

На правах рукописи

Шагалеев Руслан Ринатович

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ГИБКЕ НА  
ЛИСТОШТАМПОВОЧНЫХ МОЛОТАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БАБЫ  
МОЛОТА С НАПОЛНИТЕЛЕМ**

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва, 2025

Работа выполнена на кафедре «Технологии обработки материалов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

**Научный руководитель:** Лавриненко Владислав Юрьевич  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** Ерисов Ярослав Александрович  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой обработки металлов  
давлением ФГАОУ ВО «Самарский  
национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева»

Арсентьева Ксения Сергеевна  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент Высшей школы машиностроения,  
Института машиностроения, материалов и  
транспорта ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого»

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Московский политехнический  
университет»

Защита состоится « » 2025 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета 24.2.331.01 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок 8-499-263-66-33, доб. 36-28

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим  
направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте  
[www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан « » 2025 г.  
Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.331.01  
кандидат технических наук, доцент



Плохих А.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В условиях современного производства для изготовления различных деталей авиационной техники широко применяют гибку листовых заготовок на листоштамповочных молотах, оснащённых дешёвыми и быстро изготавляемыми свинцово-цинковыми штампами. Простота конструкции и управления, невысокая стоимость, а также универсальность листоштамповочных молотов, позволяющая выпускать большую номенклатуру деталей, снижает затраты на оборудование и инструмент при единичном и мелкосерийном производстве. В настоящее время многие отечественные авиастроительные предприятия (филиал ПАО «Компания «Сухой» «КнАЗ им. Ю.А. Гагарина», АО «Авиакор - авиационный завод», Луховицкий авиационный завод им. П.А. Воронина – филиал АО «РСК «МиГ» и др.) широко используют листоштамповочные молота для изготовления большой номенклатуры деталей.

Основными недостатками гибки на листоштамповочных молотах являются низкая размерная точность изготавливаемых деталей и несоответствие геометрических размеров деталей заданным на чертеже вследствие упругого пружинения детали, а также высокие трудоемкость и затраты на производство, связанные с большим количеством доводочных операций.

Одним из перспективных направлений повышения размерной точности деталей и снижения упругого пружинения при гибке на листоштамповочных молотах является увеличение продолжительности ударного взаимодействия инструмента и заготовки путем удержания падающих частей молота в нижней точке при ударе при использовании специальных устройств.

В связи с этим разработка научно обоснованных технических решений, направленных на повышение точности деталей и снижение трудоемкости при гибке на листоштамповочных молотах является актуальной. Экспериментальные и теоретические исследования процессов ударного деформирования при гибке на молотах позволяют провести их математическое описание и разработать практические рекомендации и предложения по совершенствованию технологических процессов гибки на листоштамповочных молотах, обеспечивающие получение деталей требуемого качества и снижение затрат на производство.

**Цель работы:** повышение точности деталей и снижение трудоемкости при гибке на листоштамповочных молотах за счет увеличения продолжительности ударного взаимодействия инструмента с заготовкой.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведение анализа современного состояния процессов гибки на листоштамповочных молотах.
2. Разработка методики и проведение экспериментальных исследований процесса гибки на листоштамповочном молоте в условиях целенаправленного увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой.
3. Разработка математических моделей процесса гибки заготовок на листоштамповочных молотах.

4. Разработка методики расчета основных параметров бабы листоштамповочного молота с наполнителем и предложений по совершенствованию технологических процессов гибки на листоштамповочных молотах.

5. Разработка технологического процесса изготовления детали «Зашивка» на листоштамповочном молоте для ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол».

**Объект исследования:** процесс гибки листовых заготовок на листоштамповочных молотах.

**Предмет исследования:** размерная точность деталей, особенности формоизменения и силовые параметры при гибке листовых заготовок на листоштамповочных молотах в условиях целенаправленного увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой.

**Методы исследования.** *Теоретические исследования* особенностей формоизменения, кинематических и силовых параметров процесса гибки на листоштамповочных молотах выполнены с использованием существующих положений теории обработки металлов давлением и теории удара, численного расчета и компьютерного моделирования процесса ударного взаимодействия заготовки с инструментом в среде ANSYS / LS-DYNA.

*Экспериментальные исследования* выполнены с использованием современных испытательных машин (вертикальный копер, испытательная машина УТС-250), системы высокоскоростной видеосъемки FASTVIDEO-250 и программного обеспечения FASTVIDEO LAB, автоматизированного измерительного комплекса NI 5102, высокопроизводительных компьютеров и микропроцессорной техники. Обработку опытных данных проводили с помощью методов математической статистики и теории планирования эксперимента.

**Автор защищает:**

1. Результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса гибки заготовок на листоштамповочном молоте, показывающие особенности особенностей формоизменения, кинематических и силовых параметров процесса гибки в условиях целенаправленного ограниченного увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой.

2. Результаты исследований процесса гибки заготовок с использованием бабы листоштамповочного молота специальной конструкции, позволяющей увеличить продолжительность взаимодействия инструмента и заготовки.

3. Методику конструкторско-технологического расчета основных параметров бабы листоштамповочного молота с наполнителем, применение которой увеличивает размерную точность и уменьшает упругое пружинение при гибке на листоштамповочных молотах по сравнению со стандартной бабой молота.

4. Научно-обоснованные предложения по совершенствованию технологических процессов гибки на листоштамповочных молотах, позволяющие определять основные параметры бабы молота с наполнителем и разрабатывать технологические процессы гибки заготовок на листоштамповочных молотах.

**Достоверность** полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований подтверждена их высокой сходимостью (расхождение не более 8,5%).

### **Научная новизна.**

Определена взаимосвязь параметров точности детали при гибке (угол пружинения и кривизна полки детали) на листоштамповочном молоте и продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой, заключающаяся в воздействии на заготовку дополнительной силы правки (калибровки) при увеличении продолжительности удара при удержании падающих частей молота в нижней точке при использовании бабы молота с наполнителем;

Получены зависимости угла пружинения заготовок из различных материалов (стали 10, 08Х15Н5Д2Т и 12Х18Н10Т, цветные сплавы АМг2Н, Д19АТ и Т1) от параметров гибки (угол и относительный радиус гибки) и параметров бабы молота с наполнителем (отношение массы шариков к массе бабы молота и отношение массы одного шарика к массе бабы молота) на основе построенных математических моделей процесса гибки заготовок на листоштамповочных молотах.

