

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский Государственный Технологический университет СТАНКИН»

На правах рукописи

Селищев Александр Иванович



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

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р техн. наук, доц. Корнилова А.В.

Москва, 2021 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Анализ способов повышения эффективности штамповки круглых в плане поковок	11
1.2 Взаимосвязь стойкости инструмента для ГОШ и качества изготавливаемых поковок.....	13
1.2.1 Виды разрушения штампов ГОШ.....	15
1.2.2 Особенности выбора инструментального материала штампов ГОШ.....	19
1.2.3 Термическая, химико-термическая и механическая обработка штампов ГОШ.....	24
1.2.4 Покрытия и наплавки гравюры штампов ГОШ	26
1.2.5 Температурный режим штамповки и смазка штампов ГОШ	28
1.2.6 Особенности конструкции кузнечно-штамповочного оборудования, влияющие на стойкость штампов ГОШ.....	30
1.3 Методы определения стойкости штампов ГОШ	34
1.3.1 Расчётно-аналитические методы	36
1.3.2 Физические методы контроля	38
1.4 Коэрцитивная сила как показатель остаточного ресурса	43
1.5 Выводы по главе.....	53
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШТАМПОВКИ НА КГШП ПОКОВОК ТИПА «КОЛЬЦО»	55
2.1 Основные положения модели.....	55
2.2 Экспериментальная проверка разработанной модели	72
2.3 Анализ факторов, влияющих на качество штамповки и стойкость штампов для кольцевых поковок	90
2.4 Выводы по главе.....	93
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА КАЧЕСТВО ПОКОВОК И РЕСУРС ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА НА ПРИМЕРЕ ПОКОВКИ «КОРПУС»	94

ГЛАВА 4. СБОР СВЕДЕНИЙ ОБ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ В МАТЕРИАЛЕ ШТАМПОВ ГОШ	111
4.1 Оценка возможностей контроля по коэрцитивной силе штампов ГОШ..	111
4.2 Исследование коэрцитивной силы в материале штампов, частично или полностью выработавших свой ресурс	112
4.3 Определение коэрцитивной силы инструментальных сталей для ГОШ в неповреждённом состоянии	117
4.4 Исследование изменений коэрцитивной силы при эксплуатации штампового инструмента	123
4.5 Взаимосвязь между твёрдостью и коэрцитивной силой сталей 5ХНВ и 5ХНМ.....	140
4.6 Выводы по главе.....	141
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВ ГОШ ПО ВЕЛИЧИНЕ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ	143
5.1 Алгоритм определения стойкости штампов ГОШ.....	143
5.2 Практическая реализация метода определения стойкости штампов ГОШ .	146
5.3 Выводы по главе	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	157
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	159
ПРИЛОЖЕНИЯ	175
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.	199
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	214
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.	274
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	283
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	298
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	307
ПРИЛОЖЕНИЕ З.	325
ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	341
ПРИЛОЖЕНИЕ К.....	349

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГКМ – горизонтально-ковочная машина

ГОШ – горячая объёмная штамповка

КГШП – кривошипный горячештамповочный пресс

МКЭ – метод конечных элементов

ОМД – обработка металлов давлением

ПО – программное обеспечение

САПР – система автоматизированного проектирования

ТМО – термомеханическая обработка

ТЦО – термоциклическая обработка

ХЛШ – холодная листовая штамповка

ВВЕДЕНИЕ

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., Артес 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 станов (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 поковок «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 рационализация 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 поковке;

– 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 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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ способов повышения эффективности штамповки круглых в плане поковок

В настоящее время в условиях стремительно развивающейся производительности вычислительной техники значительную помощь при подготовке производства в плане обеспечения бездефектного течения штампуемого материала могут оказать средства компьютерного моделирования технологических процессов типа Simufact, QForm, DEFORM-3D и т.п. В частности, в статье [1] рассматриваются возможности применения компьютерного моделирования процесса штамповки с точки зрения выбора правильного направления течения металла.

В то же время не стоит отказываться и от классических методов моделирования, которые хоть и обладают меньшей универсальностью, но значительно менее требовательны к вычислительным ресурсам и позволяют получать стабильные результаты расчёта при относительной простоте моделирования. В частности, в работах [2-5] приведены математические модели горячей объёмной штамповки поковки типа «шестерня» в открытых штампах на КГШП и на молотах, разработанные на основе общепринятых положений теории обработки металлов давлением и проектирования кузнечно-штамповочного оборудования с применением метода линий скольжения.

Одной из наиболее распространённых категорий поковок в машиностроении являются осесимметричные поковки. На основе анализа приведённых в литературе данных было принято решение разработать в данной работе математическую модель, описывающую штамповку поковок типа «кольцо» на кривошипных горячештамповочных прессах, позволяющую с высокой точностью спрогнозировать заполнение штамповой полости и изменение силовых характеристик на протяжении всего технологического процесса, а также повысить качество изготавливаемых поковок путём оптимизации течения материала и снижения вероятности образования дефектов в виде зажимов. Детали из поковок заданной конфигурации широко распространены в машиностроении в качестве

втулок, колец, бандажей, стаканов и т.д., поэтому разработка модели, позволяющей рационализировать процесс технологической подготовки производства поковок колец при минимальных затратах, является актуальной задачей.

В работе [6] рассматривается применение новой конструкции расширяющегося фигурного облойного мостика при штамповке колец синхронизатора автомобилей КАМАЗ из кольцевых заготовок. Данное решение позволило обеспечить достаточный подпор штампуемого металла для заполнения полости штампа при снижении технологических усилий штамповки, хоть и усложняет конструкцию инструмента, а также повышает требования к точности взаимной установки половин штампа.

В работе [7] приводятся основные сведения о разработке математической модели штамповки осесимметричных поковок на основе метода конечных элементов, позволяющей вести расчёт процесса деформации как в прямом, так и в обратном направлении, что позволяет производить расчёт оптимальных размеров заготовок по переходам. Разработанной модели могут быть присущи недостатки, типичные для расчёта по методу конечных элементов (ошибки сходимости, округления и погрешности расчёта). Аналогичные результаты были получены в работах [8,9] при использовании метода граничных элементов, что позволило определить оптимальные размеры заготовки, обеспечивающие минимальную продолжительность стадии доштамповки осесимметричной поковки и, соответственно, позволяющие добиться снижения требуемого усилия деформирования.

В статье [10] приводятся исследования зон деформации при производстве поковок колец ответственного значения. В частности установлено, что при использовании комбинированной осадки (сначала осадка бойками конической формы с малым диаметром конуса меньшим чем диаметр цилиндрической заготовки, затем осадка плоскими бойками) по сравнению с осадкой плоскими бойками улучшается структурная однородность поковки и температурные условия для проведения последующих операций. Данные положения могут быть применены при разработке модели штамповки кольцевых поковок.

1.2 Взаимосвязь стойкости инструмента для ГОШ и качества изготавливаемых поковок

Несомненно, что качество поковок, изготавливаемых горячей объёмной штамповкой, непосредственно зависит как от подбора оптимальных параметров тех. процесса (способ нагрева заготовок, температура нагрева, конфигурация переходов изготовления и др.), правильного конструирования штампа (бездефектное течение металла, надёжность установки заготовки в штамп и т.п.), так и от состояния инструмента, степени изношенности и деформированности гравюры. Повышенный износ инструмента приводит к технологическому браку, риску для обслуживающего персонала, затратам на изготовление нового штампа.

