

На правах рукописи



Лавриненко Владислав Юрьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
УДАРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ОСАДКЕ НА
КОВОЧНЫХ МОЛОТАХ**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Московский государственный индустриальный университет

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Феофанова Анна Евгеньевна

Официальные оппоненты: Кошелев Олег Сергеевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», профессор

Складчиков Евгений Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», профессор

Шibaков Владимир Георгиевич,
доктор технических наук, профессор,
Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВПО
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
заведующий кафедрой

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет («МАМИ»))»

Защита состоится « 14 » октября 2014 г. в 14 ч. 00 мин на заседании диссертационного совета Д212.271.01 при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, просп. Ленина, д.92, (9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» и на сайте ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»: <http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/lavrinenko-vu/>

Автореферат разослан « 31 » июля 2014 г.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять по указанному адресу.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прогресс в машиностроении зависит от разработки и внедрения технологических процессов и оборудования, использование которых позволяет повысить качество изготавливаемых изделий, увеличить производительность и обеспечить ресурсо- и энергосбережение. Это является актуальной задачей для современного заготовительного производства, в котором одними из основных способов получения заготовок (поковок) деталей различных форм и размеров являютсяковка и горячая объемная штамповка.

Применениековки и горячей объемной штамповки обеспечивает получение стабильного качества поковок, обладающих требуемыми механическими свойствами. Поэтому наиболее ответственные детали машин делают из кованных или штампованных поковок (поковки турбинных дисков, коленчатых валов судовых двигателей и дизелей, вагонных осей, шестерней, маховиков, дисков и др.). По данным ассоциации «EUROFORGE» в настоящее время в мире более 40% всех изготавливаемых поковок получают на ковочных и штамповочных молотах.

Главными преимуществамиковки на молотах являются кратковременность процесса деформирования (не более 0,01с), обеспечивающая минимальное остывание поверхности нагретой заготовки; возможность получения при ковке крупных поковок; необходимость сравнительно небольших сил деформирования при ковке относительно крупных по массе и сложных по конфигурации поковок, и, вследствие этого, возможность использования оборудования относительно небольшой мощности; применение при ковке универсальных машин и универсального инструмента, что снижает затраты на оборудование и инструмент в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Эффективность ударного деформирования при ковке на молотах определяют коэффициентом полезного действия (КПД) удара, который равен отношению работы пластической деформации A_{def} заготовки к энергии падающих частей молота L . Основным недостаткомковки на молотах является низкий КПД удара вследствие возникновения при ударе больших сил и, вследствие этого, потерь энергии на упругую деформацию поковки и деталей молота, трение и колебания шабота и фундамента.

Ударное деформирование заготовки на молоте происходит за счет энергии падающих частей молота. При увеличении продолжительности удара будет совершена большая работа пластической деформации A_{def} , что увеличит КПД удара, при этом уменьшится средняя скорость деформации, а ударное деформирование заготовки может проходить при более благоприятных условиях (небольшие значения сопротивления деформированию и повышенная пластичность), что также может увеличить КПД удара. Повышение КПД удара позволит повысить КПД и производительность работы молота, снизить расход энергии и затраты на производство.

Кроме этого, увеличение продолжительности удара и величины деформации заготовки на каждом ударе при осадке на молоте приведет к сокращению общего количества ударов молота для получения поковки заданных раз-

меров, что, в свою очередь, снизит интенсивность охлаждения поковки за весь технологический процессковки и штамповки.

Выполнение многих технологических операций в машиностроении, металлургии, горном деле, строительстве, производстве строительных материалов и других отраслях народного хозяйства связано с применением ударной нагрузки и машин ударного действия (горные и сваебойные машины, дизель – молоты, отбойные молотки и др.), используемых для разрушения и дробления горных пород и искусственных материалов, забивки свай, разрушения сооружений, рыхления и разрушение грунтов и др. Совершенствование таких машин также связано с проблемой повышения эффективности использования энергии, запасенной ударной массой перед соударением, обеспечением необходимых режимов работы и энергосбережением.

В связи с этим разработка научно обоснованных технических решений, направленных на повышения эффективности ударного деформирования (КПД удара) при ковке на молотах является актуальной. Исследования процессов ударного деформирования при ковке на молотах позволяют провести их математическое описание и разработать практические рекомендации по проектированию технологических процессовковки на молотах для повышения эффективности использования ковочных молотов и других машин ударного действия различного технологического назначения.

Цель работы: увеличение КПД удара при осадке на ковочных молотах за счет увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой, позволяющее повысить КПД и производительность молота, снизить расход энергии и затраты на производство.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи исследований:**

1. Проведение анализа современного состояния процессов ударного деформирования на ковочных молотах.

2. Разработка методики экспериментально-теоретических исследований процесса ударного деформирования при осадке заготовок на ковочном молоте (копре) в условиях целенаправленного увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой.

3. Исследование особенностей формоизменения, деформированного состояния и энергосиловых параметров осадки заготовок на ковочном молоте (копре) в условиях целенаправленного увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой.

4. Разработка математических моделей процесса ударного деформирования заготовок при осадке на ковочных молотах.

5. Определение основных параметров сконструированных устройств, обеспечивающих повышение эффективности ударного деформирования на ковочных молотах.

6. Разработка рекомендаций по проектированию технологических процессовковки на молотах и определению работы деформации и массы падающих частей ковочного молота при деформировании бабой молота с наполнителем.

Объект исследования. Процесс ударного деформирования при осадке заготовок на ковочном молоте (копре).

Предмет исследования. Формоизменение и деформированное состояние заготовки, энергосиловые параметры и параметры процесса ударного деформирования при осадке на ковочном молоте (копре) в условиях целенаправленного увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой.

Методы исследования. Теоретические исследования деформационных, кинематических и энергосиловых параметров процесса ударного деформирования заготовок при осадке на ковочном молоте (копре) выполнены с использованием существующих положений теории обработки металлов давлением и теории удара, численного расчета и компьютерного моделирования процесса ударного взаимодействия заготовки с инструментом.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных испытательных машин (вертикальный копер, газодинамическая копровая установка вертикального типа, универсальная испытательная машина МИУ-500.1К), системы высокоскоростной видеосъемки FASTVIDEO-250 и программного обеспечения FASTVIDEO LAB, автоматизированного измерительного комплекса NI 5102, высокоскоростных осциллографов, высокопроизводительных компьютеров и микропроцессорной техники. Обработку опытных данных проводили с помощью методов математической статистики и теории планирования эксперимента.

Автор защищает:

1. Результаты экспериментально-теоретических исследований процесса ударного деформирования при осадке заготовок на ковочном молоте (копре), показывающие особенности формоизменения, деформированное состояние и энергосиловые параметры процесса осадки в условиях целенаправленного увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой.

2. Результаты исследований процесса ударного деформирования при осадке заготовок с использованием бабы молота (копра) с наполнителем, позволяющей увеличить продолжительность нагрузочной фазы удара.

3. Методику конструкторско-технологического расчета основных параметров бабы молота с наполнителем, применение которой увеличивает КПД удара при деформировании на ковочных молотах по сравнению со стандартной бабой молота.

4. Научно обоснованные рекомендации по проектированию технологических процессовковки на молотах, позволяющие определить работу деформации и массу падающих частей ковочного молота при осадке заготовок с использованием бабы молота с наполнителем.

Научная новизна работы заключается:

- в обосновании взаимосвязи эффективности процесса ударного деформирования при осадке на ковочном молоте (копре) и продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой, заключающейся в повышении КПД ударного деформирования при осадке на ковочном молоте (копре) путем увеличения продолжительности удара при удержании падающих частей молота в нижней точке при использовании бабы молота с наполнителем;

- в установлении зависимости относительной пластической деформации заготовки и энергосиловых параметров осадки от параметров бабы молота с наполнителем, отношения массы заготовки к массе падающих частей

молота и энергии удара на основе построенных математических моделей процесса ударного деформирования заготовок при осадке на ковочных молотах;

- в новых соотношениях для определения работы деформации и массы падающих частей ковочного молота при осадке заготовок с использованием бабы молота с наполнителем.

Научная значимость. Научная значимость работы состоит в увеличении КПД удара при осадке на ковочных молотах за счет увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой при использовании бабы молота с наполнителем. Построенные математические модели процесса ударного деформирования на ковочных молотах и соотношения для определения работы деформации и массы падающих частей ковочного молота с использованием бабы молота с наполнителем позволяют расширить возможности и подходы к анализу процессов ударного деформирования.

Практическая ценность работы заключается:

- в создании на основе результатов экспериментально-теоретических исследований процесса ударного деформирования при осадке заготовок на ковочном молоте (копре) новых конструкций бабы молота и устройств для увеличения продолжительности взаимодействия инструмента и заготовки, обеспечивающих повышение эффективности ударного деформирования на молотах;

- в рекомендациях по проектированию технологических процессовковки на молотах, обеспечивающих получение поковок с требуемыми механическими свойствами, повышение КПД и производительности молота, снижение расхода энергии и затрат на производство;

- в программе расчета процесса удара в зернистых средах для проектирования технологических процессовковки на молотах и расчета оптимальных параметров бабы молота с наполнителем.

Реализация работы. Разработанные рекомендации по модернизации ковочного паровоздушного молота двойного действия мостового типа модели М1545 с массой падающих частей 3150 кг планируются к применению в кузнечном цехе ремонтно-инструментального завода ОАО «КамАЗ», будут использованы и опробованы на ОАО «ТЯЖПРЕССМАШ». Результаты работы также планируются к применению в кузнечном цехе ОАО «МУРОМТЕПЛОВОЗ» и в ОАО «НПО «СПЛАВ».

Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Машины и технология обработки металлов давлением» ФГБОУ ВПО Московский государственный индустриальный университет для подготовки студентов и бакалавров, при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также в научно-исследовательской работе студентов и аспирантов.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на 77-ой международной конференции «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров» (г. Москва: МГМУ «МАМИ», г. Москва, 2012 г.); IV-ой международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» (г. Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2012 г.); XI - ом Конгрессе «Кузнец-2012» «Перспективы инновационного и конкурентоспособного развития куз-

нечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств» (г. Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2012г.); международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем» (г. Севастополь, Украина: СевНТУ, 2012г. и 2013г.), V международной научно-технической конференции «Машиностроение - основа технологического развития России» (г. Курск: ЮЗГУ, 2013 г.), международном научно-техническом конгрессе «ОМД-2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии» (г. Москва, НИТУ «МИСиС» и ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, 2014 г.); на научных семинарах кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением» ФГБОУ ВПО «МГИУ»; кафедры «Технологии обработки металлов давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана; кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением» МГМУ «МАМИ», кафедры «Обработка материалов давлением» РГАТУ им. П.А. Соловьева, лаборатории пластической деформации металлических материалов ИМЕТ РАН, кафедры «Системы пластического деформирования» МГТУ «СТАНКИН», на совещаниях технических советов ОАО «КамАЗ», ОАО «ТЯЖПРЕССМАШ» и ОАО «МУРОМТЕПЛОВОЗ».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 44 работы, в том числе: 1 монография, 21 статья в рецензируемых изданиях и сборниках, входящих в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук»; 17 статей в различных сборниках научно-технических трудов; 5 патентов на изобретения и полезные модели. Общий объем – 25 печ. л., авторский вклад – 17 печ. л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и основных выводов по работе, списка используемых источников из 292 наименований, приложения и включает 312 страниц основного текста, содержит 118 рисунков и 45 таблиц. Общий объем работы – 339 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой в работе научно-технической проблемы, сформулирована цель работы, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, достоверность, научная значимость, практическая ценность и реализация работы, приведены данные об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертационной работы и дано краткое содержание разделов диссертации.

В первой главе приведен анализ существующих исследований процесса ударного деформирования при осадке на ковочных молотах и рекомендации по определению энергосиловых параметров и массы падающих частей ковочных молотов, анализ методов исследования процессов обработки металлов давлением и удара.

Исследования особенностей формоизменения, напряженного и деформированного состояния, а также энергосиловых параметров при осадке проводили: Ф. Кик, Э. Зибель, Я.М. Охрименко, А.В. Ребельский, М.В. Сторожев, Г. Гофмейстер, Е.И. Семенов, Е.П. Унксов, А.А. Поздеев, Г.А. Смирнов-Аляев, С.И. Губкин, В.В. Соколовский, К.Н. Шевченко, А.А. Мишулин, Г. Ландграф, Г. Киххюбель, В.М. Сегал, А.Ф. Головин, И.Я. Тарновский, Е.Ф.

Шарапин, Л. А. Шофман, В. Г. Березкин, О.А. Ганаго, В.Н. Субич, Н.А. Шестаков и другие.