### **Практическая значимость.**

Разработаны предложения по совершенствованию технологических процессов гибки на листоштамповочных молотах, включающие методику расчета основных параметров бабы молота с наполнителем и рекомендации по проектированию технологических процессов гибки листовых заготовок на листоштамповочных молотах и обеспечивающие повышение точности деталей и снижение трудоемкости их изготовления;

Разработана технология гибки детали «Зашивка» на листоштамповочном молоте модели МЛ-1,5 с массой падающих частей 1500 кг с использованием бабы молота с наполнителем (для филиала ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол»), позволяющая уменьшить в 2...3 раза количество операций и снизить общую трудоемкость изготовления деталей.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора состоит в проведении теоретических и экспериментальных исследований гибки заготовок на листоштамповочном молоте, получении математических моделей процесса гибки на листоштамповочном молоте в виде уравнений регрессии, описывающих зависимости угла пружинения от параметров бабы молота с наполнителем и от отношения массы заготовки к массе бабы молота, в разработке методики расчета основных параметров бабы листоштамповочного молота с наполнителем и разработке предложений по совершенствованию технологических процессов гибки на листоштамповочных молотах.

**Реализация работы.** Разработанные предложения по совершенствованию технологических процессов гибки листовых заготовок на листоштамповочных молотах, а также разработанные рекомендации по модернизации листоштамповочного молота модели МЛ-1,5 с массой падающих частей 1500 кг планируются к применению в производственных условиях филиала ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол» (г. Нижний Новгород).

Разработанная конструкция бабы листоштамповочного молота с наполнителем защищена патентами РФ №199522 и №203749 и может быть использована в листоштамповочных цехах авиастроительных предприятий РФ для повышения точности изготавливаемых деталей, снижения трудоемкости и затрат на производство.

**Апробация работы.** Основные положения и материалы работы доложены на Международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем» (Севастополь, 2017, 2018, 2019г.), IV международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением», посвященная 60-летию д.т.н., проф. Яковлева С.С. (Тула, 2017г.), Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь, 2018, 2019г.), Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2019г.), V-й Международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением», посвященная 85-летию д.т.н., проф. Яковлева С.П. и 80-летию кафедры «Механика пластического формоизменения» (Тула, 2019г.), Международном XIV Конгрессе «Кузнец-2019» «Состояние и перспективы развития технологических процессов обработки металлов давлением и оборудования кузнечно-прессового машиностроения в современных условиях» (Рязань, 2019г.), III Международной молодежной конференции «Новые подходы и технологии системного проектирования, производства, эксплуатации и промышленного дизайна изделий аэрокосмической техники» (Москва, 2019г.), XLIV Академических чтениях по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Москва, 2020г.), Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовительных производств в машиностроении» (Москва, 2022г.).

### **Публикации.**

Основные результаты диссертации отражены в 13 научных статьях, из них 5 научных статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 2 научные статьи, индексируемые в SCOPUS и 2 патента РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав основного текста, основных выводов по работе. Общий объем диссертации составляет 157 страниц. Диссертация содержит 94 рисунка, 14 таблиц и список литературы из 119 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность рассматриваемой в работе научно-технической проблемы, сформулированы цель и задачи 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.

**В первой главе** проведен анализ существующих процессов гибки листового материала, анализ методов повышения точности и качества деталей при гибке, анализ особенностей процессов гибки на листоштамповочных молотах, анализ существующих теоретических и экспериментальных методов исследования процессов гибки на молотах и методов исследования процесса удара.

В условиях современного производства для изготовления различных деталей авиационной техники из листовых заготовок широко применяют процессы листовой штамповки. Для уменьшения издержек в условиях единичном и мелкосерийном производстве применяют свинцово-цинковые штампы, при этом распространенным оборудованием для листовой штамповки являются листоштамповочные молота простого действия.

Исследования особенностей формоизменения, напряженного и деформированного состояния, а также энергосиловых параметров при гибке проводили: Хилл Р., Ренне И.П., Давыдов В.И., Малинин Н.Н., Мошнин Е.Н., Попов Е.А., Семёнов Е.И., Романовский В.П., Норицын И.А., Калпин Ю.Г., Дёмин В.А., Жуков М.Б., Ерисов Я.А., Арсентьева К.С. и другие ученые.

Отмечено, что основными недостатками процессов гибки на листоштамповочных молотах, является: низкая точность изготавливаемых деталей вследствие их упругого пружинения, высокие трудоемкость и затраты на производство, связанные с большим количеством правочных операций и невозможность применения инструментальных штампов в единичном и мелкосерийном производстве. В ранее проведенных исследованиях Лавриненко В.Ю. и Семенова Е.И. была установлена возможность по увеличению коэффициента полезного действия и продолжительности ударного деформирования на ковочных и штамповочных молотах при удержании падающих частей молота в нижней точке с использованием бабы молота специальной конструкции.

В связи с этим было сделано предположение о возможности повышения размерной точности деталей при гибке на листоштамповочных молотах, путем увеличения времени ударного взаимодействия инструмента и заготовки при использовании специальных устройств, обеспечивающих удержание падающих частей листоштамповочного молота в нижней точке при ударе.

**Во второй главе** приведены разработанная методика и результаты экспериментальных исследований процесса гибки на листоштамповочных молотах для изучения особенностей формоизменения, кинематических и силовых параметров процесса гибки в условиях целенаправленного увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой при использовании бабы молота с наполнителем в виде стальных шариков. Разработанная методика включала выбор оборудования, оснастки, приборов, материалов и размеров заготовок, параметров гибки, а также обработку результатов экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования процесса гибки заготовок и определение параметров удара проводили на комплексе для исследований процесса гибки на молоте (копре), принципиальная схема которого представлена на Рисунке 1. Комплекс состоит из вертикального копра и системы скоростной видеосъемки с частотой записи 3000 кадров в секунду.

