоидой. Аналогично току в катушке, ускорение бойка также описывается квадратичной синусоидой, приведенной на рисунке 2.14.

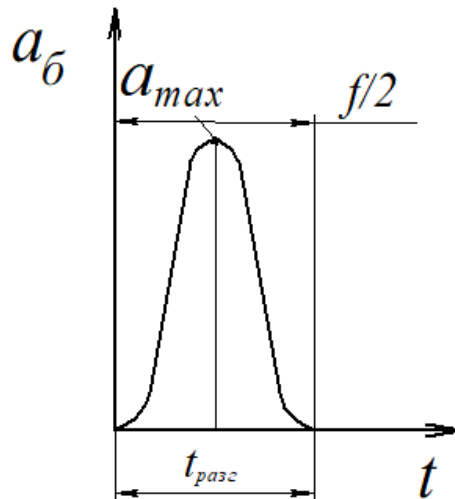


Рисунок 2.14 - Характеристика ускорения бойка.

На рисунке 2.14  $a_{\text{б}}$  - ускорение бойка,  $t_{\text{разг}}$  - время разгона.

Уравнение движения бойка имеет следующий вид:

$$m_{\text{б}} a_{\text{б}} = F_{\text{эм}} \sin^2 \omega t_{\text{разг}}, \quad (2.4)$$

где  $m_{\text{б}}$  – масса бойка,  $F_{\text{эм}}$  - амплитудное значение тяговой электромагнитной силы,  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота,  $a_{\text{б}}$  - ускорение бойка,  $t_{\text{разг}}$  - время разгона.

Второй фазой рабочего цикла является неупругий удар бойка о пуансон. Деформация обрабатываемого изделия происходит при совместном воздействии бойка и пуансона. При рассмотрении удара бойка о пуансон можно использовать классическую теорию удара [83]. Согласно этой теории:

- соударяющиеся тела считаются абсолютно твердыми;
- неударными силами можно пренебречь, поскольку они малы по сравнению с ударными силами.

Так как боек и пуансон после удара движутся вместе, и при этом масса бойка значительно больше массы пуансона, их соударение принимается неупругим.

Формулы классической теории удара можно использовать при условии [18]:

$$\theta = \frac{t_y}{Y} > 3 \div 5, \quad (2.5)$$

где  $t_y$  - длительность удара,  $t_y = 11,5 \cdot 10^{-3}$  с,  $Y$  - период собственных колебаний тел, как систем с распределенными параметрами, в которых при ударе распространяются упругие волны растяжения-сжатия. Для стержней из стали коэффициент  $Y_{cm}$  находится по формуле:

$$Y_{cm} = 2l \sqrt{\frac{\rho}{E}}, \quad (2.6)$$

где  $l$  - длина соударяющегося стержня наименьшей длины,  $\rho$  - плотность материала,  $E$  - модуль упругости ( $\rho = 7,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 206000 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>).

Согласно расчетам массогабаритных параметров бойка, приведенных в главе 3, длина бойка составляет  $l = 0,09$  м. При этом длина пуансона  $l = 0,06$  м. Тогда период собственных колебаний бойка:

$$Y_{cm} = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ с},$$

$$\theta = 48,9 > 5.$$

Таким образом, определение совместной начальной скорости системы «бок + пуансон» в начале деформирования этой системой обрабатываемой детали можно проводить методами классической теории удара. Ударяемое тело (пуансон) до удара неподвижно, то есть  $v_{02} = 0$ . При ударе бойка о пуансон они начинают совместное движение, поэтому принят коэффициент восстановления  $K = 0$  (абсолютно неупругий удар). В таком случае совместная скорость системы «бок - пуансон»  $v_g$ :

$$v_g = \frac{m_b v_{01}}{m_b + m_n} \quad (2.7)$$

где  $m_n$  - масса пуансона.

Кинетическая энергия деформирования обрабатываемой детали при неподвижном корпусе машины:

$$E_g = \frac{m_{\delta} + m_n}{2} v_g^2. \quad (2.8)$$

Фактически, кинетическая энергия удара бойка снижается за счет того, что часть этой энергии тратится на колебания корпуса.

Третьей фазой является деформирование обрабатываемой детали. В расчетной схеме, представленной на рисунке 2.15 параметр  $x_{c1}$  характеризует координату движения в упругой зоне деформации,  $x_{c2}$  – в пластической.

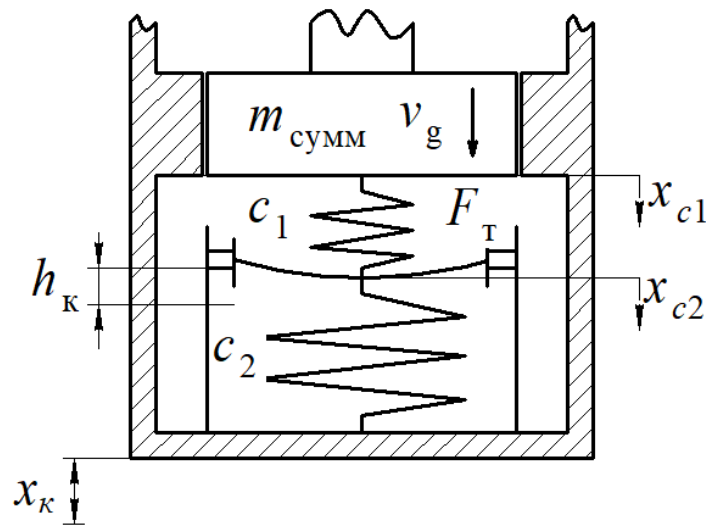


Рисунок 2.15 – Расчетная схема деформирования детали

Для оценки упругих свойств используются результаты экспериментов по шестигранному обжатию трубчатых обрабатываемых деталей из алюминиевых сплавов (Al) и стали (Ст). Из экспериментальных нагрузочных характеристик известны коэффициенты обрабатываемости материалов, представленные в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Характеристики обрабатываемых деталей.

ОИ из Al	ОИ из Ст
$C_1(Al) = 4,5 \cdot 10^8 \text{ Н/М}$	$C_1(Ст)$ - неизвестно
$C_2(Al) = 6,5 \cdot 10^6 \text{ Н/М}$	$C_2(Ст) = 10^7 \text{ Н/М}$
$F_T(Al) = 10^4 \text{ Н}$	$F_T(Ст) = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Н}$

В данном случае  $F_T$  – переходная сила, соответствующая точке перехода с упругого участка деформации с коэффициентом жесткости  $C_1$  на

жесткопластический участок с коэффициентом жесткости  $C_2$  в статической нагрузочной характеристике. Трубчатые образцы из алюминия и стали подвергаются качественно одинаковым физическим процессам пластического деформирования в одинаковых условиях [48, 82]. Поэтому можно считать, что эти процессы подобны. Тогда соответствующие им параметры можно выразить через коэффициенты подобия [17, 47, 100]. Коэффициенты подобия находятся на основании экспериментальных данных:

$$K_n = \frac{c_2(Cm)}{c_2(Al)} = \frac{10^7}{6,5 \cdot 10^6} = 1,54. \quad (2.9)$$

В таком случае неизвестный коэффициент жесткости  $c_1(Ст)$  возможно найти следующим образом:

$$c_1(Ст) = K_n \cdot c_1(Al) = 1,54 \cdot 4,5 \cdot 10^8 \approx 7 \cdot 10^8 \text{ Н/м}. \quad (2.10)$$

Характер процесса формоизменения имеет прямую зависимость от упругих свойств материалов тел [46].

Формоизменение обрабатываемой детали описывается уравнениями (2.11) и (2.12). Для упругой зоны деформирования:

$$m_{сумм} \ddot{x}_{c1} + c_1 x_{c1} = 0. \quad (2.11)$$

Для пластической зоны деформирования:

$$\begin{cases} m_{сумм} \ddot{x}_{c2} + c_1(x_{c1} - x_{c2}) = 0; \\ c_2(h_k + x_{c2}) + F_T = c_1(x_{c1} - x_{c2}). \end{cases} \quad (2.12)$$

Выводом из уравнений (2.11) и (2.12) является приведенное ранее уравнение (2.3), описывающее модель упругопластического деформирования тел.

При этом, если использовать уровень энергии удара низкий, но достаточный для начала формоизменения детали, то в каждом последующем ударе количество энергии, необходимой для начала пластического деформирования будет существенно возрастать. Поэтому задача становится неопределимой.

Для построения графического изображения характеристики упругопластической деформации необходимо определить условные жесткости в упругой и пластической зонах деформации, а также величину усилия, необходимого для начала пластического течения материала. Такую величину для

стандартизованных изделий можно получить в сортаментах, для остальных необходимо экспериментальное исследование.

Значительно снизить влияние упругой составляющей деформирования можно с помощью увеличения энергии единичного удара. Такой подход позволяет не учитывать условную жесткость  $c_1$  в расчетах. В работах [11, 86] указано, что это приведет к погрешности не более 7% при энергии удара более 30 Дж.

Если принять допущение об отсутствии упругой составляющей деформации [12], то из нагрузочной характеристики тела, представленной на рисунке 2.9, являющегося упрочняющимся по мере деформирования, может быть получена характеристика, приведенная на рисунке 2.16.

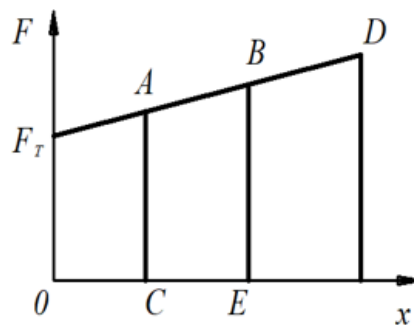


Рисунок 2.16 – Характеристика статического нагружения жесткопластического тела

Тогда величину формоизменения по оси, параллельной продольной оси машины, можно с помощью выражения (2.13) [78, 75].

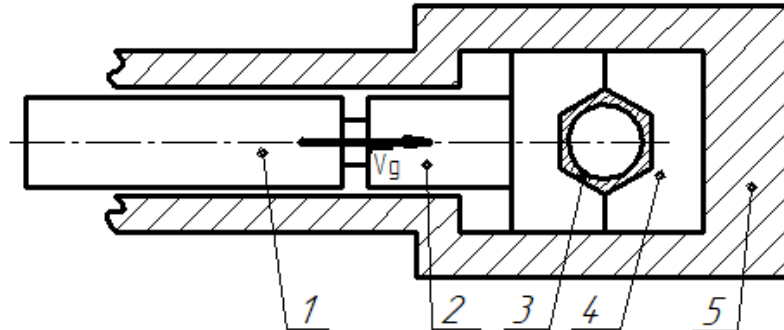
$$h_k = \sqrt{\left(\frac{F_T}{c_2}\right)^2 + \frac{T_{y\partial}}{c_2}} - \frac{F_T}{c_2} \quad (2.13)$$

Энергия единичного удара, достаточная для деформирования детали за количество циклов  $k$  рассчитывается с помощью уравнения (2.14).

$$T_{y\partial} = \frac{h_k(c_2 h_k + 2F_T)}{2k} \quad (2.14)$$

При этом жесткость возвратной пружины не учитывается за счет того, что сила противодействия от ее упругости на несколько порядков ниже силы удара.

Четвертой фазой является передача прямого ударного движения корпусу через обрабатываемое изделие и контактное соединение матрицы с корпусом. Схема такого взаимодействия представлена на рисунке 2.17.



1 – боек; 2- пуансон; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – матрица; 5 –корпус.

Рисунок 2.17 - Контактное взаимодействие элементов системы

Машина, о которой идет речь, является редкоударной. Частота ударов составляет 1-2 Гц, общее число ударов для осуществления одной операции не превышает 20.

Расчет скорости и ускорения совместного движения корпуса и бойка в момент окончания обработки детали представляется нерешаемой аналитическими методами задачей даже для тел правильной геометрической формы [118]. Поэтому такая задача может быть решена только для случая практически абсолютно жесткого тела – момента, когда удары по изделию продолжаются после окончания опрессовки [49]. Данный случай позволяет рассчитать максимально возможную скорость корпуса, которая в реальных условиях должна быть исключена контролем оператора за выполнением технологической операции, а при ее разработке – подбором энергии удара под обрабатываемую деталь. Это должно практически исключить или минимизировать скорость корпуса в момент отскока бойка за счет поглощения вибраций обрабатываемым телом.

Случай жесткого соударения можно рассмотреть с помощью уравнения кинетической энергии (2.17). С учетом того обстоятельства, что в конце опрессовки обрабатываемая деталь и матрица машины достаточно жестко соединены друг с другом, при расчетах энергии, передаваемой на корпус, к массе корпуса машины

$m_k$  необходимо добавлять и массу обрабатываемого изделия  $m_{ou}$ . Из закона сохранения импульса находится скорость корпуса после соударения:

$$(m_{\delta} + m_n)v_g = (m_{\delta} + m_n)v'_g + (m_k + m_{ou})v'_k, \quad (2.15)$$

$$v'_k = \frac{2(m_{\delta} + m_n)v_g}{(m_{\delta} + m_n) + (m_k + m_{ou})}. \quad (2.16)$$

где  $v_g$  скорость бойка и пуансона после соударения,  $v'_k$  - скорость корпуса после соударения.

Кинетическая энергия совместного движения бойка и корпуса машины:

$$E_k = \frac{(m_{\delta} + m_n + m_k + m_{ou})v_k'^2}{2}. \quad (2.17)$$

Однако стоит принимать во внимание, что в реальных условиях в случае с арматурой масса обрабатываемой детали в несколько раз превышает массу самой машины, а жесткое соударение элементов системы должно быть исключено своевременным прекращением работы оператором.

Пятой фазой является обратный разгон бойка возвратным механизмом под действием пружины.

Возвратное движение бойка можно представить в виде расчетной схемы, показанной на рисунке 2.19.

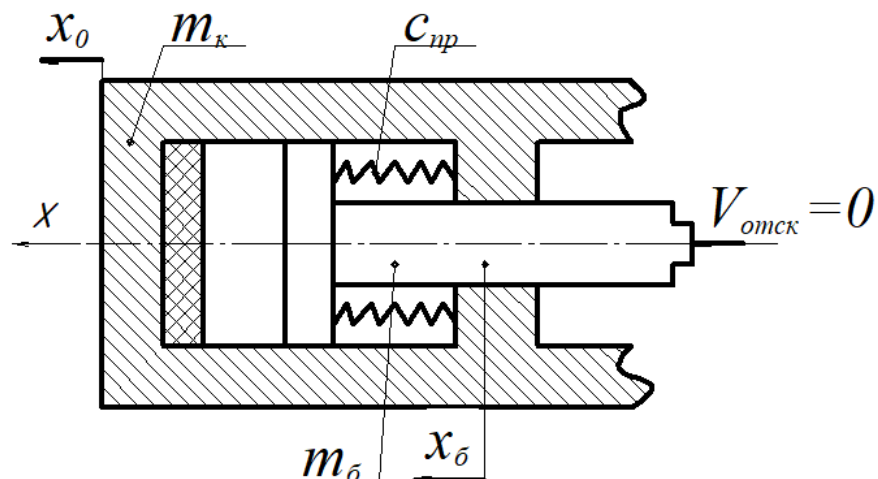


Рисунок 2.19 - Расчетная схема возвратного движения бойка

Координаты  $x_n$  отсчитываются от положения равновесия.



Дифференциальное уравнение движения бойка под действием сил упругости возвратной пружины:

$$m_{\delta} a_{\delta} + c_{np} x_{\delta} = 0 \Rightarrow a_{\delta} + \frac{c_{np}}{m_{\delta}} x_{\delta} = 0. \quad (2.18)$$

Частное решение при нулевых начальных условиях ( $v_{\text{отскока}} = 0$  при  $t = 0$ ):

$$x_{\delta} = A_1 \sin \omega_1 t, \quad (2.19)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{c_{np}}{m_{\delta}}}.$$

Зная свободный ход бойка  $A_1$ , можно рассчитать максимальную скорость движения бойка при возвратном движении  $v_{\delta \text{ max}}$ :

$$v_{\delta \text{ max}} = A_1 \omega_1. \quad (2.20)$$

Величина  $v_{\delta \text{ max}}$  является скоростью непосредственно перед соударением бойка с резиновой прокладкой–демпфером корпуса возвратного механизма.

Кинетическая энергия бойка перед ударом:

$$E_{k \text{ возвр}} = \frac{m_{\delta} v_{\delta \text{ max}}^2}{2}. \quad (2.21)$$

Шестой фазой является удар бойка о корпус через резиновую прокладку.

Согласно методике, предложенной Александровым Е.В., Соколинским В.Б. вычисляется сила  $N_m$ :

$$N_m = v_{\delta \text{ max}} \sqrt{\frac{C_p m_{\kappa} m_{\delta}}{m_{\kappa} + m_{\delta}}}, \quad (2.22)$$

и время действия удара  $t_y$ :

$$t_y = \pi \sqrt{\frac{m_{\kappa} m_{\delta}}{C_p (m_{\kappa} + m_{\delta})}}. \quad (2.23)$$

При этом жесткость резиновой прокладки  $C_p$  находится с помощью выражения:

$$C_p = \frac{E_{\text{рез}} S_{\text{пр}}}{h_{\text{пр}}}, \quad (2.24)$$

где  $E_{\text{рез}}$  - модуль упругости резины,  $S_{\text{пр}}$  - площадь прокладки,  $h_{\text{пр}}$  - высота прокладки.

Использовать классическую теорию удара абсолютно твердых тел [76] в данном случае можно при соблюдении условий (2.5) и (2.6).

Скорость корпуса в данной фазе, из закона сохранения сохранения импульса, с учетом нулевой скорости корпуса до удара, составит:

$$N_m t_y = (m_k + m_{\delta} + m_n) v'_k, \quad (2.25)$$

$$v'_k = \frac{N_m t_y}{m_{\delta} + m_n + m_k}.$$

Кинетическая энергия:

$$E'_k = \frac{(m_{\delta} + m_n + m_k) v'^2_k}{2}. \quad (2.26)$$

Анализируя процессы, происходящие в ходе рабочего цикла ударной машины, можно сделать вывод о том, что передача вибрационной нагрузки на корпус от движения бойка возможна в фазах 4 и 6. Данные фазы характеризуются наличием только свободных колебаний, вынужденные колебания при этом отсутствуют.

Таким образом, математическая модель, описывающая рабочий цикл машины, разбитый на 6 фаз (разгон, неупругий удар бойка, деформирование втулки, передача ударного движения корпусу, обратный разгон бойка, удар бойка о корпус), учитывает основные характеристики ударного привода и деформируемой стальной втулки на арматуре, позволяет рассчитать технологические параметры выполнения операции соединения арматуры (энергию удара, количество ударов, величину осадки втулки), а также определить величину ударной нагрузки, передаваемой на корпус машины.

Выводы по главе:

1. На основе анализа процессов формоизменения тел, характеристик ударного привода и изучения реологических моделей была создана математическая модель ручной ударной машины.

2. Созданная модель выявила фазы 4 и 6 рабочего цикла ручной ударной машины, в которых происходит непосредственная передача ударной энергии от

подвижных частей машины на корпус, что в свою очередь порождает колебания корпуса, передаваемые оператору.

3. Для проверки адекватности математической модели ручной ударной машины необходима экспериментальная проверка уровня скорости корпуса реальной ударной машины в фазах рабочего цикла 4 и 6.

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПРЕССОВКИ СТРОИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ В СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВТУЛКАХ

Экспериментальное исследование состоит из четырех этапов. Первый этап позволяет получить численные значения таких характеристик как условная жесткость тела в пластической зоне деформации  $c_2$  и необходимую силу для преодоления упругой деформации  $F_m$ . Эти данные нужны для дальнейшего расчета значений энергии единичного удара и количества ударов, необходимых для получения качественного соединения строительной арматуры в стальных втулках.

Во втором этапе проведены экспериментальные исследования процесса соединения арматуры с помощью реальной ручной ударной машины, позволяющие оценить возможность и производительность работ по соединению арматуры диаметром от 10 до 20 мм.

Третий этап предполагает проверку разрывной силы, при которой происходит необратимая деформация и разрушение соединения. Данный этап в свою очередь состоит из двух подэтапов: растяжение соединенной различными способами соединения арматуры и испытание на разрыв таких же соединений, залитых в армированный бетон.

Четвертый этап экспериментальных исследований включает в себя проверку величины ударного импульса, передаваемого на корпус машины, необходимой для проверки адекватности математической модели ручной ударной машины, представленной в главе 2, а также оценку уровня вибрационной нагрузки для оценки соответствия рассматриваемой машины нормативам вибробезопасности.

#### 3.1 Получение статической нагрузочной характеристики процесса опрессовки арматуры

Целью первого этапа экспериментального исследования является получение статических нагрузочных характеристик, необходимых для определения коэффициента условной жесткости детали в пластической зоне деформирования  $c_2$ ,

которые нужны для дальнейшего перехода от статической модели деформирования к динамической [50, 79].

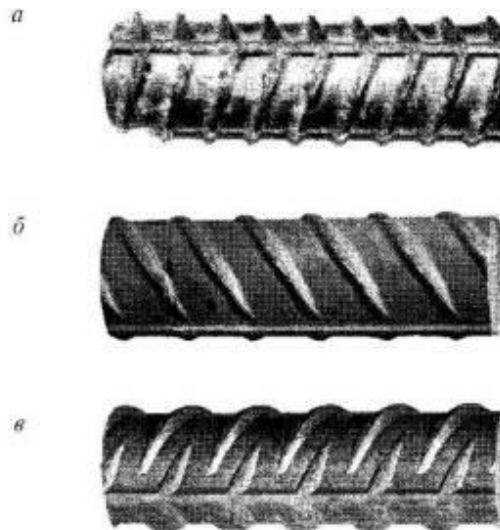
Методом проведения исследования является нагружение в соответствии с ГОСТ Р 57997-2017 [36], стальной втулки, изготовленной из отрезка трубы, на арматурном стержне в условиях приложения к заготовке определенного усилия с помощью прессы. При этом изменение формы происходит только у втулки, стержень арматуры не подвергается деформированию. Поскольку скорость нагружения в таком режиме в десятки раз ниже 20 м/с, такой режим можно считать статическим.