Выбор молота и определение необходимого количества ударов для осадки имеет большое значение, так как при осадке требуются большие силы, которые являются максимальными за весь технологический процессковки. Выбор молота проводят по необходимой для осадки работе деформации. Неправильный выбор молота приводит к снижению производительности труда, уменьшению точности поковок и стойкости штампов, увеличению расхода энергии и металла. Вместе с тем, существующие рекомендации по определению энергосиловых параметров осадки и массы падающих частей ковочных молотов, представленные в работах Э. Зибеля, Л.Н. Соколова, Г.А. Навроцкого, А.Д. Томленова, М.В.Сторожева, А.В. Ребельского, Е.И. Семенова, Г. Гофмейстера, Я.М. Охрименко и других, являются в основном приближенными эмпирическими или теоретическими. При этом в большинстве формул для определения работы деформации и массы падающих частей молота не учтены особенности формоизменения заготовок при осадке, закономерности реального упругопластического удара, а также волновые процессы, происходящие в заготовке при ударном нагружении. Принятые при выводе этих формул допущения приводят к большому отличию расчетных значений от практических данных.

Основные положения и методы исследования теории удара и ударного деформирования изложены в работах И. Бернулли, Б. Сен-Венана, Л. Навье, Г. Герца, Т. Кармана, П. Гюгонию, Дж. Тейлора, Г. Кольского, И. Сирса, Е.Л. Николаи, Р. Шилдта, В. Крука, Д. Табора, В. Гольдсмита, В.Д. Мак-Миллана, Б.М. Малышева, С.П. Тимошенко, А.Н. Динника, В.Л. Бидермана, Н.А. Кильчевского, И.Я. Штаермана, Х.А. Рахматуллина, В.В. Соколовского, Г.С. Шапиро, Н.Н. Давиденкова, А.Ю. Ишлинского, Я.Б. Зельдовича, К.П. Станюковича, М.А. Лаврентьева, А.А. Дерibasа, Г.С. Батуева, В.Г. Баженова и других.

Отмечено, что для исследования и решения вопросов теории удара применяют приближенные теории и методы решения: классическая теория соударения твердых тел (метод Ньютона); волновая теория удара (метод плоских волн Сен-Венана); деформационная теория удара (метод Герца) и комбинированные методы, основанные на упрощающих положениях и синтезе волновой теории и теории Герца. Кроме этого, для изучения процесса удара широко применяют экспериментальные и экспериментально – теоретические методы исследования.

В большинстве известных работ, например, А.И. Зимина, Ю.А. Бочарова, А.В. Сафонова, А.В. Власова, Ю.П. Беляева и других при рассмотрении процесса ударного деформирования на молотах не учтены пластическая деформация заготовки и ее механические свойства. Вместе с тем, недостаточность и ограниченность экспериментальных и теоретических исследований процесса ударного деформирования на молотах сдерживают разработку новых рекомендаций по проектированию технологических процессовковки на молотах и разработку новых высокоэффективных конструкций ковочных молотов.

Также отмечено, что при горячем деформировании на молотах при скоростях деформирования от 4 до 9 м/с в металле одновременно протекают деформационное и скоростное упрочнение и рекристаллизация, результатом которой является разупрочнение. Эти процессы происходят во времени, с разными скоростями, зависящими от температуры и степени деформации. При этом одним из важнейших параметров процесса обработки давлением, определяющих сопротивление деформированию, пластичность и механические свойства обрабатываемого металла или сплава, является скорость деформации. С увеличением скорости деформации при деформировании заготовок из распространенных углеродистых и низколегированных сталей возрастает сопротивление деформированию и уменьшается пластичность.

Приведен обзор конструкций ковочных и штамповочных молотов. Общая теория кузнечно-штамповочного оборудования получила свое развитие в трудах многих отечественных ученых: И.А. Тиме, П.К. Мухачева, А.П. Гавриленко, Я.П. Марковича, А.И. Зимина, И.В. Климова, М.В. Сторожева, Е.П. Унксова, Б.В. Розанова, Ю.А. Бочарова, А.Г. Овчинникова, Л.И. Живова, А.В. Сафонова, Ю.В. Беляева, В.И. Власова, А.А. Игнатова, А.Н. Банкетова, Е.Н. Ланского, В.Ф. Щеглова, П.А. Дунаева, А.П. Токарского, Г.Я. Зайденберга, В.А. Примака, Ю.В. Колотова и других.

Показано, что молоты являются распространенным типом оборудования отечественного и зарубежного кузнечно-штамповочного производства. В настоящее время установлено, что полная замена молотов кривошипными и гидравлическими прессами не всегда возможна и часто неэффективна.

Основным недостаткомковки на молотах является низкий общий КПД и, в частности, КПД ударного деформирования (от 0,7 до 0,8) вследствие возникновения при ударе больших сил и потерь энергии на упругую деформацию поковки и деталей молота, трение и колебания шабота и фундамента.

Кроме этого, выполнение многих технологических операций в машиностроении, металлургии, горном деле, строительстве, производстве строительных материалов и других отраслях народного хозяйства связано с применением ударной нагрузки и машин ударного действия. Это создает предпосылки для непрерывного совершенствования конструкций молотов с целью повышения КПД ударного деформирования поволоков и увеличения эффективного КПД молотов, снижения тепловых и механических потерь энергии, а также уменьшения шума, вибраций и сотрясений фундамента и окружающего грунта.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности ударного деформирования на ковочных молотах возможно путем увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой при удержании падающих частей молота в нижней точке при ударе путем использования сконструированных устройств, устанавливаемых на бабу или шабот молота. При этом за большее время взаимодействия с инструментом будет совершена большая энергия пластического деформации заготовки, а также будет снижена скорость деформации и созданы более благоприятные условия деформирования (повышение пластичности и снижение сопротивления деформированию). Кроме этого, увеличение продолжительности удара и величины деформации заготовки на каждом ударе при ковке на молоте приведет к сокра-

щению общего количества ударов молота для получения поковки заданных размеров, снизит интенсивность охлаждения поковки за весь технологический процесс, уменьшит расход энергии и затраты на производство, а также повысит КПД молота и производительность.

Для проведения исследований процесса ударного деформирования на молотах необходима разработка комплексной экспериментально-теоретической методики, включающей экспериментальные исследования с использованием теории многофакторного планирования, численный расчет и математическое моделирование с использованием высокопроизводительных ЭВМ. Такие исследования позволят провести математическое описание процесса ударного деформирования, определить работу деформации, массу падающих частей молота и разработать практические рекомендации по проектированию технологических процессовковки на молотах.

Обоснована постановка задач исследования.

Во второй главе разработана методика экспериментально-теоретических исследований процесса ударного деформирования заготовок при осадке на молоте (копре) для изучения особенностей формоизменения и деформированного состояния заготовок, определения энергосиловых параметров осадки в условиях целенаправленного увеличения продолжительности ударного взаимодействия при использовании бабы молота (копра) с наполнителем в виде металлических шариков. Разработанная методика включала выбор оборудования, оснастки, приборов, материалов и размеров заготовок, параметров осадки, а также обработку результатов экспериментальных исследований.

Осадку заготовок проводили на экспериментальной ударной установке (рис.1), состоящей из вертикального копра с максимальной теоретической скоростью бабы при ударе 6,26 м/с и системы скоростной видеосъемки, включающей скоростную цифровую видеокамеру FastVideo-250, персональный компьютер и базовое программное обеспечение V500 для сохранения и обработки полученных видеоизображений.

Для определения параметров удара при осадке заготовок проводили видеосъемку с частотой 3000 кадров в секунду. При этом продолжительность одного кадра $t_{\text{кадр}} = 3,33 \cdot 10^{-4}$ с, а размер получаемого видеоизображения - 150x150 пикселей.

Для осадки заготовок на копре использовали стандартную бабу массой $m_{\text{бабы}} = 22,4$ кг, а также бабу с наполнителем (рис.2), состоящую из корпуса с внутренней полостью и засыпаемых внутрь стальных шариков диаметром $D_{\text{шар}} = 0,001; 0,002; 0,006; 0,012$ м. Между крышкой бабы с наполнителем и шариками устанавливали упругую прокладку из поролонa, которая обеспечивала предварительное упругое поджатие шариков. Масса корпуса бабы с наполнителем была равна 14,5 кг, а масса засыпаемых внутрь шариков $m_{\text{шар}} = 3,4; 5,7$ и 7,8 кг. При этом отношение массы шариков к общей массе бабы $K_m = m_{\text{шар}} / m_{\text{бабы}} = 0,15; 0,25$ и 0,35.

Для возможности сравнения результатов экспериментов массу бабы с наполнителем принимали равной массе стандартной бабы $m_{\text{бабы}} = 22,4$ кг. Для этого при различной массе засыпаемых внутрь шариков $m_{\text{шар}} = 3,4; 5,7$ и 7,8 кг использовали крышки бабы массой 4,5; 2,2 и 0,1 кг соответственно.

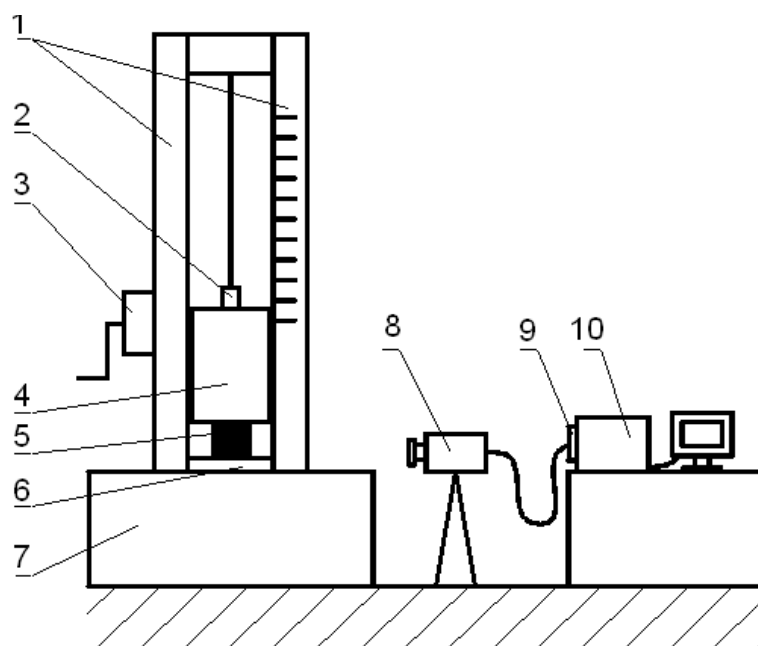


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной ударной установки:
 1 – стойки копра; 2 – устройство захвата бабы; 3 - устройство подъема бабы;
 4 – баба; 5 – заготовка; 6 – нижний боек; 7 - основание; 8 - скоростная цифровая видеокамера; 9 - переходник; 10 - персональный компьютер

Бабу копра сбрасывали с высот: 0,5; 1,25 и 2 м, которым соответствовали теоретические энергии удара $L = 109,3; 273,2$ и $437,1$ Дж и теоретические скорости движения бабы при соударении с заготовкой - 3,13; 4,95 и 6,26 м/с. Согласно разработанной методике были определены экспериментальные скорости бабы копра при ударе, равные 3,0; 4,8 и 6 м/с.

Разницу между теоретическими и экспериментальными значениями скорости, не превышающую 5%, можно объяснить наличием в направляющих копра сил трения, которые уменьшают реальную скорость движения бабы.

В качестве материала заготовок для моделирования горячего деформирования стали использовали однородный прессованный свинец марки С2 ГОСТ 3778-98 (химический состав: Pb - 99,95%, примеси – 0,05%; степень деформации при прессовании – 0,44).

Для обеспечения условий трения, соответствующих горячему деформированию (коэффициент трения 0,35...0,4), поверхности заготовки, бабы и основания копра обезжиривали ацетоном и натирали мелом.

По данным завода ОАО «УЗТМ» при ковке поковок типа шестерен на молотах с массой падающих частей $G = 1000...5000$ кг величина отношения массы заготовки $m_{заг}$ к массе падающих частей $K_{заг} = m_{шар} / G = 0,01...0,05$. При этом среднее значение $K_{заг} = 0,03$. Кроме этого, согласно производственных данных, поковки, получаемые при ковке на молотах, обычно имеют отношение высоты к диаметру $H_{пок} / D_{пок} \approx 0,1...1$. При этом среднее значение $H_{пок}/D_{пок} \approx 0,55$.

Так как на последнем ударе степень деформации заготовки при осадке наименьшая и обычно не превышает 10%, принимали, что отношение высоты заготовки к ее диаметру $H_{заг} / D_{заг} = H_{пок} / D_{пок} \approx 0,55$.