Для гибки заготовок на копре использовали стандартную бабу массой  $m_{бабы} = 22,4$  кг, а также бабу с наполнителем (Рисунок 2), состоящую из корпуса с внутренней полостью и засыпаемых внутрь стальных шариков диаметром 1; 2; 6 и 12 мм. Масса корпуса бабы с наполнителем была равна 14,5 кг. При этом отношение массы шариков к общей массе бабы  $K_M = m_{шар}/m_{бабы} = 0,11; 0,21$  и  $0,31$ . Для выравнивания масс бабы использовали крышки массой 5,42; 3,17 и 0,92 кг соответственно.

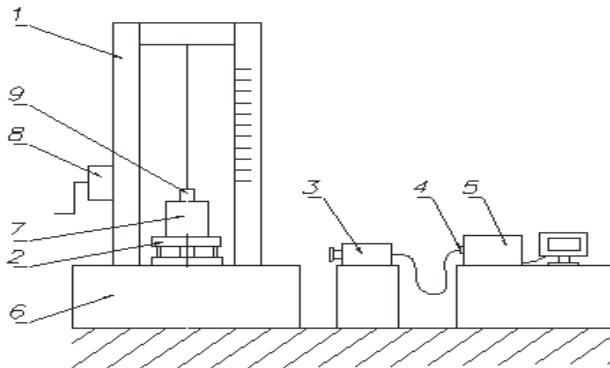


Рисунок 1. Принципиальная схема комплекса для экспериментальных исследований: 1 – стойки копра; 2 – штамп; 3 - скоростная цифровая; 4 – переходник; 5 – персональный компьютер; 6 – основание; 7 - баба; 8 - устройство подъема бабы; 9 - устройство захвата бабы

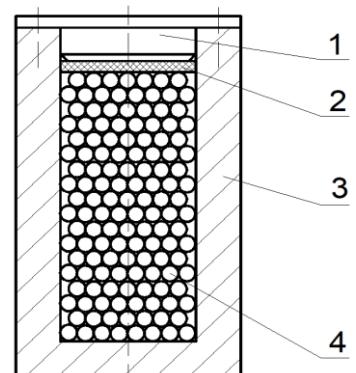


Рисунок 2. Схема бабы с наполнителем:  
1 – крышка; 2 – упругая прокладка; 3 – корпус; 4 – шарики

Гибку заготовок проводили с использованием экспериментального штампа со сменным набором пuhanсонов и матриц. При этом принимали следующие параметры экспериментов: заготовки: 20 x 40 мм, толщиной 2 мм (направление гибки – вдоль и поперек направления прокатки); материалы заготовок: сталь 10, АМг2Н, Д19АТ, Т1, сталь 08Х15Н5Д2Т, сталь 12Х18Н10Т; угол гибки  $\alpha = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ ; относительный радиус гибки: 0,5; 1,5 и 2,5; скорость бабы при ударе: 3 м/с (высота сбрасывания бабы 0,5 м).

Для проведения гибки заготовок были составлены матрицы плана полнофакторного эксперимента  $3^2$  (стандартная баба молота) и дробнофакторного эксперимента  $3^{4-2}$  (баба молота с наполнителем). При этом в качестве входных факторов эксперимента были приняты относительный радиус гибки  $R/S$ , угол гибки  $\alpha$ , отношение массы шариков к массе бабы  $K_M$  и отношение массы одного шарика к массе бабы молота  $K_{IM}$ .

В таблицах 3, 4 и 5 представлены основные результаты экспериментальных исследований гибки на листоштамповочных молотах.

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований гибки заготовок из стали 10  
стандартной бабой молота

№ опыта	Стандартная баба молота					
	Вдоль			Поперек		
	$\Delta\alpha$ , °	$\Delta$ , мм	$t$ , мс	$\Delta\alpha$ , °	$\Delta$ , мм	$t$ , мс
1	3,00	0,163	4,67 (отскок пуансона)	3,50	0,141	4,67 (отскок пуансона)
2	3,33	0,134	4,67 (отскок пуансона)	3,86	0,125	4,00 (отскок пуансона)
3	4,25	0,132	3,33 (отскок пуансона)	4,75	0,122	3,67 (отскок пуансона)
4	0,83	0,123	4,67 (отскок пуансона)	0,90	0,106	4,67 (отскок пуансона)
5	0,92	0,145	4,00 (отскок пуансона)	1,01	0,092	4,00 (отскок пуансона)
6	1,00	0,114	4,33 (отскок пуансона)	1,24	0,107	4,00 (отскок пуансона)
7	1,37	0,092	4,67 (отскок пуансона)	1,50	0,125	4,67 (отскок пуансона)
8	1,31	0,086	4,67 (отскок пуансона)	1,66	0,093	4,67 (отскок пуансона)
9	1,40	0,069	4,43 (отскок пуансона)	1,80	0,077	4,00 (отскок пуансона)

Таблица 4

Результаты экспериментальных исследований гибки заготовок из стали 10 бабой  
молота с наполнителем

№ опыта	Баба молота с наполнителем					
	Вдоль			Поперек		
	$\Delta\alpha$ , °	$\Delta$ , мм	$t$ , мс	$\Delta\alpha$ , °	$\Delta$ , мм	$t$ , мс
1	0,78	0,087	6,67 (нет отскока пуансона)	0,80	0,049	6,67 (нет отскока пуансона)
2	3,19	0,063	6,67 (нет отскока пуансона)	3,75	0,057	6,67 (нет отскока пуансона)
3	4,08	0,057	6,67 (нет отскока пуансона)	4,30	0,047	6,67 (нет отскока пуансона)
4	0,75	0,059	6,67 (нет отскока пуансона)	0,80	0,054	6,67 (нет отскока пуансона)
5	0,82	0,036	6,67 (нет отскока пуансона)	0,85	0,043	6,67 (нет отскока пуансона)
6	0,92	0,048	6,67 (нет отскока пуансона)	0,95	0,038	6,67 (нет отскока пуансона)
7	0,97	0,049	6,67 (нет отскока пуансона)	1,33	0,023	6,67 (нет отскока пуансона)
8	1,01	0,033	6,67 (нет отскока пуансона)	1,25	0,037	6,67 (нет отскока пуансона)
9	0,70	0,035	6,67 (нет отскока пуансона)	1,15	0,036	6,67 (нет отскока пуансона)