Для снятия статических  $F - x$  нагрузочных характеристик использовался стенд ПСУ-50 (рисунок 3.1), являющийся лабораторным прессом для экспериментальной проверки различных изделий и материалов путем приложения силы сжатия на определенную контролируемую величину. Пресс оснащен силоизмерителем торсионного типа. Нагрузка, прикладываемая к испытываемому образцу, отображается на аналоговом стрелочном циферблате. Нагружающий модуль работает по принципу винт – гайка (центральная ось). Направление движения выдерживается с помощью двух боковых вертикальных колонн. При помощи данного прессы имеется возможность нагрузить исследуемый образец силой до 500 кН. Перемещение подвижной части прессы может достигать 0,2 м.



Рисунок 3.1 - Пресс ПСУ-50 с установленной заготовкой.

В качестве исходных заготовок для изготовления соединения приняты стальная горячекатаная арматура для изготовления железобетонных конструкций в соответствии с ГОСТ 5781-82 и металлическая труба по ГОСТ 8734-75 [37]. Основными требованиями, предъявляемыми к арматуре, находящейся в среде бетона, являются высокая прочность, способность противостоять нагрузкам, в первую очередь на растяжение, коррозионная стойкость, а также способность удерживаться внутри бетона максимально сильно. По прочности арматура подразделяется на классы: А – горячекатаная арматура, подвергающаяся термическому или термомеханическому упрочнению, предел текучести  $\sigma_m = 500 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ ; В – холодноотянутая арматура, обладающая более низким пределом текучести. Для увеличения сцепных свойств используется оребрение арматуры (рисунок 3.2).



а) кольцевой, б) двухсторонний серповидный, в) четырехсторонний серповидный

Рисунок 3.2 - Основные профили изготавливаемой температуры

Стали, используемые для изготовления арматуры, как правило обычного качества, самыми распространенными можно назвать СтЗсп, СтЗпс, СтЗГпс, а также иногда применяются низколегированные стали 18ГС, 20ГС. Поверхность арматуры, в зависимости от степени оребрения, бывает гладкой (класс А-1) и стержни с профилем с периодическими ребрами (классы А-2 – А-6). Периодический профиль выглядит в виде рифлений с правым заходом с одной

стороны и левым по другой стороне. Количество заходов оребрения может быть от 1 до 4. Так же изготавливается арматура с серповидными ребрами для тонкостенных бетонных конструкций. По материалу изготовления арматура может быть класса «К» - коррозионно устойчивая, «С» - свариваемая. Гладкая и периодическая арматура, как правило, изготавливается диаметром от 6 до 40 мм, больший или меньший диаметр производится только по заказу строительной или проектной компании.

Для строительства железобетонных зданий и конструкций ТУ 14-1-5254-2006 регламентируется горячекатаная арматура периодического или гладкого профиля, имеющая диаметры от 3 до 80 мм. Для опытов была выбрана арматура А-3 25Г2С  $\sigma_m=390$  Н/мм<sup>2</sup>. Выбор такого типа арматуры обусловлен распространенностью его применения и возможностью сваривания. Это позволяет провести сравнение прочности соединения стержней методом опрессовки и методом сварки. Более подробно основные геометрические параметры класса А-3 представлены на рисунке 3.3.

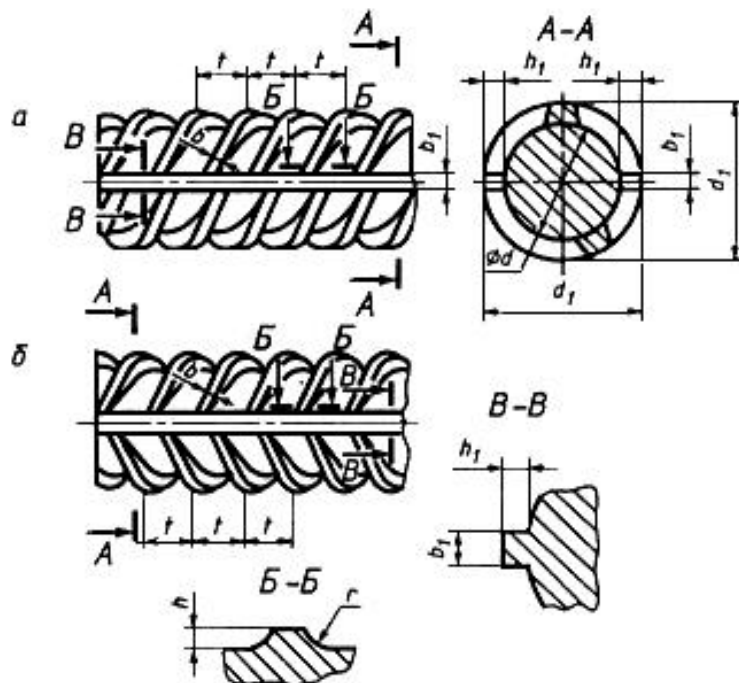


Рисунок 3.3 Общий вид строительной арматуры, подвергающейся испытаниям

Соединительная муфта изготавливается из отрезка стальной трубы. При этом толщина стенки должна составлять от 7 до 15% от диаметра трубы. Длина втулки должна составлять от 10 до 15 диаметров арматурного стержня. Допускается использование шовной водопроводной трубы, изготовленной из стали Ст25.

Длина трубы, согласно нормативным данным, должна составлять от четырех до восьми диаметров арматуры. Выбор труб для изготовления соединительных втулок осуществляется из расчета прочности соединения [33]:

$$\sigma_{T_{вт}} = 0,6\sigma_{T_{арм}}, \quad (3.1)$$

где  $\sigma_{T_{арм}}$  - предел текучести арматуры,  $\sigma_{T_{вт}}$  - предел текучести втулки. Предел текучести арматуры, указанный в нормативных данных, для типажа А400(АШ)  $\sigma_{пр\ арм} = 390 \text{ Н/мм}^2$ .

В главе 1 определены типоразмеры арматуры, наиболее часто применяемые в железобетонных конструкциях бетонных зданий. Соответственно для типоразмеров арматуры диаметром от 10 до 20 мм необходимо выбрать втулки, наиболее подходящие по внутреннему диаметру и материалу (его пределу текучести). Для соединительных муфт выбраны заготовки из стальной шовной водопроводной трубы из стали Ст20 с пределом текучести  $\sigma_{пр\ вт} = 275 \text{ Н/мм}^2$  с обыкновенной толщиной стенки [31]. Арматура Ø10 мм будет соединена втулкой из трубы с внутренним диаметром 10 мм при толщине стенки 2,2 мм. Арматура диаметром 12 и 14 мм – втулкой из трубы с внутренним диаметром 15 мм, стенкой 2,5 мм, арматура диаметром 16 и 20 мм – втулкой из трубы с внутренним диаметром 20 мм, стенкой 2,8 мм. Характеристики разрывной нагрузки арматуры, сравнение требуемого значения усилия разрыва для соединительных муфт со значением разрывной нагрузки выбранных труб представлено в таблице 3.1.

Выбор для втулки водопроводной трубы обусловлен ее доступностью для проведения эксперимента. Для изготовления крупных партий втулок имеется возможность использования заготовок из бесшовной холодноотянутой стальной трубы из Ст25. Стандарт для данной продукции предполагает возможность



изготовления партий труб с любой необходимой толщиной стенки, что позволит обеспечить равнопрочность соединения.

Таблица 3.1 - Характеристики разрывной нагрузки арматуры и сравнение необходимого усилия разрыва втулки с развиваемым заготовкой.

Диаметр арматуры, мм	Разрывная нагрузка арматуры, Н	Требуемая разрывная нагрузка втулки, Н	Разрывная нагрузка водопроводной трубы, Н
10	30615	18369	23292
12	44085	26451	37785
14	60005	36003	37785
16	78374	47024	55126
20	122460	73476	55126

Результаты расчетов, представленных в таблице 3.1 позволяют сделать вывод, что с помощью водопроводных труб имеется возможность соединения строительной арматуры в диапазоне диаметров от 10 до 16 мм. Для арматуры диаметром 20 мм использована бесшовная труба из Ст25 внутренним диаметром 20 мм и стенкой 3 мм

Для проведения эксперимента в прессе размещаются матрица и пуансон подходящего типоразмера. Между матрицей и пуансоном вставляется заранее заготовленная втулка нужного диаметра, во втулку до середины ее длины вставляется стержень арматуры, после чего начинается нагружение образца, проходящее до завершения опрессовки. Далее втулка разворачивается на 180° и устанавливается между пуансоном и матрицей неопрессованным участком, в нее до упора вставляется второй стержень и аналогично происходит нагружение. Для построения статической нагрузочной характеристики в процессе нагружения образца необходимо контролировать и документировать значения силы сдавливания и осадки заготовки. Сила контролируется по шкале динамометра пресса, а осадка с помощью микрометрического индикатора часового типа. Он закрепляется с помощью магнитной стойки с гибким стержнем на подвижной плите

пресса, и контролирует ее смещение относительно неподвижной плиты. Окончанием опрессовки следует считать момент, когда осадка образца прекращается (стрелка индикатора перестает смещаться). Далее давление пресса будет возрастать без значительной осадки испытуемой детали. На рисунках 3.4 и 3.5 представлены образцы заготовок перед испытаниями, на рисунке 3.6 – вид готового изделия.



Рисунок 3.4 - Заготовленные и промаркированные образцы

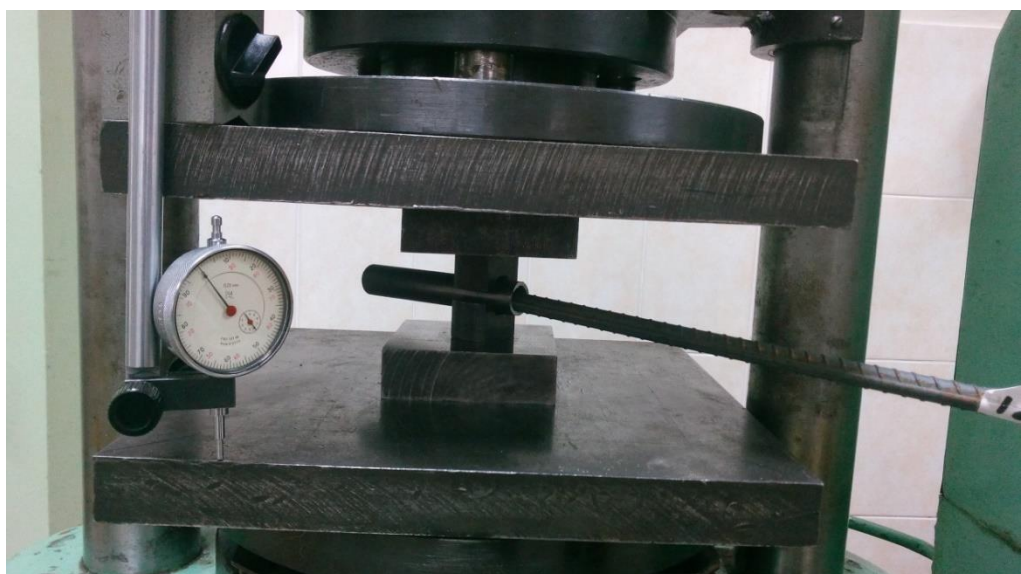


Рисунок 3.5 Положение заготовки и индикатора в прессе



Рисунок 3.6 Готовое соединение двух стержней арматуры

На основании ранее рассмотренной методики получены экспериментальные результаты зависимости осадки втулки на арматуре от силы сдавливания.

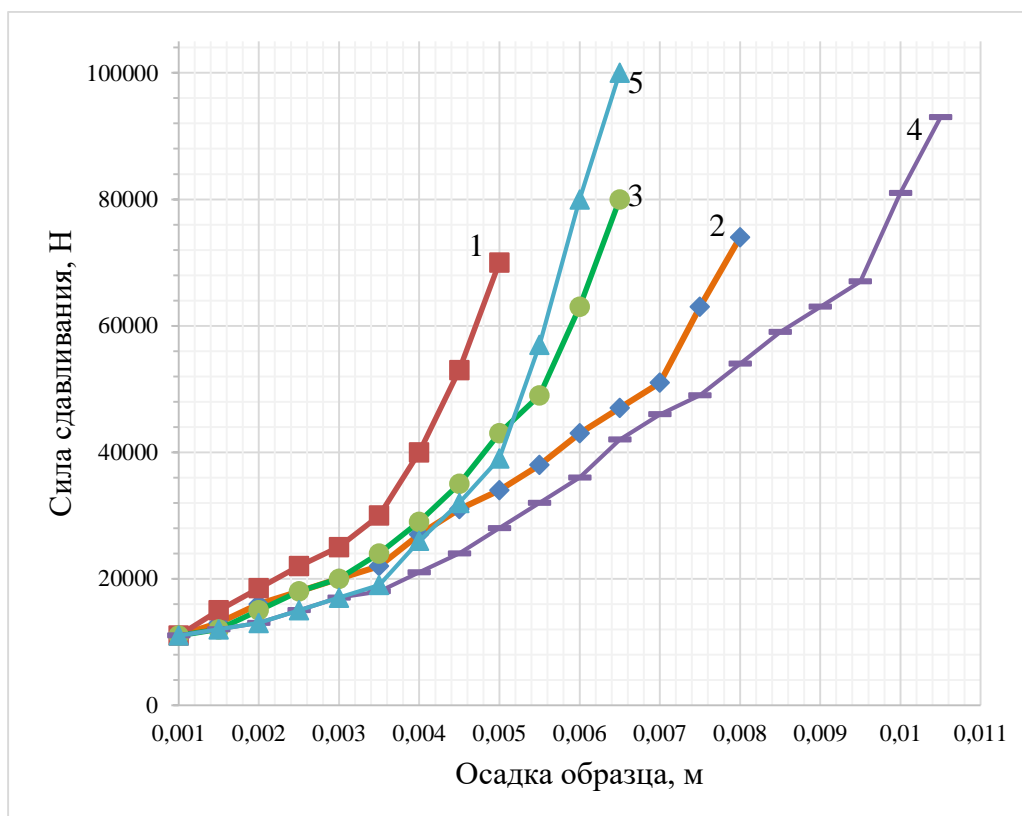
Таблица 3.2 – Результаты экспериментов для арматуры диаметром 12 мм.

Осадка образца, $h_k$ , мм	Сила сдавливания, Н				
	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5
1	2	3	4	5	6
0,5	9000	9500	8500	9000	8500
1	11000	11500	9500	10000	11500
1,5	13000	14000	11000	12000	13000
2	16000	18000	15000	17000	15000
2,5	18000	20000	17000	19000	16000
3	20000	21000	19000	20000	18000
3,5	22000	23000	21000	22000	20000
4	27000	26000	27000	28000	25000
4,5	31000	33000	30000	32000	30000
5	34000	36000	32000	36000	31000
5,5	38000	40000	36000	42000	37000

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6
6	43000	44000	40000	47000	41000
6,5	47000	49000	45000	51000	46000
7	51000	52000	48000	55000	49000
7,5	63000	65000	59000	69000	57000
8	74000	76000	71000	80000	70000

Анализ экспериментальных данных позволил получить закономерности величины осадки стальной втулки на арматуре в продольной оси пресса в зависимости от силы сдавливания. На рисунке 3.7 представлена итоговая статическая нагрузочная характеристика осадки втулок на арматуре диаметром от 10 до до 20 мм.



Линия 1 – для арматуры Ø10 мм, 2 – для Ø 12 мм, 3 – для Ø 14 мм, 4 – для Ø 16 мм,  
5 – для Ø 20 мм

Рисунок 3.7 – Итоговая зависимость осадки цилиндрической втулки на арматурном стержне для диаметров арматуры

Из графиков видно, что осадка втулки существенно зависит от расхождения внутреннего диаметра втулки и наружного диаметра арматуры. Стоит отметить, что в первом диапазоне движения пуансона длиной 3-4 мм не происходит существенной осадки втулки. Это связано с тем, что матрица и пуансон гранями начинают напрессовываться на втулку без ее существенной деформации.

С помощью аппроксимации данных графиков линиями регрессии получены значения условной жесткости среды  $c_2$ , приведенные в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Условная жесткость втулок в пластической зоне деформирования при осадке на арматуре

Диаметр арматуры	Ø10 мм	Ø12 мм	Ø14 мм	Ø16 мм	Ø20 мм
$c_2$ , Н/м	$12,3 \cdot 10^6$	$7,8 \cdot 10^6$	$10,6 \cdot 10^6$	$7,6 \cdot 10^6$	$13 \cdot 10^6$

Сила начала деформирования получена аналитическим путем:

$$F_T = \frac{\sum F_{Tn}}{n} = 9 \cdot 10^3 \text{ Н} \quad (3.2)$$

Значение энергии единичного удара  $T_{уд}$  получено из уравнения осадки образца (2.13), предложенного в главе 2:

$$h_k = \sqrt{\left(\frac{F_m}{c_2}\right)^2 + \frac{T_{y0}}{c_2} - \frac{F_m}{c_2}}.$$

Данные значения, с помощью методики, предложенной в главе 2, позволят в дальнейшем рассчитать энергию единичного удара и количество ударов, необходимых для обжатия втулки на арматуре.

Для оценки точности полученной линии нагружения необходимо определить погрешность измерений.

Математическое ожидание силы сдавливания  $F$ , Н:

$$M_F = \frac{1}{n} \sum (F_i - F_0), \quad (3.3)$$

где  $F_0$  - средняя сила сдавливания для осадки на текущую величину, Н;  $F_i$  -  $i$  - ая сила нагружения, Н;  $n_i$  - количество измерений в цикле.

Дисперсия силы  $F$ :

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - M_F)^2}{n}. \quad (3.4)$$

Абсолютная погрешность,  $\Delta F$ , Н:

$$\Delta F = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - M_F)}{n}. \quad (3.5)$$

Относительная погрешность результата измерений  $E_F$ , %:

$$E_F = \frac{\Delta F}{M_F} \cdot 100\%. \quad (3.6)$$

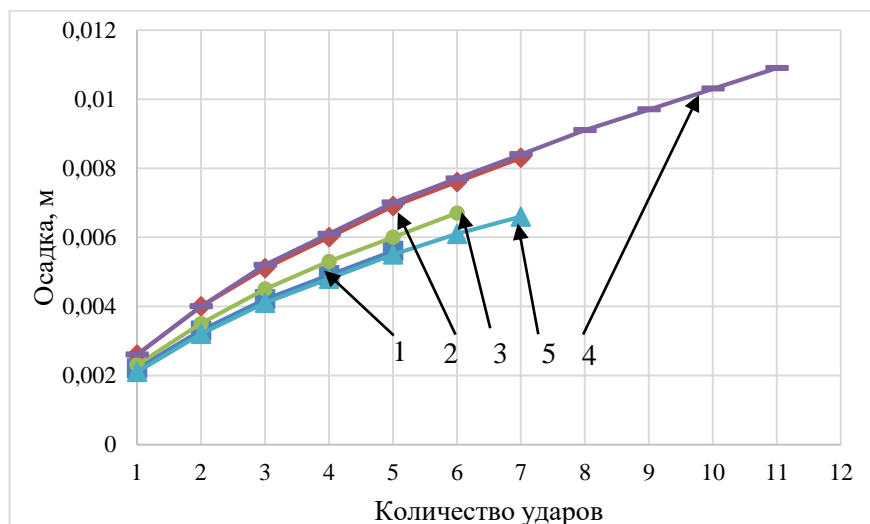
На основании обработки экспериментальных данных получены значения, указанные в таблице 3.4, подтверждающие сходимость результатов.

Таблица 3.4 - Обработка результатов испытаний

Множественный R	0,977
Коэффициент детерминации $R^2$	0,954
Нормированный $R^2$	0,950
Погрешность, Н	1216
Погрешность абсолютная, $E_F$ , %	4,3

Таким образом, коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,954, что выше допустимого значения 0,95. Общая погрешность эксперимента составляет 4,3%, что позволяет считать эксперимент достоверным.