Прежде всего, необходимо установить, что подразумевается под понятием «стойкость штампа». Различают стойкость штампа до его отказа (переточки, ремонта) и общую стойкость до состояния, когда дальнейший ремонт штампа становится нецелесообразным. ГОСТ 21546-88 [11] определяет следующие критерии стойкости молотовых штампов: отказом штампа является появление отклонений от требований, предъявляемых к поковке, изготавливаемой на данном штампе; предельным состоянием штампа является такое состояние, когда трудоёмкость его восстановления составляет 60% трудоёмкости изготовления нового штампа. Данные критерии можно применять не только к молотовым штампам, но и к штампам, используемым на ином оборудовании. Средняя общая стойкость штампов горячей штамповки варьируется в пределах от сотен штук (для крупных, сложных и труднодеформируемых поковок) до десятков тысяч штук поковок.

Стойкость штампов ГОШ зависит напрямую или посредством от множества факторов. Рассмотрим наиболее важные из них:

- материал заготовки;
- масса и сложность поковки;
- марка материала инструмента (штампа);

- состояние материала штампа (способ получения и состояние поставки, химический состав, наличие дефектов, термическая и механическая обработка);
- покрытия и наплавки гравюры;
- температурный режим штамповки;
- наличие охлаждения;
- тип и характер смазки;
- конструктивные особенности штампа;
- точность кузнечно-штамповочного и вспомогательного оборудования.

Все эти факторы влияют на стойкость инструмента одновременно, причём многие из них взаимосвязаны (рисунок 1), поэтому определение остаточного ресурса работы штампа представляет собой непростую задачу. Далее рассмотрено подробнее влияние различных факторов на ресурс работы штампов ГОШ, приводится описание некоторых методов качественной и количественной оценки стойкости штампового инструмента.

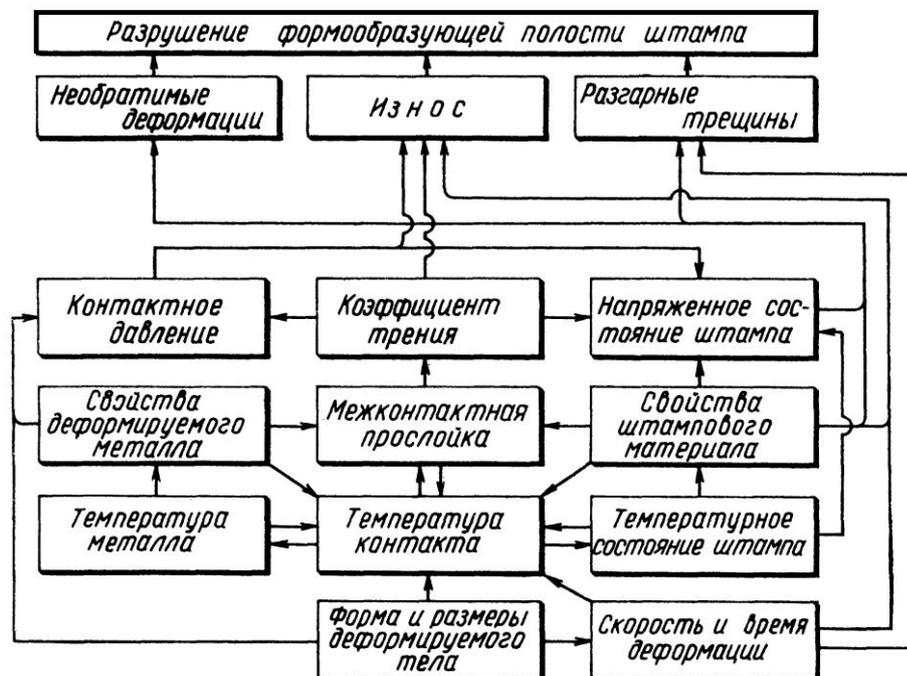


Рисунок 1 – Взаимосвязь основных факторов, влияющих на стойкость штампов ГОШ [12]

1.2.1 Виды разрушения штампов ГОШ

Анализ литературных источников по теме исследования позволяет выделить 4 причины, приводящие к выходу штампов для горячего деформирования из строя [13]:

- 1) износ (истирание) гравюры – причина списания 70% штампов;
- 2) трещины, образовавшиеся под действием каких-либо механических факторов – 25% штампов;
- 3) трещины, образовавшиеся под действием температурного фактора (разгарные трещины) – 3%;
- 4) смятие гравюры штампа – 2%.

Следует понимать, что числа из работы [13], приведённые выше, основаны на статистике и имеют значительный разброс для разных условий производства и конфигурации штампуемых поковок. Эти данные характерны в случае отработанной технологии штамповки изделия, когда преобладающим видом разрушения является износ рабочих элементов штампа. Наибольшее влияние на соответствие изготавливаемых поковок требованиям технической документации оказывают истирание гравюры и смятие её элементов.

В работе [14] приводятся зависимости преобладающего вида разрушения штампов от основных характеристик используемого кузнечно-штамповочного оборудования (для молотов – масса падающих частей для молотов, для прессов – усилие, для горизонтально-ковочных машин – диаметр заготовки). Согласно этим данным, для молотов преобладающими видами разрушения являются смятие и износ, причём доля износа падает при использовании молотов с большой массой падающих частей. Для прессовых штампов наиболее характерно истирание с повышенной вероятностью образования разгарных трещин (до 25%) при небольшом влиянии смятия и образования механических трещин. Причины разрушения формовочных и наборных пуансонов для ГКМ аналогичны причинам выхода из строя прессовых штампов, но отмечается повышенное влияние разгарообразования.

На рисунке 2 приведен пример распределения видов разрушения штампа по различным участкам гравюры.

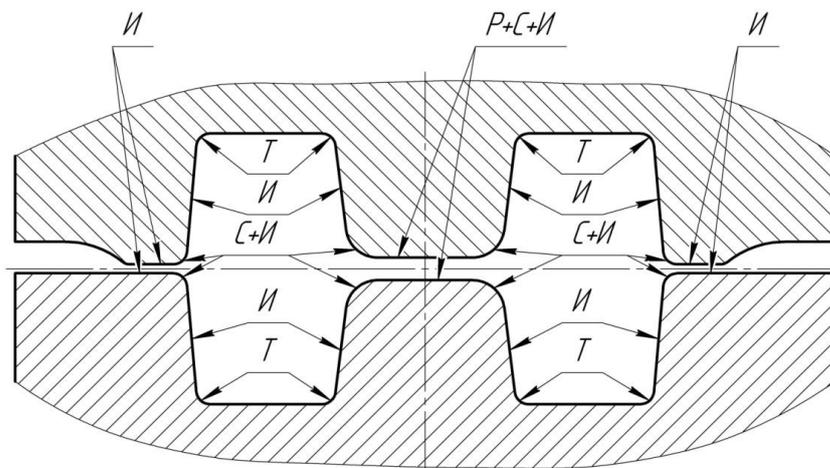


Рисунок 2 – Распределение различных видов разрушения по отдельным участкам гравюры штампа: И – износ; С – смятие; Р – разгарные трещины; Т – механические трещины

При горячей штамповке преобладает адгезионный тип износа, характеризующийся образованием межатомарных связей между материалами инструмента и заготовки с последующим отделением частиц материала. Также на штамп действует абразивный износ за счёт контакта гравюры с попавшими на неё твёрдыми включениями. При нагреве заготовок для штамповки в печах поверхностный слой металла окисляется, при этом образуются твёрдые оксиды железа (окалина). При штамповке частицы окалина увеличивают износ гравюры штампа [15] и оставляют вмятины и забоина на поверхности поковок. Поэтому при проектировании технологического процесса следует отдавать предпочтение малоокислительным и безокислительным методам нагрева заготовок и своевременно удалять образовавшуюся окалину из рабочей зоны штампа. Согласно работе [14], окалина, образующаяся на заготовке в случае нагрева её в газовой печи, может снизить долговечность штамповой оснастки более чем на 20%. Применение индукционных нагревательных устройств позволяет снизить выход окалина в 3-3,5 раза.