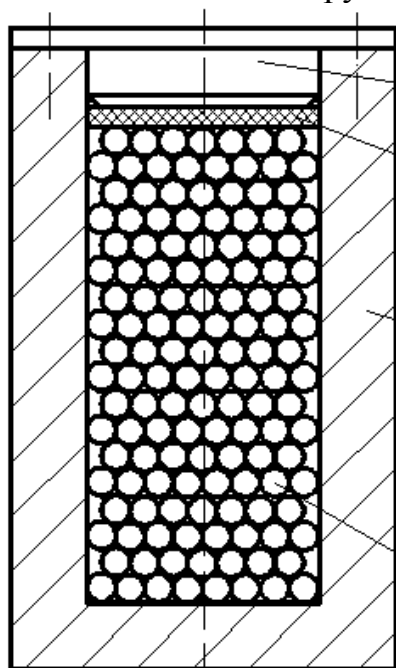


Рис.2. Схема бабы с наполнителем:
1 — крышка; 2 — упругая прокладка;
3 — корпус; 4 — шарики

При расчете массы заготовок $m_{заг}$ для экспериментальной осадки на копре с массой бабы $m_{бабы} = 22,4$ кг принимали $K_{заг} = m_{шар} / m_{бабы} = 0,03$. Получили массу и размеры свинцовых заготовок: $m_{заг} = 0,6$ кг, $H_{заг} = 0,026$ м, $D_{заг} = 0,05$ м.

Для определения свойств заготовок была разработана методика и построены динамические диаграммы деформирования свинца (рис.3) при скоростях деформации 153,3; 288,8 и 533,9 c^{-1} , соответствующих условиям горячего деформирования на ковочных молотах с массой падающих частей $G = 1000...5000$ кг и со скоростями удара до 12,2 м/с. Динамические диаграммы деформирования построены на основе совместных исследований методом прямого удара на газодинамической копровой установке вертикального

типа и компьютерного моделирования процесса деформирования заготовок в пакете прикладных программ «Динамика-2» (исследования выполнены в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы»).

Кроме этого, были построены статические диаграммы деформирования свинца при скоростях деформации 10^{-2} ; $1,4 \cdot 10^{-2}$ и $2 \cdot 10^{-2} c^{-1}$ на универсальной испытательной машине МИУ-500.1К согласно ГОСТ 25.503-97 (рис.3)

После сохранения видеоизображений процесса осадки заготовок получали раскадровку видеоизображения в графическом формате (рис.4). При обработке полученных отдельных кадров процесса осадки определяли количество кадров N_1 , соответствующее нагрузочной фазе удара — от момента начала деформирования заготовки до окончания осадки заготовки, а также количество кадров N_2 , соответствующее разгрузочной фазе удара — от момента максимальной деформации заготовки до отскока от нее бабы.

Продолжительность каждой фазы удара определяли по формуле:

$$t_i = N_i \cdot t_{кадр} \quad (1)$$

где N_i — количество кадров; $i = 1$ или 2.

Полная продолжительность всего удара:

$$t_y = t_1 + t_2 \quad (2)$$

где t_1 — продолжительность нагрузочной фазы удара; t_2 — продолжительность разгрузочной фазы удара.

Далее проводили масштабирование полученных кадров процесса осадки и измеряли величину перемещения бабы на каждом кадре ΔH_i с шагом по времени, равным $t_{\text{кадр}}$. На рис.4 приведены первый и $(i - \text{й})$ кадры видеозаписи процесса осадки заготовки 2 бабой 1. Показано перемещение бабы ΔH_i и формоизменение заготовки.

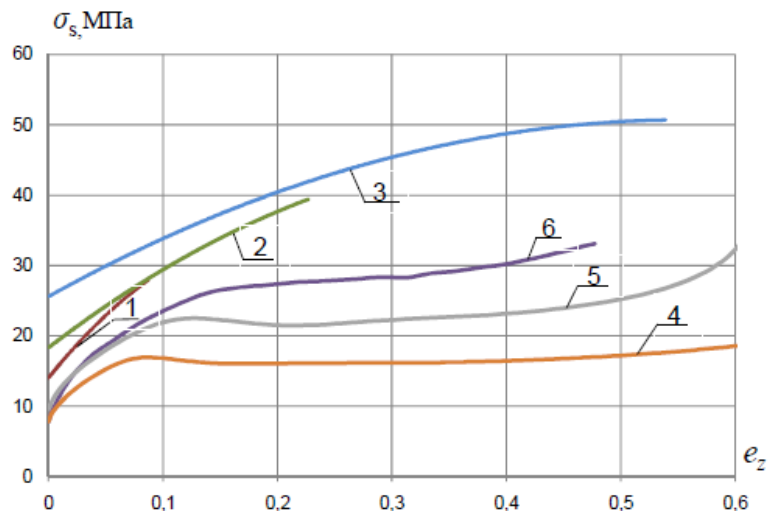


Рис.3. Динамические и статические диаграммы деформирования свинца при различных скоростях деформации:

1 – $153,3 \text{ c}^{-1}$; 2 – $288,8 \text{ c}^{-1}$; 3 – $533,9 \text{ c}^{-1}$; 4 – 10^{-2} ; 5 – $1,4 \cdot 10^{-2}$; 6 – $2 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$

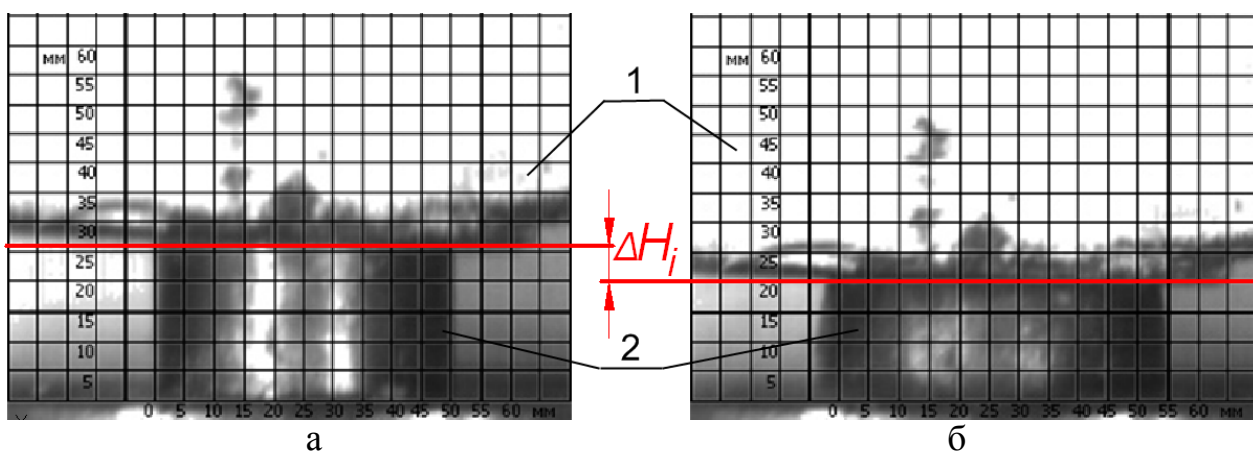


Рис.4. Раскадровка видеоизображения процесса осадки:

а – первый кадр; б – $(i - \text{й})$ кадр;

1 – баба копра; 2 – заготовка; ΔH_i – перемещение бабы

Экспериментальные зависимости перемещения бабы ΔH от времени t аппроксимировали полиномиальными регрессионными зависимостями 5-го порядка вида:

$$\Delta H^{анпр} = f(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4 + a_5 \cdot t^5 \quad (3)$$

Далее определяли пластическую деформацию свинцовых заготовок ΔH_{II} на нагрузочной фазе удара t_1 :

$$\Delta H_{\Pi} = \Delta H^{анп} - \Delta H_y, \quad (4)$$

где ΔH_y - упругая деформация нижнего бойка, определяемая при обработке отдельных кадров процесса ударного деформирования и равная величине обратного хода бабы на разгрузочной фазе удара до момента отрыва от заготовки.

Необходимо отметить, что свинец относят к высокопластичным материалам, поэтому упругими деформациями свинцовых заготовок пренебрегали.

При этом зависимости ΔH_{Π} от времени t также аппроксимировали полиномиальными регрессионными уравнениями 5-го порядка. Скорость движения бабы $V_{бабы}$ по ходу ее движения определяли дифференцированием аппроксимированной зависимости перемещения бабы $\Delta H^{анп}$ по времени:

$$V_{бабы} = d(\Delta H^{анп}) / dt \quad (5)$$

Также определили количество полных проходов пластической волны деформации по заготовке на нагрузочной фазе удара

$$N_p = t_1 / t_p \quad (6)$$

где $t_p = 2 H_{заг} / c_p$ - период прохождения пластической волны деформации по заготовке высотой $H_{заг}$, с; c_p - скорость распространения пластической волны деформации в материале заготовки, м/с. При этом согласно литературных данных $c_p = c_0 / 1,2$, где c_0 - скорость распространения упругой волны деформации в материале. Таким образом, для свинца $c_0 \approx 1200$ м/с и $c_p = 1000$ м/с; для стали $c_0 \approx 5200$ м/с и $c_p = 4330$ м/с. Таким образом, для заготовки высотой $H_{заг} = 0,026$ м период прохождения пластической волны деформации на нагрузочной фазе удара $t_p = 5,2 \cdot 10^{-5}$ с.

Зависимости пластической деформации заготовок ΔH_{Π} от времени были использованы для построения зависимостей относительной деформации заготовок ε_{Π} от времени. При этом значения ε_{Π} определяли по формуле:

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{\Delta H_{\Pi}}{H_{заг}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Для построения зависимостей сил деформирования F при осадке заготовок проводили двукратное дифференцирование аппроксимированных зависимостей пластической деформации заготовок ΔH_{Π} по времени и определяли ускорение движения бабы a по ходу ее движения:

$$a = d^2(\Delta H_{\Pi}) / dt^2 \quad (8)$$

Сила деформирования при осадке:

$$F = m_{бабы} \cdot a \quad (9)$$

Зависимости сил деформирования $F = f(\Delta H_{II})$ аппроксимировали полиномиальными регрессионными уравнениями:

$$F(\Delta H_{II}) = c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2 + c_3 \cdot t^3 \quad (10)$$

Работу пластической деформации при осадке заготовок определяли интегрированием построенных зависимостей силы деформирования $F = f(\Delta H_{II})$

$$A_{def} = \int F(\Delta H_{II}) d(\Delta H_{II}) \quad (11)$$

КПД удара η_y определяли по формуле:

$$\eta_y = A_{def} / L. \quad (12)$$

Было установлено, что применение бабы молота (копра) с наполнителем для осадки заготовок приводит к увеличению продолжительности нагрузочной фазы удара и количества прохождений пластической волны деформации по заготовке, а также к увеличению интенсивности формоизменения и степени деформации заготовок по сравнению с осадкой стандартной бабой. Наибольшее увеличение продолжительности нагрузочной фазы удара (до 3 раз) имело место при использовании бабы с наполнителем при диаметре шариков 0,006 и 0,012 м и с отношением массы шариков к общей массе бабы $K_M = 0,15$ и 0,25, что можно использовать в технологических целях при ковке на молотах, например, при правке и калибровке поковок. Наибольшее увеличение интенсивности формоизменения и степени деформации заготовок (до 1,2 раза) имело место при использовании бабы с наполнителем при диаметре шариков 0,012 м и с отношением массы шариков к общей массе бабы $K_M = 0,15$.

Также установлено, что при осадке заготовок бабой с наполнителем происходит существенное увеличение относительной деформации заготовок ε_{II} по сравнению со стандартной бабой. При этом наибольшее увеличение ε_{II} (до 1,2 раза) имело место при использовании бабы с наполнителем с $K_M = 0,15$ и $D_{шар} = 0,012$ м. На рис.5 приведены зависимости относительной деформации заготовок ε_{II} от продолжительности нагрузочной фазы удара при осадке стандартной бабой и бабой с наполнителем.

Установлено, что применение бабы с наполнителем для осадки заготовок приводит к существенному снижению F (до 1,4 раза), увеличению A_{def} и КПД удара (до 1,15 раза) по сравнению с осадкой стандартной бабой. При этом наименьшая сила деформирования, наибольшая работа пластической деформации КПД удара имели место при использовании бабы с наполнителем с $K_M = 0,15$ и $D_{шар} = 0,012$ м. На рис.6 показаны графики зависимостей сил деформирования от пластической деформации заготовки ΔH_{II} при осадке заготовок стандартной бабой и бабами с наполнителем с $K_M = 0,15$ и различными $D_{шар}$.

В табл.1 приведены полученные значения A_{def} и η_y при осадке свинцовых заготовок стандартной бабой и бабой с наполнителем.