Таблица 5

Результаты экспериментальных исследований гибки заготовок из цветных сплавов АМг2Н, Д19АТ, Т1 и сталей 08Х15Н5Д2Т и 12Х18Н10Т

№ опыта	Марка материала	Стандартная баба		Баба молота с наполнителем	
		$\Delta\alpha, ^\circ$	$t, \text{ мс}$	$\Delta\alpha, ^\circ$	$t, \text{ мс}$
1	АМг2Н	0,9	4,67 (отскок пуансона)	0,19	6,67 (нет отскока пуансона)
2	Д19АТ	3,05	4,67 (отскок пуансона)	2,36	6,67 (нет отскока пуансона)
3	Т1	8,17	4,67 (отскок пуансона)	5,86	6,67 (нет отскока пуансона)
4	08Х15Н5Д2Т	10,14	4,33 (отскок пуансона)	8,46	6,67 (нет отскока пуансона)
5	12Х18Н10Т	1,8	3,33 (отскок пуансона)	1,2	6,67 (нет отскока пуансона)

При этом можно отметить увеличение продолжительности удара (до 1,3...1,8 раз) и отсутствие отскока пуансона во всех экспериментах с бабой молота с наполнителем, а также существенное снижение угла пружинения до (4,0...4,5 раза) и кривизны полки детали (до 2,5...3,0 раза) при использовании бабы молота с наполнителем. Кроме этого, при гибке с использованием свинцово-цинковых штампов была показана высокая сходимость с результатами гибки в инструментальном штампе (расхождение не более 8,5%).

С использованием разработанной программы MotionAnalize®BMSTU, пред назначенной для обработки видеоизображений и получения кинематических характеристик подвижных объектов (перемещение, скорость, ускорение), была проведена обработка полученных видеоизображений процесса гибки на молоте и были построены графики зависимости перемещения пуансона и силы деформирования от времени при гибке стандартной бабой молота и бабой молота с наполнителем для всех проведенных экспериментов. На Рисунках 3 и 4 приведены примеры полученных зависимостей для опыта №1 (гибка заготовок из стали 10).

Установлено увеличение силы гибки примерно в 1,2 раза и продолжительность ее действия на заготовку в 1,3...1,8 раза при использовании бабы с наполнителем по сравнению со стандартной бабой (Рисунок 4).

Полученные экспериментальные данные позволили предложить принципиальные схемы гибки при использовании стандартной бабы молота и бабы молота с наполнителем (Рисунок 5 и Рисунок 6), дающие качественное объяснение полученных экспериментальных данных. Можно отметить наличие этапа правки (калибровки) заготовки после окончания гибки при использовании бабы молота с наполнителем (Рисунок 6).