Изнашивание наиболее характерно для участков гравюры, контактирующих с быстро движущимся материалом заготовки. Износ в первую очередь зависит от состояния поверхности гравюры и определяется износостойкостью и теплостойкостью инструментального материала, механической и термической обработкой, температурным режимом штамповки, наличием износостойких покрытий, видом и режимом смазки и др. Ввиду того, что износостойкость гравюры прямо пропорциональна её твёрдости, нагрев штампа до температуры порядка 400 °С и выше, сопровождающийся разупрочнением инструментального материала, приводит к значительному росту изнашиваемости. Поэтому рабочая поверхность штампа должна сохранять при работе на повышенных температурах высокую твёрдость, то есть обладать хорошей теплостойкостью.

Дефекты в виде трещин в инструменте проявляются по большей части из-за каких-либо ошибок на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации штампа. В настоящее время проектирование штампов производится преимущественно при помощи методов компьютерного моделирования. Растёт и развивается рынок программного обеспечения (ПО), позволяющего при помощи универсальных численных методов смоделировать течение материала заготовки для штамповки в горячем и холодном состояниях, определить силовые параметры штамповки в любой момент времени. Такое ПО используется для определения конечной силы штамповки, прогнозирования возможных дефектов поковок, поиска зон повышенной концентрации напряжений на гравюре штампа. Учёт влияния таких концентраторов напряжений во многом позволяет значительно снизить вероятность появления трещин при эксплуатации штамповой оснастки.

Развитием теории накопления повреждаемости при механическом циклическом нагружении, которое приводит к образованию и росту усталостных трещин, занимались такие специалисты по прочности как Palmgren A., Miner M.A., Grover H.J., Прошковец Й., Войтишек Я., Manson S.S., Henry D.L., Gatts R.R., Brown G.W., Work C.E., Corten H.T., Dolan T.J., Richart F.E., Newmark N.M., Marin J., Серенсен С.В, Когаев В.П., Махутов Н.А., Москвичев В.В. и др.

Куда сложнее спрогнозировать появление усталостных трещин, когда на гравюру штампа действует нестационарное по времени и объёму температурное поле. Во время работы штампа при контакте матриц с нагретым полуфабрикатом штампу передаётся тепло. Поверхностные слои гравюры нагреваются быстрее, чем более глубокие слои, поэтому там возникают сжимающие напряжения. За время простоя между удалением готовой поковки и установкой нагретой заготовки штамп остывает. Поверхностные слои гравюры остывают быстрее, поэтому возникают растягивающие напряжения. Данное знакопеременное циклическое изменение температуры в конечном итоге приводит к образованию сети глухих разгарных трещин на поверхности гравюры, негативно влияющих на усталостную стойкость штампа. Для уменьшения разности температур между штампом и штампуемой заготовкой проводят предварительный нагрев штампа до рекомендуемых температур порядка 200-300 °С, что снижает вероятность появления разгарных трещин. Разгар наиболее характерен для участков гравюры, находящихся в длительном контакте с нагретой заготовкой, а также для тех участков рабочей полости, в которых происходит интенсивное выделение тепла в результате пластической деформации металла.

Кроме того, нагрузки на инструменте при нагреве его до высоких температур могут привести к явлению ползучести металла. При нагреве стали более чем на 0,3 от температуры плавления происходит медленное накопление пластических деформаций. В предельном случае происходит разрыв материала, но такое случается достаточно редко.

В некоторых случаях температура поверхностного слоя гравюры штампа может подниматься выше температуры отпуска, что приводит к чрезмерному росту зерен и разупрочнению материала, и, как следствие, повышенному смятию и изнашиванию гравюры. Такой цикл нагрева с последующим охлаждением может неоднократно повторяться при штамповке.

Рабочая поверхность штампа, не обладающая достаточной прочностью и твёрдостью, подвержена повышенному смятию во время штамповки. Смятие влечёт за собой изменение геометрии штамповых знаков и, соответственно,

размеров штампуемых поковок. Выход из строя в результате смятия наиболее характерен для молотовых штампов из-за высокой кинетической энергии падающих частей при ударе, передаваемой заготовке и частично инструменту, но может проявляться и на иных видах оборудования при ударе текущего материала заготовки о гравюру. Например, для гравюры, представленной на рисунке 2, помимо очевидного смятия прошивного знака может наблюдаться смятие кромки облойного мостика при ударе деформируемого материала, движущемся в радиальном направлении.

Износ и смятие являются в большинстве случаев устранимыми дефектами. Изношенные и смятые штампы могут сохранить свою работоспособность после нескольких переточек. Также смятую гравюру штампа, предварительно подвергнутого разупрочнению, зачастую можно восстановить при помощи специально подготовленных мастер-поковок или калибров (рисунок 3) [16]. Неглубокие механические и разгарные трещины устраняются при помощи сварки или наплавки с последующей зачисткой [15,17]. Глубокие трещины являются неустранимым браком.

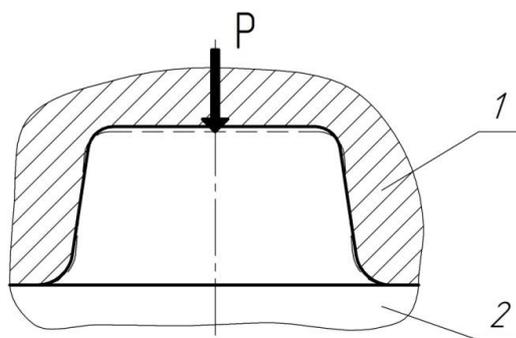


Рисунок 3 – Схема правки штампа калибром: 1 – калибр; 2 – штамп

1.2.2 Особенности выбора инструментального материала штампов ГОШ

При проектировании инструмента следует уделять особое внимание подбору инструментальной стали, так как она во многом определяет его ресурс работы. Подбор инструментального штампового материала обычно представляет собой выявление компромисса между износостойкостью, трещиностойкостью и теплостойкостью. При проектировании штамповой оснастки следует стремиться

снизить вероятность поломок из-за образования трещин, так как повреждённый таким образом штамп зачастую не удаётся восстановить для дальнейшей работы. Возможно, даже зачастую снижая его износостойкость и твёрдость, так как изношенные и подвергшиеся смятию гравюры штампов могут использоваться после нескольких переточек, что позволяет экономно расходовать дорогие штамповые стали.

Стали для горячей штамповки можно условно разделить на 3 группы [18].

I группа – стали высокой теплостойкости (3X2B8Ф, 4X2B5ФМ, 5X3BMФС). Данные стали сохраняют высокое значение твёрдости гравюры при повышенных температурах, что ведёт к повышению износостойкости, но при этом обладают низким сопротивлением хрупкому разрушению. Применяют при температурах нагрева инструмента до 680 °С.

II группа – стали высокой прочности и вязкости, но средней теплостойкости (4X5B2ФС, 4X5MФС, 4X3BMФ, 4XMФС, 4X4BMФС, 3X3M3Ф). Стали этой группы обладают повышенными сопротивлением смятию и трещиностойкостью. Применяют при температурах нагрева инструмента до 620 °С.