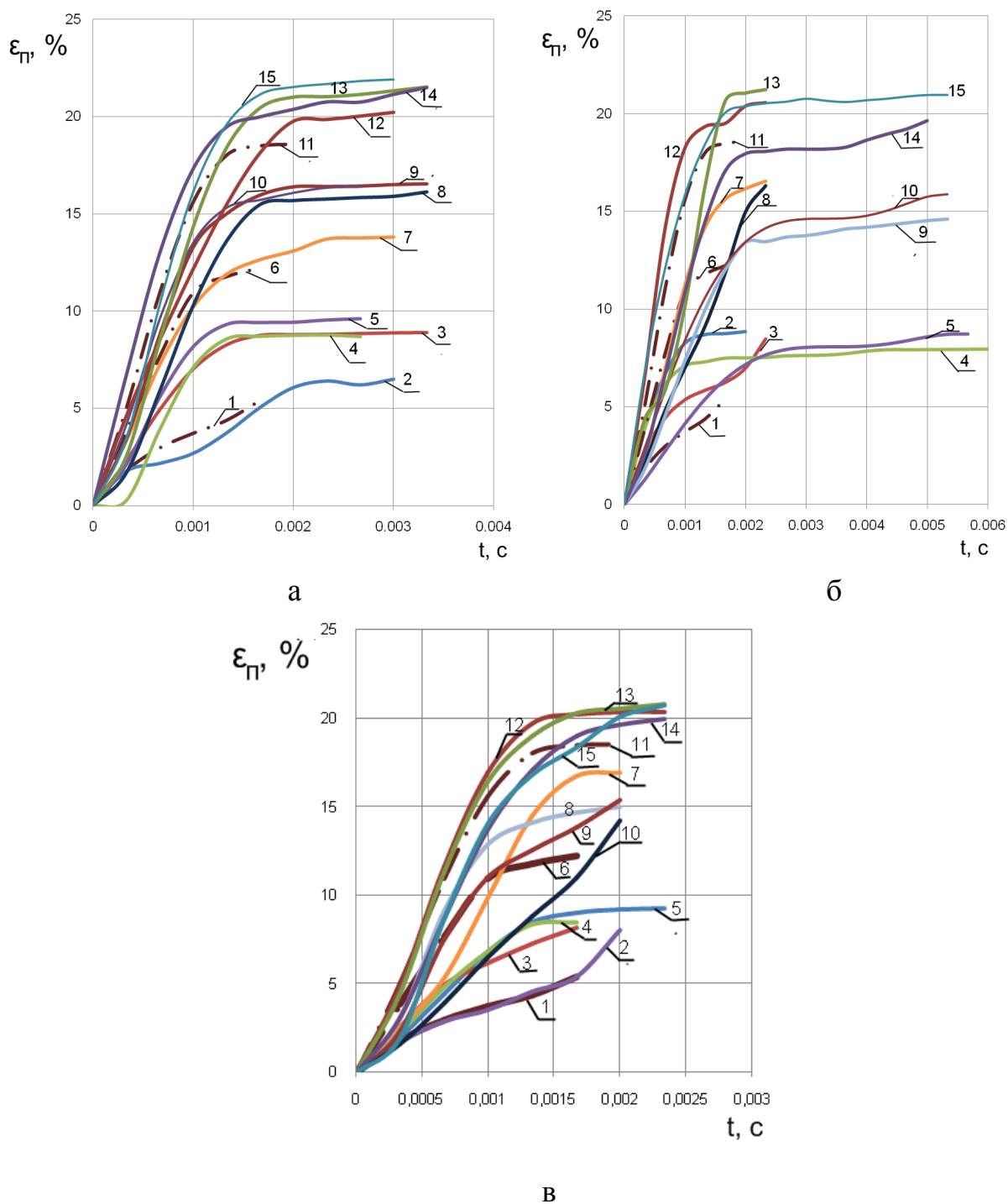


Рис.5. Зависимость относительной деформации заготовок $\varepsilon_{П}$ от времени при осадке стандартной бабой и бабой с наполнителем:

а - при $K_M = 0,15$; б - при $K_M = 0,25$; в - при $K_M = 0,35$:

опыт №1: 1 – стандартная баба; 2 – $D_{шар} = 0,001$ м; 3 – $D_{шар} = 0,002$ м;

4 – $D_{шар} = 0,006$ м; 5 – $D_{шар} = 0,012$ м;

опыт №2: 6 – стандартная баба; 7 – $D_{шар} = 0,001$ м; 8 – $D_{шар} = 0,002$ м;

9 – $D_{шар} = 0,006$ м; 10 – $D_{шар} = 0,012$ м;

опыт №3: 11 – стандартная баба; 12 – $D_{шар} = 0,001$ м; 13 – $D_{шар} = 0,002$ м;

14 – $D_{шар} = 0,006$ м; 15 – $D_{шар} = 0,012$ м

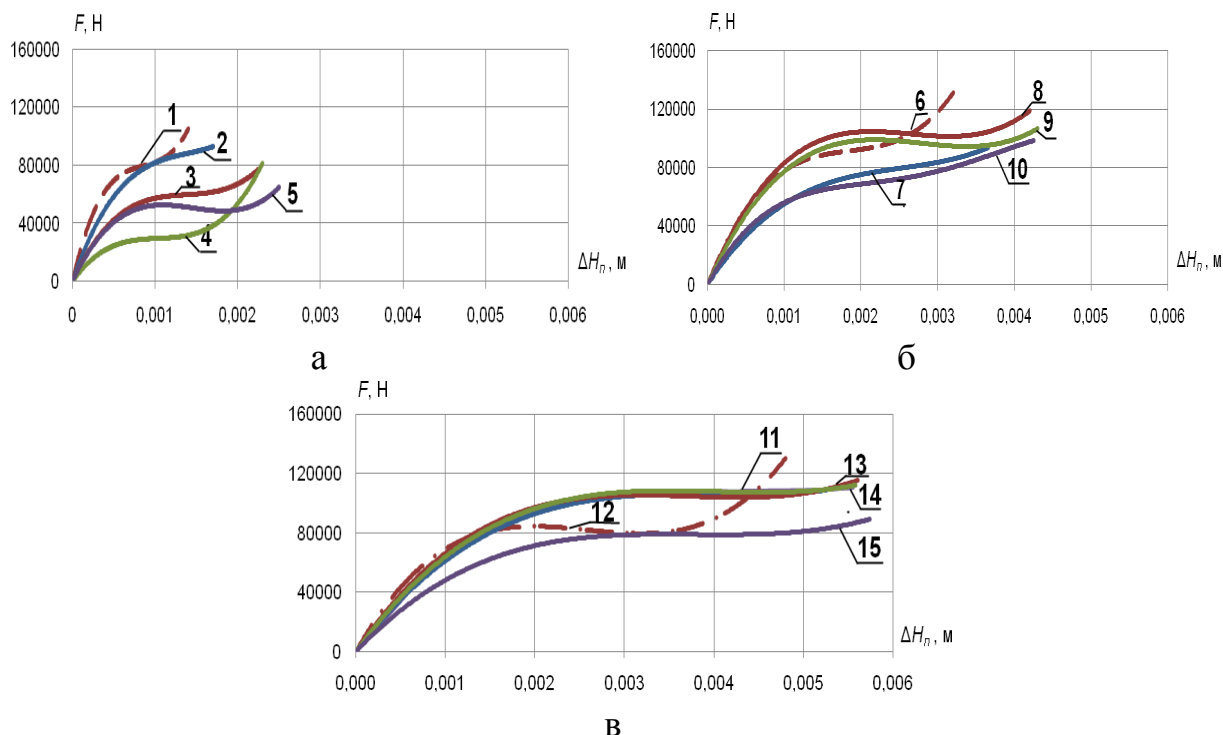


Рис.6. Зависимость силы деформирования от пластической деформации заготовок при осадке стандартной бабой и бабой с наполнителем при $K_M = 0,15$:
 опыт №1: 1 – стандартная баба; 2 – $D_{шар} = 0,001$ м; 3 – $D_{шар} = 0,002$ м;
 4 – $D_{шар} = 0,006$ м; 5 – $D_{шар} = 0,012$ м;
 опыт №2: 6 – стандартная баба; 7 – $D_{шар} = 0,001$ м; 8 – $D_{шар} = 0,002$ м;
 9 – $D_{шар} = 0,006$ м; 10 – $D_{шар} = 0,012$ м;
 опыт №3: 11 – стандартная баба; 12 – $D_{шар} = 0,001$ м; 13 – $D_{шар} = 0,002$ м;
 14 – $D_{шар} = 0,006$ м; 15 – $D_{шар} = 0,012$ м

Таблица 1.

Работа пластической деформации $A_{деф}$ и КПД удара η_y при осадке стандартной бабой и бабами с наполнителем

№ опыта	Осадка стандартной бабой		Осадка бабой с наполнителем								
			K _м	Диаметр шариков D _{шар} , м							
				0,001		0,002		0,006		0,012	
				A _{деф} , Дж	η _y	A _{деф} , Дж	η _y	A _{деф} , Дж	η _y	A _{деф} , Дж	η _y
1	67,2	0,67	0,15	77,3	0,77	79,3	0,79	84,3	0,84	92,3	0,92
			0,25	71,3	0,71	72,3	0,72	70,3	0,70	73,3	0,73
			0,35	81,3	0,81	74,3	0,74	78,3	0,78	74,3	0,74
2	184,9	0,72	0,15	215,8	0,84	220,9	0,86	223,5	0,87	226,1	0,88
			0,25	223,5	0,87	223,5	0,87	215,8	0,84	223,5	0,87
			0,35	226,1/	0,88	218,4	0,85	223,5	0,87	218,4	0,85
3	309,1	0,77	0,15	332,9	0,83	345,2	0,86	344,9	0,86	369,3	0,92
			0,25	349,2	0,87	353,2	0,88	349,2	0,87	353,2	0,88
			0,35	337,2	0,84	357,3	0,89	332,8	0,83	357,3	0,89

Также были проведены экспериментальные исследования процесса ударного деформирования при осадке стандартными бабами с различными массами. При этом на экспериментальной ударной установке проводили осадку свинцовых заготовок массами $m_{заг} = 0,6$ и $0,8$ кг при использовании двух стандартных баб копра с $m_{бабы} = 22,4$ кг и $33,45$ кг.

При этом $K_{заг} = m_{заг} / m_{бабы} = 0,017; 0,024; 0,026; 0,036$.

Размеры свинцовых заготовок составляли $H_{заг} = 0,023$ м и $D_{заг} = 0,074$ м; $H_{заг} = 0,026$ м и $D_{заг} = 0,05$ м.

Для обеспечения равенства принятых теоретических энергий удара $L = 109,3; 273,2$ и $437,1$ Дж бабу копра с $m_{бабы} = 22,4$ кг сбрасывали с различных высот 0,5; 1,25; 2 м, которым соответствовали теоретические скорости бабы при соударении с заготовкой - 3,13; 4,95 и 6,26 м/с, а бабу копра с $m_{бабы} = 33,45$ кг – с высот 0,33; 0,83; 1,33 м, которым соответствовали теоретические скорости бабы при соударении 2,42; 3,96 и 5,01 м/с.

В результате проведенной тарировки копра по скорости были определены экспериментальные скорости баб копра массами 22,4 и 33,45 кг при ударе, равные 3,0; 4,8 и 6 м/с и 2,4; 3,9 и 5,0 м/с соответственно.

В результате проведенных исследований процесса ударного деформирования при осадке стандартными бабами с различными отношениями массы заготовки к массе бабы молота $K_{заг}$ установлено, что уменьшение $K_{заг}$ от 0,026 до 0,017 приводит к увеличению продолжительности нагрузочной фазы удара и количества прохождений пластической волны деформации по заготовке (до 1,3 раза), а также к увеличению интенсивности формоизменения и степени деформации заготовок (в 1,1...1,3 раза)

На основе полученных зависимостей относительной деформации заготовок и сил деформирования заготовок при осадке стандартными бабами с различными отношениями массы заготовки к массе бабы молота установлено, что уменьшение отношения $K_{заг}$ от 0,026 до 0,017 приводит к снижению сил деформирования (в 1,8...2,2 раза) и увеличению работы пластической деформации и КПД удара (до 1,13 раза).

Для сравнения с полученными ранее экспериментальными данными по осадке свинцовых заготовок было проведено исследование процесса горячего деформирования стальных заготовок при осадке на молотах. Осадку стальных заготовок и определение параметров удара проводили на экспериментальной ударной установке (рис.1).

Для осадки заготовок на копре использовали стандартную бабу и бабу с наполнителем с одинаковыми массами $m_{бабы} = 22,4$ кг. В качестве наполнителя бабы использовали металлические шарики диаметром $D_{шар} = 0,012$ м. При этом отношение массы засыпаемых шариков к общей массе бабы с наполнителем $K_m = m_{шар} / m_{бабы} = 0,15$.

Стандартную бабу копра и бабу копра с наполнителем сбрасывали с высоты 2 м, которой соответствовала теоретическая и фактическая скорость движения бабы в момент соударения с заготовкой $V = 6,26$ м/с и 6 м/с, а также теоретическая и фактическая энергии удара $L = 437,1$ Дж и 401, 4 Дж. Материал заготовок – сталь 20 (ГОСТ 1050-88). Размеры заготовок: высота $H_{заг} = 0,029$ м и диаметр $D_{заг} = 0,059$ м. Масса заготовки - $m_{заг} = 0,6$ кг. Для каждого эксперимента использовали по 3 заготовки.