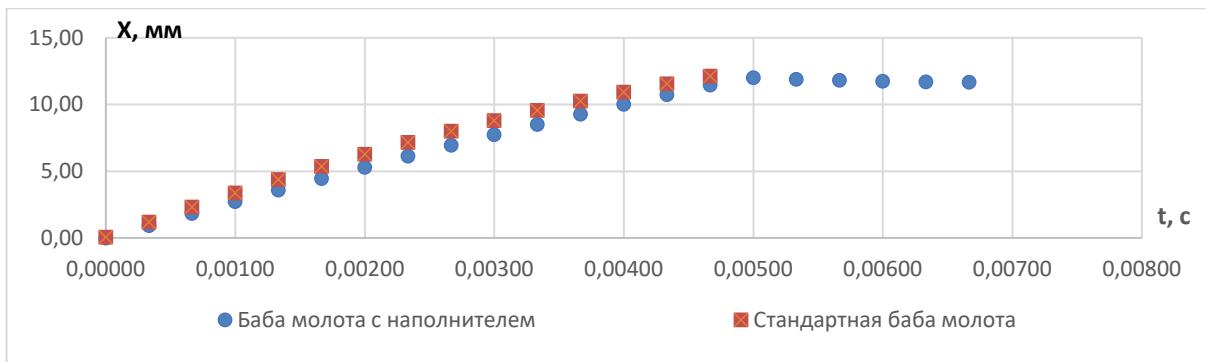


Рисунок 3. График зависимости перемещения пуансона от времени

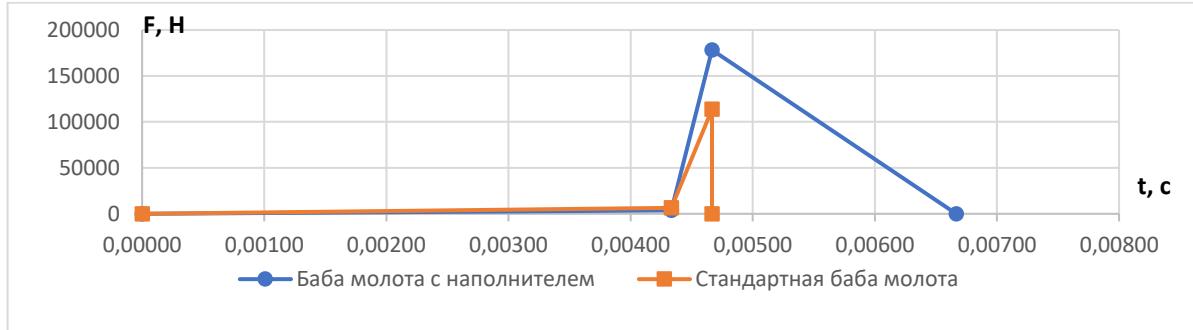


Рисунок 4. График зависимости силы деформирования при гибке от времени

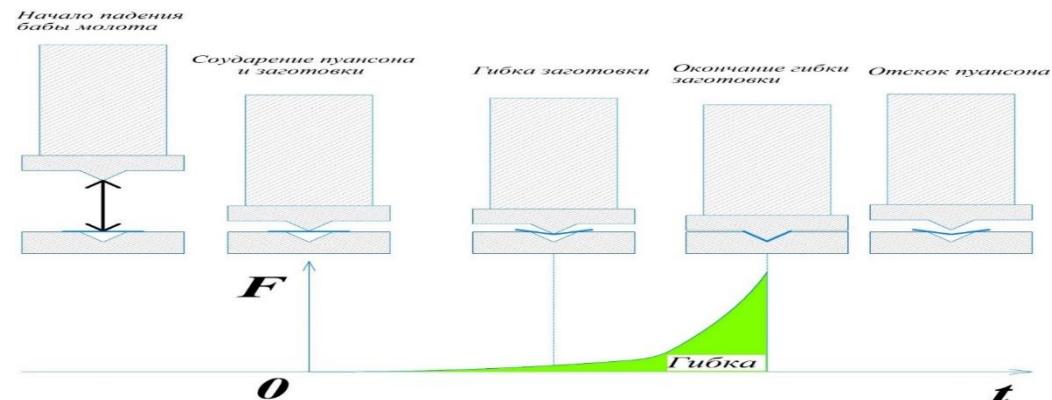


Рисунок 5. Принципиальная схема гибки заготовок при использовании стандартной бабы листоштамповочного молота

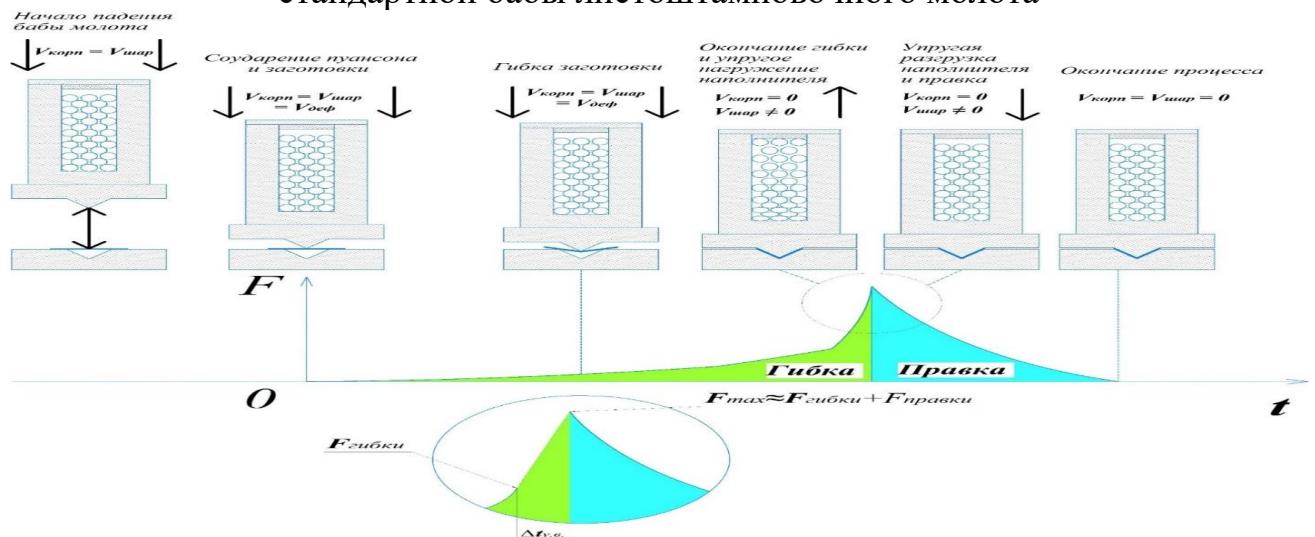


Рисунок 6. Принципиальная схема гибки заготовок при использовании бабы листоштамповочного молота с наполнителем

При этом максимальная сила деформирования при использовании бабы молота с наполнителем составляет  $F_{max} = F_{гибки} + F_{правки}$ , где  $F_{гибки}$  – сила гибки,  $F_{правки}$  – сила правки (калибровки),  $F_{правки} = F_{гибки} \cdot (1,15\dots1,2)$ .

В третьей главе на основании полученных экспериментальных данных при использовании метода многофакторного планирования были построены математические модели процесса гибки на молоте в виде уравнений регрессии, показывающих зависимости угла пружинения от угла и радиуса гибки, а также от параметров бабы молота с наполнителем: отношения массы шариков к массе бабы  $K_M$  отношение массы одного шарика к массе бабы молота  $K_{1M}$ .

- гибка стандартной бабой молота (направление прокатки вдоль заготовки):

$$\Delta\alpha = 0,106 (R/S)^2 + 0,00215\alpha^2 - 0,0109 (R/S) \cdot \alpha + 0,965 (R/S) - 0,41032\alpha + 20,09337 \quad (1)$$

- гибка стандартной бабой молота (направление прокатки поперек заготовки):

$$\Delta\alpha = 0,15 (R/S)^2 + 0,00152\alpha^2 - 0,00973 (R/S) \cdot \alpha + 0,679 (R/S) - 0,293\alpha + 14,96028 \quad (2)$$

- гибка бабой молота с наполнителем (направление прокатки вдоль заготовки):

$$\Delta\alpha = 1,44126 + 0,3 (R/S) - 0,01667\alpha + 3K_M + 2010,0051K_{1M}; \quad (3)$$

- гибка бабой молота с наполнителем (направление прокатки поперек заготовки):

$$\Delta\alpha = 1,48875 + 0,15 (R/S) - 0,01\alpha + K_M - 670,017K_{1M} \quad (4)$$

В результате анализа построенных уравнений регрессии были определены наиболее рациональные значения отношения массы одного шарика к массе бабы молота с наполнителем  $K_{1M} \geq 1,5 \cdot 10^{-6}$  и отношения массы шариков к массе бабы  $K_M \geq 0,1$ , при которых возможно получение наименьшего угла пружинения.