III группа – стали с высоким сопротивлением хрупкому разрушению при динамическом нагружении, но малой теплостойкостью (5XHM, 5XHB, 5XHBС, 5XGM). Применяют при температурах нагрева инструмента до 550 °С.

Для горячей штамповки применяются стали с повышенным содержанием карбидообразующих легирующих элементов. Влияние легирующих элементов на свойства штамповых сталей по данным работы [19] приведено далее.

1. **Хром.** Повышение концентрации хрома в твёрдом растворе увеличивает устойчивость переохлаждённого аустенита и цементита при нагреве. В комплексно легированных сплавах введение хрома существенно усиливает эффект вторичного твердения. Кроме того, хром оказывает положительное влияние на окалиностойкость и способствует значительному повышению износостойкости. Однако существует ряд ограничений на содержание этого элемента в штамповых сталях. При превышении концентрации хрома в сплаве происходит резкое

ухудшение карбидной неоднородности, сопровождаемое уменьшением прочности, пластичности, сопротивления усталостной повреждаемости и износостойкости в условиях динамического нагружения, а также повышается чувствительность к перегреву. Поэтому содержание хрома ограничивается 4-5% в сталях повышенной теплостойкости, 2-3% в сталях высокой теплостойкости и 1-2% в сталях умеренной теплостойкости.

2. Вольфрам и молибден. Степень усиления этими элементами карбидной неоднородности меньше, чем у хрома. Легирование вольфрамом сталей, содержащих не более 0,5-1,0% ванадия, увеличивает их устойчивость к перегреву, хотя при этом происходит большее снижение твёрдости, чем в случае легирования этих сталей молибденом. Несколько повышая устойчивость против перегрева сталей типа 4X4B2M2ФС, молибден оказывает противоположное влияние на сплавы с повышенным содержанием углерода (X4B2M2Ф1). Увеличение концентрации вольфрама в сталях повышенной теплостойкости типа 5X3B3Ф2МС с 2% до 3% вызывает значительный рост твёрдости после закалки, продолжающийся, хоть и в меньшей степени, при дальнейшем увеличении содержания элемента. Уровень вторичной твёрдости после отпуска при повышении концентрации вольфрама возрастает. Вольфрам повышает теплостойкость штамповых сталей при увеличении его концентрации до определённых пределов (1,0-2,0% в сталях типа 4X4BMФС, 3% в сталях типа 5X3B3Ф2МС). Несмотря на то, что введение молибдена повышает прокаливаемость, сопротивление тепловому разупрочнению и твёрдость, его содержание в сталях ограничено отрицательным влиянием на обезуглероживание и окалиностойкость. Штампы, ввиду специфики своей работы, подвержены явлению отпускной хрупкости при длительном нагреве. Эта проблема подробно описана в работах Горицкого В.М. [20]. Выдержка при повышенных температурах приводит к росту хрупкой составляющей и уменьшению вязкой при испытаниях на излом. В результате нагрева штамповые кубики, особенно крупные, длительное время сохраняют тепло и со временем становятся более чувствительными к трещинообразованию. Поэтому в штамповые стали вводят молибден и вольфрам для снижения отпускной хрупкости.

3. **Ванадий.** Так же, как и хром, повышает карбидную неоднородность сталей. Введение до 1% ванадия существенно уменьшает чувствительность к перегреву, повышает твёрдость, прочность и пластичность как высокоуглеродистых, так и среднеуглеродистых сталей. Большая концентрация ванадия по отношению к содержанию углерода может снизить указанные характеристики. Легирование ванадием сталей типа Х4В2МФ, 17Х6Ф4М до 2-4% с отпуском даёт повышенное сопротивление хрупкому разрушению. Но при высокотемпературном отпуске (более 500°С) повышенное содержание ванадия уменьшает пластичность и износостойкость сталей. Также повышенное содержание ванадия снижает окалиностойкость.

4. **Кремний и кобальт.** Данные элементы при легировании не образуют соединений с углеродом, но усиливают процессы карбидообразования при отпуске, значительно повышая уровень вторичной твёрдости. Кремний также оказывает положительное влияние на окалиностойкость стали. Отрицательным эффектом введения кремния и кобальта в сплав является снижение его теплостойкости, поэтому превышать концентрацию этих элементов более 0,8% нецелесообразно.

5. **Никель и марганец.** Не образуют соединений с углеродом, но влияют на концентрацию углерода в эвтектоиде, что приводит к повышенной твёрдости стали после отжига. Легирование никелем и марганцем повышает прокаливаемость стали, что положительно сказывается при изготовлении крупногабаритного инструмента. Никель, при соблюдении оптимальных условий легирования, также заметно повышает пластичность стали.

Роль легирующих элементов в уменьшении износа при контактном трении можно оценить по относительной величине износа R , принимая за $R=100\%$ величину износа в аналогичных условиях стали 5ХНМ [21]:

$$R = 204 - 70C - 4S_1 - 15\sqrt{S_2} - 80\sqrt{S_3}, \quad (1.1)$$

где C – суммарное содержание углерода, %; S_1 – суммарное содержание остальных легирующих элементов, %; S_2 – суммарное содержание хрома в карбидах, %; S_3 – содержание молибдена Mo , вольфрама W , ванадия V и ниобия Nb в карбидах, %:

$$S_3 = Mo + 1,2W + 2V + Nb. \quad (1.2)$$

Из-за повышенных требований к долговечности штампы обычно изготавливают из кованных сталей. Предварительная ковка позволяет получить мелкодисперсную структуру стали и исключить дефекты литья и проката, что обеспечивает более высокие механические характеристики по сравнению с литым инструментом. В работе [22] рассматриваются результаты применения для изготовления прокатных валков и штампового инструмента заготовок, получаемых ковкой с закручиванием и макросдвигами структуры металла. Такая технологияковки обеспечивает повышение стойкости деформирующего инструмента в 1,23...1,58 раза по сравнению с обычной трёхсторонней ковкой.

Таблица 1 – Сравнительная стойкость инструментальных сталей

Марка стали	Относительная стойкость, η	Марка стали	Относительная стойкость, η
3Х2В8Ф	2,0-3,0	5ХГС	0,9
40Х, 50Х	0,3	5ХНТ	0,9
40ХСМФ	2,5-3,0	5ХГМ	0,6
45Х2МФ	1,5-3,0	5ХГСВФ	1,0-1,4
4Х2В5ФМ	2,2	5ХГСТФ	1,6
4Х3ВМФ	1,4	5ХНМ	0,8
4Х3В3МФС (ДИ23)	6,0	5ХНВ	1,0
4Х4М2ВФС (ДИ22)	3,0-4,5	5Х2ВМНФ (ДИ32)	2,3
4Х5В2ФС	1,8	5Х10В5МФ (наплавка)	7,0-10,0
4Х5В2ФМС	1,9	Р18	3,4
4Х5В4ФСМ	2,0	Сплав Т-620 (наплавка)	12,0-14,0
4Х8В2	1,5	Сплав ВК20 (наплавка)	15,0-25,0

Известны способы изготовления и ремонта штампового инструмента методом электрошлакового переплава, который позволяет добиться более высоких механических свойств инструментального материала, чем при изготовлении из

кованой стали (стойкость оснастки повышается в 1,4 – 3,5 раза) [23,24]. Кроме того, многократный электрошлаковый переплав окончательно изношенных деталей штампов позволяет более экономно расходовать дорогие штамповые стали.

При массовом изготовлении в штампах небольших деталей простой конфигурации приобретает целесообразность использование твердосплавных вставок [25,26]. Такие вставки обладают высокой твердостью (73-76 HRC_Э), износостойкостью и высокой теплостойкостью (до 800-1000 °С) [27], но усложняют конструкцию штампа и повышают стоимость его изготовления.

