

На правах рукописи



Селищев Александр Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЁМНОЙ ШТАМПОВКИ
ПУТЁМ КОНТРОЛЯ МАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ
СОСТОЯНИЯ ИНСТРУМЕНТА**

Специальность

2.6.4. – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2021 г.

Работа выполнена на кафедрах «Системы пластического деформирования» и «Композиционные материалы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Научный руководитель: **- Корнилова Анна Владимировна**
доктор технических наук, доцент, директор
департамента машиностроения и приборостроения
Российского университета дружбы народов

Официальные оппоненты: **- Кожевникова Ирина Александровна**
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой металлургии, машиностроения и
технологического оборудования ФГБОУ ВО
«Череповецкий государственный университет»,
г. Череповец

- Шварц Данил Леонидович
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой обработки металлов давлением ФГАОУ
ВО «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
г. Екатеринбург

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск

Защита диссертации состоится «06» октября 2021 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.05 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория № 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета и по электронной почте paltievichar@mati.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <https://mai.ru/events/defence/>.

Автореферат диссертации разослан « ___ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Д 212.125.16, к.т.н., доцент



Палтиевич А.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Разработке и рационализации технологий горячей объёмной штамповки (ГОШ) посвящено множество работ на протяжении всей истории развитияковки и штамповки ещё со времён Д.К. Чернова и С.И. Губкина, многие из которых связаны с такими именами как И.М. Павлов, М.В. Сторожев, Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин, О.М. Смирнов и др. Сейчас активно развиваются расчетные и экспериментальные методы определения напряжений и деформаций, но для технологических процессов ГОШ пока не внедрены в полной мере в практику методики оценки влияния конструктивных параметров заготовки, штампа и технологического процесса на качественные и эксплуатационные характеристики штамповки.

Внедрение перспективных технологий часто бывает затруднено из-за низкой стойкости инструмента. Все предлагаемые ведущими учёными способы повышения ресурса штампового инструмента можно условно разделить на 3 группы: применение новых материалов и усовершенствование технологии обработки инструмента (Позняк Л.А., Степанский Л.Г., Гурьев А.М., Довнар С.А., Смирнов, М.А. и др.); внесение изменений в технологический процесс изготовления поковок (Тюрин В.А., Акаро И.Л. и др); усовершенствование конструкции инструмента (Непершин Р.И., Артеc А.Э., Сосёнушкин Е.Н., Ненашев, В.Ю. и др.).

Повышенный износ инструмента приводит к технологическому браку, риску для обслуживающего персонала, затратам на изготовление нового штампа, поэтому одним из актуальных способов повышения эффективности производства ГОШ является контроль состояния инструмента. Известные статистические зависимости стойкости штампов от конструктивно-технологических параметров штамповки (Сторожев М.В., Тетерин Г.П., Петров А.Н. и т.д.) не позволяют получить точную оценку для гравюры заданной формы и условий работы. Из физических методов неразрушающего контроля наиболее адекватные результаты дают магнитные методы, основанные на корреляции магнитных характеристик и структурного состояния материала контролируемого изделия. Значительный вклад в исследования взаимной корреляции механических и магнитных характеристик различных материалов внесли сотрудники Института физики металлов Уральского отделения РАН (Михеев М.Н., Горкунов Э.С., Бида Г.В.,

Ничипурук А.П., Костин В.Н., Царькова Т.П. и др.) и Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (Зацепин Н.Н., Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Осипов А.А. и др.). Известны патенты на способ оценки ресурса листовых штампов по величине коэрцитивной силы (ФГБОУ ВО МГТУ «Станкин») и на способ контроля по коэрцитивной силе валков прокатных станков (ПАО «Северсталь»). Однако для штампов ГОШ контроль магнитными методами ранее не применялся, а в этой области контроль состояния штампов недорогим экспресс-методом, не требующим для своей реализации высокой квалификации работника, может иметь большой экономический эффект. Поэтому исследование возможности применения и разработка данного метода является актуальной задачей для повышения эксплуатационных характеристик процесса штамповки различных поковок.

Цель исследований – повышение эксплуатационных характеристик процессов горячей объёмной штамповки путём контроля магнитными методами состояния инструмента на основе величины коэрцитивной силы инструментального материала и повышение ресурса штампов за счёт рационализации технологического процесса.

Для реализации данной цели требуется решить следующие **задачи**:

- разработать способы повышения качества кольцевых поковок путём рационализации технологического процесса и конструкции инструмента;
- провести рационализацию конструктивных и технологических параметров процесса штамповки поковки «корпус»;
- установить возможность контроля по величине коэрцитивной силы изделий из инструментальных сталей для ГОШ и формализовать характер изменения коэрцитивной силы в материале штампов ГОШ на различных этапах их изготовления и эксплуатации;
- определить величину коэрцитивной силы в материале штампов для ГОШ, соответствующую моменту выхода штампа из строя по различным критериям разрушения;
- разработать расчётный аналитико-численный метод определения стойкости штампов ГОШ различных конструкций в зависимости от величины коэрцитивной силы в материале штампа.

Объектом исследования является технологический процесс ГОШ, сопровождающийся накоплением повреждаемости материала штампов, влияющей на качество поковок.

Предметом исследования являются закономерности изменения предлагаемого параметра для диагностики накопления повреждаемости в штампах для ГОШ от материала штампа, этапа изготовления и периода эксплуатации штампа.

Научная новизна заключается в:

- разработке способа повышения эксплуатационных характеристик процесса штамповки на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП) кольцевых поковок путём рационализации технологического процесса и конструкции инструмента на основе полученной математической модели технологического процесса штамповки;
- теоретически и экспериментально установленной возможности контроля по величине коэрцитивной силы состояния материала инструмента для ГОШ, подвергающегося в ходе работы циклическим механическим и термическим нагрузкам;
- разработанном методе определения остаточного ресурса штампов ГОШ по величине коэрцитивной силы, напряжениям и температуре при эксплуатации, который позволяет повысить стабильность выхода годной продукции.
- установлении зависимостей между твёрдостью сталей 5ХНВ и 5ХНМ и величиной коэрцитивной силы материала.

Практическая значимость работы состоит в:

- разработанном на основе математической модели штамповки кольцевых поковок на КГШП программном обеспечении, которое позволяет рационализировать процесс конструкторско-технологической подготовки производства поковок данной конфигурации;
- рекомендациях по рационализации конструктивных и технологических параметров процесса штамповки поковки «корпус», позволяющих повысить заполняемость штампа;
- разработанном методе контроля по коэрцитивной силе, который может использоваться для оценки наработки и остаточного ресурса штампов ГОШ, что позволяет прогнозировать появление отклонений от требований, предъявляемых к ковке;

– результаты работы использованы при составлении учебных пособий, в учебных процессах кафедры "Композиционные материалы» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Инженерной академии РУДН, а также в производственных условиях (ЗАО «Прочность») для определения стойкости штампового инструмента.