Заготовки нагревали до температуры 1100°C в электропечи сопротивления «Накал» в течение 45 мин. Также подогревали основание копра до температуры 200-250°C. Температуру поверхности заготовки и основания копра контролировали с помощью пирометра «СЕМ» DT-8855.

Видеосъемку процесса осадки проводили с помощью скоростной цифровой видеокамеры FastVideo-250, при этом все данные в непрерывном режиме записывали в оперативную память компьютера. Съемку проводили с частотой кадров 3000 кадров в секунду. При этом продолжительность одного кадра $t_{\text{кадр}} = 3,33 \cdot 10^{-4}$ с.

В результате проведенных исследований было установлено, что применение бабы с наполнителем приводит к существенному увеличению продолжительности нагрузочной фазы удара (в 2,5 раза), увеличению интенсивности формоизменения и степени деформации заготовок (в 1,2 раза), снижению сил деформирования (в 1,35 раза) и увеличению работы пластической деформации и КПД удара (в 1,12 раза) по сравнению с осадкой стандартной бабой. Полученные данные по горячему деформированию с достаточной точностью подтверждают экспериментальные данные по осадке свинцовых заготовок. Экспериментальные исследования выполнены частично с использованием оборудования лаборатории кафедры «Технологии обработки металлов давлением МГТУ им. Н.Э. Баумана и НИИМ ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

В третьей главе при использовании метода многофакторного планирования эксперимента построены математические модели процесса ударного деформирования на молотах в виде уравнений регрессии.

Для построения первого уравнения в качестве независимых факторов были приняты следующие величины: отношение массы одного шарика к массе бабы $K_{IM} = m_{\text{ш}} / m_{\text{заг}}$, энергия удара L и отношение массы всех шариков к массе бабы $K_M = m_{\text{ш}} / m_{\text{заг}}$.

В результате было получено уравнение регрессии, описывающее процесс удара при осадке бабой с наполнителем и показывающее зависимость относительной деформации заготовки от диаметра и массы шариков, засыпаемых в бабу, а также энергии удара:

$$y_1 = \varepsilon_{II} = -8 + 71 \cdot 10^4 \cdot K_{IM} + 0,144 \cdot L + 2,156 \cdot K_M - 19,4 \cdot 10^9 \cdot (K_{IM})^2 - 15 \cdot 10^{-5} \cdot L^2 - 6,2 \cdot (K_M)^2 + 56,9 \cdot 10^{12} \cdot (K_{IM})^3 \quad (13)$$

Для построения второго уравнения в качестве независимых факторов были приняты: энергия удара L и отношение массы заготовки к массе бабы $K_{\text{заг}} = m_{\text{заг}} / m_{\text{бабы}}$.

В результате было получено уравнение регрессии, описывающее процесс ударного деформирования при осадке и показывающее зависимость относительной деформации заготовок от энергии удара и отношения массы заготовки к массе бабы:

$$y_2 = \varepsilon_{II} = 0,01 + 0,111 \cdot L + 120 \cdot K_{\text{заг}} - 0,0001 L^2 - 559,7 \cdot (K_{\text{заг}})^2 + 59268 \cdot (K_{\text{заг}})^3 \quad (14)$$

Проведенная проверка подтвердила адекватность построенных уравнений регрессии по критерию Фишера на 1% уровне значимости.

В результате анализа построенных уравнений регрессии были определены наиболее целесообразные значения отношения массы одного шарика к массе бабы молота с наполнителем $K_{IM} = 280 \cdot 10^{-6}$ и отношения массы всех шариков к массе бабы $K_M = 0,17$, при которых возможно получение наибольшей относительной деформации заготовок при заданной энергии ковочного

молота. Также установлено, что для получения наибольшей относительной деформации заготовки при заданной энергии ковочного молота необходимо проводить осадку при отношении массы заготовки и массы бабы молота $K_{заг} \leq 0,02$.

Для дальнейшего теоретического исследования основных закономерностей процесса ударного деформирования на ковочных молотах было проведено компьютерное моделирование процесса осадки заготовок на молоте с помощью пакета прикладных программ «Динамика-2» и разработанной программы расчета процесса удара в зернистых средах.

При проведении моделирования ударного деформирования заготовок с использованием стандартной бабы молота была принята осесимметричная схема осадки заготовки сплошным цилиндрическим стержнем (рис.7, а), а с использованием бабы молота с наполнителем - осесимметричная схема осадки заготовки пустотелым цилиндрическим стержнем с шариками внутри, расположенными в один столб (рис.7, б).

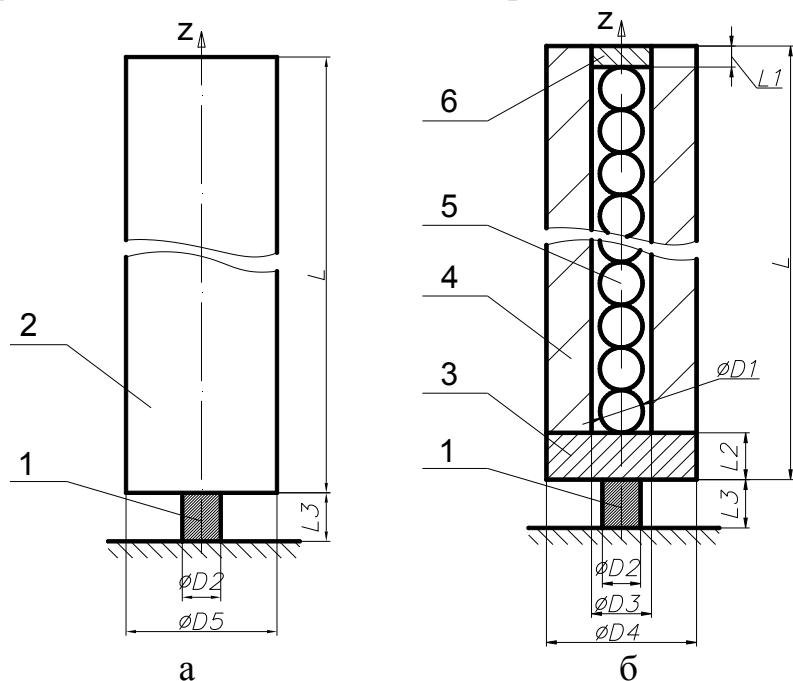


Рис.7. Расчетные схемы осадки заготовки:
а – сплошным стержнем; б – пустотелым стержнем с шариками

1 – заготовка; 2 - сплошной стержень; 3 – нижняя крышка; 4 – пустотелый стержень; 5- столб шариков; 6 – верхняя крышка

с фактическими значениями. В качестве материала заготовок был принят свинец, используемый при экспериментальных исследованиях и имеющий следующие механические характеристики: модуль объемного сжатия $K = 5,333 \cdot 10^2$ МПа, модуль сдвига $G = 5,517 \cdot 10^1$ МПа, плотность $\rho = 11350$ кг/м³, предел текучести $\sigma_T = 7,7$ МПа. Для описания свойств мате-

Было установлено, что если шарики, засыпанные в экспериментальную бабу с наполнителем, установить в отдельные столбы во внутренней полости бабы, то количество этих столбов шариков составит 37. В связи с этим в расчетных схемах длины сплошного и пустотелого стержней, а также высота заготовки приняты такими же, как при экспериментальных исследованиях, а массы сплошного и пустотелого стержней, массы шариков и заготовки уменьшили в 37 раз по сравнению

риала заготовки были использованы динамические диаграммы деформирования свинца (рис.3).

Пакет прикладных программ «Динамика-2» основан на гипотезах и уравнениях механики и динамики сплошной среды и является вычислительным средством для решения двумерных плоских и осесимметричных задач нестационарного упругопластического деформирования тел, состоящих из оболочечных и массивных элементов, при контактном взаимодействии и соударении с заполняющими и окружающими сжимаемыми средами с учетом значительных формоизменений контактирующих поверхностей.

Уравнение движения сплошной среды в цилиндрической системе координат r, β, z (Oz – ось вращения) следует из уравнения баланса виртуальных мощностей в форме Журдена:

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \left(\sigma_{rr} \delta \dot{\varepsilon}_{rr} + \sigma_{\beta\beta} \delta \dot{\varepsilon}_{\beta\beta} + \sigma_{zz} \delta \dot{\varepsilon}_{zz} + 2\sigma_{rz} \delta \dot{\varepsilon}_{rz} \right) r d\Omega + \\ & + \iint_{\Omega} \left(\rho \ddot{u}_r \delta \dot{u}_r + \rho \ddot{u}_z \delta \dot{u}_z \right) r d\Omega - \int_{G_p} \left(p_r \delta \dot{u}_r + p_z \delta \dot{u}_z \right) r dG - \\ & - \int_{G_q} \left(q_r \delta \dot{u}_r + q_z \delta \dot{u}_z \right) r dG = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

Уравнение (15) дополняют соответствующими начальными и кинематическими граничными условиями. Кинематические соотношения формулируют в скоростях в метрике текущего состояния, что позволяет учитывать большие формоизменения и деформации. Условия на поверхностях контакта оболочек и сред с различными физико-механическими свойствами учитывают отрыв, проскальзывание и прилипание на основе комбинаций условий непроникания (или прилипания) на тех участках поверхностей, которые в данный момент находятся в контакте, и условий на свободных границах на остальных участках. Критерием перехода от условий непроникания к условию на свободной границе (отрыв) служит неравенство $q < q_k$, где q – контактное давление, q_k – некоторая константа, характеризующая прочность на отрыв. Критерием вступления в контакт является геометрическое пересечение свободных поверхностей. Численная реализация контактных условий основана на выделении и сопровождении в процессе расчетов контактных и свободных поверхностей.

В вариационном уравнении движения компоненты контактной силы q_α ($\alpha = r, z$) заранее неизвестны и их определяют в процессе решения задачи. Для простоты полагают, что контактное взаимодействие только между отдельными конструктивными элементами, которые занимают в меридиональном сечении или на плоскости rOz односвязные подобласти Ω .

Силу по нормали к поверхности контакта определяют из условия непроникания без учета и с учетом трения. Для модели контакта с трением касательная сила на первом этапе – из условия жесткой склейки, а в случае превышения силы трения покоя – в соответствии с законом Кулона.

Для обеспечения условий трения, соответствующих горячему деформированию, коэффициент трения в зоне контакта ударника и заготовки при компьютерном моделировании принимали равным 0,35...0,4.

Связь контактирующих подобластей предполагают односторонней, т.е. возможен отрыв поверхностей друг от друга и повторное вступление в контакт. При этом в одномерной модели волнового процесса принимали следующие допущения: отсутствуют поперечные колебания ударника, заготовки и мерного стержня; ударник является абсолютно жестким; напряженно-деформированное состояние заготовки является однородным вследствие малости размеров.

Полную систему уравнений при заданных начальных и граничных условиях решали по явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа «крест».

Программа расчета процесса удара в зернистых средах, разработанная для проведения моделирования процесса осадки заготовок на молоте при использовании бабы молота с наполнителем, является дополнительным модулем пакета прикладных программ «Динамика-2». При этом контактное взаимодействие между соседними шариками, помещаемыми в бабу молота с наполнителем, предложено рассчитывать по методу исследования нестационарных нелинейных импульсов сжатия в одномерных зернистых средах, предложенного В.Ф. Нестеренко, согласно которого силу сжатия соседних шариков F рассчитывают по формуле:

$$F = \frac{2E}{3(1-\nu^2)} \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^{1/2} [(R_1 + R_2) - (x_2 - x_1)]^{3/2} \quad (16)$$

где E – модуль Юнга материала шариков; R_1, R_2 – радиусы взаимодействующих шариков; ν – коэффициент Пуассона; x_1, x_2 – координаты центра шариков.

Использование данного закона для решения динамических задач подразумевает следующие ограничения: максимальное напряжение, достигаемое в центре контакта соседних шариков, должно быть меньше предела упругости материала шариков; размеры поверхности контакта намного меньше радиусов кривизны каждого шарика; продолжительность ударного взаимодействия много больше периода собственных колебаний упругого шарика.

В результате компьютерного моделирования процесса ударного деформирования заготовок на молотах установлено, что при осадке заготовок пустотелым стержнем с шариками диаметром 0,012 м происходит увеличение продолжительности нагрузочной фазы удара (до 1,5 раза) и относительной деформации заготовок (до 1,2 раза), снижение силы деформирования (до 1,2 раза) и увеличение работы пластической деформации (до 1,15 раза) по сравнению с осадкой сплошным стержнем (рис.8). В табл.2 и 3 приведено сравнение некоторых результатов моделирования и экспериментальных данных в зависимости от расчетной схемы и начальной скорости удара при осадке.

Полученные результаты компьютерного моделирования процесса ударного деформирования заготовок на молотах показали высокую сходимость с результатами экспериментальных исследований. Некоторое расхож-

дение полученных результатов (до 8%) можно объяснить допущениями, принятыми при моделировании.