В таблице 1 приведена сравнительная стойкость штампов в зависимости от типа используемого инструментального материала [12,14].

1.2.3 Термическая, химико-термическая и механическая обработка штампов ГОШ

Традиционными методами повышения эксплуатационных свойств штамповой оснастки являются термическая и химико-термическая обработка. Термическая и химико-термическая обработка штампов проводятся с целью получения нужной структуры металла и определенной твердости и стойкости поверхности гравюры. Завышенная твердость ведет к возможности выкрашивания поверхности гравюры, недостаточная – к возможности смятия её элементов.

Термическая обработка штампов включает операции отжига, нормализации, закалки и отпуска. Порядок выполнения вышеуказанных операций зависит от размеров и назначения штампа. Термообработку обрезных, легких и средних молотовых штампов и вставок рекомендуется проводить после окончательной механической обработки. Термообработка средних и полутяжелых штампов производится между предварительной и окончательной обработкой. Тяжелые штампы подвергаются термообработке до механической обработки [28].

Параметры термообработки определяются маркой материала и условиями работы штампа. Так, например, большие температуры закалки обеспечивают

повышенную твёрдость и теплостойкость стали, меньшие – лучшую пластичность и ударную вязкость.

Для улучшения структуры металла производится термомеханическая обработка (ТМО), которая помимо перечисленных операций термической обработки включает в себя процесс деформации заготовки, например выдавливание рабочей полости [29] при температуре аустенизации. Такая обработка может повысить стойкость штампового инструмента на 40-50% по сравнению с традиционной обработкой резанием. Высокотемпературная термомеханическая обработка также позволяет существенно снизить отпускную хрупкость сталей [30].

Известна также термоциклическая обработка штампов (ТЦО), которая заключается в проведении последовательно нескольких циклов закалки и отпуска. Результаты исследований на стали 5ХНМ, приведённые в работе [31], говорят о снижении вероятности образования разгарных трещин после такой обработки.

Ниже представлены наиболее распространённые виды химико-термической обработки для штампов ГОШ, заключающейся в насыщении поверхностных слоёв материала инструмента легирующими элементами.

Цементация – процесс насыщения поверхностного слоя деталей из малоуглеродистых сталей углеродом. Применяется для упрочнения направляющих элементов штампового инструмента (направляющих колонок, втулок и т.д.).

Азотирование – процесс насыщения поверхностного слоя изделия азотом. Применяется для упрочнения рабочих деталей штампов, изготовленных из теплостойких и полутеплостойких сталей. Твёрдость азотированного слоя не снижается даже при нагреве до 600 °С. Стойкость штампов ГОШ после двухступенчатого азотирования повышается в 1,5...2 раза [32]. Недостатками азотирования являются низкая контактная выносливость и хрупкость слоя из-за его малой толщины, а также нестабильность результатов процесса азотирования [33].

Цианирование (нитроцементация) – процесс насыщения поверхностного слоя одновременно азотом и углеродом. Согласно исследованиям, приведённым в

работе [34] нитроцементация сталей для ГОШ (5ХНМ, 5ХГМ) значительно повышает их твёрдость и износостойкость (в 2...2,5 раза).

Борирование – процесс насыщения поверхностного слоя бором. Высокая твёрдость боридного слоя сохраняется до 700 °С [35].

Диффузионное хромирование – насыщение поверхностных слоёв сталей хромом для повышения коррозионной стойкости, жаростойкости, твёрдости и износостойкости. Может проводиться в комплексе с другими методами упрочнения (цементация, цианирование и др.). Хромирование может значительно повысить стойкость штамповой оснастки (в 3-4 раза), но имеет существенный недостаток – покрытие становится нестабильным при малейшем несоблюдении технологического процесса нанесения. Кроме того, возможно снижение трещиностойкости.

Алитирование. Процесс насыщения поверхностных слоёв стали алюминием с целью повышения её жаростойкости. Применяется при изготовлении форм для литья под давлением.

1.2.4 Покрyтия и наплавки гравюры штампов ГОШ

В настоящее время в инструментальном производстве широко применяется нанесение различных износостойких покрытий на обрабатывающий инструмент. Так, например, покрытие на основе нитрида титана (TiN), увеличивает стойкость инструмента в 2-3 раза, а покрытие на основе нитрида титан-алюминия (TiAlN) – более чем в 4 раза [36]. Подобные покрытия наносятся на режущий инструмент, инструмент листовой штамповки, пресс-формы, формы для литья под давлением, но в случае штампов объёмной штамповки, особенно горячей, встречаются нечасто. Это объяснимо недостаточной стойкостью покрытий при сложном механическом и термическом нагружении гравюры.

Тем не менее, известен патент [37] на штамп для горячей изотермической штамповки титана с нанесённым на гравюру многослойным покрытием из Zr, Cr, Nb или их сочетания, а также нитридов, боридов или карбидов этих же металлов

или их сочетаний. Стойкость штампов при использовании такого покрытия увеличивается в 1,7-2,4 раз.

Также известен случай нанесения на рабочие поверхности штампа для горячей высадки из стали 3Х2В8 многослойного нанокompозитного покрытия системы Si-O-C-N, благодаря чему стойкость штампа увеличилась в 2 раза [38].

Для штампов горячей штамповки более распространён способ покрытия гравюры слоем из легированных сталей и твёрдых сплавов путём её наплавки специализированными электродами. Электроискровое упрочнение помимо повышения стойкости позволяет также восстановить изношенную и покрытую трещинами рабочую поверхность инструмента.

Таблица 2 – Электроды для наплавки штампов ГОШ

Тип электрода	Марка электрода	Твёрдость наплавленного слоя (* - без термообработки), HRC _Э
Э-16Г2ХМ	ОЗШ-1	36,5 – 41,0*
Э-35Г6	ЦН-4	51,0 – 58,5*
Э-30В8Х3	ЦШ-1	41,5 – 51,5
Э-35Х12В3СФ	Ш-16	51,0 – 59,0
Э-90Х4М4ВФ	ОЗИ-3	59,0 – 64,0
Э-80В18Х4Ф	ЦИ-1М	58,0 – 63,0
Э-90В10Х5Ф2	ЦИ-2У	58,0 – 63,0
Э-105В6Х5М3Ф3	И-1	61,0 – 65,0
Э-10К15В7М5Х3СФ	ОЗИ-4	53,0 – 59,0
Э-10К18В11М10Х3СФ	ОЗИ-5	63,0 – 67,0

Типы и химический состав электродов, используемых для наплавки поверхностных слоёв ответственных деталей регламентируются ГОСТ 10051-75 [39]. В таблице 2 приведены механические свойства и наиболее распространённые марки электродов по ГОСТ 10051-75, применяемых для наплавки штампов горячей

штамповки. Как видно из таблицы, полученные наплавкой покрытия позволяют обеспечить высокую твёрдость гравюры при сохранении вязкой сердцевины. Для повышения трещиностойкости наплавленного слоя зачастую вводится дополнительная операция отжига.

Для предотвращения отслаивания наплавленного покрытия необходим тщательный подбор материала электрода в соответствии с материалом подложки. Использование материалов с отличными друг от друга коэффициентами линейного расширения и модулем упругости увеличивает вероятность отслаивания и образования разгарных трещин под действием возникающих растягивающих напряжений.