Методология и методы исследования. Теоретические обоснования проводились на базе известных подходов теории течения металла, методов математической статистики и математического моделирования. Эксперименты проводились в условиях кафедр «Системы пластического деформирования» и «Композиционные материалы» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», термической лаборатории Инженерной академии РУДН и в кузнечном цехе АО «ММЗ «Авангард». Методы исследования выбирались исходя из постановки решаемых задач, с учётом особенностей исследуемых объектов и включают в себя: исследования коэрцитивной силы при помощи портативного коэрцитиметра с датчиком Холла модели КИМ-2М; исследования прочностных свойств при помощи портативного твердомера неразрушающего действия ТЭМП-4; моделирование инструмента и заготовок средствами SolidWorks и КОМПАС-3D; анализ напряжённо-деформированного состояния заготовок и инструмента методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM-3D; обработку данных стандартными методами математической статистики, в том числе регрессионный анализ методом Брандона; разработку программ на языке Fortran 95; совместное решение уравнений равновесия и условия пластичности; проведение испытаний с использованием гидравлических машин ИМЧ-30 и VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig.

Основные положения, выносимые на защиту:

- способ повышения эксплуатационных характеристик штамповки на КГШП кольцевых поковок на основе математической нестационарной модели технологического процесса;
- результаты экспериментальных исследований величины и характера изменений величины коэрцитивной силы в процессе изготовления и эксплуатации штампового инструмента из инструментальных сталей 5ХНВ и 5ХНМ;
- метод определения остаточного ресурса штампов ГОШ по величине коэрцитивной силы;
- математическим моделированием определена величина коэрцитивной силы

материала инструментальных сталей для штампов ГОШ, не повреждённых механическими и термическими нагрузками;

– математическим моделированием произведена оценка твёрдости сталей 5ХНВ и 5ХНМ в зависимости от величины коэрцитивной силы материала.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов обеспечивается использованием стандартных методов исследования с применением современного оборудования, прошедшего метрологическую поверку; достаточной воспроизводимостью результатов экспериментов и статистической обработкой полученных данных.

Апробация работы. Основные положения и практические результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах: студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012)»; всероссийской молодежной конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012)»; XV научной конференции «Математическое моделирование и информатика»; студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2015)»; XVII научной конференции «Математическое моделирование и информатика»; III-й Международной конференции «Научно-технический прогресс в чёрной металлургии – 2017»; конференции по космическим конструкциям и материалам (IAA Conference of Space Structures and Materials) международного научно-технического форума IAA SciTech Forum 2018, а также на научном семинаре ЗАО «Прочность», научно-техническом совете АО «ММЗ «Авангард» и заседаниях кафедр «Системы пластического деформирования» и «Композиционные материалы» ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН».

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 21 работе, в том числе: 6 – в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ; 3 – в изданиях, включенных в базу данных Scopus; в 2 монографиях и 1 учебнике.

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 158 страницах, включая 78 рисунков и 14 таблиц; состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, пяти глав, заключения, списка используемых источников в количестве 141 наименований, 10 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** проведено обоснование актуальности научных исследований, изложенных в диссертационной работе, сформулированы цели и задачи, отражена научная новизна работы, теоретическая и практическая ценность исследований.

В **первой главе** проведён анализ литературы по рассматриваемой проблеме. Были рассмотрены возможности применения средств компьютерного моделирования для определения оптимальной схемы течения металла (Фомичёв А.Ф., Володин А.И., Резников Ю.Н.). Установлено, что несмотря на универсальность применения численных методов расчёта, не стоит отказываться и от классических методов моделирования, которые менее требовательны к вычислительным ресурсам и позволяют получать стабильные результаты при своей относительной простоте (например, работы Непершина Р.И. по моделированию штамповки шестерен).

Поэтому при разработке математической модели, описывающей штамповку поковок типа «кольцо» на КГШП, принято решение использовать основные положения теории обработки металлов давлением и проектирования кузнечно-штамповочного оборудования, а также метод линий скольжения. При разработке модели учтены перспективные решения (Михайлов В.Н., Тюрин В.А. и др.), позволяющие обеспечить однородную структуру и заполняемость ручья при минимальных нагрузках на инструмент.

Отмечено, что главные достижения области повышения стойкости штампового инструмента связаны с работами Довнара С.А., Тылкина М.А., Тюрина В.А., Позняка Л.А., Акаро И.Л. и др. Показано, что существующие расчётно-аналитические подходы определения стойкости штампов ГОШ отличаются большим разбросом получаемых значений на выходе, а большинство методов неразрушающего контроля не позволяют дать количественную оценку структурных изменений в материале инструмента за исключением магнитных методов. Поэтому предлагается разработка метода прогнозирования стойкости штампов ГОШ по величине коэрцитивной силы, которая находится в обратной зависимости от размера зерна и в прямой от корня из плотности дислокаций.

Во **второй главе** описываются основные положения разработанной математической модели технологического процесса штамповки поковок типа

«кольцо» (рисунок 1, а) на КГШП, позволяющей с высокой точностью спрогнозировать заполнение штамповой полости и изменение силовых характеристик на протяжении всего технологического процесса.

За независимую переменную принято перемещение верхнего штампа. Напряжение текучести рассчитывается по скорости деформации и температуре. Изменение температуры в единицу времени определяется по тепловому балансу с учетом выделения тепла пластического деформирования, трения и теплопередачи. Для расчёта скорости и перемещения ползуна используется кинематика КГШП. Учитывается поправка на раскрытие станины, потери кинетической энергии подвижных частей пресса, вероятность заклинивания пресса.

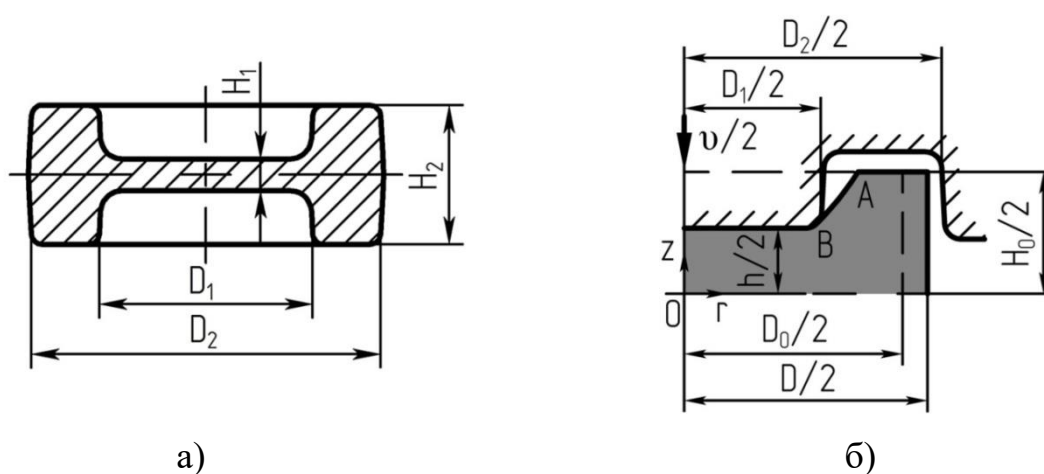


Рисунок 1 – Кольцевая поковка с непробитой перемычкой без облоя (а) и схема формоизменения заготовки на первой стадии штамповки (б).