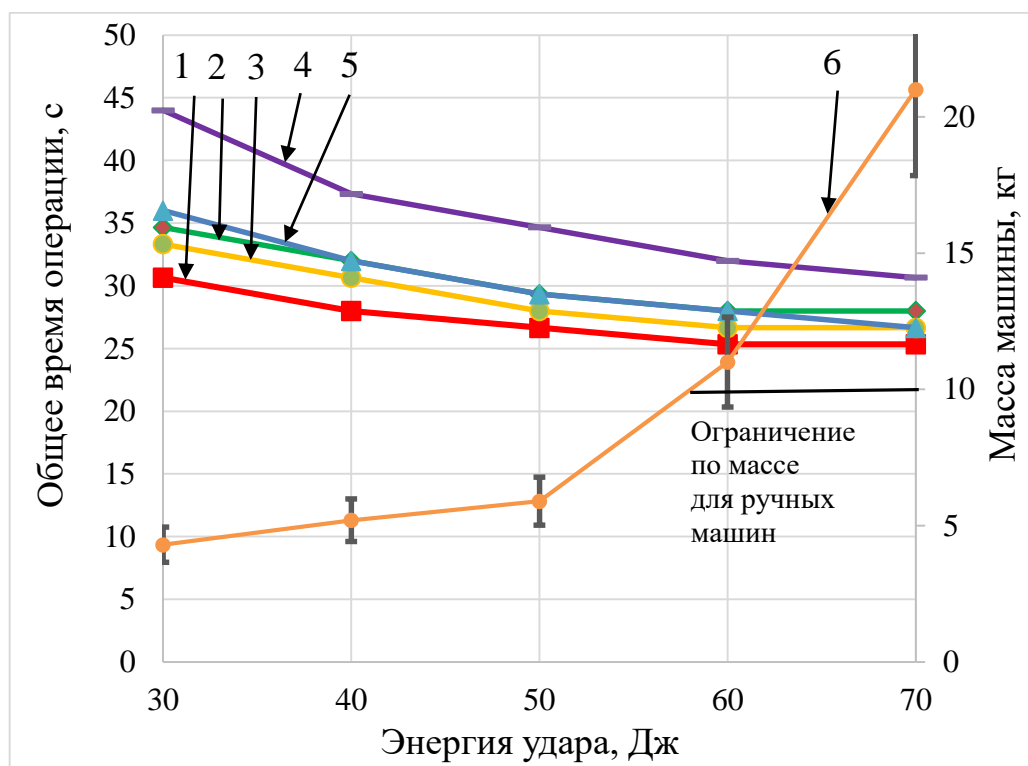
Имея коэффициенты  $F_T$  и  $c_2$ , по приведенным в главе 2 формулам (2.12) и (2.13) получена зависимость осадки втулки на арматуре от количества ударов машины при энергии удара 50 Дж (рисунок 3.8).



Линия 1 – для арматуры Ø10 мм, 2 – для Ø12 мм, 3 – для Ø14 мм, 4 – для Ø16 мм,  
5 – для Ø20 мм

Рисунок 3.8 – Зависимость осадки стальной втулки на арматуре от количества ударов.

Зависимости, приведенные на рисунке 3.8, в свою очередь позволяют получить зависимости времени выполнения технологической операции при частоте ударов 1,5 Гц и массы машины от различной энергии удара (рисунок 3.9). При этом масса машины напрямую зависит от удельной энергии удара электромагнитного привода. В промышленности широко применяются электромагнитные молотки с удельной энергией удара 1,5-2 Дж/кг, кроме того в технической литературе отражены характеристики электромагнитных двигателей, с удельной энергией удара 5-9 Дж/кг, поэтому значения массы на графике 6 (рисунок 3.9) приведены в определенных интервалах [52, 94].



Линия 1 – для арматуры Ø10 мм, 2 – для Ø 12 мм, 3 – для Ø 14 мм, 4 – для Ø 16 мм,  
5 – для Ø 20 мм, линия 6 – масса машины

Рисунок 3.9 – Зависимость общего времени операции и массы машины от энергии единичного удара для диаметров арматуры

Из приведенных зависимостей видно, что максимальная энергия удара машины для соединения арматуры массой до 10 кг составляет 55 Дж. Наиболее предпочтительная энергия удара - 50 Дж. Дальнейшее увеличение энергии

единичного удара на 5 Дж ведет к возрастанию массы более чем в 1,5 раза (с 6 до 10 кг) [6], при этом время операции снижается не значительно.

Таким образом, получены экспериментальные зависимости осадки стальной втулки на арматуре от силы сдавливания, позволяющие рассчитать функциональные зависимости энергии удара, массы машины, количества ударов и времени выполнения операции.

Массогабаритные параметры бойка и электромагнитные нагрузки напрямую влияют на электрическую мощность электромагнитного привода [93], рассчитываемую с помощью формулы 3.7.

$$S_p = \Omega d_o^2 A_s B_\delta l_k, \quad (3.7)$$

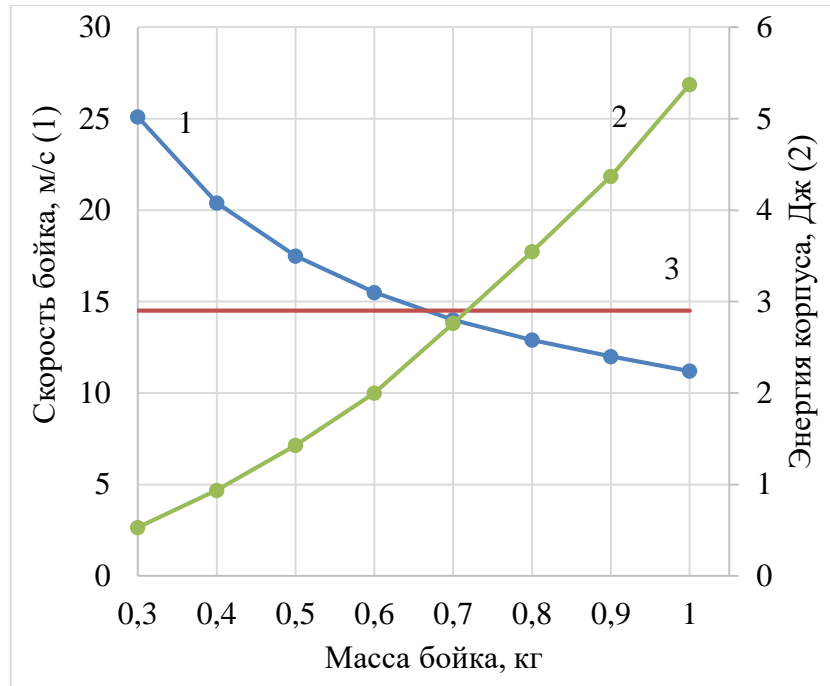
где  $\Omega$  - коэффициент, учитывающий частоту питающей сети,  $d_o$  - диаметр бойка,  $A_s$  - линейная токовая нагрузка,  $B_\delta$  - индукция в воздушном зазоре катушки,  $l_k$  - длина катушки.

Из выражения (3.7) следует, что мощность двигателя зависит от параметров бойка, токовой нагрузки и индукции в воздушном зазоре [70]. Предельные значение токовой нагрузки и индукции электромагнитного двигателя ограничены насыщением материала бойка и нагрузкой на питающую сеть. Их дальнейшее увеличение невозможно [61, 68].

Изменение массы бойка влияет на характеристики рабочего цикла в фазах 1-6, в том числе на величину ударного импульса, передаваемого на корпус в 6 фазе рабочего цикла. В соответствии с формулами (2.29), (2.37) на рисунке 12 приведена зависимость скорости бойка и величины ударного импульса корпуса в 6 фазе от массы бойка при энергии удара машины  $T_{y\delta} = 50$  Дж. Максимальная известная из литературы скорость бойка, реализуемая электромагнитом, не более 14,5 м/с (линия 3).

Из графика видно, что снижение скорости на 1 м/с (8%), приводит к увеличению ударного импульса на 16%, поэтому значение массы бойка 0,72 кг является наиболее предпочтительным.





Линия 1 – скорость бойка, 2 – энергия корпуса, 3 – ограничение по скорости бойка.

Рисунок 3.10 – Зависимость скорости бойка и ударного импульса корпуса от массы бойка

На рисунке 3.11 приведено сравнение производительности работ при соединении сваркой (1) и опрессованием (2) для установленной ранее  $T_{уд} = 50$  Дж.

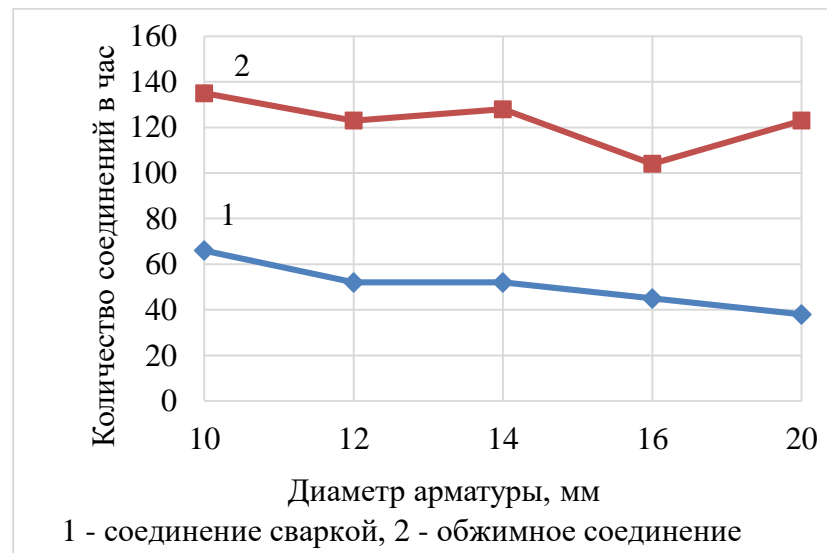


Рисунок 3.11 – Зависимость производительности работ по соединению арматуры в зависимости от ее диаметра

Сравнение зависимостей 1 и 2 на графике наглядно иллюстрирует, что соединение арматуры диаметром от 10 до 20 мм ручной ударной машиной происходит быстрее, чем сваркой.

Таким образом, энергия единичного удара, равная 50 Дж, развиваемая ручной ударной машиной с массой бойка 0,72 кг, является достаточной для совершения технологической операции соединения строительной арматуры, и позволяет соединять арматурные стержни быстрее, чем с помощью сварки.

Полученные данные позволяют при помощи математической модели ручной ударной машины, представленной в главе 2, рассчитать величину ударного импульса, передаваемого на корпус машины в 4 и 6 фазах рабочего цикла. При этом масса пуансона  $m_{п} = 0,27$  кг.

Согласно выражению (2.7) находится предударная скорость бойка:

$$v_g = \frac{m_{\delta} v_{01}}{m_{\delta} + m_n} = \frac{0,72 \cdot 14}{0,72 + 0,27} = 10,4 \text{ м/с.}$$

Далее при помощи выражения (2.16) находится скорость корпуса в 4 фазе после соударения с бойком. При этом учитывается масса обрабатываемой детали  $m_{ои} = 0,2$  кг. Масса корпуса вычисляется исходя из общей массы электромагнитного привода  $m_{эн}$  без учета подвижных элементов.

$$m_k = m_{эн} - m_{п} - m_{\delta} = 4,9 \text{ кг.} \quad (3.8)$$

$$v'_k = \frac{2(m_{\delta} + m_n)v_g}{(m_{\delta} + m_n) + (m_k + m_{ои})} = \frac{2 \cdot (0,72 + 0,27) \cdot 10,4}{(0,72 + 0,27) + (4,9 + 0,2)} = 3,32 \text{ м/с.}$$

Кинетическая энергия совместного движения бойка и корпуса машины согласно (2.17) в 4 фазе составит:

$$E'_k = \frac{(m_{\delta} + m_n + m_k + m_{ои})v_k'^2}{2} = \frac{(0,72 + 0,27 + 4,9 + 0,2) \cdot 3,32^2}{2} = 33,6 \text{ Дж.}$$

Расчет кинетической энергии движения корпуса в 6 фазе необходимо начать с вычисления циклической частоты обратного движения бойка  $\omega_1$ , которая согласно (2.19) составляет:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{c_{np}}{m_{\delta}}} = \sqrt{\frac{3200}{0,72}} = 66,67 \text{ с}^{-1}.$$

При ходе бойка бойка  $A_1 = 0,06$  м, скорость движения бойка при возвратном движении перед соударением с корпусом (2.20)  $v_{\text{бб max}}$ :

$$v_{\text{бб max}} = A_1 \omega_1 = 4 \text{ м/с.}$$

Значение жесткости возвратной пружины  $c_{\text{пр}} = 3200$  Н/м взято из расчетов, приведенных в главе 4 (4.9).

Сила удара, согласно выражению (2.22), при жесткости прокладки, рассчитанной в формуле (4.11) составит:

$$N_m = v_{\text{бб max}} \sqrt{\frac{C_p m_k m_{\text{бб}}}{m_k + m_{\text{бб}}}} = 4,06 \sqrt{\frac{989 \cdot 10^3 \cdot 4,9 \cdot 0,7}{4,9 + 0,72}} = 3159,9 \text{ Н,}$$

время действия удара  $t_y$  (2.23):

$$t_y = \pi \sqrt{\frac{m_k m_{\text{бб}}}{C_p (m_k + m_{\text{бб}})}} = 3,14 \sqrt{\frac{4,9 \cdot 0,72}{989 \cdot 10^3 \cdot 5,87}} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Скорость корпуса в б фазе, согласно уравнению (2.25), составит:

$$v'_k = \frac{N_m t_y}{m_{\text{бб}} + m_n + m_k} = \frac{3159 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}}{5,87} = 0,43 \text{ м/с.}$$

Кинетическая энергия движения корпуса в б фазе (2.26):

$$E'_k = \frac{(m_{\text{бб}} + m_n + m_k) v_k'^2}{2} = \frac{(0,72 + 0,27 + 4,9) \cdot 0,43^2}{2} = 0,54 \text{ Дж.}$$

Из этого следует вывод, что для данных фаз необходимо более подробное исследование характеристик вибрационной нагрузки в соответствии с нормативными значениями, указанными в СанПиН 2.2.4.3359-16.

Стоит отметить, что моделирование процесса опрессовки строительной арматуры происходило с учетом минимальной массы обрабатываемой детали, хотя она может достигать значений, в несколько раз превосходящих массу самой машины, что в значительной степени снижает возможные ускорения корпуса. А в случае, когда один конец стержня залит в многотонный железобетонный каркас, ускорение корпуса, за счет массы детали, стремящейся к бесконечности, будет практически равно нулю.

### 3.2 Проверка возможности соединения арматуры с помощью ручных ударных линейных электромагнитных машин

Поскольку результаты эксперимента по снятию статической нагрузочной характеристики показывают, что существует возможность получения соединения двух стержней арматуры посредством обжимной муфты при уровне энергетического воздействия, соответствующем развиваемому ручными ударными машинами с электромагнитным приводом, необходимо проведение экспериментального исследования опрессовки стальных втулок на арматуре с помощью таких машин.

Для проведения эксперимента была выбрана машина, имеющая энергию единичного удара 50 Дж. Соединению подвергалась арматура диаметром от 10 до 20 мм. Были применены втулки и арматурные стержни, идентичные тем, которые использовались при получении статической нагрузочной характеристики. На рисунке 3.12 представлен процесс получения неразъемного соединения арматуры.

Проведенные опыты показывают, что ручная машина с энергией единичного удара 50 Дж способна производить опрессовку стальных соединительных втулок на одном из соединяемых стержней оребренной арматуры диаметром 12 мм шестью – восемью ударами.

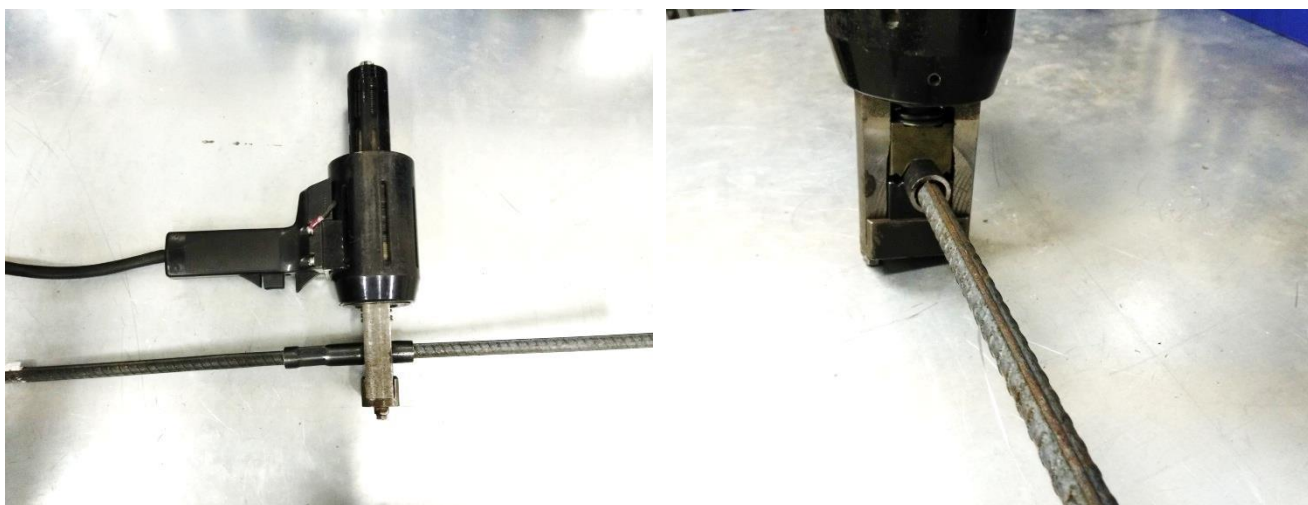
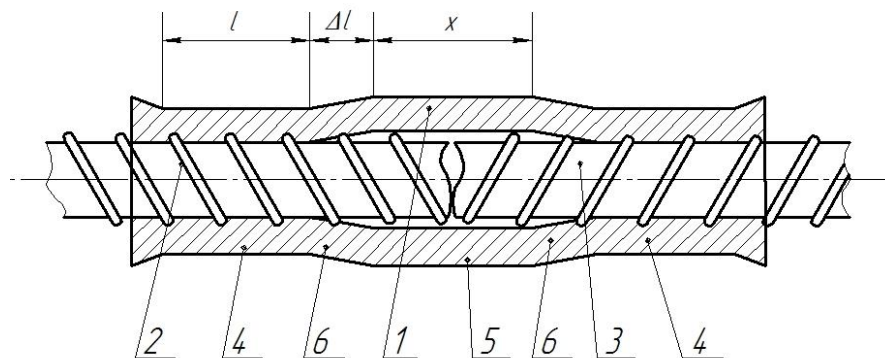


Рисунок 3.12 – Процесс соединения строительной арматуры с помощью ручной ударной машины

В результате выполнения операции получается готовая деталь, схема которой представлена на рисунке 3.13.

Монтаж арматурных стержней осуществляется следующим образом [79]: на арматурный стержень 2, залитый в бетон или находящийся в любом пространственном положении, монтируется соединительная муфта 1, при этом торец наращиваемого стержня 2 необходимо вставить в муфту 1 до ее середины. Далее производится опрессовка соединительной муфты, в которой находится стержень, на участке не менее двух диаметров арматурного стержня, при этом сразу формируется обжатый участок 4 и переходный участок 6. Затем в муфту со свободной стороны вставляется наращивающий стержень 3 до упора его в торец стержня 2. Далее производится опрессовка второй части соединительной муфты, в которой находится стержень 3, при этом формируется обжатый участок 4, составляющий не менее двух диаметров арматурного стержня, и переходный участок 6.



1 – соединительная муфта, 2 – наращиваемый стержень, 3 – наращивающий стержень, 4 – зона обжатия, 5 – необжимаемая зона, 6 – переходная зона.

Рисунок 3.13 – Готовое изделие и его характеристики

Соединительная муфта должна соответствовать следующим требованиям: внутренний диаметр втулки определяется диаметром арматуры  $\Phi_{\text{арм}}$  и должен быть на 1-2 мм больше; внешний диаметр также зависит от диаметра арматуры и выбирается из расчета площади сечения, обеспечивающей равнопрочность втулки и стержня арматуры, с учетом предела прочности материалов арматуры

и соединительной муфты; участок  $l$  на рисунке 3.9 определяется достаточной площадью контакта для создания соединения и должен соответствовать условию  $l \geq 2\phi_{\text{арм}}$ , что подтверждено экспериментальными данными; переходной участок  $\Delta l$  должен составлять 20 – 25% от  $l$  для обеспечения переменной величины деформации с целью исключения концентраторов напряжения из-за сминания материала втулки; неопрессовываемый участок  $x$  для исключения возможности попадания некачественно обработанного конца стержня в зону обжатия выбирается из условия  $2\phi_{\text{арм}} \leq x \leq 15\phi_{\text{арм}}$ .

Для получения рабочего диапазона соединяемой арматуры был проведен ряд опытов, на основании которых можно утверждать [62], что ручная ударная машина с линейным электромагнитным приводом с энергией единичного удара 50 Дж и массой бойка 0,72 кг может быть эффективно использована для операции соединения арматуры в стальных цилиндрических втулках при диаметрах арматуры от 10 до 20 мм.

### 3.3 Проверка разрывной силы соединения

Данное исследование проводится с целью проверки соединения арматуры в стальных цилиндрических втулках с помощью ручной ударной машины и сравнения качественных характеристик такого соединения с «традиционными» способами сварки и вязки.

Методом проверки является создание неразъемного соединения арматуры и закрепление его с двух концов в разрывную машину. Испытания проводятся в соответствии с ГОСТ 34227-2017 [32].

#### 3.3.1 Проверка на разрыв образцов, соединенных разными типами скреплений

Для испытаний, в соответствии с нормативом, был подготовлен образец стыкового соединения арматуры диаметром 14 мм в стальной втулке с длиной каждого стержня по 400 мм. Для сравнения значений разрывной силы были

изготовлены образцы стержней, соединенных сваркой и вязкой. Вид образцов до испытаний представлен на рисунке 3.17, а также подробно рассмотрен образец опрессованный во втулке (рисунок 3.14 б).



а)



б)

а) арматура, соединенная сваркой, вязкой и опрессовкой, б) вид образца после испытания на разрыв

Рисунок 3.14 – Образцы перед и после испытания на разрыв

Параметрами, контролируемыми при испытании качества соединения арматуры, согласно ГОСТ 12004-81, являются:

- условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , Н/мм<sup>2</sup> - напряжение, при котором мгновенная пластическая деформация достигает 0,2%;
- относительное удлинение после разрыва  $\delta_5$  - процент изменения длины участка детали, на котором произошел разрыв, выраженное в зависимости от первоначальной длины участка, равного пяти диаметрам детали;
- временное сопротивление при растяжении  $\sigma_b$ , Н/мм<sup>2</sup> - нагрузка, соответствующая максимальному напряжению перед разрывом;
- предел текучести  $\sigma_T$ , Н/мм<sup>2</sup> - наименьшее усилие, при достижении которого деформация протекает без значительного увеличения нагрузки;

- относительное равномерное удлинение  $\delta_p$  - изменение длины детали на участке, длиной 50 или 100 мм, исключая непосредственно место разрыва, выражаемое в процентах от первоначальной длины детали;

- прочность арматуры - сопротивление материала стержня разрушению или неупругим (пластическим) деформациям под воздействием внешних нагрузок (предел прочности или предел текучести).