Также было проведено исследование основных закономерностей процесса ударного деформирования на листоштамповочных молотах с помощью компьютерное моделирование процесса гибки листовых заготовок на молоте в среде ANSYS / LS-DYNA. При проведении моделирования с использованием стандартной бабы молота была принята трехмерная (объемная) схема гибки заготовки в матрице с помощью пуансона и сплошного цилиндрического стержня (Рисунок 7, а), а с использованием бабы молота с наполнителем - трехмерная (объемная) схема гибки заготовки в матрице с помощью пуансона и пустотелого цилиндрического стержня с шариками внутри, расположенными в один столб (Рисунок 7, б).

В результате можно отметить, что имело место увеличение силы гибки до 1,2 раза и продолжительности ее действия на заготовку, что привело к уменьшению угла упругого пружинения заготовки после гибки (до 1,6 раза) по сравнению с гибким сплошным стержнем. Необходимо отметить высокую сходимость результатов экспериментов и моделирования.

Некоторое расхождение полученных результатов (до 8%) можно объяснить допущениями, принятыми можно объяснить допущениями, принятыми при моделировании в среде ANSYS / LS-DYNA.

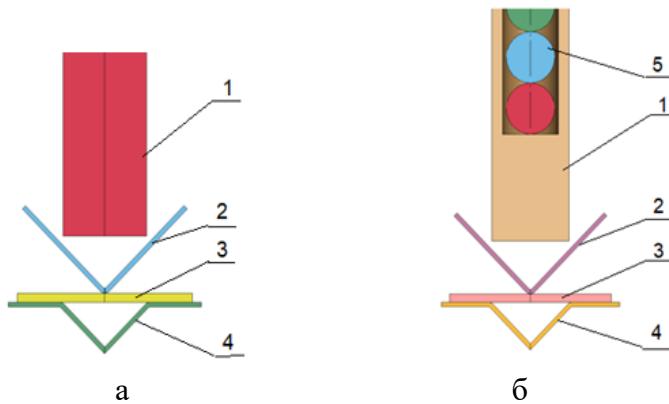


Рисунок 7. Расчетные схемы гибки листовых заготовок: а – сплошным стержнем; б – пустотелым стержнем с шариками; 1 – стержень; 2 – пуансон; 3 – заготовка; 4 – матрица; 5 – шарики

**В четвертой главе** представлена разработанная методика расчета основных параметров бабы молота с наполнителем, включающая определение массы шариков  $m_{шар} = K_M m_{бабы}$ , массы одного шарика  $m_{1шар} = K_{1M} m_{бабы}$ , объема одного шарика  $V_{1шар} = \rho m_{1шар}$ , количества шариков  $n_{шар} = \frac{m_{шар}}{m_{1шар}}$ , суммарного объема шариков  $V_{шар} = n_{шар} V_{1шар}$  и минимального объема отверстий под шарики  $V_{отв} = 1,25 V_{шар}$ .

С использованием данной методики было проведен расчет параметров бабы с наполнителем листоштамповочного молота модели МЛ-1,5с массой падающих частей 1500 кг (для филиала ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол»):

- масса бабы молота  $m_{бабы} = 1295$  кг;
- масса шариков  $m_{шар} = 142,5$  кг;
- масса одного шарика  $m_{1шар} = 0,0041$  кг;
- объем одного шарика  $V_{1шар} = 0,52 \cdot 10^{-6} \text{м}^3$ ;
- кол-во шариков  $n_{шар} = 31586$  шт.;
- суммарный объем шариков  $V_{шар} = 0,016 \text{м}^3$ ;
- объем отверстий под шарики  $V_{отв} = 0,0205 \text{м}^3$ .

На основании проведенных расчетов была спроектирована конструкция бабы с наполнителем листоштамповочного молота модели МЛ-1,5 с массой падающих частей 1500 кг (Рисунок 8).

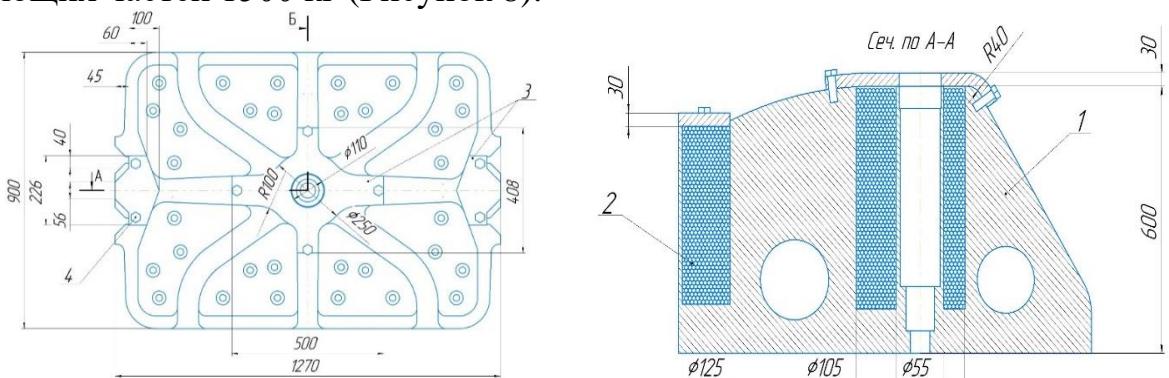


Рисунок 8. Сборочный чертеж бабы с наполнителем листоштамповочного молота модели МЛ-1,5 с массой падающих частей 1500 кг

Также были разработаны рекомендации по проектированию технологических процессов гибки листовых заготовок на листоштамповочных молотах, включающие следующие основные этапы:

1. Анализ чертежа детали.
2. Выбор оборудования в зависимости от габаритов детали и штампов (преимущественно из имеющегося на предприятии).
3. Расчет угла пружинения  $\Delta\alpha$  при гибке бабой молота с наполнителем (с использованием уравнений (3) и (4) и сравнение с допустимыми отклонениями угла гибки  $[\alpha]$ , в соответствии с чертежом:
  - если расчётное значение  $\Delta\alpha < [\alpha]$ , то правочные операции не используют;
  - если расчётное  $\Delta\alpha > [\alpha]$ , необходимы правочные операции;
  - при необходимости используют промежуточный отжиг.
4. При наличии требований чертежа детали – окончательная термическая обработка.
5. Контрольные операции.