При моделировании рассматриваются две стадии заполнения полости штампа. На рисунке 1, б показана схема формоизменения заготовки на первой стадии (приведена четверть сечения штампа, пластические области закрашены, пунктиром показан контур исходной цилиндрической заготовки). Для исключения смятия кромки заготовки при одновременном контакте с боковой стенкой D_2 и дном штампа производится расчёт оптимальных размеров D_0 и H_0 заготовки объёмом V_0 :

$$4V_0 \left(1 - \exp \frac{D_0^2 - D_2^2}{D_1^2} \right) + \pi D_0^2 (H_1 - H_2) = 0.$$

На второй стадии формоизменения происходят процессы заполнения углов кольцевой полости (рисунок 2, а) и выдавливания материала в облой (рисунок 2, б), определяемые условием равновесия жесткой зоны в кольцевой

полости. Пластические области моделируются полями линий скольжения.

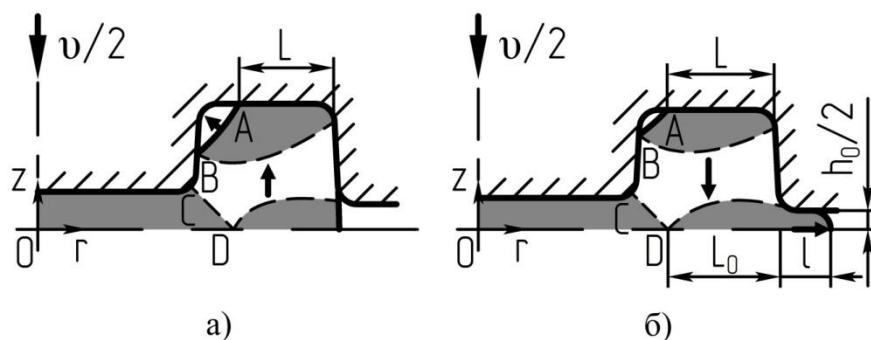


Рисунок 2 –Схема формоизменения заготовки на второй стадии штамповки: а – заполнение углов; б – выдавливание в облой

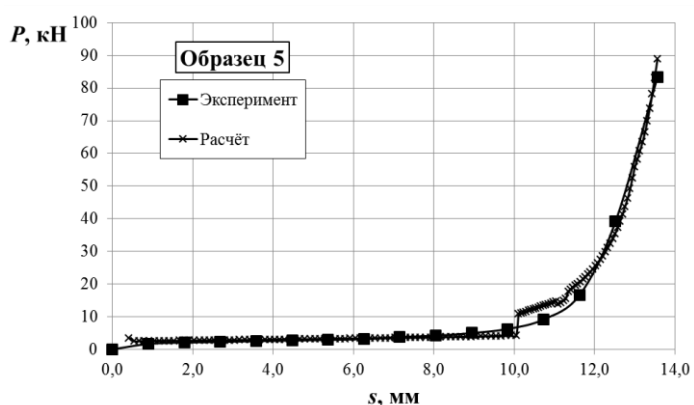


Рисунок 3 –Экспериментальные и расчётные (по созданной модели) графики зависимости силы деформирования P от перемещения ползуна s для одного из испытанных образцов

Разработанная модель программно реализована, проверка проводилась на свинцовых заготовках в гидравлической машине (рисунок 3). Для имитации условий горячей деформации стали был использован технически чистый свинец. Для сравнения результатов, получаемых при помощи модели и расчётом численными методами, было проведено моделирование штамповки в DEFORM-3D. Основные параметры расчёта: $D_1=18,9$ мм; $D_2=31,5$ мм; $H_1=2,84$ мм; $H_2=12,6$ мм; толщина облойного мостика 1 мм; отношение объема облоя к объему поковки $\delta=0,3$; материал – сталь 45; температура нагрева заготовки 1250°C ; температура штампа 250°C ; коэффициент пластического трения по Прандтлю 0,35; радиус кривошипа прессы $R=150$ мм; отношение длины шатуна к радиусу кривошипа $R_L=0,15$. Полученный график силы на ползуне прессы приведён на рисунке 4.

Модель может быть использована для рационализации технологического процесса, в том числе для определения нагрузок на инструмент. Так, например,

увеличение толщины мостика с 1 до 3 мм позволяет снизить максимальную силу деформирования с сохранением заполняемости штампа в 2,8 раз (в 1,7 раз по данным DEFORM-3D), величину максимальных растягивающих напряжений в инструменте в 3,2 раза и сжимающих в 1,3 раза (по данным DEFORM-3D).

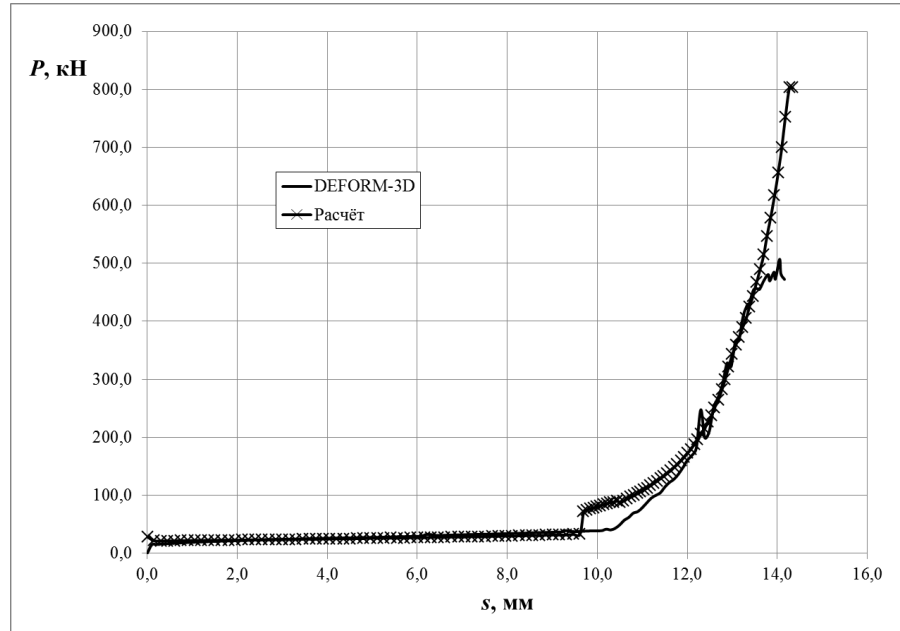


Рисунок 4 –Графики зависимости силы деформирования P от перемещения s ползуна кривошипного пресса, полученные расчётом по модели и в DEFORM-3D