Площадь поперечного сечения арматуры  $S_a$ , мм<sup>2</sup> - площадь поперечного сечения одинакового по массе на всей длине круглого образца, имеет зависимость:

$$S_a = \frac{1000m}{7,85l}, \quad (3.8)$$

где  $m$  - масса образца, г;  $l$  - длина образца, мм.

Согласно ГОСТ 34227-2017, в исследовании проводится проверка предела прочности соединения арматуры различными типами скрепления, с целью сравнения полученного ранее соединения с другими общепринятыми видами соединения. Для этого образцы поочередно были закреплены в универсальной испытательной машине УИМ – 50. Данный прибор предназначен для создания усилия на разрыв и сжатие до 500 кН. В случае с исследуемыми деталями, один конец закрепляется в нижней цанге станда, другой в верхней, после этого начинается испытание с приложением нагрузки, направленной по оси детали на разрыв. Нагружение контролируется с помощью стрелочного индикатора, продолжается до превышения предела прочности соединения, то есть до разрыва детали. На основании результатов испытания, на рисунке 3.15 приведен сравнительный анализ разрывной силы, показывающий, что прочность соединения арматуры опрессовкой сравнима с прочностью сварного соединения и кратно выше соединения вязкой. К тому же важным обстоятельством является тот факт, что стержни рассоединились не в месте стыка с муфтой, а произошел излом самой муфты. Это обстоятельство позволяет сделать вывод, что применив в качестве муфты трубу с более толстой стенкой и незначительно увеличив время



операции за счет нанесения еще нескольких ударов, можно получить с помощью опрессовки соединение, сопоставимое по прочности на разрыв с самой арматурой.

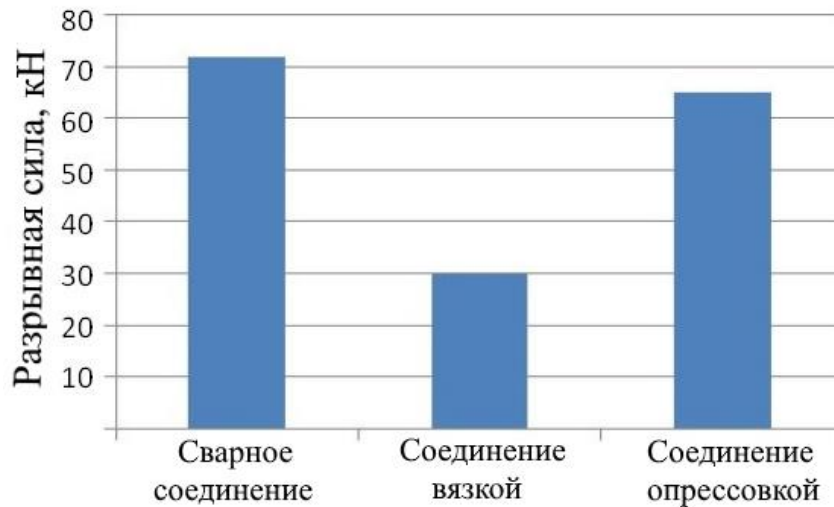


Рисунок 3.15 – Сравнение разрывной силы для разных типов соединения

### 3.3.2 Проверка разрывной силы с заливкой образцов в бетон

Следующим этапом экспериментального исследования является испытание на разрыв образцов, залитых в бетон в стальной трубе. Такое исследование проводится для проверки разрывной силы соединения, находящегося в условиях, приближенных к реальным. Для испытания были подготовлены три образца арматуры, соединенных способами, описанными выше. Далее были подготовлены три отрезка трубы диаметром 100 мм и высотой, превышающей участок соединения на 100 мм с каждой стороны. Трубы с образцами внутри были залиты бетоном М-200 и оставлены для сушки на 14 дней. В работах А.Д. Абрамова данная процедура была названа армированием.

Операция заливки в стальную трубу необходима для имитации нахождения большого массива бетона вокруг арматуры, что позволяет воспроизвести реальные условия нахождения арматуры внутри железобетонного объекта. На рисунке 3.16 приведены образцы, залитые в бетон и подготовленные для испытаний.

Данные изделия были так же подвергнуты испытаниям на разрыв в машине УИМ-50 (рисунок 3.17). Результаты такого испытания показаны на рисунке 3.18.



Рисунок 3.16 - Образцы, подготовленные для испытания на разрыв



Рисунок 3.17 - Процесс испытания на разрыв в слое бетона

Результаты эксперимента показывают, что прочность всех образцов одинакова и сопоставима с прочностью арматуры. Следовательно, поскольку прочность соединения отрезков арматуры внутри готовой железобетонной конструкции не

имеет решающего значения, основными достоинствами применения операции обжатия арматуры в стальных муфтах на строительных площадках является увеличение скорости возведения объектов, высокая технологичность и низкие трудозатраты в сравнении с соединением комбинированными и болтовыми муфтами и вязкой, и низкие требования к квалификации персонала относительно сварного соединения. К важнейшим достоинствам обжимного соединения стоит отнести возможность соединения силами одного рабочего двух стержней арматуры в любом положении: горизонтальном, вертикальном или наклонном.

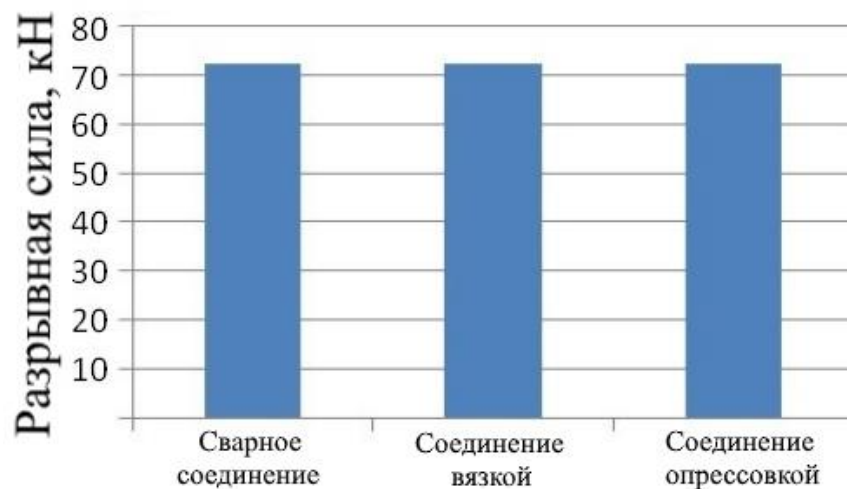


Рисунок 3.18 – Сравнение разрывной силы для разных типов соединения, залитых в бетон М-200.

#### 3.4 Проверка уровня вибрационной нагрузки, передаваемой на корпус ударной машины

Для установления уровня вибрационной нагрузки на корпус машины с помощью массивной стальной пластины был установлен пьезоэлектрический датчик измерения вибрации «Bruel & Kjaer №4333», характеристики которого приведены в таблице 3.5. Сигнал обрабатывался с помощью аналогово-цифрового преобразователя «L-Card LE-440», усилителя сигнала «Bruel & Kjaer charge amplifier type 2635», а также программного комплекса «ACTest». Испытания проводились в лаборатории вибротехники Института горного дела СО РАН. Характеристики усилителя приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.5 - Характеристики датчика вибрации «Bruel &amp; Kjaer №4333»

Параметр	Значение
Чувствительность к напряжению	18,4 мВ/г
Температура	от минус 74 до плюс 260° С
Масса	12,7 г
Чувствительность по заряду	19,6 пКл/г
Емкость вибропреобразователя (включая кабель)	1065 пФ
Собственная частота	59 кГц
Минимальное сопротивление (при нормальных условиях)	20000 МОм
Тип электрического разъема	10-32 NF
Максимальное ударное ускорение	10000 g

Таблица 3.6 - Характеристики усилителя сигнала «Bruel &amp; Kjaer charge amplifier type 2635»

Параметр	Значение
Максимальный входной заряд	105 пКл
Диапазон настройки	от 0,1 до 10,99 пКл/м·с <sup>2</sup>
Чувствительность усилителя	от 0,1 мВ/пКл до 10 В/пКл, от минус 40 до плюс 80 дБ
Выходной сигнал ускорения	от 0,1 мВ/м·с <sup>2</sup> до 1 В/м·с <sup>2</sup>
Выходной сигнал скорости	от 10 мВ/м·с до 100 В/м·с
Выходной сигнал перемещения	от 0,1 мВ/мм до 10 В/мм
Шаг дискретной настройки	10 дБ
Частотный диапазон ускорения (переключаемый нижний предел)	0,2 Гц или 2 Гц - 100 кГц
Частотный диапазон скорости (переключаемый нижний предел)	1 Гц или 10 Гц - 10 кГц

Продолжение таблицы 3.6

Частотный диапазон перемещения (переключаемый нижний предел)	1 Гц или 10 Гц - 1 кГц
Температура	-10 - + 55 °С
Питание от внешнего источника постоянного тока с напряжением	от 6 до 28 В

Для проверки адекватности математической модели ручной ударной машины, представленной в главе 2, был проведен первый этап эксперимента - проверка величины ударного импульса, передаваемого на корпус машины при совершении процесса опрессовки стальной втулки, при условии того, что корпус машины расположен на струнном подвесе. Общий вид и принципиальная схема установки представлены на рисунках 3.19 и 3.20 соответственно.

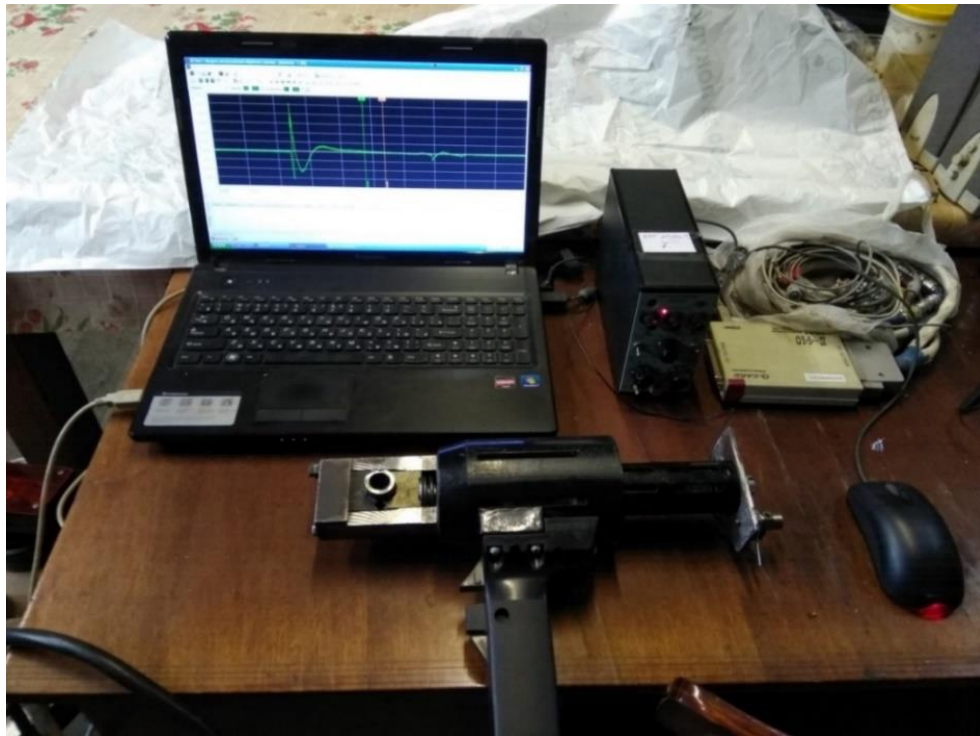
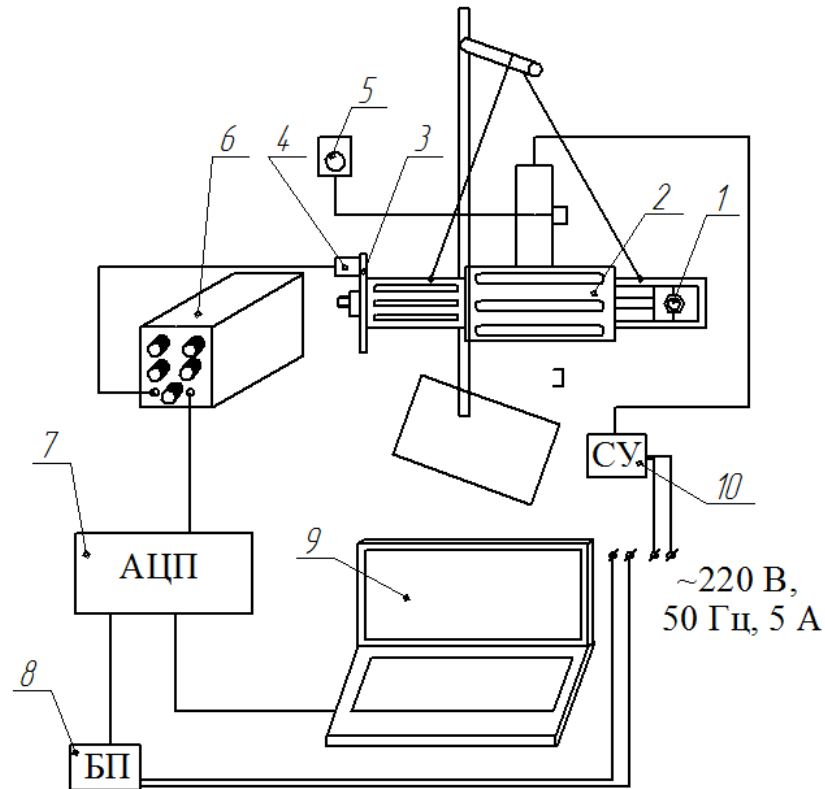


Рисунок 3.19 – Ручная ударная машина с комплексом обработки данных характеристик вибрации

Установка представляет собой штатив с кронштейном, на котором с помощью струн подвешивается ручная ударная машина. При этом кнопка запуска

рабочего режима также вынесена на проводах за пределы корпуса машины, что позволяет управлять включением дистанционно, то есть исключается любое влияние оператора на происходящий колебательный процесс. В результате эксперимента получена зависимость скорости корпуса от времени, графический вид которой представлен на рисунке 3.21.



1 – обрабатываемая деталь; 2 – ручная ударная машина; 3 – пластина крепления датчика; 4 – датчик измерения вибрации; 5 – выносная кнопка «пуск»; 6 – усилитель сигнала; 7 – АЦП; 8 – блок питания, 9 – портативный компьютер; 10 – система управления ударной машиной.

Рисунок 3.20 - Принципиальная схема измерения ударной нагрузки с вывешиванием машины на струнах.

Полученные данные позволяют оценить энергию удара, передаваемую на руку оператора, используя значения скорости корпуса машины в фазах 4 и 6 рабочего цикла машины.



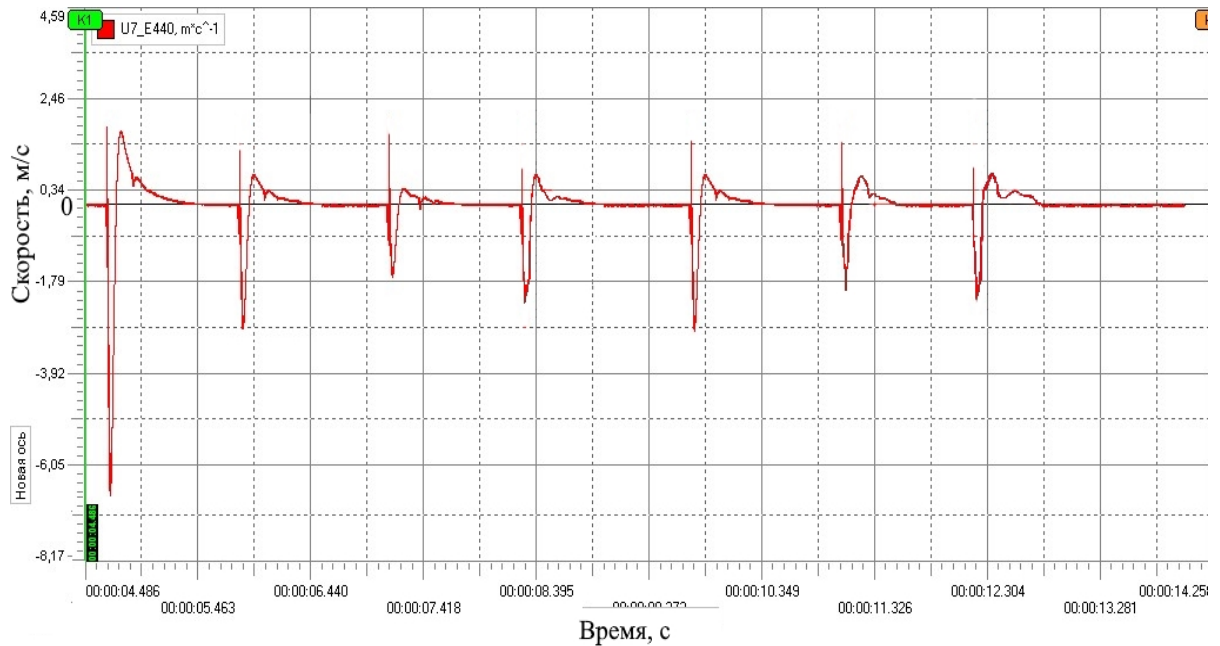
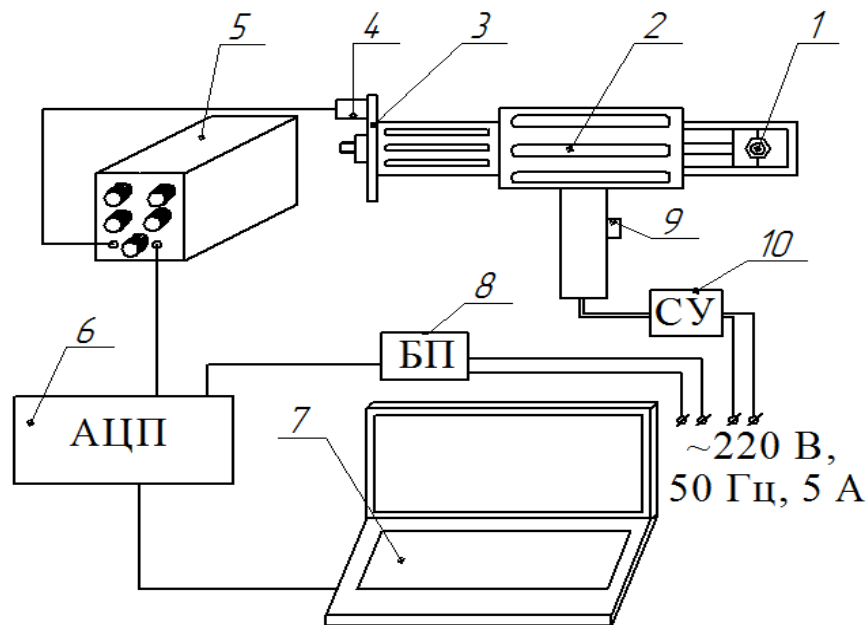


Рисунок 3.21 – Зависимость скорости корпуса от времени в 7 рабочих циклах ударной машины при подвешивании машины (окно интерфейса программы АС Test)

Подставляя значения скорости корпуса, полученные экспериментально, в уравнения кинетической энергии фаз 4 и 6 (2.18) и (2.27), были выявлены значения  $E_{к\ 4\ фаза}=30,5$  Дж,  $E_{к\ 6\ фаза}=0,59$  Дж. Данные значения находятся в пределах погрешности 8%, относительно расчетных. В реальных условиях кинетическая энергия совместного движения машины и руки оператора будет существенно ниже за счет демпфирования ударного импульса рукой оператора.

Для сравнения вибрационных характеристик машины с нормативными, СанПиН 2.2.2.540 - 96 устанавливает способ проверки вибрации, в котором оценивается уровень виброускорения в среднегеометрических октавных частотах. При этом оператор удерживает машину за рукоятку [81]. Для дальнейших экспериментов была применена схема измерения вибрационной нагрузки, приведенная на рисунке 3.22, состоящая из вибродатчика, усилителя и преобразователя сигнала, аналогово-цифрового преобразователя, персонального компьютера и непосредственно самой машины ударного действия с обрабатываемой деталью, представляющей собой втулку, обжимаемую на арматурном стержне. Масса детали составляет 0,2 кг.



1 – обрабатываемая деталь, 2 – ручная ударная машина, 3 – крепежная пластина для крепления вибродатчика, 4 – вибродатчик, 5 – усилитель сигнала датчика, 6 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) сигнала, 7 – портативный компьютер с установленной системой обработки данных, система управления электромагнитным двигателем, 8 – блок питания АЦП, 9 – кнопка пуска машины, 10 – система управления машиной.

Рисунок 3.22 - Принципиальная схема измерения ударной нагрузки с удерживанием машины в руках

В результате эксперимента получена зависимость виброускорения от времени. На рисунке 3.23 представлена запись восьми последовательных рабочих циклов ударной машины в процессе опрессовки стальной втулки на арматуре. Корпус машины подвешен на струнах.

Рисунок 3.24 иллюстрирует зависимость виброускорения от времени при удерживании машины оператором двумя руками за рукоятку.