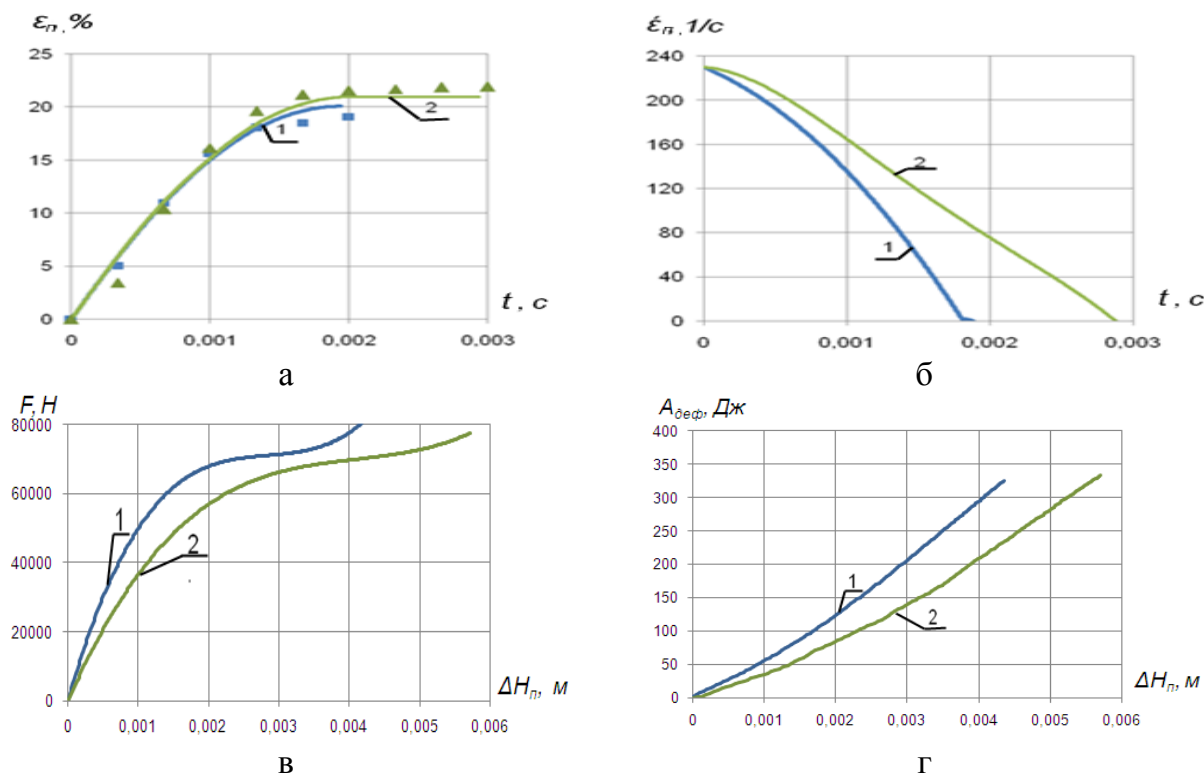


Рис.8. Зависимость $\varepsilon_{п}$ (а), $\dot{\varepsilon}_{п}$ (б), F (в) и $A_{деф}$ (г) от t и ΔH при осадке с начальной скоростью удара 6 м/с: 1 – осадка сплошным стержнем; 2 – осадка пустотелым стержнем с шариками. Экспериментальные данные показаны точками

Таблица 2.

Отношение наибольших сил деформирования заготовок при осадке сплошным стержнем $F_1^{наиб}$ и пустотелым стержнем с шариками $F_2^{наиб}$

Параметр*	Начальная скорость удара, м/с	
	4,8	6
$F_1^{наиб} / F_2^{наиб}$	1,2*	1,15*
	1,3*	1,35*

* В числителе приведены результаты компьютерного моделирования; в знаменателе – экспериментальные данные по осадке стандартной бабой и бабой с наполнителем

Таблица 3.

Отношение работы деформации заготовок при осадке пустотелым стержнем с шариками $A_{деф2}$ и сплошным стержнем $A_{деф1}$

Параметр*	Начальная скорость удара, м/с	
	4,8	6
$A_{деф2} / A_{деф1}$	1,2*	1,06*
	1,18*	1,15*

* В числителе приведены результаты компьютерного моделирования; в знаменателе – экспериментальные данные по осадке стандартной бабой и бабой с наполнителем

В четвертой главе разработаны рекомендации по определению работы деформации при осадке и массы падающих частей ковочных молотов при использовании бабы с наполнителем.

При этом экспериментальные графики зависимостей силы деформирования от величины деформации заготовки (рис.6) были перестроены в относительные графики путем деления значений на осях абсцисс ΔH_{II} и ординат F на параметры, характеризующие поковки. В результате получили относительные зависимости в виде:

$$\frac{F}{S \cdot \sigma_s} = f\left(\frac{\Delta H_{II}}{H_{заг}}\right), \quad (17)$$

где ΔH_{II} – деформация заготовки; S – площадь поперечного сечения поковки; σ_s – напряжение текучести, соответствующее температурно-скоростным условиям деформации.

По площади, ограниченной построенными графиками для всех экспериментов были определены значения относительной работы деформации A^* при осадке заготовок бабой с наполнителем. Полученные графики зависимостей величины относительной работы деформации A^* от соответствующих значений отношения $\Delta H_{II} / H_{заг}$ при осадке бабой с наполнителем с различными K_M (рис.9) были аппроксимированы прямыми линиями.

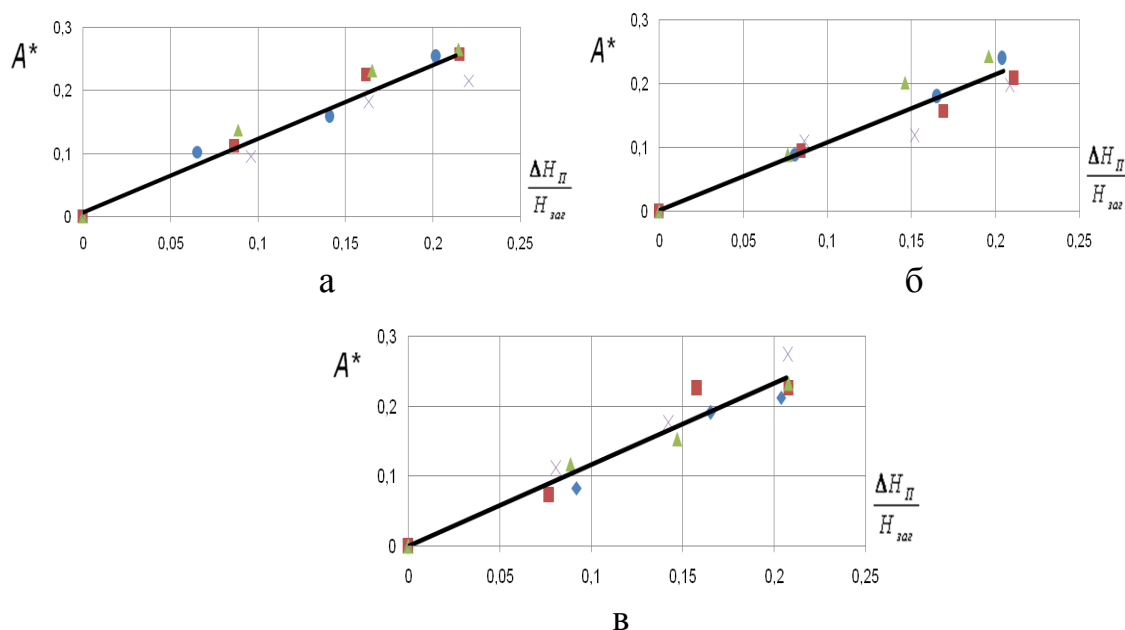


Рис.9. График зависимости относительной работы деформации A^* от $\Delta H_{II} / H_{заг}$ при осадке бабой с наполнителем:

а – $K_M = 0,15$; б – $K_M = 0,25$; в – $K_M = 0,35$

Экспериментальные значения A^* , соответствующие различным K_{IM} , показаны точками: ●- $K_{IM} = 0,2 \times 10^{-6}$; ■ – $K_{IM} = 1,5 \times 10^{-6}$; ▲ – $K_{IM} = 40 \times 10^{-6}$; X – $K_{IM} = 300 \times 10^{-6}$

Усредненная зависимость относительной работы деформации A^* от $\Delta H_{\Pi} / H_{\text{заг}}$ при осадке бабой с наполнителем с различными K_M и K_{IM} имеет вид:

$$A^* = 1,132 \cdot \frac{\Delta H_{\Pi}}{H_{\text{заг}}} \quad (18)$$

На основании уравнения (18) путем умножения A^* на основные параметры, характеризующую реальную поковку, была получена формула для определения работы деформации при осадке бабой с наполнителем:

$$A_{\text{деф}} = A^* \cdot S \cdot \sigma_s \cdot H_{\text{заг}} = 1,132 \cdot \Delta H_{\Pi} \cdot S \cdot \sigma_s \quad (19)$$

С учетом масштабного коэффициента $k = 4,58$, используемого при проведении экспериментальных исследований, получаем формулу для определения работы деформации при осадке на молотах стальных цилиндрических заготовок бабой с наполнителем с $K_M = 0,15 \dots 0,35$ и $K_{IM} = 0,2 \cdot 10^{-6} \dots 300 \cdot 10^{-6}$ на последнем ударе:

$$A_{\text{деф}} = 2,18 \cdot 10^3 \cdot \Delta H \cdot S \cdot \sigma_s \quad (20)$$

Величина деформации заготовки на последнем ударе ΔH , входящая в формулу (20), обычно не превышает $(5 \dots 10)\%$ от исходной высоты заготовки $H_{\text{заг}}$.

Величину напряжения текучести σ_s определяют с помощью соответствующих диаграмм деформирования стали при данных температурно-скоростных условиях деформирования. Также за величину σ_s для сталей можно принять предел прочности $\sigma_{\text{вТ}}$ при температуре окончанияковки T . С учетом рекомендаций А.В. Ребельского по определению величины σ_s формула для определения работы деформации на последнем ударе при осадке на молотах бабой с наполнителем примет вид:

$$A_{\text{деф}} = 20,1 \cdot 10^2 \cdot (1 - 0,0005 \cdot D_{\text{пок}}) \cdot \Delta H \cdot S \cdot \sigma_{\text{вТ}} \quad (21)$$

Ковку на молотах проводят за несколько ударов. При последнем ударе молота возникают наибольшие силы деформирования и достигается наименьшая величина осадки за весь процесс. В связи с этим было сделано предположение, что для совершения экономичной осадки за последний удар необходима определенная работа деформации и соответствующая энергия падающих частей, которая будет заведомо достаточна для получения экономичной осадки за предыдущие удары. При этом также предполагается, что КПД удара не меньше определенной величины. Таким образом, расчет необходимой массы падающих частей ковочного молота можно проводить по последнему удару молота при осадке заготовки.

Величину работы пластической деформации $A_{\text{деф}}$ при осадке можно определить по формуле:

$$A_{\text{деф}} = F_{\text{сред}} \cdot \Delta H_{\Pi}, \quad (22)$$

где $F_{\text{сред}}$ — средняя сила деформирования в течение последнего удара молота.

Расчеты фактических значений $F_{\text{сред}}$ и $A_{\text{деф}}$, проведенные по данным экспериментальных исследований процесса ударного деформирования при осадке свинцовых заготовок бабой с наполнителем позволили определить значения средней силы деформирования и работы деформации:

$$F_{\text{сред}} \approx 0,63 \cdot F_{\text{наиб}} \quad \text{и} \quad A_{\text{деф}} = 0,63 \cdot F_{\text{наиб}} \cdot \Delta H_{\text{п}}, \quad (23)$$

где $F_{\text{наиб}}$ – наибольшая сила деформирования в окончательный момент последнего удара молота.

Рассчитанная по полученным формулам работа деформации при осадке заготовок на последнем ударе молота составляет некоторую определенную часть от всей запасенной падающими частями молота энергии удара L , которую можно определить по формуле:

$$L = G_{\phi} \cdot V_y^2 / 2, \quad (24)$$

где G_{ϕ} – фактическая масса падающих частей молота, кг; $G_{\phi} = 1,25 \cdot G_{\text{ном}}$; $G_{\text{ном}}$ – номинальная масса падающих частей молота, кг; V_y – начальная скорость бабы молота при ударе (для ковочных молотов $V_y = 5 \dots 9$ м/с).

Для $V = 7$ м/с получаем:

$$L = 30,6 \cdot G_{\text{ном}}, [\text{кДж}] \quad (25)$$

Согласно полученных экспериментальных данных при осадке стандартной бабой средний КПД удара $\eta_y = 0,7 \dots 0,8$, а при осадке бабой с наполнителем – $\eta_y = 0,86 \dots 0,92$.