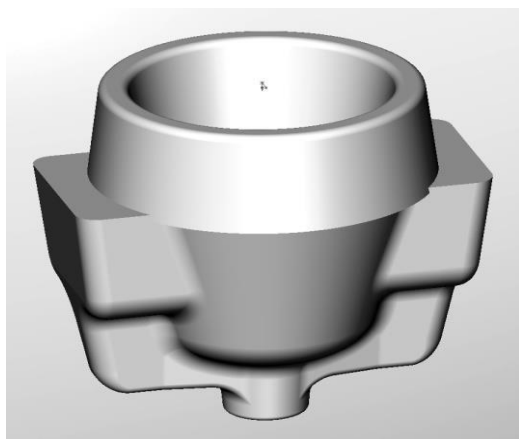


Рисунок 5 – Поковка детали типа "корпус"

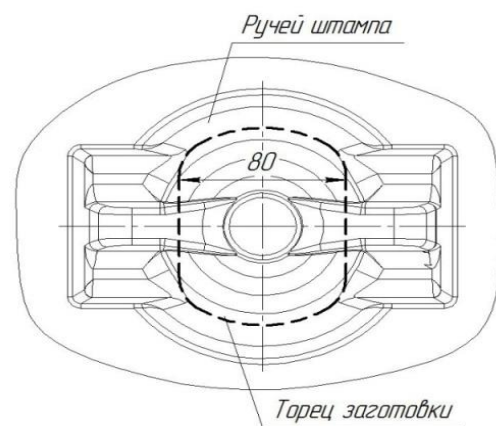


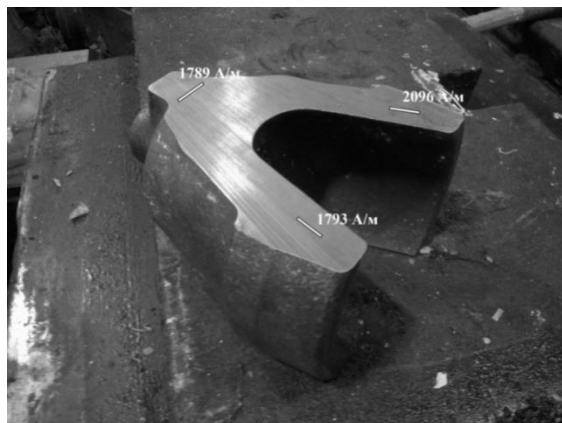
Рисунок 6 – Схема установки заготовки в штамп по принятой технологии

В третьей главе проведена рационализация процесса штамповки поковки «корпус», представленной на рисунке 5. Исходная схема установки заготовки в штамп приведена на рисунке 6. В ходе моделирования процесса штамповки в DEFORM-3D установлена возможность потери заготовкой устойчивости на начальной стадии штамповки, когда осаженная в торец и затем плашмя заготовка

устанавливается в полость штампа, имеющую коническую форму. Потеря устойчивости может привести к браку по заполняемости штампа и по неоднородности механических свойств изготавливаемых поковок. На рисунке 7, а показаны результаты измерений твёрдости в сечении одной из поковок при использовании твердомера ТЕМП-4. Неоднородность структурного состояния поковки подтверждают результаты замеров коэрцитивной силы (коэрцитиметр КИМ-2М), приведённые на рисунке 7, б.



а)



б)

Рисунок 7 – Результаты замеров твёрдости (а) и коэрцитивной силы (б) в сечении поковки «корпус»

Было проведено варьирование значений следующих параметров: высоты заготовки при осадке в торец H ; толщины заготовки при осадке плашмя B ; положения заготовки в штампе; радиуса скругления на заготовке R . Установлено, что повысить устойчивость заготовки в штампе можно следующими способами:

- 1) уменьшить искажение геометрии заготовки, увеличив значение H (увеличивается длина контакта);
- 2) уменьшить овальность сечения заготовки и неровности на торцах, увеличив значение B (увеличивается длина контакта);
- 3) увеличить радиус скругления R (увеличивается ширина контакта).

При варианте с повернутой по оси на 90° заготовкой обеспечивается значительное снижение максимальных сжимающих напряжений по сравнению с исходным процессом, а также улучшается заполняемость штампа, однако высока вероятность образования дефектов течения в виде зажимов (рисунок 8).

Наибольшее негативное влияние на устойчивость заготовки оказывает операция осадки заготовки плашмя, поэтому её предлагается исключить из

технологического процесса. Повышение устойчивости заготовки в штампе за счёт уменьшения эффекта осадок в торец, плашмя и увеличения радиуса скругления R позволяет добиться лучшего заполнения штамповой полости и более равномерного износа гравюры согласно проведённому в DEFORM-3D расчёту напряжённого состояния инструмента. Однако при этом повышается давление в полости штампа, что можно компенсировать за счёт геометрии облойных канавок.

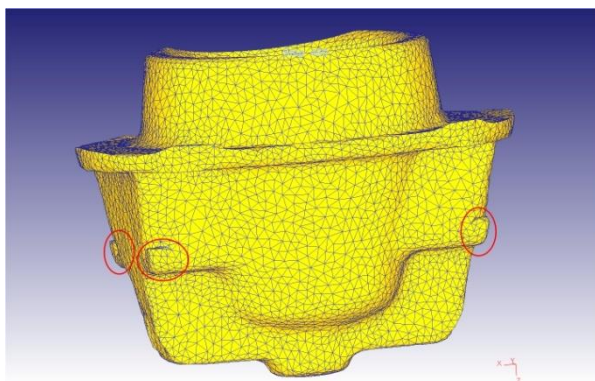


Рисунок 8 –Образование дефектов (зажимов) при штамповке поковки «корпус»

В четвёртой главе проведены исследования характера изменения величины коэрцитивной силы на различных этапах изготовления и эксплуатации штампового инструмента. В данной работе предлагается в качестве контролепригодного параметра, позволяющего оперативно контролировать состояние материала инструмента на всех этапах технологического процесса, принять коэрцитивную силу. Для этого необходимо определить характерные ещё не нормированные значения величины коэрцитивной силы штамповых сталей в различных состояниях.