Графики наглядно показывают, что уровень виброускорения корпуса при подвешивании и удерживании в руках машины, отличаются в 2 раза, что свидетельствует о сильном поглощении энергии оператором.



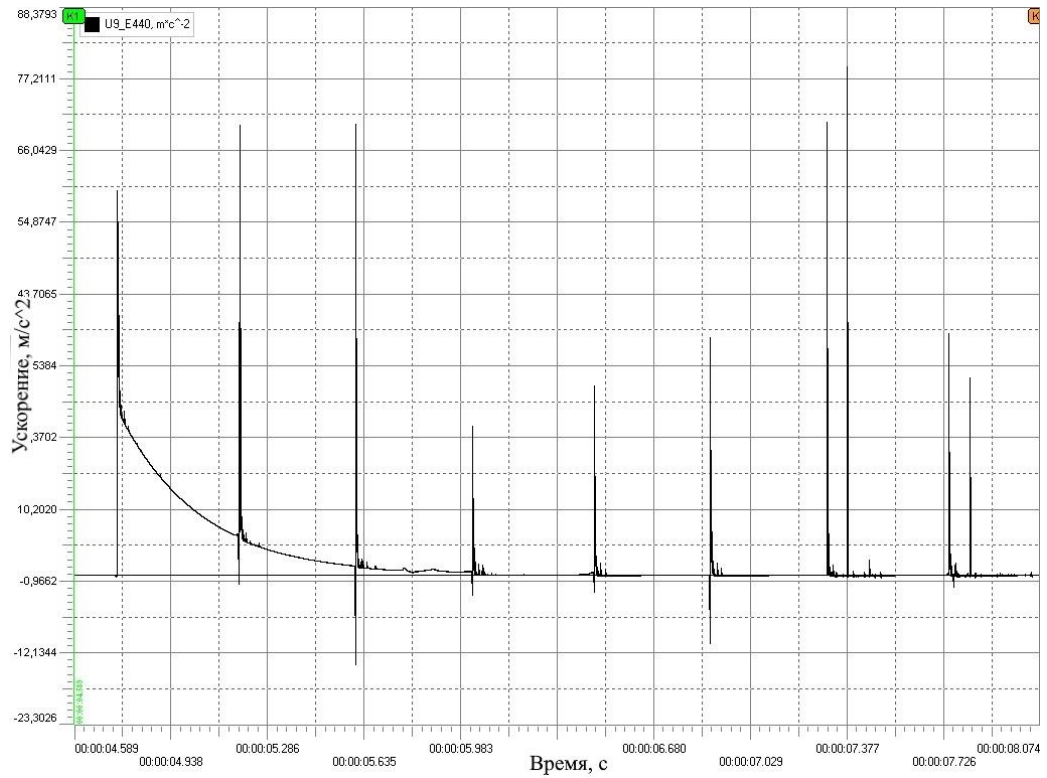


Рисунок 3.23 - Виброускорение корпуса машины на струнном подвесе

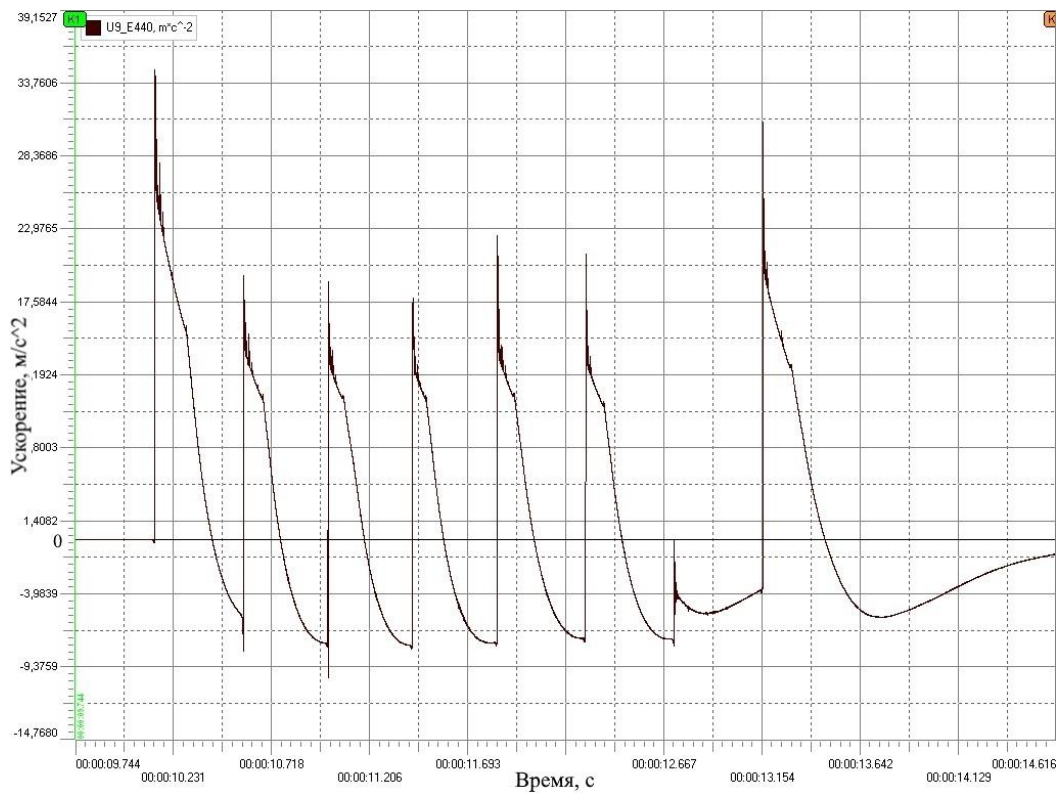


Рисунок 3.24 – Зависимость виброускорения от времени в 8 рабочих циклах ударной машины при удерживании машины в руках (окно интерфейса программы AC Test)

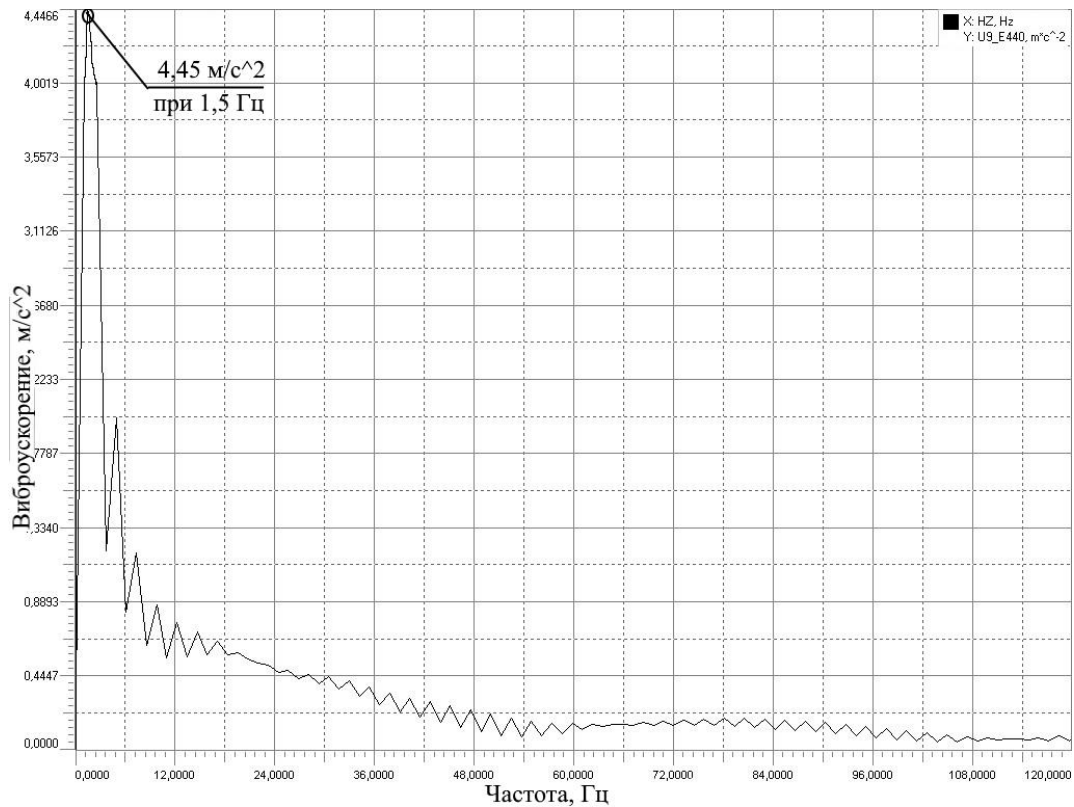


Рисунок 3.25 - Амплитудно – частотный спектр виброускорения

Анализируя график виброускорения, представленный на рисунке 3.25, можно сделать вывод, что максимальный уровень виброускорения достигается при частоте 1,5 Гц, что соответствует периодичности рабочих циклов исследуемой ручной ударной машины. При этом значение виброускорения достигают  $4,45 \text{ м/с}^2$ , что превышает установленный нормативом уровень  $1,4 \text{ м/с}^2$ , что свидетельствует о необходимости применения новых конструктивных решений, снижающих уровень вибрационной нагрузки на оператора.

Стоит отметить, что в эксперименте был рассмотрен критический режим работы ручной ударной машины – момент жесткого соударения подвижных и неподвижных частей машины, достигающийся при продолжении оператором ударной обработки детали после завершения опрессования втулки на арматуре. При этом был использован стержень арматуры длиной 0,1 м, что свидетельствует о малой массе детали, а соответственно о малой способности детали к рассеиванию вибрационной нагрузки. В реальных условиях масса двух соединяемых стержней арматуры можеткратно превышать массу самой машины,

что говорит о том, что вибрационная нагрузка в 4 фазе может быть снижена за счет своевременного прекращения работы оператором. Однако график на рисунке 3.22 показывает, что и в 6 фазе рабочего цикла уровень виброускорения достаточно высок. При этом масса обрабатываемой детали и выбор правильного режима обработки не оказывают влияния на передачу ударного импульса на корпус в данной фазе. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости конструктивных доработок, снижающих уровень вибрации корпуса при ударе о него бойка в 6 фазе рабочего цикла

### 3.5 Результаты экспериментальных исследований

На основании полученной в ходе эксперимента зависимости величины осадки образца от усилия сдавливания расчетным способом можно определить количественные характеристики энергии единичного удара  $T$  и числа ударов  $k$ , необходимые для качественной и экономически целесообразной технологической операции соединения строительной арматуры.

$$T = \frac{h_k^2 c_2 + h_k F_m}{2k}; \quad T \geq \frac{h_k (c_2 h_k + 2F_T)}{2k}. \quad (3.9)$$

Результаты расчетов, приведенные в таблице 3.3 говорят о том, что имеется возможность производить опрессовку строительной арматуры с помощью машин с энергией единичного удара от 30 Дж. По результатам расчета необходимо произвести выбор оборудования в соответствии с его энергетическими и массогабаритными показателями.

Анализируя зависимости, приведенные на рисунках 3.8 и 3.9 можно сделать вывод о том, что наиболее подходящей для соединения строительной арматуры с диаметрами от 10 до 20 мм является машина с энергией удара 50 Дж. Машины, развивающие энергию единичного удара более 50 Дж, при незначительном увеличении скорости опрессовки, не могут за счет массы более 10 кг считаться ручными, что предполагает другой режим работы оператора с ними. В таблице 3.7

рассмотрено изменение параметров операции соединения арматуры Ø12 мм и машины в зависимости от развиваемой энергии удара.

Таблица 3.7 Расчет энергии и количества ударов для опрессовки арматуры диаметром 12 мм

Количество ударов	12	12	14	18	22
Энергия единичного удара Т, Дж	71,3	50,9	49,5	38,3	28,7
Масса проектируемого привода, кг	21	11	5,9	5,2	4,3
Время операции, с	28	28	29	32	35

Результаты, приведенные в таблице, полученные расчетным путем, коррелируют с результатами эксперимента с реальной машиной с энергией удара 50 Дж, степень погрешности составляет не более 8 %, что позволяет говорить о достоверности статического эксперимента и возможности применения ручных ударных машин с ЛЭМД для опрессовки строительной арматуры.

Однако при очевидных достоинствах указанных машин, у известных конструктивных схем существуют и недостатки, такие как значительный уровень ударной нагрузки, передаваемой с ручки прибора на оператора. Исследования, приведенные в п. 3.4, говорят о необходимости усовершенствования демпфирования в фазе б, что относится к системе возврата бойка в исходное положение, поскольку именно импульс соударения бойка и корпуса в возвратном цикле не может быть снижен за счет своевременного прекращения работы оператором.

Поэтому необходима модернизация существующего электромагнитного привода, а также разработка технологической оснастки, позволяющей качественно и с высокой скоростью соединять строительную арматуру в стальных муфтах.

Таким образом расчеты и практические результаты показывают, что с помощью машин с энергией единичного удара, составляющей 50 Дж, и массой бойка 0,72 кг возможна качественная опрессовка строительной арматуры в диапазоне диаметров от 10 до 20 мм. Для снижения вибрационной нагрузки на оператора необходимо вносить изменения в конструкцию машины.

Выводы по главе:

1. Проведены экспериментальные исследования процесса опрессования строительной арматуры стальной гильзой, в результате которых установлены взаимосвязи между режимами формообразования и величиной осадки гильзы на арматуре.

2. Установлено, что оптимальный уровень энергии единичного удара развиваемый ручными ударными машинами для опрессовки арматуры, составляет 50 Дж при массе бойка 0,72 кг.

3. Проведены опыты по соединению строительной арматуры в стальных цилиндрических втулках с помощью ручной машины с энергией единичного удара 50 Дж, в результате которых установлено, что такие машины способны производить обжатие стальных втулок на арматуре диаметром от 10 до 20 мм.

4. Для проверки адекватности математической модели ручной ударной машины, проведена проверка величины ударного импульса, передаваемого на корпус машины при совершении процесса опрессовки стальной втулки на арматуре. При этом корпус машины был расположен на струнном подвесе.

5. По результатам проверки уровня виброускорения, передаваемого на корпус машины, удерживаемой в руках оператора, получено значение скорректированного виброускорения  $4,45 \text{ м/с}^2$ , что находится близко к предельно допустимому значению  $5,6 \text{ м/с}^2$  для октавной полосы.

6. Произведена оценка качества выполнения технологической операции опрессования на основании показателей усилия удержания гильзы на арматуре.

## ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ОПРЕССОВКИ СТРОИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ И ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

### 4.1 Процесс опрессовки арматуры

В предыдущих разделах было аналитически обосновано и практически доказано, что: соединение строительной арматуры методом обжатия в стальных втулках является наиболее предпочтительным; наиболее перспективным оборудованием для реализации такой технологии являются ручные машины с электромагнитным линейным приводом [45]. Для практического применения такой операции существует необходимость в разработке технологического процесса производства работ в условиях строительной площадки, оборудованной электрической сетью переменного тока 220 В с частотой 50 Гц. Это связано и с уточнением требований к ручным машинам, осуществляющим обжатие втулки.

Технологический процесс создания неразъемного соединения строительной арматуры с помощью ручной ударной машины с линейным электромагнитным приводом состоит из нескольких последовательных операций, состав которых может меняться в зависимости от условий проведения работ. Сам процесс можно разбить на несколько этапов

Подготовительный этап – включает в себя подготовку обрабатываемых деталей и оборудования. На данном этапе необходимо произвести следующие работы:

- удалить воду или снег на подготавливаемых к соединению концах арматуры;
- зачистить от следов коррозии концы стержней арматуры в местах будущего соединения и цилиндрические втулки с помощью металлической щетки (ручной или с помощью шлифовальной машины);
- выбрать и установить из комплекта нужную технологическую оснастку, предназначенную для данного типоразмера обрабатываемой детали, и установить на ударную машину матрицедержатель для опрессовки арматуры и соответствующий комплект матрицы и пуансона.

Основная операция:

- надеть на заранее подготовленный конец арматуры цилиндрическую втулку;
- вставить заготовку между матрицей и пуансоном машины, предварительно отжав пружину и пуансон в сторону рукоятки машины (предварительное усилие нажатия на заготовку необходимо для надежного неподвижного ее удержания от перемещения относительно инструмента до и в процессе обжатия);
- произвести обжатие заготовки путем приведения машины в действие нажатием на кнопку включения на рукоятке, при этом удары продолжать до осадки втулки на арматуре;
- произвести соединение двух заготовок путем обжатия второго стержня в муфте способом, описанным выше;
- открыть матрицедержатель и снять машину с готовой детали.

При отсутствии осадки втулки за несколько последовательных ударов, операцию необходимо завершить во избежание негативного влияния ударной нагрузки на оператора и корпус машины от жестко соударяющихся деталей машины и обрабатываемой детали. Для проведения такой операции в горизонтальном положении на уровне пола нет принципиальной разницы в том, на зафиксированный или незафиксированный стержень первым надевать муфту. Для случаев соединения арматуры в вертикальном или наклонном положении, в случае длины арматуры более 1 м, предпочтительным является обжатие муфтой свободного стержня арматуры на горизонтальной поверхности с последующим обжатием второго конца;

Выбор матриц и пуансонов, а также количества ударов для совершения готовой технологической операции определяется внешним диаметром цилиндрической втулки, который в свою очередь зависит от применяемой арматуры. Предпочтительным материалом для втулок служит холодноотянутая стальная труба с толщиной стенки с отношением наружного диаметра  $d_n$  к толщине стенки  $s$  трубы  $d_n/s$  от 6 до 14 и длиной от четырех до восьми диаметров стержня арматуры. Для арматуры диаметром от 10 до 16 мм допускается применение шовной водопроводной трубы из Ст25ГС.

## 4.2 Инженерная методика проектирования ручных ударных машин для соединения строительной арматуры

Рассмотренная ранее математическая модель является универсальной для ручных ударных машин с любым типом привода, а соответственно позволяет при необходимости рассчитать технологические параметры машины для соединения арматуры в зависимости от требуемого диаметра или диапазона диаметров. На рисунке 4.1 представлена методика проектирования ручной ударной машины для соединения арматуры.



Рисунок 4.1 - Методика проектирования ручной ударной машины.



Данная методика предполагает оценку статической нагрузочной характеристики обрабатываемой детали, выбор наиболее подходящего по энергетическим характеристикам привода, расчет количества ударов, необходимых для качественного выполнения операции, оценку целесообразности использования выбранного привода по затрачиваемому времени на операцию, и непосредственно проектирование привода. При этом проектирование линейного электромагнитного привода осуществляется методом подобия, широко описанным в работах ученых [66, 71, 93].

#### 4.3 Создание инструмента для соединения строительной арматуры

В первой главе работы приведен анализ конструктивных схем и готовых технических решений ручных электромагнитных машин, а также приведены примеры наиболее удачных известных образцов таких устройств и подробно описаны их достоинства. Так же был определен уровень энергетического воздействия на обрабатываемую деталь – стальную цилиндрическую втулку, опрессовываемую на конец стержня строительной арматуры. Приведенные уровни энергии единичного удара могут быть достигнуты с использованием низкочастотных электромагнитных машин ударного действия, отличающихся высокими удельными энергетическими показателями, характеризующими отношение энергии единичного удара к массе машины, достигающими 9 Дж/кг.

В работах [41, 53, 60] говорится о существовании разработок отдельных экспериментальных образцов машин с удельной энергией удара 7-9 Дж/кг, однако широкое применение нашли устройства с гораздо меньшими значениями этого параметра (1,5-2 Дж/кг). Помимо этого, существуют образцы электромагнитных прессов с удельной энергией единичного удара 6 Дж/кг, обладающие массой 15-20 кг, что относит такое оборудование к классу переносного инструмента.

В работах авторов доказано, что конструктивная схема ручной ударной машины с линейным электромагнитным приводом, в которой используется одна катушка прямого хода, а возврат бойка происходит под действием пружины

обладает лучшими характеристиками преобразования электрической энергии в механическую энергию бойка, имея при этом наиболее предпочтительные показатели удельной энергии единичного удара [109].

Согласно данным экспериментальных исследований, приведенных в главе 3, машины с энергией единичного удара 50 Дж являются наиболее предпочтительными для соединения строительной арматуры диаметром от 10 до 20 мм. Такие машины должны обладать характеристиками, приведенными в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Требуемые технологические параметры ручной ударной машины для соединения арматуры

Параметр	Значение
Энергия единичного удара, Дж	50
Общая снаряженная масса, кг	5,9
Масса электромагнитного двигателя, кг	4,9
Масса бойка, кг	0,72
Предударная скорость бойка, м/с	14
Диаметры соединяемой арматуры, мм	от 10 до 20
Тип источника питания	~220 В, 50 Гц
Частота ударов, Гц	1,5
Количество соединений в час (арматура Ø12 мм)	18
Виброскорость, м/с	≤2,8
Виброускорение, м/с <sup>2</sup>	1,4
Класс условий эксплуатации электроустановок	II

В работах [54, 57] рассматривались образцы электромагнитного привода, обладающего требуемой энергией удара. В таблице 4.2 приведены расчетные данные линейного электромагнитного привода с энергией единичного удара 50 Дж.