В настоящее время в филиале ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол» деталь «Зашивка» изготавливают с использованием 11 операций: 3 операции гибки за 5 ударов, 2 промежуточных отжига, 3 операции ручной правки, 2 операции калибровки на гидравлическом прессе, окончательная термическая обработка (закалка и старение) и операция контроля (таблица 7).

Таблица 7  
Существующий технологический процесс изготовления детали «Зашивка» (по данным ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол»)

№ операции	Наименование и содержание операции	Оборудование	Оснастка и инструмент
1	Предварительная гибка(4 удара)	Листоштамповочный молот мод. МЛ-1,5	Штамп АЦ-13, набор резиновых подкладок
2	Отжиг заготовки	Печь муфельная СНОЛ	
3	Окончательная гибка(1 удар)	Листоштамповочный молот мод. МЛ-1,5	Формовочный штамп
			АЦ-13
4	Ручная правка		Формоблок, молоток
5	Отжиг заготовки	Печь муфельная СНОЛ	
6	Калибровка детали	Гидравлический пресс для штамповки эластичной средой мод. ЯО-6017А, номинальная сила 240 МН	Формоблок
7	Ручная правка		Формоблок, молоток
8	Термическая обработка (закалка и старение)		
9	Калибровка детали	Гидравлический пресс для штамповки эластичной средой мод. ЯО-6017А, номинальная сила 240 МН	Формоблок
10	Ручная правка		Формоблок, молоток
11	Контроль отсутствия трещин и геометрических размеров		Лупа ГОСТ 7594-75 Микрометр Штангенциркуль

При этом угол пружинения при гибке стандартной бабой молота, рассчитанный с использованием уравнения (1), составил  $\Delta\alpha = 2,5^\circ$ , что существенно больше допустимого отклонения  $[\alpha] = +1^\circ$  и приводит к высокой трудоемкости изготовления данной детали в соответствии с существующим технологическим процессом штамповки на стандартном оборудовании.

Угол пружинения при гибке бабой молота с наполнителем, рассчитанный с использованием уравнения (3), составил  $\Delta\alpha = 0,9^\circ$ , что меньше допустимого отклонения  $[\alpha] = +1^\circ$ . Это позволило предложить новый технологический процесс изготовления детали «Зашивка», включающий одну операцию гибки за 2 удара, окончательную термическую обработку (закалка и старение), калибровку на гидравлическом прессе и контрольную операцию (таблица 8).

Разработанная технология изготовления детали «Зашивка» на листоштамповочном молоте модели МЛ-1,5 с массой падающих частей 1500 кг при использовании бабы молота с наполнителем (для филиала ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол», Нижний Новгород) позволит уменьшить в 2-3 раза количество операций и снизить общую трудоемкость изготовления детали.

Таблица 8  
Предлагаемый технологический процесс изготовления детали «Зашивка»

№ операции	Наименование и содержание операции	Оборудование	Оснастка и инструмент
1	Гибка (2 удара)	Листоштамповочный молот мод. МЛ-1,5	Штамп АЦ-13, набор резиновых подкладок
2	Термическая обработка (закалка и старение)		
3	Калибровка детали	Гидравлический пресс для штамповки эластичной средой мод. ЯО-6017А, номинальная сила 240 МН	Формоблок
4	Контроль отсутствия трещин и геометрических размеров		Лупа ГОСТ 7594-75 Микрометр Штангенциркуль

**В заключении** приведены основные результаты и выводы по работе.

**Приложения** содержат отдельные результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований, сборочные чертежи разработанных конструкций листоштамповочных молотов, копии патентов Российской Федерации на предложенные в работе технические решения, а также заключения о применении результатов работы на машиностроительных предприятиях и учебном процессе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе изложены научно обоснованные технические решения, направленные на повышение точности деталей летательных аппаратов и авиационной техники из различных материалов при гибке на листоштамповочных

молотах, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие авиастроительной отрасли промышленности.

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

1. В результате проведенного анализа существующих исследований процессов гибки установлено, что одним из направлений повышения точности деталей и снижения упругого пружинения при гибке является увеличение продолжительности ударного взаимодействия инструмента и заготовки путем удержания падающих частей молота в нижней точке при ударе при использовании специальных устройств.

2. Разработана методика экспериментальных исследований процесса гибки заготовок на листоштамповочном молоте в условиях целенаправленного увеличения продолжительности взаимодействия инструмента с заготовкой при использовании предложенной конструкции бабы молота с наполнителем в виде стальных шариков.

3. Проведенные на основе предложенной методики экспериментальные исследования процесса гибки заготовок из сталей 10, 08Х15Н5Д2Т, 12Х18Н10Т и цветных сплавов АМг2Н, Д19АТ, Т1 на листоштамповочных молотах позволили установить:

- при гибке заготовок с помощью бабы молота с наполнителем продолжительность удара увеличивается в 1,3…1,8 раза, угол упругого пружинения уменьшается до 4,5…5,0 раз и кривизна уменьшается до 2,5…3,0 раз по сравнению с гибкой стандартной бабой молота;

- показана высокая сходимость результатов гибки в свинцово-цинковых штампов с гибкой в инструментальном штампе (расхождение не более 8,5%), что позволяет рекомендовать полученные экспериментальные результаты для разработки технологических процессов гибки на листоштамповочных молотах.

4. При использовании метода многофакторного планирования эксперимента были построены математические модели процесса гибки на молоте в виде уравнений регрессии, показывающие зависимости угла пружинения от угла и радиуса гибки, а также от параметров бабы молота с наполнителем.