Для расчёта предположительной величины коэрцитивной силы H_{c0} (А/м) штамповых сталей ГОШ в состоянии после термической обработки до эксплуатации были разработаны статистические модели по выборке сталей с известной из литературных источников и по результатам предварительных экспериментов коэрцитивной силой. Использовался метод Брандона, полученные модели адекватны по критерию Фишера при уровне значимости 0,01. Первая модель, которая может считаться универсальной для всех инструментальных сталей ГОШ, описывается формулой ($R^2=0,546$):

$$H_{c01} = (0,0013 \cdot T_{\text{зак.пр.}} + 0,9882) \times (0,0154 \cdot T_{\text{отп.пр.}} + 0,9228) \times \\ \times (-0,0556 \cdot \text{Ni} + 1,0358) \times (915,09 \cdot \text{Mo} + 2044,2) \times (-0,0005 \cdot W + 1,0005) \times \\ \times (-0,0037 \cdot \text{Cr} + 1,0106) \times (0,1805 \cdot \text{Si} + 0,9208) \times (-0,0864 \cdot V + 1,026) \times \\ \times (-0,0042 \cdot \text{Mn} + 1,0014) \times (0,9048 \cdot C + 0,5387).$$

где $T_{зак.пр.} = T_{зак.}/100$ и $T_{отп.пр.} = T_{отп.}/100$ – приведённые температуры закалки и отпуска, °C; $Ni, Mo, W, Cr, Si, V, Mn, C$ – процентное содержание соответствующего легирующего элемента в стали. Вторая модель аппроксимирует исходные данные функциями высокого порядка ($R^2=0,914$):

$$H_{C02} = 1,0001 \times (0,0095 \cdot T_{зак.пр.}^3 - 0,2836 \cdot T_{зак.пр.}^2 + 2,7995 \cdot T_{зак.пр.} - 8,1616) \times \\ \times (-0,7061 \cdot T_{отп.пр.}^2 + 7,1348 \cdot T_{отп.пр.} - 16,932) \times (-0,0684 \cdot Ni^2 + 0,1252 \cdot Ni + 0,9727) \times \\ \times (2273,6 \cdot Mo^2 - 2154,1 \cdot Mo + 2508,1) \times (-0,0094 \cdot W^2 + 0,0493 \cdot W + 0,9855) \times \\ \times (-0,0278 \cdot Cr^2 + 0,125 \cdot Cr + 0,9404) \times (-0,027 \cdot Si + 1,0121) \times \\ \times (-0,4874 \cdot V^2 + 0,3671 \cdot V + 0,9712) \times (0,009 \cdot Mn + 1,0211) \times \\ \times (288,57 \cdot C^4 - 646,82 \cdot C^3 + 534,38 \cdot C^2 - 192,58 \cdot C + 26,414).$$

Вторая модель позволяет определить коэрцитивную силу в сталях, химический состав и термообработка которых соответствуют следующим условиям: $T_{зак.}=(840\div 1080)^\circ\text{C}$; $T_{отп.}=(450\div 550)^\circ\text{C}$; $Ni=(0,2\div 1,6)\%$; $Mo=(0,1\div 1,35)\%$; $W=(0\div 5)\%$; $Cr=(0,65\div 5)\%$; $Si=(0,25\div 1,05)\%$; $V=(0,08\div 0,75)\%$; $C=(0,35\div 0,8)\%$; $Mn=(0,28\div 0,65)\%$.

Для выяснения возможности применения метода контроля по коэрцитивной силе для штампов ГОШ проведена серия натуральных экспериментов на инструменте, применявшемся на различном оборудовании и выработавшем свой ресурс частично или полностью (рисунок 9). Также были проведены исследования закономерностей изменения коэрцитивной силы материала молотовых штампов ГОШ из сталей 5ХНВ и 5ХНМ для поковок различной конфигурации в условиях производства. Замеры проводились по возможности на всех этапах изготовления и эксплуатации инструмента при помощи аттестованного коэрцитиметра КИМ-2М, настроенного по комплекту СОКС-1 ГСО 2192-89. Замеры в каждой точке по возможности производились по двум перпендикулярным направлениям, далее производился расчёт среднего значения в точке. В тех же точках по возможности измерялась твёрдость при помощи твердомера ТЭМП-4. Параллельно вёлся расчёт процесса штамповки в комплексе DEFORM-3D по производственной технологии. Далее по методу Брандона была проведена аппроксимация измеренных значений коэрцитивной силы по модулям максимальных нормальных напряжений и температуре в инструменте с использованием линейных функций (пример на рисунке 10). Использовались значения напряжений и температуры для конечного шага расчёта последнего удара при штамповке/калибровке. Для состояний

штампов до проведения операций использовались значения напряжений и температуры, характерные для тех же точек при последующей операции.

Исследование полученных данных позволяет сделать следующие выводы.

- Коэрцитивная сила повышается при механической обработке, что согласуется с известным механизмом роста коэрцитивной силы при накоплении дефектов кристаллической решётки.
- Коэрцитивная сила уменьшается в наиболее нагруженных и нагретых областях гравюры (рисунок 9, а), что объяснимо уменьшением длины межзёренных границ, а также повышением эффективности залечивания дефектов кристаллической решётки. Минимальное значение коэрцитивной силы приходится на подвергающиеся тепловому воздействию зоны дефектов технологического характера (рисунок 9, б).
- Коэрцитивная сила повышается в предварительно подогретых до рекомендуемых температур (200-300 °С), но не подвергающихся значительному механическому и тепловому нагружению участках гравюры, что, вероятно, вызвано снижением влияния диффузии.

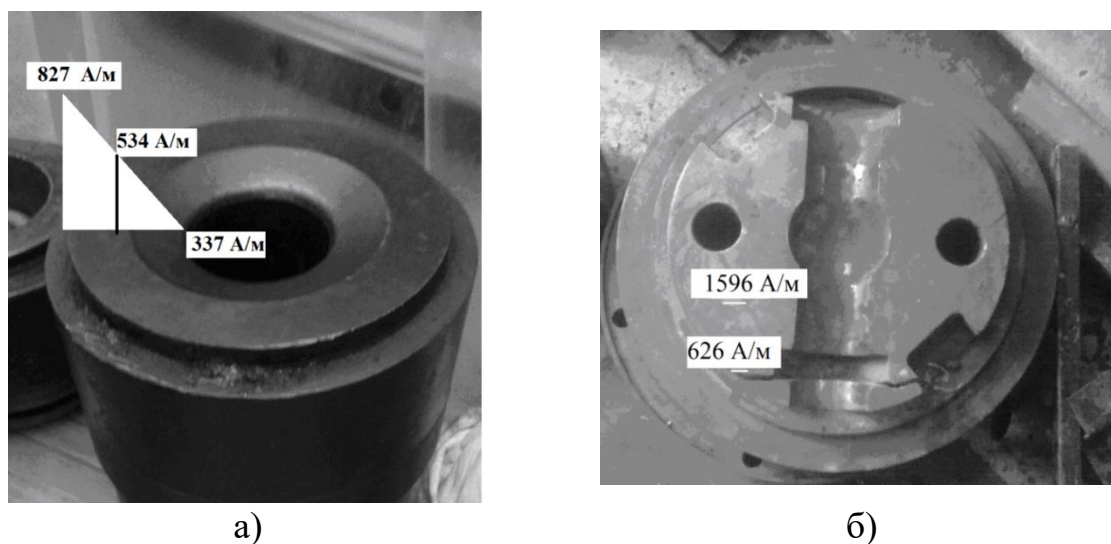
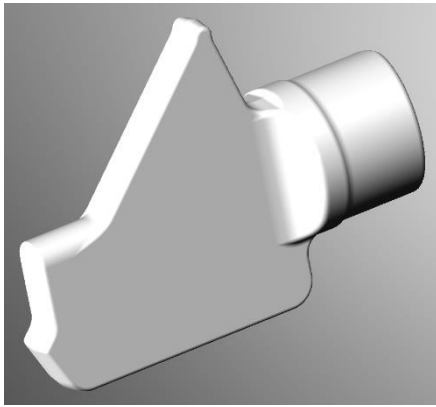
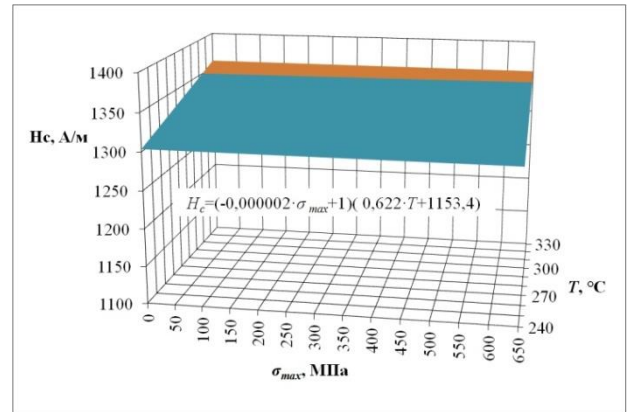