Таблица 4.2 - Характеристики электромагнитного привода

Характеристика	Значение
Масса корпуса с электромагнитной катушкой, кг	3
Масса матрицы и матрицедержателя, кг	1,2
Масса возвратного механизма, кг	0,7
Итоговая масса неподвижных частей, кг	4,9
Масса бойка, кг	0,72
Масса пуансона, кг	0,27
Предударная скорость бойка, м/с	14
Энергия единичного удара, Дж	50
Ход бойка, мм	60

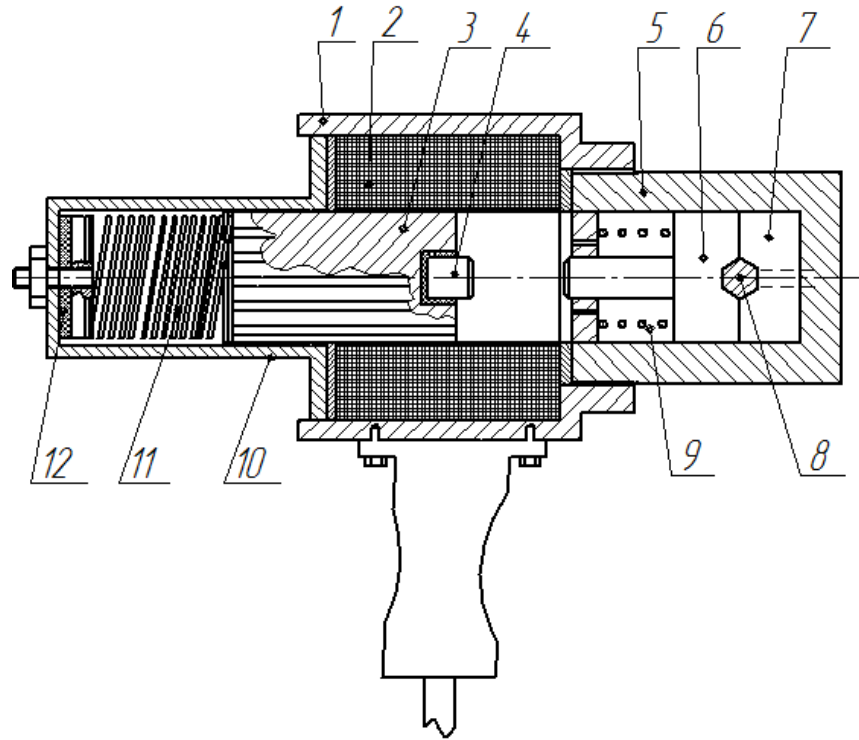
На рисунке 4.2 изображена схема такого электромагнитного привода, обладающего высокими показателями энергетической эффективности относительно массы, с возможностью регулирования низкой частоты ударов, имеющего пружинную систему возврата бойка в исходное положение [80].

В представленной конструктивной схеме боек совмещен с якорем линейного двигателя посредством немагнитного стакана. Якорь, для преодоления сопротивления воздуха во время холостого и рабочего хода, оборудован специальными продольными пазами.

В качестве недостатков прототипа стоит отметить низкую степень защиты оператора от вибраций, передаваемых на ручку прибора и низкий ресурс возвратной пружины бойка, связанный с изломом витков в местах ее прикрепления к бойку и корпусу.

Общим недостатком ручных электромагнитных машин ударного действия с линейным двигателем, можно назвать неоптимальность их работы с точки зрения энергопотребления и электрической эффективности [69]. Этот факт можно объяснить тем, что основным критерием оценки свойств таких устройств является полезная работа, отнесенная к снаряженной массе, которая в свою очередь не должна превышать установленную нормативами. В таком случае

предпочтительной считается ударная мощность, позволяющая совершать операции за меньший временной интервал [59].



1 – корпус, 2 – электромагнитная катушка, 3 – боек, 4 – ударник; 5 – матрицедержатель, 6 – пуансон, 7 – матрица, 8 – обрабатываемое изделие, 9 – поджимающая пружина, 10 – корпус возвратного механизма, 11 – возвратная пружина, 12 – вибродемпфер.

Рисунок 4.2 - Схема высокоэффективной низкочастотной ручной ударной машины с пружинным механизмом возврата

Согласно источнику [7], главным критерием оценки операции является ее стоимость, обусловленная затратами на оборудование для ее совершения. Сокращая время операции за счет мощности машины, то есть меньшего количества подходов для прихода к конечному результату, а также снижая затраты на производство и обслуживание самой машины, можно получить ощутимую экономию на стоимости операции. К тому же продолжительность включения таких машин как правило находится в пределах 40 % от общего времени операции, а при достаточно большой энергии удара может достигать и 20 % [9]. Остальное время

катушка электромагнита не взаимодействует с электрическим током, что позволяет ей не перегреваться.

Основными техническими задачами для расчета ручной ударной машины для соединения строительной арматуры являются снижение вибрационной нагрузки и увеличение эксплуатационного ресурса.

#### 4.4 Расчет элементов ударной машины для соединения арматуры

##### 4.4.1 Расчет возвратной пружины

Пружина является основной деталью механизма возврата бойка в исходное положение, поэтому при проектировании новых и усовершенствовании существующих конструкций, как в случае с данным исследованием, необходимо произвести ее расчет. Согласно источникам [20, 112], расчет возвратной пружины производится с использованием заданных сил пружины в начале и в конце хода якоря линейного двигателя. Также необходимо учитывать и такой параметр как усилие предварительного поджатия. Такое усилие необходимо для того, чтобы при любом положении ударной машины, после снятия с бойка электромагнитной нагрузки, он принудительно возвращался в исходное положение. Также от этого параметра увеличивается и энергия единичного удара, за счет возрастания времени трогания, и, соответственно уменьшения времени движения [73].

Минимальный диаметр пружины  $D$  выбирается из расчета  $D=1,25d$ , где  $d$  – диаметр хвостовика бойка. Применительно к случаю, рассматриваемому в работе, с учетом особенностей конструктивной схемы,  $1,25d \leq D \leq d_{кр}$ , где  $d_{кр}$  – диаметр внешней крышки возвратного механизма машины. Так же при расчете пружины стоит учитывать недопустимость инерционного соударения витков.

Для расчета жесткости возвратной пружины было рассмотрено движение бойка в пятой и шестой фазе рабочего цикла при произвольном пространственном положении ударной машины. Схема для расчета пружины приведена на

рисунке 4.3. Начало координат находится в положении равновесия бойка, когда сила реакции пружины равна силе тяжести бойка.

$$F_{cm} = c_{np} \lambda_{CT} = m_{\delta} g, \quad (4.1)$$

где  $F_{cm}$  – сила тяжести бойка;

$c_{np}$  – коэффициент жесткости пружины;

$m$  – масса бойка;

$g$  – ускорение свободного падения.

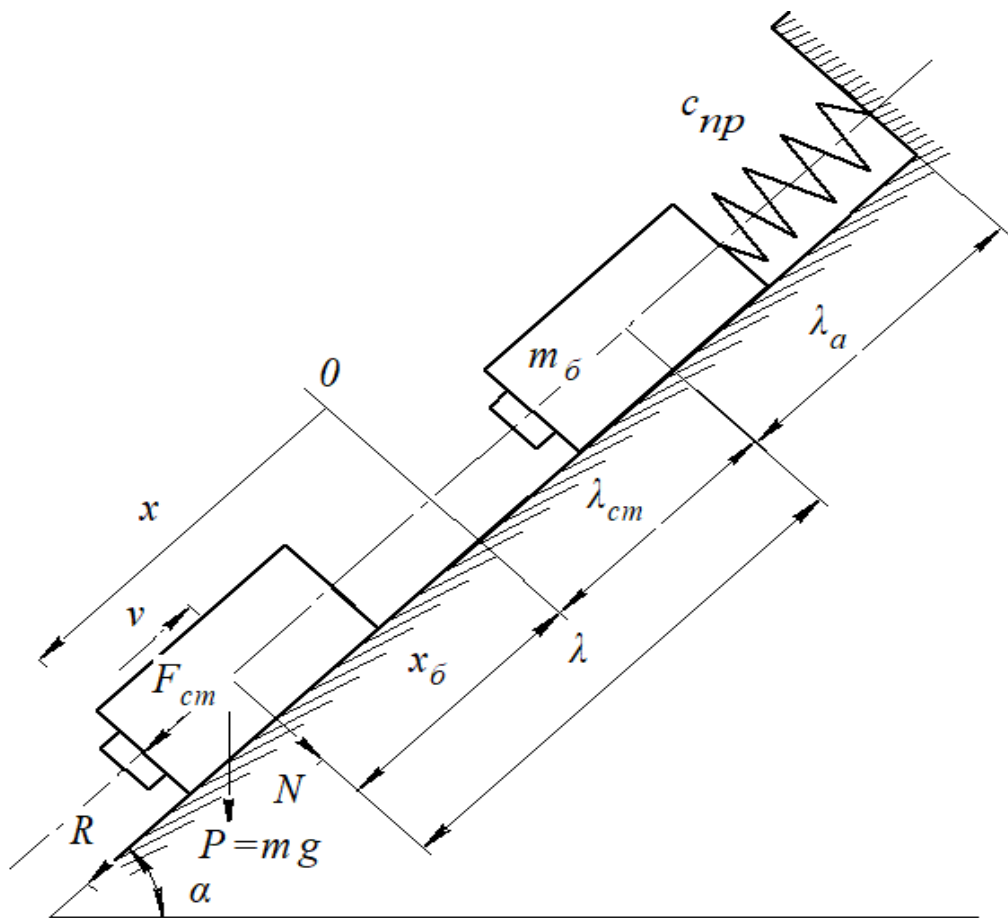


Рисунок 4.3 - Схема для расчета возвратной пружины

Поскольку сила сопротивления воздуха в данном случае бесконечно мала, ей можно пренебречь. В этом случае, уравнение движения бойка в фазе холостого хода, при изменении угла наклона корпуса машины  $\alpha$  в пределах  $0 \leq \alpha \leq \pi$  (рисунок 4.3) будет иметь вид

$$m_{\delta} a_{\delta} = R + F_{cm} - F_{np}. \quad (4.2)$$

Из рисунка 2.19 видно, что  $F_c = P \cos \alpha$ ;  $R = \sin \alpha$ ;  $F_{np} = c_{np} \lambda$ ;  $\lambda = x_{\delta} + \lambda_{cm}$

Тогда, учитывая выражение (4.1), получено:

$$a_{\delta} + q^2 x = g(f \sin \alpha + \cos \alpha - 1), \quad (4.3)$$

где  $q^2 = c_{np}/m_{\delta}$ ;

$w$  – коэффициент трения бойка о направляющую втулку электромагнита.

С учетом начальных условий  $t=0$ ,  $x=x^*$ ,  $\dot{x}=0$ , решением уравнения (4.3) будут выражения:

$$x = \left( v_{\delta} - \frac{g(f \sin \alpha + \cos \alpha - 1)}{q^2} \right) \cos qt + \frac{g(f \sin \alpha + \cos \alpha - 1)}{q^2}, \quad (4.4)$$

$$\dot{x} = - \left( v_{\delta} q - \frac{g(f \sin \alpha + \cos \alpha - 1)}{q} \right) \sin qt. \quad (4.5)$$

Момент времени  $t=t_{xx}$  соответствует возвращению бойка в положение  $x = 0$ .

Время движения бойка от точки максимального удаления от задней стенки корпуса до соударения с ней вычисляется с помощью выражения (4.6).

$$t_{xx} = \frac{1}{q} \arccos \frac{1}{1 - v_{\delta} q^2 / (g(f \sin \alpha + \cos \alpha - 1))}. \quad (4.6)$$

Значение времени возврата бойка (4.6) примет свое максимальное значение при условии (4.7).

$$\alpha = \arctg w, \quad (4.7)$$

где  $w$  – коэффициент трения бойка о направляющую втулку внутри катушки.

Значения коэффициента трения находятся в диапазоне от 0,15 до 0,1, следовательно угол наклона  $\alpha$  для таких значений, рассчитанный по (4.7) находится в пределах  $8^\circ$ , что позволяет с незначительной погрешностью принять его (угол) равным нулю. В таком случае выражение (4.6) принимает следующий вид:

$$t_{xx} = \frac{1}{w} \arccos \frac{1}{1 - v_{\delta} q^2 / (g((w^2 + 1) \cos \arctg w - 1))}. \quad (4.8)$$

Подставляя значения максимального времени холостого хода в уравнение (4.8), вычисляется коэффициент жесткости пружины:

$$c_{np \min} = \frac{\pi^2 m}{4 t_{xx \max}^2} \quad (4.9)$$

Жесткость пружины, рассчитанная с помощью выражения (4.9) позволяет вернуть боек в положение  $x = 0$  за время, необходимое для своевременного возобновления цикла. При этом боек должен возвращаться за установленное время при любом пространственном положении ударной машины [27]. С учетом вышесказанного, получено значение  $c_{пр\ min} = 3200$  Н/м.

#### 4.4.2 Расчет демпфирующего элемента

Для расчета демпфирующего элемента в фазе 6 необходимо определить жесткость резиновой прокладки. На рисунке 4.4 представлен вид прокладки-демпфера возвратного механизма.

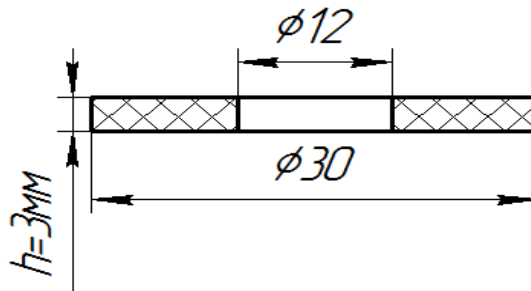


Рисунок 4.4 Габаритные размеры прокладки

Исходя из габаритных размеров, определяется площадь прокладки:

$$S = \pi(R^2 - r^2) = 3,14 \cdot (15^2 - 6^2) \cdot 10^{-6} = 593,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

С помощью выражения (4.10):

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{F_y}{ES} \Rightarrow F_y = \frac{ES}{h} \Delta h \quad (4.10)$$

можно получить жесткость прокладки, приняв модуль упругости резины равным  $E = 0,5 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>.

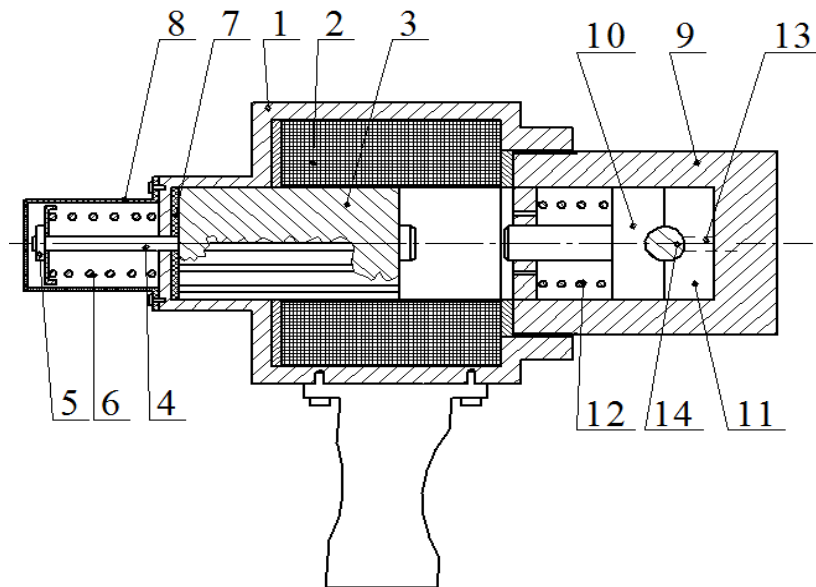
$$C_p = \frac{ES}{h} = \frac{0,5 \cdot 10^7 \cdot 593,5 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-3}} = 989 \cdot 10^3 \text{ Н/м}. \quad (4.11)$$

Однако, согласно экспериментальным исследованиям, проведенным в главе 3, демпфирующих свойств данной прокладки недостаточно. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости новых конструктивных решений системы возврата бойка.



#### 4.5 Новые конструктивные решения в машине для соединения строительной арматуры

Как было сказано ранее, конструктивная схема прототипа машины для соединения арматуры нуждается в изменениях компоновки возвратного механизма. Одним из решений данной проблемы служит структура машины, представленная в устройстве для соединения контактов [77], представленном на рисунке 4.5.



1 – корпус, 2 - электромагнитная катушка прямого хода, 3 – массивное тело бойка, 4 – хвостовик, 5 – упорный элемент, 6 – возвратная пружина, 7 – демпфер, 8 – защитный кожух, 9 – матрицедержатель, 10 – пуансон, 11 – матрица, 12 – поджимающая пружина, 13 – направляющая ось, 14 – обрабатываемая деталь.

Рисунок 4.5 – Конструктивная схема устройства для соединения контактов

Данная конструкция позволяет увеличить ресурс устройства за счет применения возвратной пружины, сжимающейся при совершении рабочего хода, в которой отсутствуют места прикрепления к бойку, являющиеся недостатком прототипа. При этом масса устройства снижена за счет применения кожуха возвратного механизма из легких материалов что является особенностью компоновки.

Однако стоит отметить, что в представленной схеме должным образом не решен вопрос с гашением ударного импульса, что говорит о необходимости доработки. Модифицированная конструкция устройства предполагает увеличение площади виброгасителя, а также уменьшение габаритных размеров.

С учетом усовершенствований компоновочной схемы возвратного механизма, изменится и конфигурация вибродемпфера, поэтому согласно методике, рассмотренной в п.п. 4.4.2, необходимо заново произвести расчет резиновой прокладки (рисунок 4.6).

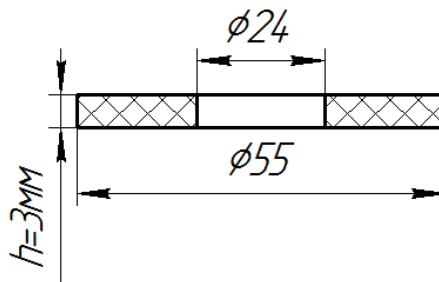


Рисунок 4.6 - Габаритные размеры прокладки

Далее по приведенной ранее методике производится расчет площади и жесткости прокладки, силы соударения и периода удара бойка о корпус.

$$S = \pi(R^2 - r^2) = 1922,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

Жесткость прокладки, рассчитанная с помощью выражения (4.11):

$$C_p = \frac{ES}{h} = 320,4 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2.$$

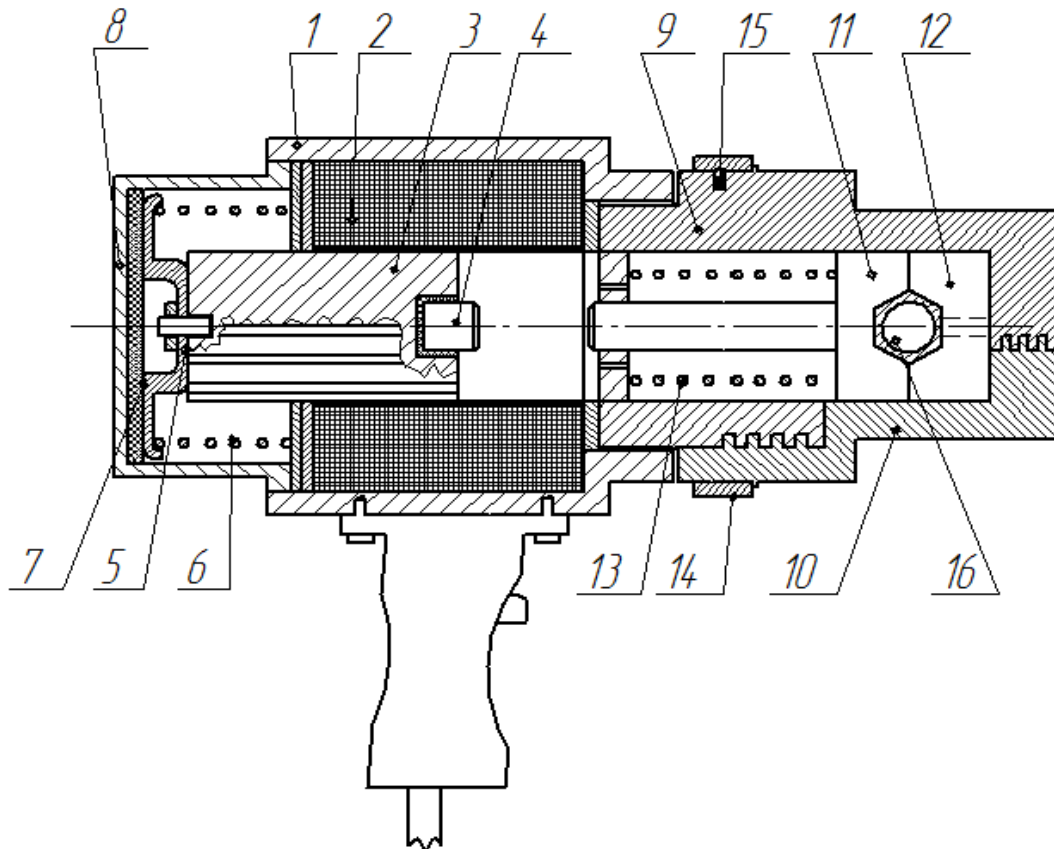
Сила, передаваемая на корпус, согласно формуле (2.23):

$$N_m = V_{\text{вбmax}} \sqrt{\frac{C_p(m_k + m_n + m_{ou})m_{\delta}}{(m_k + m_n + m_{ou}) + m_{\delta}}} = 1406,8 \text{ Н.}$$

Исходя из расчетов очевидно, что площадь прокладки увеличилась в 3,2 раза. Сравнивая силу, воспринимаемую корпусом после демпфирования у прототипа  $N_m = 3159,9 \text{ Н}$ , и у предлагаемой машины  $N_m = 1406,8 \text{ Н}$ , можно сделать вывод о снижении ударной нагрузки на корпус при возвратном движении бойка в 2,25 раз.

К другим отличиям такой конструктивной схемы относится разъемный матрицедержатель, что обусловлено спецификой операции. Например, в случае с обжатием электрических проводов, гидрорукавов или стальных тросов, существует

возможность простым движением извлечь деталь из матрицы. Однако соединенные стержни арматуры, достигающие в высоту нескольких метров, не позволяют отделить деталь от машины, не прибегая к разъему матрицедержателя, что создает необходимость проектирования разъемного узла. Примером такого устройства служит рассматриваемая в работе [10] конструктивная схема, представленная на рисунке 4.7.