1.2.5 Температурный режим штамповки и смазка штампов ГОШ

Температурный режим штамповки оказывает сильнейшее влияние на механические свойства штамповых сталей. Температура началаковки большинства сталей лежит в пределах 1200-1300 °С. Температуры теплостойкости инструментальных сталей для горячей штамповки значительно ниже. Так, например, теплостойкость широко используемой стали 5ХНМ, предназначенной для изготовления молотовых и прессовых вставок, составляет 590°С. Теплостойкая сталь 3Х2В8Ф сохраняет свои свойства при нагреве до температуры 630-650 °С. Сильный нагрев штампа приводит к снижению износостойкости гравюры и увеличивается вероятность её смятия на отдельных участках ввиду снижения прочностных свойств.

Как правило, температура гравюры нижнего штампа несколько выше (на 50-120 °С [40] и больше), чем у верхнего штампа, вследствие её более длительного контакта с нагретой заготовкой. Согласно собственным расчётам процессов горячей штамповки некоторых поковок на молотах в программном комплексе DEFORM-3D, перепад температур для некоторых участков гравюры нижнего штампа может достигать 300-400 °С (с учётом предварительного подогрева кубика до 250-300 °С).

Нагрев штампа в пределах температурного интервала синеломкости (200-300 °С у большинства сталей, что соответствует рекомендуемой температуре подогрева штампа перед эксплуатацией) повышает риск возникновения усталостных трещин.

Для уменьшения влияния температурного фактора на стойкость штампов принимаются следующие меры:

- 1) Снижение теплопроводности между деформируемой поковкой и гравюрой штампа. Реализуется путём нанесения различных смазок и смазочно-охлаждающих жидкостей (графитные и безграфитные смазки, растворы солей, жидкое стекло и др.). При этом помимо снижения температуры штампа происходит улучшение условий трения и снижение усилий деформирования, уменьшается изнашиваемость гравюры.
- 2) Уменьшение времени контакта между деформируемой поковкой и штампом. Достигается как за счёт повышения скорости рабочих органов кузнечно-штамповочного оборудования и уменьшения числа ударов по деформируемой заготовке, так и за счёт снижения затрат времени на установку заготовки в штампе и извлечение готовой поковки.
- 3) Принудительное охлаждение штампа. Различают наружное и внутреннее охлаждение [41]. При наружном охлаждении во время простоя на гравюру непосредственно подаются смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), вода, воздух или пар. Недостатком данного метода является невозможность постоянного охлаждения гравюры штампа, что приводит к значительным периодическим перепадам температур. Внутреннее охлаждение производится через специально подготовленные каналы и полости в инструменте. Стойкость штампов с внутренним охлаждением в два раза выше, чем при использовании наружного. Недостатки данного метода – усложнение конструкции штампа и невозможность непосредственного охлаждения гравюры, так как охлаждающие каналы должны находиться на достаточном удалении от неё.

В конце 60-х годов на кафедре «Ковки-штамповки» МИМиС Г.В. Смирновым и Д.М. Корнеевым было установлено повышение стойкости к

образованию разгарных трещин в 2 раза при использовании внутреннего охлаждения штампов. Внутреннее охлаждение нижнего бойка на молоте с массой падающих частей 15 тонн применяют в настоящее время на предприятии ОАО «Русполимет», что серьёзно увеличило стойкость бойка [22]. В 1978 г. в кузнечно-штамповочном цехе «КамАЗ» было предложено устройство для охлаждения штампов горячей штамповки, дающее прирост стойкости штампов в 2 раза [22,42].

Перспективным для проблем стойкости теоретически может являться метод комбинированного адаптивного охлаждения, сочетающий наружное и внутреннее охлаждение при контроле посредством термодатчиков расхода охлаждающей жидкости. Это позволит ещё сильнее уменьшить температуру нагрева гравюры (и повысить износостойкость) и поддерживать её постоянное значение, чтобы снизить влияние термоциклических нагрузок.

В работе [43] Акаро И.Л. рассматриваются возможности термостабилизации работы кузнечных штампов, приведены различные конструкции устройств для подогрева штампов и нанесения смазочно-охлаждающих жидкостей. Опыт использования системы термостабилизации при штамповке поковок клапанов двигателей внутреннего сгорания показал, что стойкость матриц увеличивается на 30-60%, сокращается число переналадок инструмента и возрастает производительность.

При применении принудительного охлаждения следует избегать резких перепадов температуры, так как велика вероятность частичной закалки перегретых выше температуры аустенизации участков гравюры.

1.2.6 Особенности конструкции кузнечно-штамповочного оборудования, влияющие на стойкость штампов ГОШ

Стойкость штампов ГОШ по критерию трещиностойкости во многом зависит от наличия в конструкции концентраторов напряжений, поэтому в опасных сечениях гравюры штампа предусматриваются увеличенные скругления. Минимальные рекомендуемые величины радиусов скруглений наружных углов

поковок (внутренних углов штампов) приведены в ГОСТ 7505-89 [44]. Кроме того, увеличение скруглений положительно влияет на характер течения штампуемого металла. Использование малых радиусов скруглений хоть и позволяет зачастую получить меньшие припуски на дальнейшую обработку поковок, но и приводит к значительному увеличению необходимых усилий на заполнение углов полости штампа, что в сочетании с повышением концентрации напряжений негативно влияет на усталостную стойкость штампа.

Значительное влияние на стойкость открытых штампов оказывает течение металла в области облойного мостика. Облой обеспечивает лучшее заполнение полости штампа, создавая подпор деформируемого металла. Уменьшение толщины и радиусов скругления облойного мостика улучшает заполняемость полости штампа, но затрудняет течение металла в облой, что ведёт к росту распирающих усилий на стенки штампа и к снижению его стойкости (таблица 3) [45]. Увеличение толщины облойного мостика на 10% повышает стойкость штампа на 15-20% [12].

Таблица 3 – Влияние толщины и радиусов скругления облойного мостика на стойкость штампов

Толщина облойного мостика h_o , мм	Радиус скругления облойного мостика r , мм	Стойкость, шт.
1,8	2,0	700
2,0	2,0	1500
2,2	3,0	2700
2,5	4,0	3800

Добиться снижения усилий деформирования тонкого слоя металла на облойном мостике можно путём введения переменного по толщине (расширяющего в направлении от штамповой полости) облойного мостика, позволяющего в то же время обеспечить достаточный подпор металла для заполнения штампа. В работе [46] говорится о повышении стойкости в 3-4 раза при

применении подобной конструкции облойной канавки. Тем не менее, следует отметить недостаток такого решения в повышенном изнашивании выступающей части облойного мостика.

В работе [6] рассматривается конструкция расширяющегося фигурного облойного мостика. Данное решение позволяет обеспечить достаточный подпор штампуемого металла при снижении технологических усилий штамповки.

Подобное облойному мостику влияние на стойкость штампов ГОШ оказывают и участки штамповой полости, в которых происходит течение тонкого слоя металла. Примерами может служить осадка тонкой перемычки под дальнейшую пробивку в штампуемой поковке или выдавливание деталей с тонкостенными ребрами [47], изготовление которых по традиционным методам штамповочного производства бывает затруднительным из-за сложности заполнения полостей гравюры штампа при сохранении достаточной стойкости инструмента.

При изготовлении поковок в штампах со сложной формой гравюры при значительном влиянии концентрации напряжений или при штамповке жаростойких сталей с повышенным значением предела текучести представляется целесообразным использование бандажированных матриц. Бандаж обычно применяют в случае холодной объёмной штамповки для компенсации растягивающих напряжений, но и при горячей он может существенно повысить трещиностойкость штампа. В работе [48] установлено, что при применении многослойного бандажа за счёт перераспределения напряжений возможно увеличение ресурса кузнечных матриц в 1,5-1,9 раза.