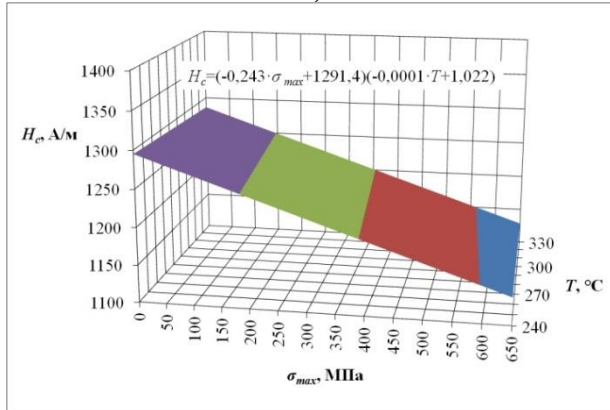
Рисунок 9 –Результаты измерений коэрцитивной силы рабочих деталей штампов ГОШ: а – матрицы штампа для высадки (КГШП); б – треснувшей вставки штампа (горячештамповочный пресс тройного действия)



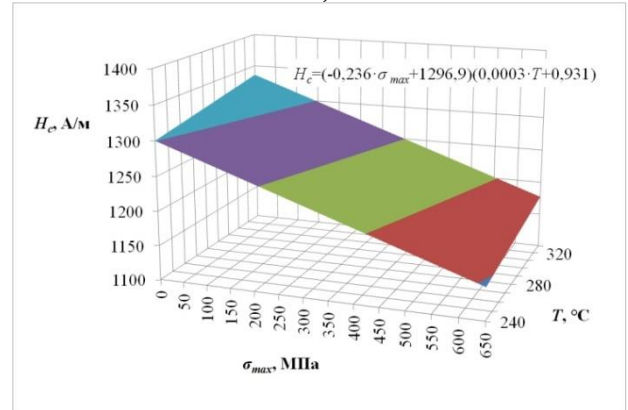
а)



б)

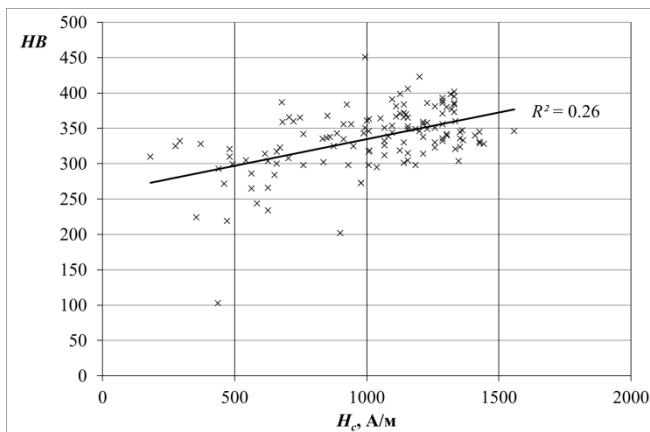


в)

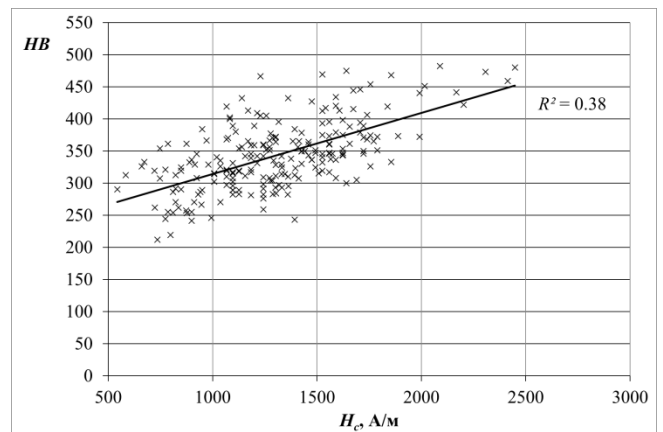


г)

Рисунок 10 –Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «корпус руля» (а) в состоянии: б – до эксплуатации, в – после штамповки и калибровки 1001 поковки, г – после штамповки и калибровки дополнительно 1020 поволок; материал штампа – сталь 5ХНМ, материал поковки – 13Х11Н2В2МФ-Ш



а)



б)

Рисунок 11 –Зависимости твёрдости *HB* от величины коэрцитивной силы для штамповых сталей: а – 5ХНВ; б – 5ХНМ

- Коэрцитивная сила уменьшается при отжиге стали 5ХНВ в 2-3 раза и возрастает в 3-4 раза при закалке стали 5ХНМ, что можно объяснить изменением дисперсности структуры материала при термообработке.

В ходе исследований молотовых штампов были получены зависимости твёрдости по Бринеллю HV от величины коэрцитивной силы H_c (А/м) сталей 5ХНВ и 5ХНМ (рисунок 11). Определить приблизительную твёрдость стали 5ХНВ можно по формуле $HV = 0.0754 \cdot H_c + 259.3$; твёрдость стали 5ХНМ – по формуле $HV = 0.095 \cdot H_c + 219.1$.