Работа, необходимая для деформирования заготовки, равна:

$$A_{\text{деф}} = \eta_y \cdot L. \quad (26)$$

Принимая величину $\eta_y = 0,89$, получаем

$$A_{\text{деф}} \approx 27 \cdot G_{\text{ном}}, [\text{кДж}]. \quad (27)$$

Приравняв необходимую работу деформации заготовки к работе, определенной по формулам (23) и подставив соответствующие значения $F_{\text{наиб}}$, определяемые по формуле Э. Зибеля, получаем формулу для нахождения массы падающих частей молота на последнем ударе при осадке заготовок бабой с наполнителем:

$$G_{\text{ном}} = 54 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,0005 \cdot D_{\text{пок}}) \cdot \sigma_{\text{вТ}} \cdot S \cdot \left[1 + 0,17 \frac{D_{\text{пок}}}{H_{\text{пок}}} \right] \cdot \Delta H. [\text{кг}] \quad (28)$$

Также величину $G_{\text{ном}}$ можно определить с помощью номограммы, представленной на рис.10.

Формула (28) показывает зависимость необходимой для осадки массы падающих частей молота от основных факторов: высоты, диаметра и площади поперечного сечения поковки, величины деформации заготовки на последнем ударе и величины $\sigma_{\text{вТ}}$, зависящей от температуры окончанияковки при использовании бабы молота с наполнителем.

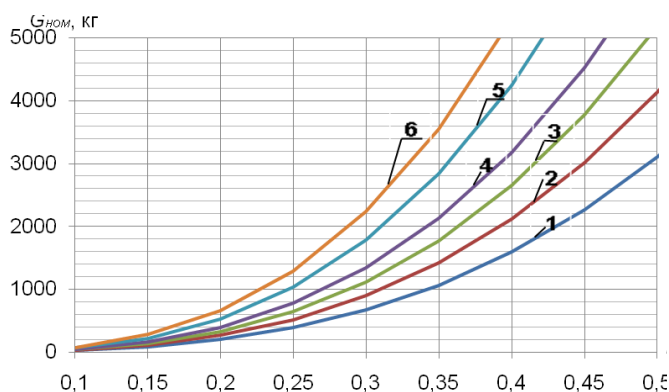


Рис.10. Номограмма для определения массы падающих частей молота $G_{ном}$: 1 - $\sigma_{сТ} = 15$ МПа; 2 - $\sigma_{сТ} = 20$ МПа; 3 - $\sigma_{сТ} = 25$ МПа; 4 - $\sigma_{сТ} = 30$ МПа; 5 - $\sigma_{сТ} = 40$ МПа; 6 - $\sigma_{сТ} = 45$ МПа

Предлагаемые формулы (21) и (28) применимы при расчете осадки средних и низких цилиндрических стальных заготовок. При осадке высоких заготовок следует учитывать неравномерность распределения деформации и двойное бочкообразование, что приводит к некоторому повышению необходимых сил деформирования, что можно учесть поправочным коэффициентом равным 1,1...1,2. Данные формулы пригодны для расчетов при мелкосерийном и единичном производстве поковок. При этом возможно применение молотов с меньшей массой падающих частей при условии увеличения количества ударов при ковке.

В результате проведенных исследований процесса ударного деформирования при осадке предложена конструкция и методика расчета основных параметров бабы ковочного молота с наполнителем, применение которой позволяет увеличить КПД удара (до 1,15 раз) при деформировании на молотах, использовать кузнечное оборудование меньшей мощности, сократить число ударов молота, повысить точность поковок, а также увеличить производительность работы оборудования и обеспечить экономию энергии по сравнению с использованием стандартной бабы ковочного молота.

Схемы бабы ковочного молота с наполнителем показаны на рис.11-12. Предлагаемая баба молота состоит из корпуса 1, крышки 2, пружины 3 для фиксации наполнителя 4 в виде металлических шариков, размещенных во внутренней кольцевой полости с наружным и внутренним диаметрами $D_{нар}$ и $D_{внутр}$ и глубиной H (рис.11).

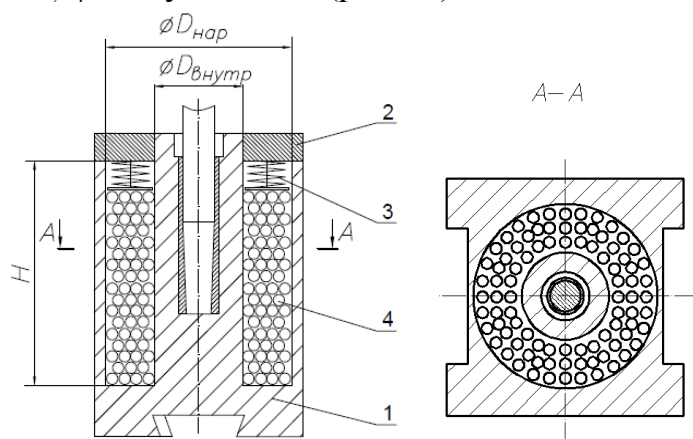


Рис.11. Схема бабы ковочного молота с наполнителем с внутренней кольцевой полостью: 1 – корпус бабы; 2 – крышка бабы; 3 – пружины; 4 – наполнитель (шарики)

Внутренняя полость также может быть выполнена в виде нескольких отверстий количеством m штук, диаметром $D_{цил}$ и глубиной H (рис.12).

Материал шариков - сталь ШХ15 (ГОСТ 3722-81). Пружины 3 поджимают шарики 4 с силой, равной или большей веса всех шариков $m_{шар}$:

$$F_{пруж} \geq m_{шар} \cdot g, [Н], \quad (29)$$

где $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$.

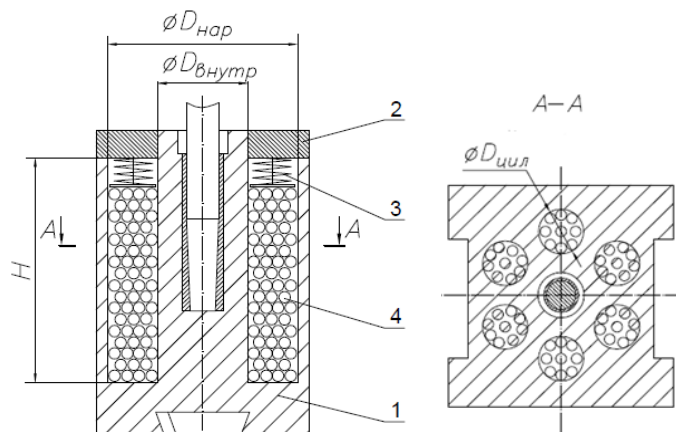


Рис.12. Схема бабы ковочного молота с наполнителем с внутренней полостью в виде N отверстий: 1 – корпус бабы; 2 – крышка бабы; 3 – пружины; 4 –наполнитель (шарики)

При этом согласно полученных данных, отношение массы одного шарика $m_{ш}$, засыпаемых в бабу, к массе падающих частей молота G должно составлять $K_{IM} = 280 \cdot 10^{-6}$, а отношение массы всех шариков $m_{шар}$ к массе падающих частей молота G должно составлять $K_M = 0,17$.

1. Размеры и масса шариков, засыпаемых во внутреннюю полость бабы молота с наполнителем:

- масса и диаметр одного шарика, мм:

$$m_{ш} \leq K_{1м} \cdot G, \quad (30)$$

$$D_{шар} \leq 0,062 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[3]{K_{1м} \cdot G}, \quad (31)$$

- масса всех шариков, кг:

$$m_{шар} \leq K_M \cdot G, \quad (32)$$

- суммарный объем всех шариков, мм³:

$$V_{шар} \leq \frac{K_M \cdot G \cdot 10^6}{7,85}, \quad (33)$$

2. Размеры внутренней полости бабы молота с наполнителем:

- объем внутренней полости, мм³:

$$V_{полости} \leq \frac{V_{шар}}{\xi} = \frac{K_M \cdot G \cdot 10^6}{\xi \cdot 7,85}, \quad (34)$$

где $\xi = 0,7 \dots 0,74$ - коэффициент заполнения пространства (меньшие значения принимают для больших диаметров шарика $D_{шар}$);

- размеры внутренней кольцевой полости ($D_{нар}$ и $D_{внутр}$ - наружный и внутренний диаметр полости; H – глубина полости, м) определяют в зависимости от наружных размеров корпуса бабы с учетом конструктивных возможностей ее изготовления и критерию прочности при эксплуатации из соотношения:

$$V_{\text{полости}} = \frac{\pi \cdot H}{4} \cdot (D_{\text{нар}}^2 - D_{\text{внутр}}^2) = \frac{K_M \cdot G \cdot 10^6}{\xi \cdot 7,85}, \quad (35)$$

а в случае выполнения внутренней полости в виде нескольких отверстий ($D_{\text{цил}}$ и H – диаметр и глубина отверстия, м) – из соотношения

$$V_{\text{полости}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{цил.углуб}}^2}{4} \cdot H \cdot m = \frac{K_M \cdot G \cdot 10^6}{\xi \cdot 7,85}, \quad (36)$$

где m – количество цилиндрических отверстий.

Наружные размеры корпуса 1 бабы ковочных паровоздушных молотов определяют в зависимости от массы бабы

$$m_{\text{бабы}} = G_{\text{ном}} - M_{\text{штока}} - M_{\text{поршня}} - M_{\text{инстр}}, \quad [\text{кг}] \quad (37)$$

где $M_{\text{штока}}$ и $M_{\text{поршня}}$ – массы штока и поршня согласно ГОСТ 9752-85; $M_{\text{инстр}} \leq 0,25 \cdot G$ – масса инструмента (бойка).

Корпус бабы может быть изготовлен из сталей 45, 35Х, 40ХН и 40ХНЗ. Для закрепления верхнего бойка в нижней части бабы молота делают паз, размеры которого назначают согласно ГОСТ 6039-82.

Для выбора ковочного молота нужно провести расчет необходимой работы деформации $A_{\text{деф}}$ и массы падающих частей $G_{\text{ном}}$ ковочного молота при использовании бабы молота с наполнителем по формулам (21) и (28).

В работе приведен пример расчета для выбора ковочного молота для проведения осадки заготовок, включающий определение работы деформации при осадке бабой молота с наполнителем и массы падающих частей ковочного молота при использовании бабы молота с наполнителем, расчет полной работы деформации при осадке и число ударов молота, а также определение основных параметров бабы молота с наполнителем в виде стальных шариков: масса и диаметр одного шарика, масса всех шариков, сила поджатия шариков, объем внутренней полости бабы молота с наполнителем по формулам (29)-(37).

Также приведены рекомендации по модернизации ковочного паровоздушного молота двойного действия мостового типа модели М1545 с массой падающих частей 3150 кг, который используется в кузнечном цехе ремонтно-инструментального завода ОАО «КамАЗ».

В заключении приведены основные результаты и выводы по работе.

Приложения содержат отдельные результаты проведенных экспериментально-теоретических исследований, текст разработанной программы расчета процесса удара в зернистых средах, копии патентов Российской Федерации на предложенные в работе технические решения, а также заключения машиностроительных предприятий о применении результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе изложены научно обоснованные технические решения, состоящие в повышении эффективности ударного деформирования (КПД удара) при осадке на ковочных молотах, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие машиностроения и страны.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования позволили получить следующие основные результаты и сделать выводы:

1. На основе проведенного анализа современного состояния процессов ударного деформирования на ковочных молотах установлено, что основным недостаткомковки на молотах является низкий КПД удара. При этом большинство известных решений задач упругопластического ударного взаимодействия тел и основанные на них методики проектирования технологических процессовковки на молотах не учитывают закономерности упругопластического удара, механические свойства заготовки при данных температурно-скоростных условиях и волновые процессы, происходящие в заготовке при ударном деформировании.

Установлено, что перспективным направлением повышения эффективности процесса ударного деформирования на ковочных молотах является увеличение продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой, позволяющее повысить КПД и производительность молота, снизить расход энергии и затраты на производство.

2. Разработана методика экспериментально-теоретических исследований процесса ударного деформирования при осадке заготовок на ковочном молоте (копре) в условиях целенаправленного увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой при использовании предложенной конструкции бабы молота (копра) с наполнителем в виде стальных шариков.

3. Проведенные на основе разработанной методики исследования особенностей формоизменения, деформированного состояния и энергосиловых параметров осадки заготовок на ковочном молоте (копре) в условиях целенаправленного увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой позволили:

- установить, что применение бабы молота (копра) с наполнителем в виде стальных шариков для осадки заготовок приводит к увеличению продолжительности нагрузочной фазы удара (до 3 раз), увеличению интенсивности формоизменения и степени деформации заготовок (от 1,1 до 1,2 раза), снижению силы деформирования (до 1,4 раза) и увеличению работы пластической деформации и КПД удара (до 1,15 раза) по сравнению с осадкой стандартной бабой, причем наибольшее влияние имело место при использовании бабы молота с наполнителем при диаметре шариков 0,012 м и отношении массы шариков к общей массе бабы 0,15;

- установить, что уменьшение отношения массы заготовки к массе бабы молота (копра) от 0,026 до 0,017 приводит к увеличению продолжительности нагрузочной фазы удара (до 1,3 раза), увеличению интенсивности формоизменения и степени деформации заготовок (в 1,1...1,3 раза), снижению сил деформирования (в 1,8...2,2 раза) и увеличению работы пластической деформации и КПД удара (до 1,13 раза).