В результате проведенного анализа полученных математических моделей определены наиболее целесообразные параметры бабы с наполнителем:  $K_m \geq 0,11$  и  $K_{1m} \geq 1,5 \cdot 10^{-6}$ , при которых возможно получение наибольшей точности при гибке заготовок и которые можно использовать при разработке технологических процессов гибки на молотах.

5. В результате расчета процесса гибки листовых заготовок на молоте в среде ANSYS / LS-DYNA была построена математическая модель процесса гибки стандартной бабой молота и бабой молота с наполнителем в виде шариков, имеющая высокую сходимость с экспериментальными данными (расхождение не более 8%) и позволяющая определять оптимальные параметры бабы молота с наполнителем при проектировании технологических процессов гибки на листоштамповочных молотах для повышения точности и снижения трудоемкости изготовления деталей.

6. Разработаны предложения по совершенствованию технологических процессов гибки на листоштамповочных молотах, включающие методику расчета основных параметров бабы молота с наполнителем и рекомендации по проектированию технологических процессов гибки листовых заготовок на листоштамповочных молотах.

7. Разработана технология изготовления детали «Зашивка» на листоштамповочном молоте модели МЛ-1,5 с массой падающих частей 1500 кг при использовании бабы молота с наполнителем (для филиала ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол», Нижний Новгород), позволяющая уменьшить в 2...3 раза количество операций и снизить общую трудоемкость изготовления детали.

Разработанные предложения по совершенствованию технологических процессов гибки листовых заготовок на листоштамповочных молотах, а также разработанные рекомендации по модернизации листоштамповочного молота модели МЛ-1,5 с массой падающих частей 1500 кг планируются к применению в производственных условиях филиала ПАО «ОАК» - НАЗ «Сокол».

Разработанная конструкция бабы листоштамповочного молота с наполнителем защищена патентами РФ на полезную модель №199522, №203749 и может быть использована в листоштамповочных цехах авиастроительных предприятий РФ для повышения точности изготавливаемых деталей, снижения трудоемкости и затрат на производство.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ**

1. Лавриненко В.Ю., Шагалеев Р.Р. К вопросу прочности бабы ковочных и штамповочных молотов с наполнителем // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.11. Ч.1 Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 59-64. (0,32 п.л./0,15 п.л.).

2. Лавриненко В.Ю., Шагалеев Р.Р., Чуваев И.С. Исследование зависимости упругого пружинения при гибке листовых заготовок от параметров бабы листоштамповочного молота с наполнителем // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. №3. С.39-43. (0,25 п.л./0,08 п.л.).

3. Лавриненко В.Ю., Шагалеев Р.Р. Построение математической модели процесса гибки листовых заготовок с использованием бабы листоштамповочного молота с наполнителем // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. 4. С. 162-168. (0,38 п.л./0,19 п.л.).

4. Шагалеев Р.Р., Лавриненко В.Ю. Методика исследования процесса ударной гибки листовых заготовок // В книге: Новые технологии в учебном процессе и производстве. Материалы XVII Международной научно-технической конференции. Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета. 2019. С. 305-308. (0,19 п.л./0,9 п.л.).

5. Лавриненко В.Ю., Шагалеев Р.Р. Модернизация падающих частей листоштамповочных молотов для повышения размерной точности деталей при гибке // Инновационные технологии реновации в машиностроении Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии

обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана. под общ. ред. В. Ю. Лавриненко. Москва, 2019. С. 379-382. (0,19 п.л./ 0,09 п.л.).

6. V. Yu. Lavrinenko, R. R. Shagaleev. Practical investigation into piercing process using forging hammer head with filling// Materials Today: Proceedings. Volume 19, Part 5, 2019, P. 1823-1825. (0,15 п.л./ 0,07 п.л.)

7. Vladislav Y. Lavrinenko, Ruslan R. Shagaleev. The Method of Reducing of Springback Effect during Impact Bending of Sheet Steel Blanks // Materials Science Forum. 2019, Volume 973, P. 85-89. (0,25 п.л./0,12 п.л.).

8. Шагалеев Р.Р., Лавриненко В.Ю. Повышение точности деталей при гибке листовых заготовок на листоштамповочных молотах // Сборник научных статей и докладов XIV Международного Конгресса «Кузнец-2019». Рязань, 2019. С.69-77. (0,5 п.л./0,25 п.л).

9. Лавриненко В.Ю., Шагалеев Р.Р., Повышение точности деталей при штамповке на листоштамповочных молотах // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. Т.2. С. 429-430. (0,15 п.л./0,07 п.л.).

10. Шагалеев Р.Р. Повышение эффективности ударного деформирования и точности деталей при гибке на листоштамповочных молотах. // В сборнике: МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовки в машиностроении. сборник трудов Международной научно-технической конференции. Москва, 2022. С. 157-159. (0,2 п.л.).

11. Шагалеев Р.Р., Лавриненко В.Ю. Разработка технологического процесса изготовления детали «Зашивка» на листоштамповочном молоте с бабой с наполнителем // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 4. С. 148-155. (0,44 п.л. /0,22 п.л.).

12. Шагалеев Р.Р., Лавриненко В.Ю. Исследование процесса удара при гибке листовых заготовок с помощью программы анализа движения MOTIONANALYZE®BMSTU // В сборнике: Технологии разработки и отладки сложных технических систем. IX Всероссийская научно-практическая конференция. Москва, 2024. С. 394-399. (0.4 п.л./ 0.2 п.л.).

13. Шагалеев Р.Р. Экспериментальные исследования гибки заготовок из цветных сплавов и стали на листоштамповочных молотах // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.2. 2025. С.258-265. (0,44 п.л.).

### **Патенты**

14. Патент на полезную модель РФ № 199522. Баба молота / Аюпов Т.Х., Лавриненко В.Ю., Семенов И.Е., Шагалеев Р.Р., Изикаева А.И., Кошелев О.В., Чекалов В.П., Чекалов В.В. опубл. 07.09.2020. Бюл. №25.

15. Патент на полезную модель РФ № 203749. Баба листоштамповочного молота / Лавриненко В.Ю., Семенов И.Е., Демин В.А., Шагалеев Р.Р. опубл. 19.04.2021. Бюл. №11.