1 – корпус, 2 - электромагнитная катушка прямого хода, 3 – массивное тело бойка, 4 – ударник, 5 – упорный элемент, 6 – возвратная пружина, 7 – демпфер, 8 – защитный кожух, 9 – разъемный матрицедержатель, 10 – съемная часть матрицедержателя, 11 – пуансон, 12 – матрица, 13 – поджимающая пружина, 14 – фиксирующее кольцо, 15 – удерживающий механизм кольца, 16 - обрабатываемая деталь.

Рисунок 4.7 - Принципиальная схема устройства для опрессовки арматуры

Таким образом, на основе усовершенствования конструктивной схемы создан новый универсальный вибробезопасный инструмент, способный

качественно и с низкими материальными затратами осуществлять стыковку арматурных стержней.

#### 4.6 Технологические операции, реализуемые с помощью ударных машин

Опыт исследований в области проектирования и эксплуатации ручных ударных машин показывает, что они используются во многих сферах производства. Ранее были описаны области применения ручных ударных машин, в данном же разделе более подробно рассмотрены конкретные примеры (рисунок 4.8) и перспективные направления использования такого оборудования.

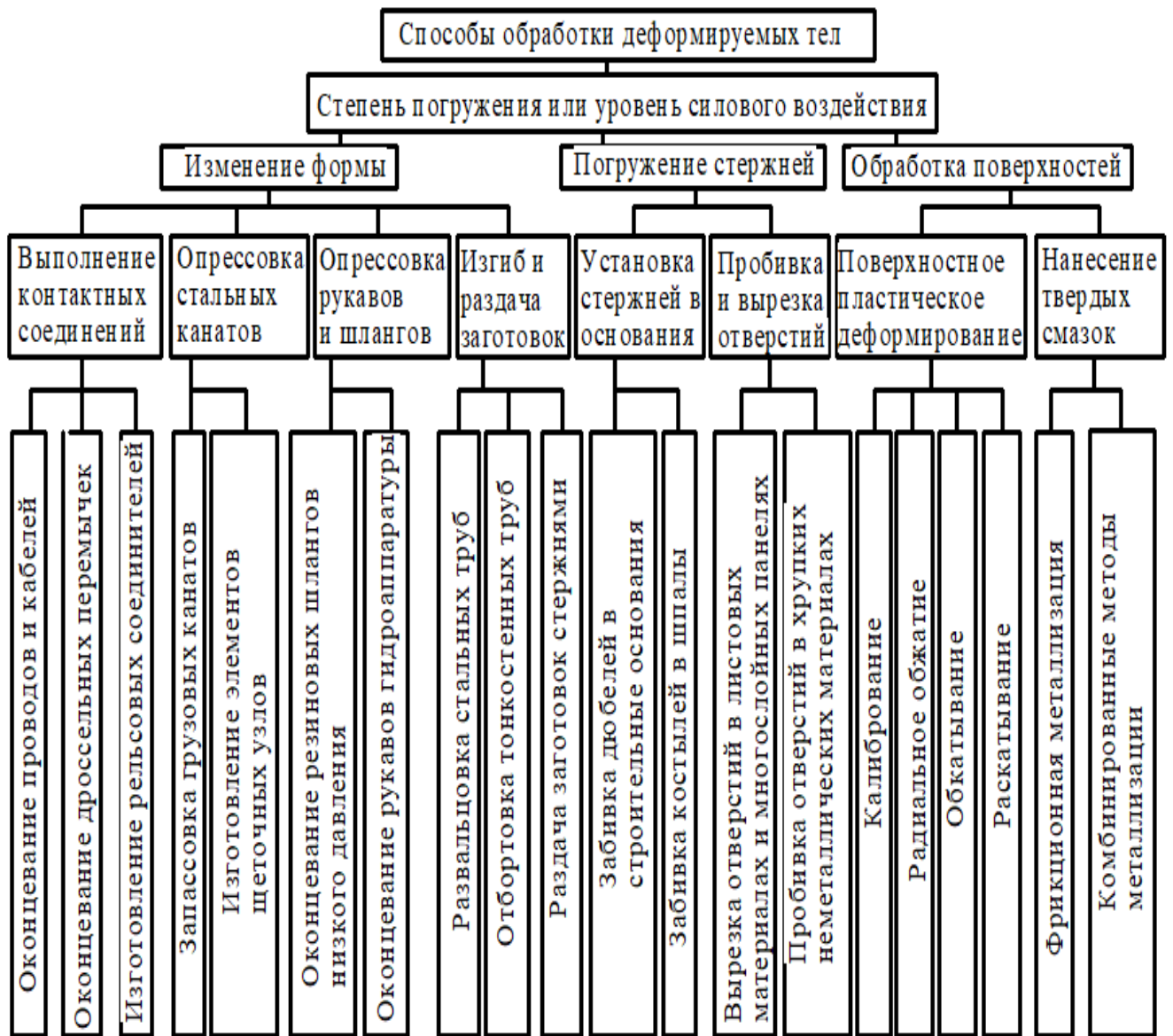


Рисунок 4.8 – Классификация ударных операций

В работах [1, 3] были приведены конкретные примеры использования ударных машин с ЛЭМД на предприятиях. А.Д. Абрамов классифицировал технологические операции на 20 групп.

Данные операции, несмотря на их очевидные различия, можно осуществить с помощью однотипных машин, различающихся только энергией удара, размером и технологической оснасткой. Вид деформационного процесса у таких операций описывается двумя-тремя сходными уравнениями.

Анализируя перечисленные ниже операции и процессы их осуществления, а также с учетом накопленного учеными опыта, можно сделать вывод, что значения энергии единичного удара для выполнения таких операций находятся в узком диапазоне от 30 до 80 Дж.

Однако, углубленное изучение информации о технологических операциях, реализуемых с помощью энергии удара, позволяет сказать, что оптимальным энергетическим воздействием на обрабатываемую деталь, обеспечивающим качественное и быстрое выполнение операции, является значение в пределах 50-60 Дж с частотой ударов 1-2 Гц. Перечень операций представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 Перечень технологических операций с указанными энергетическими показателями

Технологические операции	Общая энергоемкость		
	Общая работа, Дж	Энергия единичного удара, Дж	Кол-во ударов, шт
1	2	3	4
1. Оконцевание проводов, алюминий 20 мм <sup>2</sup>	400	50	8
2. Изготовление дроссельных перемычек, медь 35 мм <sup>2</sup>	576	48	12
3. Запасовка грузовых канатов	350	50	7
4. Изготовление элементов щеточных узлов	376	47	8

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4
5. Оконцевание рукавов гидроаппаратуры	300	50	6
6. Оконцевание шлангов пневмоаппаратуры	300	50	6
7. Забивка стержней диаметром 6 мм в неметаллические материалы, дерево, 50 мм	45	45	1
8. Забивка дюбелей в основания Ø6мм, глубина 50 мм: Кирпич обыкновенный	44,5	44,5	1
9. Забивка костылей в шпалы	52	52	1
10. Соединение строительной арматуры	350	50	7

Таким образом, можно сделать вывод, что ручная электромагнитная машина с энергией единичного удара 50 Дж, разработанная с учетом требований для операции опрессовки стальной арматуры в цилиндрических втулках, может использоваться еще для девяти операций путем смены технологической оснастки в течение короткого промежутка времени [44]. Сама оснастка представляет собой два или три матрицедержателя и несколько комплектов матриц и пуансонов разных типоразмеров. При этом сохраняются такие важные свойства как низкая вибрационная нагрузка, низкая масса укомплектованной машины, возможность размещения в транспортировочном кейсе с размерами 800x800x200 мм машины и всей необходимой для данных операций технологической оснастки.

#### 4.7 Расчет экономического эффекта

Главной задачей данной работы является создание инструмента для соединения строительной арматуры методом ударной опрессовки в стальных втулках. Возможность практического применения такого решения обусловлена в первую очередь экономическим эффектом от внедрения в производственный

процесс. Для решения этой проблемы необходимо провести анализ временных и материальных затрат на реализацию операции соединения стержней арматуры разными методами: определить нормы времени на проведение одной операции; рассчитать количество операций, которое может произвести один рабочий в течение рабочей смены; определить минимальную классность работников, допущенных к выполнению данных работ; определить расходы на материалы, затрачиваемые при соединении; рассчитать итоговые затраты на проведение операции соединения строительной арматуры.

Согласно Единым нормам и расценкам на сварочные работы [42], расчет трудозатрат выполнен с учетом установленной трудоемкости выполнения нахлесточного соединения с помощью ручной дуговой сварки (тип сварного соединения Н1) [34]. Для работ допускаются сварщики 4-6 разряда.

Нормы времени, установленные для соединений разных диаметров арматуры с помощью ручной дуговой сварки внахлест представлены в таблице 4.4. Нормирование времени на подготовительные операции для сварного соединения проведено из расчета 17% от основного времени операции.

$$t_{\text{норм.св}} = 1,17t_{\text{осн.св}}. \quad (4.12)$$

В графе «Общее время операции» для сварного соединения учитывается время на непосредственно на проварку шва, взятие присоединяемого стержня и приведение его в вертикальное положение, формирование нахлеста и фиксацию присоединяемого стержня перед сваркой.

Время на подготовительные операции при соединении опрессовкой не зависит от диаметра арматуры и принято равным 20 с.

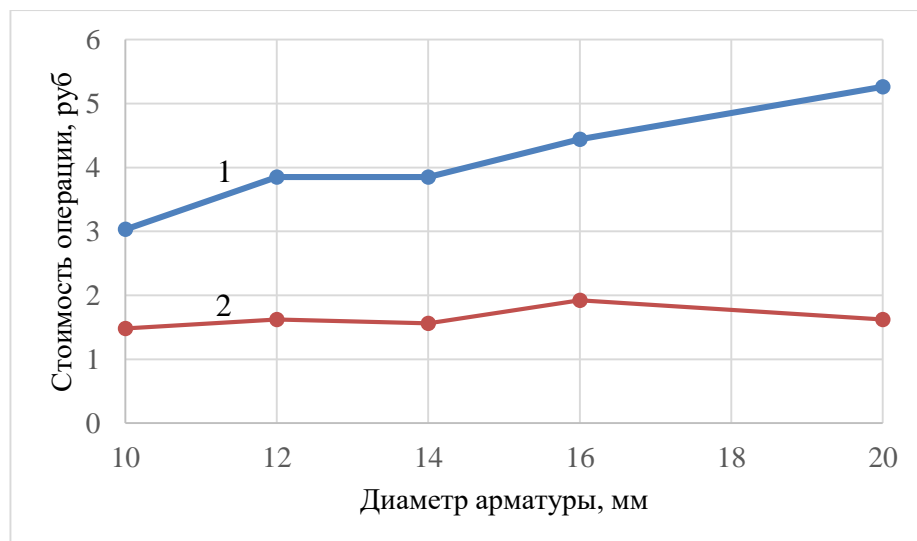
$$t_{\text{норм.опр.}} = t_{\text{осн.опр.}} + 20. \quad (4.13)$$

Экономический эффект от применения рассматриваемой технологии можно увидеть на примере сравнения с соединением стержней арматуры при помощи сварки. Затраты времени и средств на производство работ, с учетом текущей тарифной ставки для оплаты труда строителей на 2019 год по классу работ 4.1, составляющей 200,43 р/ч, сведены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Затраты на производство работ.

Диаметр стержня, мм.	Соединение сваркой		Соединение обжатием	
	Время операции, чел. – ч.	Стоимость одного соединения, руб.	Время с учетом подготовки, чел. – ч.	Стоимость одного соединения, руб.
10	0,013	3	0,007	1,4
12	0,016	3,8	0,008	1,6
14	0,016	3,8	0,008	1,6
16	0,019	4,4	0,01	2
20	0,022	5,2	0,008	1,6

Для наглядного отображения экономического эффекта от внедрения технологии соединения арматуры путем обжатия ручными ударными машинами, на рисунке 4.9 проиллюстрирована зависимость стоимости одного соединения сваркой и обжимкой от диаметра соединяемых стержней.



1 – соединение сваркой, 2 – соединение обжатием

Рисунок 4.9 – Зависимость стоимости соединения от диаметра арматуры



Таким образом, соединение обжимными муфтами с помощью ручных ударных машин позволяет сократить затраты на одно соединении арматуры диаметром от 10 до 16 мм более чем в 2 раза, диаметром 20 мм более чем в 3 раза, относительно соединения такой же арматуры с помощью сварки.

Выводы по главе:

1. Создана инженерная методика проектирования ручной ударной машины, основанная на выборе параметров электромагнитного привода исходя из характеристик обрабатываемой детали и производительности работ.

2. На основе известных конструктивных схем машин, с учетом требований вибробезопасности, разработано новое устройство, имеющее повышенный относительно прототипа ресурс, способное выполнять операцию соединения строительной арматуры путем опрессовки в стальных цилиндрических втулках за технологическое время, меньшее чем сваркой, а также после смены технологической оснастки - еще ряд операций.

3. Установлено, что применение пружины, работающей по принципу сжатия в конструктивной схеме, в которой рабочий ход бойка осуществляется с помощью электромагнитной катушки, а обратный – с помощью возвратной пружины, обеспечивает реализацию энергии удара 50 Дж при массе машины 5,9 кг, а увеличение площади демпфера в 3,2 раза - снижение вибрационной нагрузки на оператора в 2,25 раза.

3. Разработан технологический процесс соединения строительной арматуры и необходимая оснастка для его осуществления.

4. Расчет экономического эффекта внедрения в процесс строительства соединения арматуры с помощью ручных ударных машин показывает экономию средств до 3,25 раз, в сравнении с соединением с помощью сварки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, изложены научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для развития отрасли гражданского строительства. В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований, разработана ручная ударная машина для производства операции соединения строительной арматуры обжатием в стальных цилиндрических втулках. В ходе выполненных лично автором исследований получены следующие основные результаты.

1. Установлено, что ручные ударные машины с линейным электромагнитным приводом и пружинной системой возврата являются перспективными для выполнения рабочего процесса соединения строительной арматуры от 10 до 20 мм.

2. Разработана математическая модель ручной ударной машины, отражающая основные характеристики ударного привода и рабочей среды, описывающая 6 фаз рабочего цикла машины, позволяющей на стадии проектирования определять технологические параметры машины при опрессовке стальной втулки на арматуре, а также выявить фазы цикла 4 и 6, в которых осуществляется передача ударного импульса на корпус машины.

3. На основании математической модели выявлены зависимости времени опрессовки стальной втулки на арматуре от параметров ударного привода (энергия единичного удара, масса бойка, скорость бойка).

4. Экспериментально определены численные значения характеристик осадки стальной втулки на стержне, необходимых для расчета технологических параметров выполнения операции соединения строительной арматуры.

5. Разработана инженерная методика проектирования ручной ударной машины для соединения арматуры, позволяющая рассчитать ее технологические параметры в зависимости от времени выполнения операции и характеристик осадки втулки на арматурном стержне.

6. Внедрение технологии соединения арматуры в обжимных стальных муфтах с помощью ручных ударных машин, в сравнении с соединением сваркой,

позволит увеличить экономический эффект от двух до трех раз, в зависимости от диаметра соединяемой арматуры.

Направлениями и перспективами дальнейшей разработки темы являются исследования, направленные на проработку технологичности изготовления ручных ударных машин для соединения арматуры с целью постановки их на производство. Дальнейшее совершенствование технологии соединения арматуры в стальных цилиндрических втулках для ее широкомасштабного внедрения в гражданское строительство.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов А.Д. Виброударное деформирование сварных стыков / В.А. Каргин, Л.Б. Тихомирова, А.Д. Абрамов, М.С. Галай // Путь и путевое хозяйство. – М., 2010. – № 6 – С. 22.
2. Абрамов А.Д. Виброударные технологии для строительного-дорожного машин / Абрамов А.Д., Тюнюкова Т.К., Ижбулдин Е.А. // Мир транспорта. – М., 2016. - №4. С. 62-69.
3. Абрамов А.Д. Виброударные технологии: расширение фронта работ / А.Д. Абрамов, А.Л. Манаков // Мир транспорта. – М., 2006. – №2. С.46.
4. Абрамов А.Д. Выбор технологии и оборудования для соединения строительной арматуры / А.Д. Абрамов, Е.А. Ижбулдин // Строительные и дорожные машины. – М.: СДМ Пресс. – 2018. - № 5. – с. 43-48.
5. Абрамов А.Д. Использование энергии удара для ремонта машин и транспортного строительства. Технологии и оборудование / А.Д. Абрамов, Е.А. Ижбулдин // Сб. тр. междунар. конф. «Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования». – Новосибирск, 2017. – С. 113-115.
6. Абрамов А.Д. Исследования процесса соединения строительной арматуры ручными ударными машинами / А.Д. Абрамов, Е.А. Ижбулдин // Научно-технический вестник БГУ. – Брянск, 2020. – №1. С. 9 – 16. – doi: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-09-16.
7. Абрамов А.Д. Оценка эффективности ручных строительных машин ударного действия // Вестник СибАДИ. – Омск, – 2012. - №6 (11). – С. 7 – 10.
8. Абрамов А.Д. Применение ручных ударных машин с электромагнитным приводом для стыковки строительной арматуры / А.Д. Абрамов, Е.А. Ижбулдин // Политранспортные системы: тезисы X Междунар. научно-техн. конф. – Новосибирск. – 2018. – С. 242 – 243.
9. Абрамов А.Д. Проблемы эксплуатации низкочастотных машин в транспортном машиностроении и строительстве / В.А. Каргин, А.Д. Абрамов, М.С.

Галай // Политранспортные системы Сибири: Мат. VI Всероссийской научно-техн. конф. – Новосибирск: СГУПС, 2009. – Ч I. – С. 395 – 400.

10. Абрамов А.Д. Разработка ручного инструмента для соединения строительной арматуры в цилиндрических втулках / А.Д. Абрамов, Е.А. Ижбулдин // Политранспортные системы: тез. IX Междунар. научно-техн. конф. – Новосибирск, 2016. – С. 240 – 242.

11. Абрамов А.Д. Разработка системы виброударных машин и технологий для изготовления, ремонта и эксплуатации оборудования / А.Д. Абрамов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск: СГУПС, 2005. – С. 187-194.

12. Абрамов А.Д. Синтез ручных форсированных электрических машин ударного действия для строительного-монтажных работ : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.05.04 / Абрамов Андрей Дмитриевич. – Новосибирск, 2012.

13. Абрамов А.Д. Совершенствование технологии и оборудования для забивки стержней : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Абрамов Андрей Дмитриевич. – Новосибирск, 2000. – 127 с.

14. Абрамов А.Д. Создание высоконагруженных виброзащищенных машин ударного действия / А.Д. Абрамов, Е.А. Ижбулдин // [Дни науки-2016](#): тез. докл. конф. – Новосибирск, 2016. – С. 35-36.

15. Абрамов А.Д. Ударные машины и технологии для строительства объектов транспортной инфраструктуры / А.Д. Абрамов, Е.А. Ижбулдин // Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика: тезисы докладов междунар. конф. – Новосибирск, 2017. – С. 199-200.

16. Аксенов В.А. Основы технологической подготовки производства на ремонтных предприятиях сети железных дорог: Сб. СГУПС / В.А. Аксенов, Б.Б. Турутин. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2005. – С. 20-25.

17. Алабужев П.М. Применения метода подобия и размерностей к расчету соленоидных молотков / П.М. Алабужев, Н.П. Ряшенцев // Известия Томского политехнического института. – Томск, 1959. – Т.108. – С.216-225.

18. Александров Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.В. Александров, В.Б Соколинский. – М.: Наука, 1969. – 201 с.
19. Алексеев Ю.Н. Вопросы пластического течения металла / Ю.Н. Алексеев. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1958. – 188 с.
20. Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя / В.И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 1979. Т. 3. – 560 с.
21. А. с. № 944050 СССР, МКИ 3 H02P7/62. Устройство для управления двухобмоточным двигателем / Каргин В.А., Никитин Л.В., Щербина В.П. ; заявитель НЭТИ. 4 с. : ил.
22. Бабицкий В.И. Теория виброударных систем: приближенные методы / В.И. Бабицкий. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
23. Баркан Д.Д. Динамика оснований и фундаментов / Д.Д. Баркан. – М.: Стройвоенмориздат, 1948. – 412 с.
24. Блехман И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Дканелидзе. – М.: Наука, 1964. – 410 с.
25. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва / П. Бриджмен. – М., 1955. - 444 с.
26. Бублик И.Н. Разработка технологии и оборудования для изготовления сменных элементов щеточных узлов путевых машин : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Бублик Игорь Николаевич. – Новосибирск, 2006. – 24 с.
27. Бублик И.Н. Разработка технологии и оборудования для изготовления сменных элементов щеточных узлов путевых машин : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Бублик Игорь Николаевич. – Новосибирск, 2006. – 124 с.
28. Васин Р.А. Динамические зависимости между напряжениями и деформациями / Р.А. Васин, В.С. Ленский, Э.В. Ленский // Проблемы динамики упруго - пластических сред. – М., 1975. – С. 7-37.
29. Галай М.С. Обработка сварных соединений рельсов виброударным пластическим деформированием / М.С. Галай // Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы - перспективные направления научно-

исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов : сб. науч. ст. II Междунар. мол. научно-техн. конф.: в 2 томах. – Курск, 2016. – С. 77-81.

30. Галай М.С. Совершенствование технологии и инструментального обеспечения формообразования и упрочнения бесстыкового рельсового пути : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Галай Марина Сергеевна. – Новосибирск, СГУПС, 2011. – 159 с.