Построенные на основе разработанной методики динамические диаграммы деформирования свинцовых заготовок при скоростях деформации 153,3; 288,8 и 533,9 с⁻¹, соответствующих условиям горячего деформирования на ковочных молотах с массой падающих частей от 1 до 5 т и со скоростями удара до 12 м/с, можно использовать для анализа напряженного состояния и определения сил деформирования при динамическом нагружении.

4. Разработаны математические модели процесса ударного деформирования заготовок при осадке на ковочных молотах в виде уравнений регрессии, описывающих зависимости относительной пластической деформации заготовок от параметров бабы молота с наполнителем и от отношения массы заготовки к массе бабы молота.

Анализ полученных уравнений регрессии позволил определить наиболее целесообразные значения: отношения массы одного шарика к массе бабы молота с наполнителем ($280 \cdot 10^{-6}$), отношения массы всех шариков к массе бабы (0,17), а также отношения массы заготовки и массы бабы молота, равного или меньшего (0,02), при которых возможно получение наибольшей относительной деформации заготовок при заданной энергии ковочного молота и которые можно использовать при разработке технологических процессовковки на молотах.

Проведенное компьютерное моделирование процесса ударного деформирования заготовок при осадке на ковочных молотах в пакете прикладных программ «Динамика-2» и разработанной программе расчета процесса удара в зернистых средах согласно расчетных схем позволило:

- установить, что при осадке заготовок пустотелым стержнем с шариками диаметром 0,012 м происходит увеличение продолжительности нагрузочной фазы удара (до 1,5 раза) и относительной деформации заготовок (до 1,2 раза), снижение силы деформирования (до 1,2 раза) и увеличение работы пластической деформации (до 1,15 раза) по сравнению с осадкой сплошным стержнем;

- показать возможность использования разработанной программы расчета процесса удара в зернистых средах при проектировании технологических процессовковки на молотах для определения наиболее целесообразных параметров бабы молота с наполнителем.

5. Разработана методика расчета основных параметров бабы ковочного молота с наполнителем в виде стальных шариков, применение которой обеспечивает повышение эффективности ударного деформирования на ковочных молотах.

6. Получены соотношения по определению работы деформации и массы падающих частей ковочного молота при деформировании бабой молота с наполнителем и разработаны рекомендации по проектированию технологических процессовковки на молотах, позволяющие увеличить эффективность

ударного деформирования на молотах и производительность работы оборудования, снизить расход энергии и затраты на производство.

Разработанные рекомендации по модернизации ковочного паровоздушного молота двойного действия мостового типа модели М1545 с массой падающих частей 3150 кг планируются к применению в кузнечном цехе ремонтно-инструментального завода ОАО «КамАЗ», будут использованы и опробованы на ОАО «ТЯЖПРЕССМАШ». Результаты работы также планируются к применению в кузнечном цехе ОАО «МУРОМТЕПЛОВОЗ» и в ОАО «НПО «СПЛАВ».

Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Машины и технология обработки металлов давлением» ФГБОУ ВПО Московский государственный индустриальный университет для подготовки студентов и бакалавров, при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также в научно-исследовательской работе студентов и аспирантов.

Разработанные конструкции бабы молота и устройств для увеличения времени удара при деформировании заготовок на молотах защищены патентами Российской Федерации (патенты РФ № 92368, 2386512, 94182, 96804, 2438825) и могут быть использованы в кузнечных цехах машиностроительных предприятий для повышения эффективности производства.

Результаты работы могут быть использованы для повышения КПД удара при протяжке, прошивке и других ковочных операциях на молотах, при калибровке на штамповочных молотах, повышения стойкости деталей молота (например, штока) и стойкости инструмента, снижения трудо- и металлоемкости, энергосбережения и сокращения сроков производства, а также для повышения эффективности работы технологических машин ударного действия различного назначения (горных и сваебойных машин, дизель - молотов).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

Монография

1. Лавриненко В.Ю. Расчет технологических процессовковки на молотах при деформировании бабой молота с наполнителем: Монография. М.: МГИУ, 2013. 99 с.

В изданиях, входящих в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук»

2. Феофанова А.Е., Лавриненко В.Ю. К вопросу повышения эффективности удара при осадке // Известия ТулГУ. Технические науки. (Вып.5, Ч.3). Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 208-213.

3. Феофанова А.Е., Лавриненко В.Ю. Определение коэффициента полезного действия удара при осадке цилиндрических заготовок // Кузнечно-

- штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2012. №1. С.13-18.
4. Лавриненко В.Ю. Влияние массы падающих частей молота и массы заготовки на эффективность ударного деформирования заготовки при осадке // Машиностроение и инженерное образование. 2012. №1. С.2-6.
5. Феофанова А.Е., Лавриненко В.Ю. Экспериментальные исследования процесса удара при осадке цилиндрических заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 2. С. 12-15.
6. Численное моделирование процесса удара при осадке цилиндрических заготовок / В.Ю. Лавриненко [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №5. С.12-16.
7. Лавриненко В.Ю. Определение энергосиловых параметров процесса ударного деформирования при осадке цилиндрических заготовок // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2012. №7. С.24-28.
8. Феофанова А.Е., Лавриненко В.Ю. Построение математической модели процесса удара при осадке цилиндрических заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №11. С.16-18.
9. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е. Метод повышения коэффициента полезного действия удара при осадке на молотах // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2012. №12. С.13-20.
10. Семенов Е.И., Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е. К вопросу повышения эффективности ударного деформирования на ковочных молотах // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. №1. С.26-27.
11. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е. Расчет энергосиловых параметров ковочного молота // Известия ТулГУ. Технические науки. (Вып.1, Ч.1). Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С. 58-67.
12. Построение динамических диаграмм деформирования свинцовых заготовок методом прямого удара на газодинамической копровой установке / В.Ю. Лавриненко [и др.] // Вестник машиностроения. 2013. №2. С.11-14.
13. Лавриненко В.Ю. Проектирование технологических процессовковки на молотах, оснащенных бабой с наполнителем // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2013. №3. С.26-30.
14. Лавриненко В.Ю., Баженов В.Г., Павленкова Е.В. Компьютерное моделирование процесса ударного деформирования на ковочных молотах / Известия ТулГУ. Технические науки. (Вып.1, Ч.1). Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С. 20-28.
15. Исследование процесса горячего деформирования заготовок при осадке на молотах / В.Ю. Лавриненко [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. №4. С.16-19.
16. Лавриненко В.Ю. Определение сил деформирования и работы деформации при осадке на молотах // Известия ТулГУ. Технические науки. (Вып.1, Ч.1). Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С.146-149.

17. Лавриненко В.Ю., Баженов В.Г., Павленкова Е.В. Методика численного моделирования процесса удара при деформировании заготовок на молотах // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2013. №5. С.21-25.
18. Лавриненко В.Ю., Семенов Е.И., Феофанова А.Е. Проектирование технологических процессовковки на молотах / Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. Рыбинск: Изд-во РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2013. №1(24). С. 68-72.
19. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е., Семенов Е.И. Экспериментальное исследование удара при осадке на молотах в условиях горячего деформирования // Известия МГТУ «МАМИ». Технология машиностроения и материалы. (Т.2. №2 (16)). М.: МГТУ «МАМИ», 2013. С.191-194.
20. Лавриненко В.Ю., Семенов Е.И., Феофанова А.Е.. Расчет процессов осадки на молотах при деформировании бабой молота с наполнителем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. №1. С.10-16.
21. Лавриненко В.Ю. Расчет технологических процессов осадки и протяжки бабой молота с наполнителем // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2014. Вып.4. С.35-42.
22. Лавриненко В.Ю. Формоизменение цилиндрических заготовок при осадке бабой молота с наполнителем // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2014. Вып.4. С.70-73

Патенты

23. Патент на полезную модель РФ № 92368. Устройство для регулирования времени удара / В.Ю. Лавриненко, Е.И. Семенов, А.Е. Феофанова. опубл. 20.03.2010. Бюл.№8.
24. Патент на изобретение РФ № 2386512. Устройство для управления временем удара при деформировании заготовок на молоте. / А.Е. Феофанова, Е.В. Асаева, А.В. Козырев, В.Ю. Лавриненко, Е.И. Семенов. опубл. 20.04.2010. Бюл.№11.
25. Патент на полезную модель РФ № 94182. Устройство бабы молота с контролируемым временем удара при деформировании заготовки. / А.Е.Феофанова, В.Ю. Лавриненко, Е.И. Семенов. опубл. 20.05.2010. Бюл.№14.
26. Патент на полезную модель РФ № 96804. Баба молота / А.Е.Феофанова, В.Ю. Лавриненко, Е.И. Семенов. опубл. 20.08.2010. Бюл.№23.
27. Патент на изобретение РФ № 2438825. Баба молота / А.Е. Феофанова, В.А. Демин, С.А. Евсюков, В.Ю. Лавриненко, Е.И. Семенов. опубл. 10.01.2012. Бюл.№1.

Другие публикации

28. Лавриненко В.Ю., Семенов Е.И. Экспериментальные исследования процесса осадки в зависимости от энергии и продолжительности удара // Сб. науч. трудов VIII Международной конференции «Молодые ученые – промышленности, науке и профессиональному образованию: проблемы и новые решения». М.: МГИУ, 2009. С.146-150.

29. Lavrinenko V.Yu., Semenov E.I. Research of upsetting process by impact // Сб. трудов международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в науке, технике и образовании». М.: МГУПИ, 2009. С.44-49.
30. Лавриненко В.Ю., Семенов Е.И. Исследование процесса ударного деформирования при осадке / Сб. трудов XXV юбилейной международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в науке, технике и образовании». М.: МГУПИ, 2009. С.103-110.
31. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е. Исследования влияния параметров удара на формоизменение цилиндрических заготовок при осадке // Материалы 77-й Международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». Книга 6. М.: МГТУ «МАМИ», 2012. С.139-144.
32. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е., Семенов Е.И. Математическая модель процесса ударного деформирования при осадке заготовок специальной бабой // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении и двигателестроении». В 2-х частях. Ч.II. Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2012. С.255-259.
33. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е., Семенов Е.И. Исследование удара при осадке на молотах // Сб. научных трудов международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем». Вып. 133. Севастополь: СевНТУ, 2012. С.287-292.
34. Лавриненко В.Ю. Увеличение коэффициента полезного действия удара при деформировании на ковочных молотах // Materialy IX mezinárodní vědecko - praktická konference «Moderní vymoženosti vědy – 2013». Díl 77. Technické vědy. Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2013. С.26-28.
35. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е. Методика проектирования процессовковки на молотах // Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki - 2013». Volume 30. Techniczne nauki. Budownictwo i architektura. Przemysł: Nauka i studia, 2013. С.9-14.
36. Лавриненко В.Ю. Изучение влияния отношения массы заготовки и массы падающих частей молота на эффективность ударного деформирования // Материалы за 9-а международна научна практична конференция «Бъдещите изследвания». Том 29. Технологии. София: «Бял ГРАД-БГ», 2013. С.80-83.
37. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е. Использование бабы молота с наполнителем при осадке// Materialy IX mezinárodní vědecko - praktická konference «Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2013». Díl 28. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2013. С.39-41.
38. Лавриненко В.Ю. Баба молота с контролируемой продолжительностью удара при деформировании // Materialy IX mezinárodní vědecko - praktická

conference «Dny vědy – 2013». Díl 35. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2013. С.60-63.

39. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е. Устройство для регулирования продолжительности удара при деформировании на молотах // *Materialy IX mezinárodní vědecko - praktická conference «Dny vědy – 2013»*. Díl 35. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2013. С.64-66.

40. Лавриненко В.Ю. Исследование особенностей формоизменения заготовок при осадке на молотах // *Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa przestrzeń Europy - 2013»*. Volume 35. Techniczne nauki: Przemysł. Nauka i studia, 2013. С.35-38.

41. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е., Семенов Е.И. Математические модели процесса ударного деформирования на молотах // *Сб. научных трудов международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем»*. Вып. 137. Севастополь: СевНТУ, 2013. С.179-184.

42. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е. Увеличение степени деформации заготовок при осадке бабой молота с наполнителем // *Новый университет. Технические науки*. 2013. №2(12). С.29-31.

43. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е., Семенов Е.И. Повышение коэффициента полезного действия удара при деформировании на ковочных молотах // *сб. науч. ст. V Международной научно-технической конференции «Машиностроение - основа технологического развития России ТМ-2013»*. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. С. 239-242.

44. Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е. Осадка на ковочных молотах при использовании бабы молота с наполнителем // *Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г.Красноярска*. Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2013. Электронный ресурс: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/section056.html>.

Подписано к печати
Издательство МГИУ

Зак.

Объем 2 п.л. Тир. 100