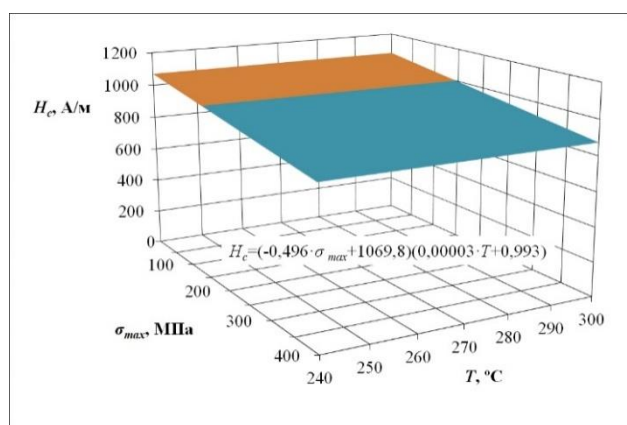
В пятой главе приведены основные положения разработанного метода определения стойкости штампов ГОШ по величине коэрцитивной силы. Предлагается следующий алгоритм.

1. Опытным путём или по литературным источникам определяется критическое значение коэрцитивной силы, соответствующее выходу инструмента из строя. Определяются напряжения и температура в заданных контролируемых участках.
2. Производятся замеры коэрцитивной силы в контролируемых участках.
3. Для исследуемого штампа необходимо провести повторный замер коэрцитивной силы после штамповки заданного числа поковок. Скорость изменения коэрцитивной силы при эксплуатации инструмента определяется как отношение разности значений второго и первого замеров к числу изготовленных поковок. Далее возможно проведение аппроксимации скорости изменения коэрцитивной силы на поковку функцией вида $\Delta H_c = (a_1 T + b_1)(a_2 \sigma + b_2)$.
4. Определяется стойкость инструмента как минимальное отношение разности между критическим и текущим значениями коэрцитивной силы в контролируемых участках к скорости её изменения.
5. Проводится проверка стойкости по разупрочнению поверхности гравюры по приведённым ранее формулам твёрдости для сталей 5ХНВ и 5ХНМ как минимальное отношение разности между предельным значением твёрдости и расчётными значениями.

Возможны три варианта расчёта. В первом варианте производится расчёт скорости изменения коэрцитивной силы в каждой точке в промежутке между двумя замерами, определяется число поковок для достижения предельного состояния, находится минимум. Аналогичным способом рассчитывается стойкость по разупрочнению гравюры. Второй метод аналогичен предыдущему за исключением того, что происходит аппроксимация скорости по алгоритму Брандона, что позволяет получить коэффициенты функции скорости, которые могут

использоваться в расчётах аналогичных штампов. В третьем варианте аппроксимируются два распределения коэрцитивной силы (см. рисунок 10), благодаря чему удаётся снизить влияние погрешности измерений, после чего рассчитываются коэффициенты функции скорости.

Все три варианта определения стойкости штампов ГОШ на основе данных замеров коэрцитивной силы программно реализованы. Для проверки метода в качестве предельных значений использовались минимальные значения коэрцитивной силы полученных зависимостей вышедших из строя молотовых штампов (рисунки 12, 13), характерные для температурно-напряжённого состояния каждого использованного в расчёте штампа. В качестве предельного состояния по твёрдости принято 280 НВ.

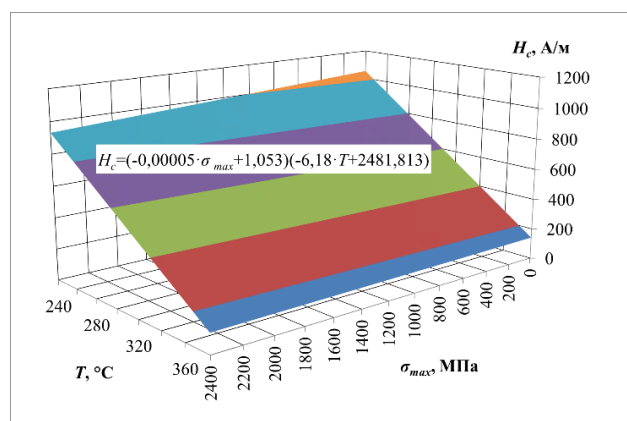


а)



б)

Рисунок 12 – Зависимость коэрцитивной силы от температуры и напряжений (а) для треснувшего нижнего штампа поковки «бугель» (б); материал штампа – сталь 5ХНВ, материал поковки – 30ХГСА



а)



б)

Рисунок 13 – Зависимость коэрцитивной силы от температуры и напряжений (а) для подвергшихся смятию и износу (б) двух половин штампа поковки «вилка»; материал штампа – сталь 5ХНВ, материал поковки – сталь 40ХН2МА

Как видно из таблицы 1, расчётные значения ресурса штампов в основном превышают наработку между замерами за исключением штампа 1 для поковки «вилка», который в ходе работы подвергся чрезмерному смятию и износу. Аномальные значения прогнозируемого ресурса, характерные для штампов 3 и 4, можно объяснить недостаточной точностью аппроксимации скорости изменения коэрцитивной силы.

Таблица 1– Результаты расчёта предположительной стойкости

№ п/п	Наименование поковки	Нарботка штампа между замерами	Прогнозируемый ресурс, шт. поковок метод 1 / метод 2 / метод 3		
			Трещины	Смятие и износ	Снижение твёрдости
1.	Вилка	Штамповка 1963 поковок	2658 / 3166 / 3011	1275 / 1644 / 1546	1707
2.	Корпус	Калибровка 307 поковок	388 / 403 / 455	383 / 397 / 449	838
3.	Корпус кардана	Штамповка 248 поковок	1022 / 8016 / 7731	1163 / 9320 / 8868	1464
4.	Корпус руля	Штамповка и калибровка 1001 поковки	1110 / 1142 / 1312	1149 / 1207 / 1372	1591
		Штамповка и калибровка 1020 поковок	895 / 1092 / 4969	962 / 1475 / 5480	1733

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В диссертации, являющейся законченной научно-технической квалификационной работой, изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для машиностроительной отрасли, состоящие в повышении эксплуатационных характеристик процессов горячей объёмной штамповки путём контроля магнитными методами состояния инструмента, базирующиеся на современных методах определения напряжений и деформаций, методах неразрушающего контроля и диагностики, математической статистики, математического моделирования и оптимизации.

2. На основе разработанной математической модели технологического процесса штамповки поковок типа «кольцо» на КГШП, позволяющей с высокой точностью спрогнозировать заполнение штамповой полости и изменение силовых характеристик на протяжении всего технологического процесса, разработан способ повышения качества кольцевых поковок путём рационализации технологического процесса и конструкции инструмента, что позволило снизить максимальное технологическое усилие в 2,8 раз с сохранением заполняемости полости штампа.

3. Проведена рационализация конструктивных и технологических

параметров штамповки поковки «корпус». Установлено, что наибольшее влияние на неравномерность течения материала вызывает потеря устойчивости заготовки, чего можно избежать исключением из технологического процесса операции осадки плашмя заготовки. Рационализация технологии позволила увеличить выход годной продукции за счёт варьирования параметров операций технологического процесса.