31. ГОСТ 1050-2013 Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. Общие технические условия (с Поправкой) : Дата введения 2015-01-01. – М.: Стандартиформ. – 2015.

32. ГОСТ 34227-2017 Соединения арматуры механические для железобетонных конструкций. Методы испытаний : Дата введения 2018-01-01. – М.: Стандартиформ. – 2019.

33. ГОСТ 34278-2017 Соединения арматуры механические для железобетонных конструкций. Технические условия : Дата введения 2018-01-01. – М.: Стандартиформ. – 2017.

34. ГОСТ 5264-80 Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры (с Изменением N 1) : дата введения 01.07.81. – М.: Стандартиформ. – 2010.

35. ГОСТ 5781-82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5) : Дата введения 1983-07-01. М.: Стандартиформ. – 2009.

36. ГОСТ Р 57997-2017. Арматурные и закладные изделия сварные, соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Общие технические условия : Дата введения 2018-05-01. – М.: Стандартиформ. – 2018.

37. ГОСТ 8734-75 Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. Сортамент (с Изменениями N 1, 2, 3) : Дата введения 1977-01-01. – М.: Стандартиформ. – 2007.

38. ГОСТ Р 52544-2006. Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций. Технические условия : Дата введения 2007-01-01. – М.: Стандартинформ. – 2006.

39. ГОСТ ISO/TR 12603-2014. Машины и оборудование строительные. Классификация : Межгосударственный стандарт : Дата введения 2016-01-01. – М.: Стандартинформ, - 2015.

40. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов / С.И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1961. – Т. 1. – 376 с.

41. Гурин Я.С. Проектирование серий электрических машин / Я.С. Гурин, Б.И. Кузнецов. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

42. ЕНиР Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы : Сборник Е22 Сварочные работы : Е 22-1 Вып.1. Конструкции зданий и промышленных сооружений. – М., 1987.

43. Ижбулдин Е.А. Разработка возвратной системы линейной ударной машины на основе анализа конструктивных схем // Технология машиностроения. – М., 2016. – №8. – С. 20-23.

44. Ижбулдин Е.А. Ручной электрический ударный инструмент для реализации виброударных технологий в транспортном машиностроении и строительстве / Е.А. Ижбулдин, А.Д. Абрамов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – Иркутск, 2016. Том 21, №1. – С. 32-39.

45. Ижбулдин Е.А. Технология соединения арматуры для транспортного строительства / Е.А. Ижбулдин // Транспортные и транспортно-технологические системы: сб. тр. междунар. научно-практ. конф.. – Тюмень: ТИУ, 2017. – С. 196-199.

46. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории / А.А. Ильюшин. – М.: АН СССР, 1963. – 271 с.

47. Ильюшин А.А. Пластичность. Упруго-пластические деформации / А.А. Ильюшин. – Л.: ОГИЗ: ГИТТЛ, 1948. – Ч.1. – 376 с.



48. Ильюшин А.А. Упруго-пластические деформации полых цилиндров / А.А. Ильюшин, П.М. Огибалов. – М.: МГУ, 1960. – 227 с.

49. Каргин В.А. Выбор оптимальных выходных параметров машин ударного действия / В.А. Каргин // Динамика и прочность судовых машин. – Николаев, 2008. – С.27-32.

50. Каргин В.А. Деформирование упруго-пластического материала при импульсном нагружении / В.А. Каргин, М.Ш. Кирнарский, Л.В. Никитин // Вопросы динамики механических систем виброударного действия. – Новосибирск, 1980. - С.37 – 44.

51. Каргин В.А. Исследование и создание виброударных машин и технологий: дисс. ... д-ра техн. наук : 01.02.06 / Каргин Владимир Анатольевич. – Новосибирск, 1986. – 333 с.

52. Каргин В.А. Методика расчета ударных узлов с предельными электромагнитными нагрузками / В.А. Каргин, А.Д. Абрамов, М.С. Галай // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды : тр. конф. с уч. иностр. уч., Новосибирск, ИГД, 28.06-2.07.2010 г.: в 3 т. – Новосибирск: РАН, Сиб. отд., 2010. Т.3: Машиноведение. – С. 99-103.

53. Каргин В.А. Некоторые особенности электромагнитного привода опрессователя / В.А. Каргин, М.Ш. Кирнарский, Л.В. Никитин // Вопросы динамики механических систем виброударного действия. – Новосибирск, 1977. - С.157–161.

54. Каргин В.А. Низкочастотные электромагнитные двигатели / В.А. Каргин // Электромагнитные импульсные системы: сб. научн.тр.. - Новосибирск: СО АН СССР, 1982, - С. 27–33.

55. Каргин В.А. Низкочастотные электромагнитные машины ударного действия для решения технологических задач транспортного машиностроения и строительства / Каргин В.А., Абрамов А.Д., Морозова Н.А., Бублик И.Н., Тюнюкова Т.К. // Мат. междунар. конф. “Проблемы и перспективы развития горных наук”. – Новосибирск, 2004. – С. 124-137.

56. Каргин В.А. Основные направления развития виброударных технологий в транспортном машиностроении и строительстве / В.А. Каргин, А.Л. Манаков, И.Н. Бублик, Т.К. Тюнюкова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск, 2005. Вып. 11. – С. 70-78.

57. Каргин В.А. Перспективы формирования ремонтных технологий с использованием виброударного инструмента / Каргин В.А, Абрамов А.Д., Бондаренко А.Г. // Вестник сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск, 2007. – С. 220–226.

58. Каргин В.А. Повышение эффективности механической обработки сварных соединений рельсов. / В.А. Каргин, Л.Б. Тихомирова, А.Д. Абрамов, М.С. Галай // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Инновационное машиностроение. – 2011. – №3 – С.18.

59. Каргин В.А. Проблемы синтеза виброударных машин и технологий для изготовления деталей с требуемым уровнем эксплуатационных свойств / В.А. Каргин, А.Д. Абрамов // Научное обозрение. – М., 2006. – №2. – С.31.

60. Каргин В.А. Расчет выходных параметров виброударных машин / В.А. Каргин, А.Д. Абрамов // Сб. тр. Междунар. научно-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования – производству». – Барнаул: АлтГТУ, 2001.

61. Каргин В.А. Рациональный выбор основных параметров опрессовывателей / В.А. Каргин // Вопросы исследования силовых импульсных систем. – Новосибирск, 1982. – С. 89-92.

62. Кассандрова О.Н. Обработка результатов наблюдений / О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев // М.: Наука, 1970. – 104с.

63. Кононенко В.Г. Определение степени деформирования наконечника (гильзы) при оконцевании (соединении) жил алюминиевых проводов и кабелей / В.Г. Кононенко, В.А. Киреев // Высокоскоростная обработка металлов давлением. – Харьков, 1972. – Вып.1. – С.67.

64. Кононенко В.Г. Решение плоской задачи высокоскоростной обработки металлов давлением / В.Г. Кононенко // Импульсная обработка металлов давлением. – Харьков, 1970. - С. 3-13.

65. Лебедев А.Н. Моделирование в научно-исследовательских исследованиях / А.Н. Лебедев. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с. – ISBN 5-256-00177-9.

66. Малов А.Т. Электромагнитные молоты / Малов А.Т., Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г. – Новосибирск.: Наука, 1979. – 269 с

67. Морозова Н.А. Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин виброударным пластическим упрочнением : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Морозова Наталья Александровна. – Новосибирск, СГУПС, 2005. – 130 с.

68. Мошкин В.И К выбору основных базисных размеров линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г Угаров // Известия Волгоградского государственного технического университета. – Волгоград, 2011. – № 8 (81). – С. 108-111.

69. Мошкин В.И. Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник СГТУ. – Самара, 2012. – № 2 (66). – Вып. 2. – С. 129–135.

70. Нейман В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин / В.Ю. Нейман // Автоматизированные электромеханические системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155 -170.

71. Нейман В.Ю. О допустимой погрешности при сравнении подобных электромагнитов по значениям конструктивного фактора // В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, Д.М. Евреинов // Транспорт: наука, техника, управление : Научный информационный сборник. – М.: ВИНТИ РАН, 2011. – № 12. – С. 36-37.

72. Нейман В.Ю. Основы построения и развитие теории импульсных линейных электромагнитных двигателей с повышенными энергетическими показателями : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.09.01 / Нейман Владимир Юрьевич. – Новосибирск, 2004. – 387 с.

73. Некоторые результаты создания и исследования электрических бурильных машин вращательно-ударного действия / О.Д. Алимов, Н.П. Ряшенцев,

А.В. Фролов, Э.И. Лисовский // Электрические ударные машины возвратно-поступательного движения. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1969. – с 202–209.

74. Никифоровский В.С. О моделях хрупкой среды в задачах механики горных пород / В.С. Никифоровский // Физико –технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск, 1978. – №3. – С.24.

75. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В.А. Огородников. – Киев: Вища школа, 1963. – 175 с.

76. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.

77. Пат. № 162279 РФ, МПК В 23 К 20/00 (2006.01), H01R 43/04(2006.01). Устройство для соединения контактов : №2015154083/02 : заявл. 16.12.2015; опубл. 10.06.2016 / Абрамов А.Д., Ижбулдин Е.А., Банул В.В; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщ.. – 3 с. : ил.

78. Пат. № 2458217 РФ, МПК E04C 5/16 (2006.01). Способ монтажа арматурных стержней и каркасов, выполненных из них : № 2011105684/03 : заявл. 15.02.2011 : опубл. 10.08.2012. / Рафаилович И.В., Дуб А.В., Кахадзе М.Ж.; заявитель и патентообладатель ОАО НПО «ЦНИИТМАШ». – 4 с.

79. Пат. №2662740. Способ монтажа арматурных стержней / А.Д. Абрамов, Е.А. Ижбулдин, В.В Банул; заявитель и патентообладатель Сиб. гос ун-т путей сообщения. – №2017124497; заявл. 10.07.17 опубл. 20.07.2018.

80. Пат. № 56845 РФ, МПК В 23 К 20/00 (2006.01). Устройство для соединения контактов : №2006110977/22 : заявл. 04.04.2006; опубл. 27.09.2006 / Абрамов А.Д., Каргин В.А., Тюнюкова Т.К.; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщ. – 4 с. : ил.

81. Пеллинец В.С. Измерение ударных ускорений / В.С. Пеллинец. – М.: Стандарты, 1975. – 287 с.

82. Писаренко Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. – Киев: Наукова думка, 1976. – 415 с.

83. Полищук Д.Ф. Прикладные теории удара. Удар в пружинных механизмах / Д.Ф. Полищук, С.А. Девятериков. – М.: Институт комплексных исследований, 2006. – 124 с. – ISBN 5-93972-523-6.

84. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гунн, А.М. Галкин. – М.: Metallurgia, 1983. – 351 с.

85. Реология. Теория и приложения. под ред. Ф. Эйриха. [пер. с англ. под ред. Работнова Ю.Н., Ребиндера П.А.]. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 824 с.

86. Родин А.К. Вентиляция производственных зданий: учебное пособие / А. К. Родин. – Саратов: СГТУ – 1997г. – 122с. – ISBN 5-7433-0356-8.

87. Ручные электрические машины ударного действия / Ряшенцев Н.П., Алабужев П.М., Никишин Н.И. и др. – М.: Недра, 1970, – 192 с.

88. Рябов А.Б. Способы соединения строительной арматуры / А.Б. Рябов // Крепеж, клеи, инструмент и .... – М., 2008. - №4. – С. 33-35.

89. Ряшенцев Н.П. Прессовое оборудование с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицин; Под общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Электромагнитные силовые импульсные системы: Сб. науч. тр.. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР. – 1982. – С. 3-13.

90. Ряшенцев Н.П. Ручные электрические машины ударного действия / Н.П. Ряшенцев, П.М. Алабужев и др. – М.: Недра, 1970. – 192 с.

91. Ряшенцев Н.П. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин / Н.П. Ряшенцев, А.Н. Мирошниченко. – Новосибирск.: Наука, 1987. -160 с.

92. СанПиН 2.2.2.540-96 Гигиенические требования к ручным инструментам и организации работ : Дата актуализации: 01.02.2020. – Москва, – 1997.

93. Симонов Б.Ф. Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника / Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск: Изд-во Сиб. отд. РАН, 2017. – С. 118-126.

94. Симонов Б.Ф. Применение электромагнитного привода в глубоких скважинах для повышения эффективности вибросейсмического метода / Б.Ф.

Симонов, В.Ю. Нейман А.С. Шабанов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : труды Седьмой Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2016. – С. 181-186.

95. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с Изменением N 1). – М.. – 2004.

96. Стихановский Б.Н., Контроль качества материалов и конструкций методом упругого отскока бойка с квазипластическим ударом / Б.Н. Стихановский, Л.М. Стихановская // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск, 2013. – № 6 (34). –С. 25-29.

97. Стихановский Б.Н. Испытания материалов бойком с изменяющейся сердцевиной / Б.Н. Стихановский, Л.М. Стихановская // Динамика систем, механизмов и машин. – Омск, 2012. – № 2. – С. 40-42.

98. СТО АСЧМ 7-93. Прокат периодического профиля из арматурной стали технические условия : Дата введения: 1994-01-01. – М., - 1993.

99. Теория и практика проектирования виброударных машин и технологий для строительства, ремонта и эксплуатации транспорта и транспортных систем / Каргин В.А., Абрамов А.Д., Тюнюкова Т.К. и др. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2003. – Вып. 5. – С. 27-41.

100. Теория подобия и размерностей. Моделирование/ Алабужев, П.М.; Геронимус, В.Б.; Минкевич, Л.М. и др. – М.: Высшая школа. – 1968 г. – 206 с.

101. Технологические процессы механообработки и сборки при ремонте подвижного состава / Аксенов В.А., Евсеев Д.Г., Фомин В.А. – Новосибирск: СГУПС, 2001. – 520 с.

102. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.

103. Томсен Э. Механика пластической деформации при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М.: Машиностроение, 1969. – 504с.

104. ТУ 14-1-5254-2006. Прокат периодического профиля для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. – М., - 2006.

105. Тюнюкова Т.К. Вырезка отверстий в тонколистовых элементах и многослойных панелях транспортно-технологических машин и оборудования в эксплуатационных условиях / Т.К. Тюнюкова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск, 2015. – № 1. – С. 88-91.

106. Тюнюкова Т.К. Совершенствование технологического процесса изготовления слоистых деталей комбинированными методами обработки: дис. канд. техн. наук: 05.02.08, 05.03.01 / Тюнюкова Татьяна Константиновна. - Новосибирск. СГУПС, 2006. 122 с.

107. Угаров Г.Г Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман // Известия ВУЗов. Электромеханика. Новосибирск, 2002. – №2. – С. 37.

108. Угаров Г.Г. Конструктивные схемы импульсных линейных электромагнитных двигателей с динамическим аккумулярованием магнитной энергии / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман // Совершенствование технических средств электрического транспорта: Сб. научн. тр. НГТУ. – Новосибирск, 2001. – Вып.2 – С. 122.

109. Усанов К.М. Динамическая эффективность однообмоточных электромагнитных ударных машин с различными рабочими циклами / К.М. Усанов, В.А. Каргин, И.В. Трубенкова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – Барнаул, 2010. – № 12 (74). – С. 67–70

110. Усанов К.М. Совершенствование технических средств и технологий АПК системами с электромагнитными импульсными машинами : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.20.02 / Усанов Константин Михайлович. – Саратов, 2009. – 33 с.

111. Физико-математические модели и расчет пневматических механизмов и машин ударного действия: Справочник / Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Аньшин В.В. и др. – Новосибирск: НГАСУ, 2002. – Т.1. – 284 с.

112. Шапиро Е.А. Пружины электрических аппаратов / Е.А. Шапиро. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 33с.

113. Электрические ударные машины возвратно-поступательного движения / Отв.ред. П.М. Алабужев. – Новосибирск: Наука, 1969. – 286 с.

114. Core losses and torque ripple in IPM Machines: dedicated modeling and design tradeoff / Pellegrino G., Guglielmi P., Vagati A., Villata F. // IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, p. 2381-2391.

115. Dynamic correction of excitation in hand-held electro-pneumatic percussion machines / E.V. Golycheva, V.I. Babitsky, A.M. Veprik // Journal of Sound and Vibration : Volume 259, Issue 4. – 2003. – P. 829-843.

116. Numerical modeling of Electrical Machines: Requirements, State of the art, lacks / Mazauric V., Leconte V., Meunier G., Marechal Y. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – P. 1198-1201.

117. Present and Future developments of Metal forming: selected examples // Voelkner W. Journal of Materials Processing Technology, 2000, p. 236-242.

118. Work modeling processes of the hand-held impact machines / Abramov, A., Abramenkov, D., Izhibuldin, E. // Journal of Physics: Conference Series, 1050 (1). – 2018. – P. 012001. – doi: 10.1088/1742-6596/1050/1/012001.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

**УТВЕРЖДАЮ:**

Генеральный директор

Общества с ограниченной ответственностью

Специализированный застройщик

«Краснообск. Монтажспецстрой»



В.П. Плахотников

13» марта 2020г.

**АКТ**

**практического использования результатов диссертационной работы  
Ижбулдина Евгения Александровича «Создание ручной ударной машины  
для соединения строительной арматуры»**

Настоящим актом подтверждается, что в соответствии с научно-практическим сотрудничеством Общества с ограниченной ответственностью Специализированный застройщик «Краснообск. Монтажспецстрой» и ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» соискателем Е.А. Ижбулдиным разработана ручная ударная машина с линейным электромагнитным приводом, позволяющая осуществлять операцию соединения строительной арматуры путем опрессовки в стальных цилиндрических втулках.

Данная технология представляет практический интерес, так как позволяет соединять вертикально и наклонно расположенные стержни арматуры без специальных удерживающих приспособлений силами одного рабочего. Отличительной особенностью обжимной технологии является отсутствие операций, связанных с подготовкой концов соединяемых стержней. При этом обжимная муфта, состоящая из отрезка трубы, обладает конструктивной простотой и может изготавливаться непосредственно на строительной площадке. Другим достоинством такого способа является отсутствие нахлеста, что позволяет снизить расход арматуры.

Машина представляет собой электромагнитный привод возвратно-поступательного действия с частотой ударов 1,5 Гц, питаемый от сети промышленной частоты, с комплектом сменной оснастки. Данное оборудование используется для соединения арматуры в диапазоне диаметров от 10 до 20 мм.

На строительных площадках проходят испытание два опытных образца машины. Существенных отказов не выявлено, устройства не требуют специального ухода, могут использоваться в условиях низких температур, не оказывают вредного воздействия на окружающую среду.

Внедрение разработки в технологический процесс монтажа армирующих конструкций позволило снизить трудовые затраты и увеличить производительность работ, при этом не снижая качество продукции.

Результаты диссертационного исследования, полученные соискателем Е.А. Ижбулдиным обладают актуальностью и представляют практический интерес. Считаю целесообразным рассмотреть возможность дальнейшего сотрудничества с целью дальнейшего внедрения технологии соединения арматуры в стальных втулках в технологический процесс строительства высотных жилых домов.

Инженер строительного надзора  
Общества с ограниченной  
ответственностью  
Специализированный застройщик  
«Краснообск. Монтажспецстрой»



О.П. Полторак

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**(справочное)**

**УТВЕРЖДАЮ:**

Проректор по учебной  
работе  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения высшего  
профессионального образования  
Сибирский государственный  
университет путей сообщения

А.А. Новоселов   
«02» 02 2020г.



**АКТ**

**использования в учебном процессе результатов диссертационной работы  
Ижбулдина Евгения Александровича на тему «Создание ручной  
ударной машины для соединения строительной арматуры»**

Настоящим актом подтверждается практическое использование результатов диссертационного исследования соискателя Е.А. Ижбулдина в учебном процессе Сибирского государственного университета путей сообщения при подготовке бакалавров и специалистов в области проектирования и эксплуатации подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин. Подготовка ведется по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», специализация «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование» и 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (профили – «Сервис транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования» (строительные, дорожные и путевые машины) и «Автомобили и автомобильный сервис»)

Разработанные Ижбулдиным Е.А. рекомендации по проектированию и применению ручных ударных машин используются в курсах дисциплин:

- «Основы технологии производства и ремонта Т и ТТМО» (бакалавры);
- «Технология производства и ремонта ПСДС и оборудования» (специалисты);
- «Строительные и дорожные машины и оборудование» (специалисты);



Материалы диссертации Ижбулдина Е.А. используются студентами при выполнении научно-исследовательских работ, курсового и дипломного проектирования.

Декан факультета  
«Управление транспортно-  
технологическими комплексами»,  
д.т.н., доцент

А.С. Ильиных

Зав. кафедрой «Технология  
транспортного машиностроения  
и эксплуатация машин»,  
к.т.н., доцент

В.И. Кочергин

Зав. кафедрой «Подъемно-транспортные,  
путевые, строительные и дорожные  
машины»,  
к.т.н., доцент

Д.С. Воронцов

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2662740

**Способ монтажа арматурных стержней**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет путей сообщения" (СГУПС) (RU)*

Авторы: *Абрамов Андрей Дмитриевич (RU), Избулдин Евгений Александрович (RU), Банул Виктор Владимирович (RU)*

Заявка № 2017124497

Приоритет изобретения **10 июля 2017 г.**

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **30 июля 2018 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **10 июля 2037 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 162279

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ КОНТАКТОВ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный университет путей сообщения" (СГУПС) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*


Заявка № 2015154083

Приоритет полезной модели 16 декабря 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 13 мая 2016 г.

Срок действия патента истекает 16 декабря 2025 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

 Г.П. Ивлиев