Нашли широкое применение конструкции штампов со сборной гравюрой. Простейший пример такой конструкции – штамп со сменными запрессованными прошивными вставками – представлен на рисунке 3. Использование сборных конструкций упрощает изготовление штампов со сложной геометрией поковки и позволяет заменить наиболее изношенные детали, что способствует экономии инструментального материала.

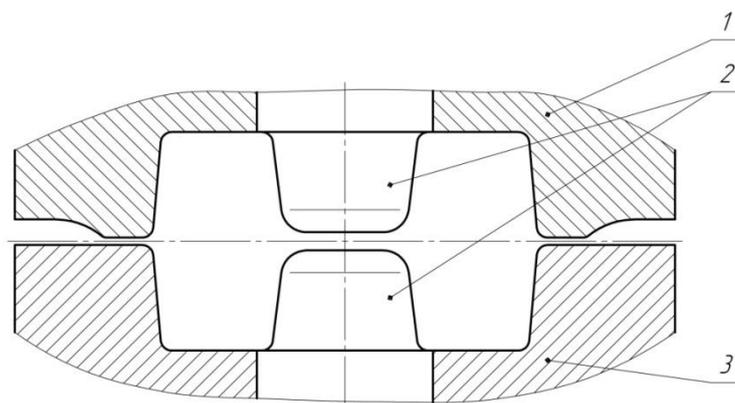


Рисунок 3 – Конструкция штампа со сменными вставками:

1 – верхний штамп; 2 – сменные вставки; 3 – нижний штамп

На стойкость штампов могут оказывать влияние некоторые особенности используемого кузнечно-штамповочного оборудования. Неточность при регулировке закрытой высоты штампа, помимо отрицательного влияния на точность изготавливаемых поковок, может привести к перештамповке, что при наличии тонкостенных элементов в поковке (облойный мостик, перемычки под пробивку и т.п.) ведёт к значительному росту напряжений на гравюру штампа и снижению его стойкости.

Также играет роль и жёсткость станины прессы. В работе [49] рассмотрено влияние жёсткости станин кузнечно-штамповочного оборудования на стойкость штампового инструмента и предложены новые варианты сечения стоек. Раскрытие станины прессы при рабочих нагрузках может привести не только к изменению высотных параметров поковки и изгибу направляющих, но и к небольшому наклону верхней матрицы штампа, что сопровождается перераспределением течения деформируемого металла. В результате этого гравюра становится неравномерно нагружена и её отдельные участки начинают изнашиваться быстрее. Данное явление более характерно для оборудования с открытой станиной, на прессах с закрытой станиной оно проявляется значительно реже.

Неравномерное течение деформируемого металла и, как следствие, перераспределение нагрузок чаще проявляется в случае использования неточно отрезанных заготовок (например, при несоблюдении перпендикулярности

торцевой поверхности цилиндрической заготовки относительно её оси) или при неточном позиционировании заготовок в ручье штампа. От точности отрезки исходной заготовки в случае закрытой штамповки сильно зависят качество готовых поковок и стойкость штамповой оснастки. Для повышения точности позиционирования заготовок при установке их в штамп в целях повышения качества штампуемых поковок может быть целесообразным сделать наметку на заготовке по форме сопрягаемой с ней гравюры. Например, на рисунке 4 показан пример установки заготовки в штамп по предварительно полученному в ней резанием или выдавливанием углублению.

При широком внедрении САПР в производство мало внимания уделяется проблеме снижения общих нагрузок на оборудование путём прогнозирования течения деформируемого материала в полости штампа. Путём подбора оптимальных размеров и формы заготовки и гравюры можно добиться полного заполнения полости штампа при уменьшенной длине и увеличенной толщине облоя, что ведёт к снижению усилий штамповки, а следовательно, и к увеличению стойкости штампа. Результаты исследований влияния геометрии инструмента и заготовок на стойкость штамповой оснастки изложены в главе 3.

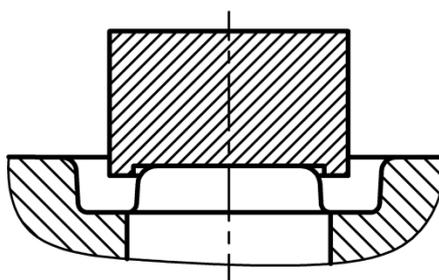


Рисунок 4 – Пример центрирования заготовки в штампе по наметке

1.3 Методы определения стойкости штампов ГОШ

Для количественного определения предполагаемой стойкости на этапе проектирования штампов традиционно используются различные расчётно-аналитические методы. В литературе приводятся формулы для определения стойкости штампов ГОШ, основанные на экспериментальных и статистических

исследованиях. Такие формулы считаются универсальными для штампов различных конфигураций и типоразмеров. Но при расчёте стойкости обычно учитывается лишь часть параметров штамповки, таких как масса поковки и соотношения её габаритных размеров. Большинство расчётов не учитывает условия трения и температурный режим штамповки, не везде оценивается влияние марки инструментального и штампуемого материала. Поэтому расчёты по статистическим зависимостям является приблизительным.

Для оценки текущего состояния изготовленных и эксплуатируемых штампов применяются различные методы неразрушающего контроля. Такие методы позволяют дать качественную оценку состояния материала инструмента, определить наличие каких-либо макро- и микродефектов (трещины, включения, раковины и т.д.). Однако случаи применения методов неразрушающего контроля для количественной оценки структурных изменений в металле, которые происходят при одновременном воздействии на инструмент силового и температурного факторов, весьма редки.

Перспективными в вопросе прогнозирования стойкости штамповой оснастки могут стать инструменты, основанные на применении метода конечных элементов и входящие в системы автоматизированного проектирования. Такое программное обеспечение позволяет дать оценку напряжённо-деформированному состоянию заготовки и инструмента с учётом нагрева, трения, характеристик используемых материалов и других технологических параметров. Некоторые программные комплексы, например DEFORM-3D, позволяют вычислить предположительный износ инструмента (для этого необходимо предварительное экспериментальное определение коэффициентов трения). Однако, автору не известны примеры подобного программного обеспечения, позволяющие дать комплексную оценку технологического ресурса работы штампов ГОШ.

Далее приведена характеристика некоторых расчётно-аналитических методов определения стойкости и физических методов неразрушающего контроля для штампов ГОШ.

1.3.1 Расчётно-аналитические методы

Наиболее часто используемыми для определения проектной стойкости штамповой оснастки являются расчётно-аналитические методы, основанные на статистических исследованиях отработавших свой ресурс штампов в рамках цеха, предприятия, отрасли. В качестве переменных для расчёта используются такие факторы как масса и геометрическая сложность поковки, марка штампуемого материала и др.

ГОСТ 21546-88 [11] устанавливает определение безотказной наработки T_6 (тыс. шт.) до ремонта молотового штампа по формуле:

$$T_6 = C_6 \cdot K_M \cdot K_H \cdot K_T \cdot K_{II} \cdot K_{TO} \cdot K_C \cdot K_p \cdot n, \quad (1.3)$$

где C_6 – номинальная наработка штампа, тыс. шт., определяется по таблице в зависимости от формы и размеров поковки; K_M – коэффициент, учитывающий материал поковки; K_H – коэффициент, учитывающий способ нагрева заготовки; K_T – коэффициент, учитывающий точность изготовления поковки; K_{II} – коэффициент, учитывающий способ изготовления штампа (вид заготовки); K_{TO} – коэффициент, учитывающий термическую и химико-термическую обработку штампа; K_C – коэффициент, учитывающий степень сложности поковки; K_p – коэффициент, учитывающий конфигурацию поверхности разъёма штампа (плоская или изогнутая); n – число одновременно штампуемых поковок.