4. Установлена возможность контроля по величине коэрцитивной силы изделий из инструментальных сталей для ГОШ и формализован характер изменения коэрцитивной силы в материале штампов ГОШ на различных этапах их изготовления и эксплуатации.

5. Определена величина коэрцитивной силы в материале штампов для ГОШ, соответствующая моменту выхода штампа из строя по различным критериям разрушения.

6. Разработан расчётный аналитико-численный метод определения стойкости штампов ГОШ различных конструкций в зависимости от величины коэрцитивной силы материала штампа, на основе которого программно реализовано несколько вариантов методики, различающихся точностью, универсальностью и степенью влияния погрешностей измерения. Данные разработки могут быть использованы в производстве для стабилизации процесса выхода годного за счёт контроля состояния инструмента.

7. Полученные результаты внедрены в ЗАО "Прочность", г. Москва, что позволило повысить точность определения остаточного ресурса штампов. Некоторые результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры "Композиционные материалы» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», а также в учебном процессе Инженерной академии РУДН.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Корнилова А.В., Набиуллина Л.К., Тет Паинг, Чжо Заяр, **Селищев А.И.** Исследование магнитными методами повреждаемости штампов для горячей объемной штамповки // Вестник МГТУ «СТАНКИН». Научный рецензируемый журнал. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2014. – №2 – С. 40-43.
2. **Селищев А.И.**, Набиуллина Л.К., Корнилова А.В. Повышение стойкости оснастки для горячей объёмной штамповки // Вестник МГТУ «СТАНКИН». Научный рецензируемый журнал. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2014. – №3 – С. 58-61.
3. **Селищев А.И.** К вопросу об определении стойкости штампов для горячей объемной штамповки // КШП. ОМД. – 2015. – №1. – С. 6-13.
4. Корнилова А.В., **Селищев А.И.**, Идармачев И.М. Применение магнитных видов неразрушающего контроля для изделий из инструментальных штамповых сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2015. – №10(724). – С. 56-62.
5. **Селищев А.И.**, Корнилова А.В. Разработка метода определения стойкости штампов для горячей объёмной штамповки по величине коэрцитивной силы // КШП. ОМД. – 2018. – №9. – С. 27-36.
6. **Селищев А.И.**, Аюпов Т.Х., Корнилова А.В., Батарин Р.В. Исследование изменения коэрцитивной силы инструментальных штамповых сталей в процессе изготовления и эксплуатации ковочных штампов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2018. – №1, С. 85-93.

Монографии, учебники и пособия:

1. Корнилова А.В., Идармачев И.М., **Селищев А.И.** Применение магнитных методов для контроля штампового инструмента. – Düsseldorf Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 71 с.
2. Практическое руководство по обработке экспериментальных данных / Корнилова А.В., Тет Паинг, Чжо Заяр, **Селищев А.И.**, Идармачев И.М. – [б.м.]: Издательские решения, 2018. – 190 с.
3. Основы научных исследований и техника эксперимента: учебник / Корнилова А.В., Идармачев И.М., **Селищев А.И.**, Тет Паинг, Батарин Р.В. – М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2017 – 177 с.

Публикации в изданиях, включенных в международные реферативные базы данных Scopus и Webofscience:

1. A.V. Kornilova, **A.I. Selishchev**, I.M. Idarmachev. Application of magnetic kinds of non-destructive inspection to parts from die tool steels // Metal Science and Heat Treatment. – 2016. – Vol. 57, issue 9-10, pp. 632–637.
2. I.I. Karpukhin, **A.I. Selishchev**, A.V. Kornilova, I.M. Idarmachev. Investigation of the Change in the Magnetic Properties of Die Steels in the Process of Manufacture and Operation of Die Tools [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Volume 287, conference 1. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/287/1/012006/pdf>.
3. Kornilova, A.V., Abu Mahadi, M.I., **Selishchev, A.I.**, Ayupov, T.H. The analysis of destruction causes and condition diagnostics of hot die forging for space industry // 1st IAA/AAS SciTech Forum on Space Flight Mechanics and Space Structures and

Materials, 2018; Moscow; Russian Federation; 13 November 2018 to 15 November 2018. Advances in the astronautical sciences. – 2020. – Volume 170. – Pp. 627-638.

Статьи и материалы конференций:

1. **Селищев А.И.** Пластическое формоизменение цилиндрической заготовки при двухсторонней открытой прошивке // Материалы 1-ого тура студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012)». Сборник докладов факультета машиностроительных технологий и оборудования. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2012. – С. 31-34.
2. **Селищев А.И.** Моделирование объемной штамповки кольцевой поковки // Материалы всероссийской молодежной конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012)». Второй том. Сборник докладов. – М.: МГТУ «Станкин», 2012. – С. 153-158.
3. **Селищев А.И.** Моделирование объемной штамповки кольцевой поковки // Труды XV научной конференции «Математическое моделирование и информатика». – М.: ИЦ ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2013. – С.179-181.
4. **Селищев А.И.** Контроль по коэрцитивной силе штампов горячей объёмной штамповки // Материалы 1-го тура студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2015)». Сборник докладов факультета машиностроительных технологий и оборудования. Под ред. Лычкина Е.Н. – М.: МГТУ «Станкин», 2015. – С. 109-111.
5. Корнилова А.В., Идармачев И.М., **Селищев А.И.**, Тет Паинг. Исследование возможностей магнитных методов для определения стойкости рабочих деталей штампового инструмента // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – 2015. – №1(40). – С. 212-218.
6. **Селищев А.И.** Математическое моделирование магнитных свойств инструментальных сталей для горячей штамповки // Труды XVII научной конференции «Математическое моделирование и информатика». – М.: ИЦ ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – Т.2. – С. 139-143.
7. Корнилова А.В., Идармачёв И.М., **Селищев А.И.**, Корнев Н.К., Выговский А.М. Статистические модели для определения коэрцитивной силы в инструментальных сталях // Неделя металлов в Москве. 10-13 ноября 2015 г. Сборник трудов конференций. – М., 2016. – С. 77-86.
8. Корнилова А.В., Идармачев И.М., **Селищев А.И.** Диагностика состояния штампового инструмента по изменению магнитных свойств его рабочих деталей // Состояние и перспектива развития отечественных технологий обработки металлов давлением и оборудования кузнечно-прессового машиностроения: Сборник научных статей и докладов XIII Конгресса «Кузнец-2017». – Рязань, 2017. – С. 162-169.
9. **Селищев А.И.**, Корнилова А.В. Применение магнитного неразрушающего контроля для изделий из инструментальных сталей для горячей штамповки, подвергающихся термомеханическому циклическому нагружению // Материалы X международной конференции «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ-2017)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2017. – С. 74-79.