В справочниках [41] и [45] приводятся рекомендации для определения стойкости штампов. Приведена формула, позволяющая ориентировочно рассчитать стойкость молотовых штампов C (шт.) в зависимости от массы и формы поковки:

$$C = \frac{A}{G^m}, \quad (1.4)$$

где G – масса поковки, кг; A и m – коэффициенты, учитывающие форму поковки, $A=940$ и $m=0,42$ – для осесимметричных поковок, $A=8400$ и $m=0,4$ – для поковок, имеющих форму вала, $A=4500$ и $m=0,35$ – для удлиненных в плане поковок. В формуле не учитываются сложность поковки, температурный режим штамповки, условия трения.

В работе [14], помимо формулы (1.4) приводится формула Г.П. Тетерина, предназначенная для расчёта стойкости молотовых штампов C (шт.) при штамповке круглых в плане поковок:

$$\begin{aligned} \lg C = & 4,155 - 0,560 \lg g - 0,388 \lg S - 0,0682 \frac{b_3}{h_3} + 1,464 \frac{h_3}{H} + \\ & + 0,0169 \frac{h_3}{H} \lg g + 0,0473 \frac{b_3}{h_3} \lg S - 0,143 \lg g \lg S, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где g – масса поковки, кг; b_3/h_3 – отношение ширины облойной канавки к её полной высоте; h_3/H – отношение высоты облойной канавки к высоте поковки; S – безразмерный критерий сложности поковки. S определяется по формуле:

$$S = \frac{\left(\frac{\Pi^2}{F}\right)_{\text{п}}}{\left(\frac{\Pi^2}{F}\right)_{\text{ц.п}}} \cdot \frac{2R_{\text{ц.т}}}{R_{\text{п}}}, \quad (1.6)$$

где Π – периметр; F – площадь поперечного сечения; $R_{\text{п}}$ – радиус поковки; $R_{\text{ц.т}}$ – радиус центра тяжести половины осевого сечения поковки. Индекс «п» относится к поковке, «ц.п» – к описанному вокруг неё цилиндру.

В той же работе приводится предложенная Г.П. Тетериным формула для расчёта стойкости штампов КГШП при изготовлении круглых в плане поковок:

$$C = \frac{10^5}{21,22 \frac{b_3}{h_3} - 2,283 \left(\frac{b_3}{h_3}\right)^2 + 0,2301gS + 0,097g^2 - 94,08 \frac{h_3}{H} - 14,71}. \quad (1.7)$$

Формулы (1.5) и (1.7) получены для штампов, на которых изготавливались поковки из углеродистых и низколегированных сталей. При штамповке сталей иных марок стойкость инструмента составляет 0,86-1,00 (в зависимости от материала) от значения, полученного по этим формулам. При расчёте не учитываются температурный режим и условия трения.

В работе [14] также всесторонне рассматривается влияние множества металлургических и технологических факторов на стойкость штампов горячей штамповки, но автор не приводит единой методики расчёта стойкости с учётом этих факторов.

Петров А.Н. в своих работах [50-52] предлагает иной метод определения стойкости штампов для КГШП. Данная расчётная зависимость учитывает влияние контактного трения, массы и габаритов поковки:

$$C = m^{-0,0536}(19369,5 - 49750\mu - 16075\eta + 57500\mu\eta), \quad (1.8)$$

где C – стойкость штампа, шт.; m – масса поковки, кг; μ – коэффициент трения с учётом смазки и температуры штампа; $\eta = \frac{H}{\sqrt{LB}}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий форму поковки высотой H , длиной L и шириной B .

К достоинствам приведённых расчётно-аналитических методов относится простота их использования. Недостатком данных методов прогнозирования стойкости является невозможность относительно точного расчёта ресурса работы инструмента заданной конструкции и типоразмера с учётом реального состояния инструментального материала.

1.3.2 Физические методы контроля

Физические методы контроля позволяют качественно и в некоторых случаях количественно определить остаточный ресурс работы оборудования на этапе его эксплуатации. Рассмотрим некоторые наиболее распространённые методы неразрушающего контроля [53], применимые к кузнечно-штамповочному оборудованию.

Визуальные методы контроля, к которым можно отнести также **капиллярный и магнитопорошковый методы**. Предназначены для обнаружения видимых, слабовидимых или невидимых дефектов материала, выходящих на контролируемую поверхность. Заключаются в определении местоположения дефекта в месте повышенной концентрации предварительно нанесённых на исследуемую поверхность технологических веществ. Достоинства методов в высокой чувствительности (возможно выявление дефектов на ранней стадии их зарождения) при относительной простоте и низкой стоимости. Недостатки – в невозможности выявления внутренних дефектов (усадочные раковины от литья; поры; трещины, не выходящие на поверхность), необходимости очистки

исследуемой поверхности и сугубо качественном определении текущего состояния материала.

Ультразвуковой неразрушающий контроль основан на изучении характера распространения ультразвуковых колебаний в изучаемой среде. Позволяет установить наличие различных дефектов сплошности и однородности материала. Основными преимуществами метода является простота и скорость исследования; возможна диагностика исследуемых деталей в реальном времени, без их разгрузки. Недостатками метода являются невозможность определения точных размеров дефекта и повышенные требования к качеству и форме поверхности изучаемой детали. Метод используется для контроля сварных соединений в ответственных конструкциях (трубопроводы, грузоподъемные краны, железнодорожная техника). В кузнечно-штамповочном производстве в основном применяется для контроля сплошности и однородности материала ответственных поковок. Для контроля штампового инструмента применяется редко и носит сугубо качественный характер исследования.

Радиационные методы контроля. Эти методы применяются для выявления нарушений сплошности и однородности материала, в том числе при контроле сварных соединений. Методы основаны на взаимодействии проникающих излучений (электромагнитных и корпускулярных) с объектом контроля и регистрацией результатов этого взаимодействия. Достоинство радиационных методов заключается в их высокой чувствительности при возможности измерения размеров дефекта. Недостатками являются повышенная опасность для обслуживающего персонала при работе с радиационными элементами и стоимость исследований. В некоторых случаях методы могут применяться для контроля поковок на наличие внутренних дефектов, для штампового инструмента малоприменимы.

Вихретоковый контроль. Метод основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых этим полем в электропроводящем объекте контроля. Используется для контроля сплошности и однородности, контроля размеров, определения физико-

механических параметров, обнаружения электропроводящих объектов. Чувствителен к структурному состоянию измеряемого материала. Достоинства метода в отсутствии необходимости физического контакта датчика с изделием, высокой производительности и возможности применения без использования специальной контактной среды, возможность контроля движущегося объекта.

Магнитные методы контроля. К данному классу относятся различные методы неразрушающего контроля, основанные на регистрации каких-либо магнитных показателей материала (коэрцитивной силы, намагниченности, напряжённости, магнитной проницаемости и т.д.), предварительно намагниченного внешним магнитным полем. Применяются для контроля сплошности материала, толщины нанесённых покрытий, толщины изделий (толщинометры), качества термической или химико-термической обработки, определения действующих напряжений в конструкции под нагрузкой, а также для определения механических свойств материала, имеющих в той или иной мере корреляцию с магнитными свойствами.

Механизм изменения характеристик петли магнитного гистерезиса под действием внешних или внутренних факторов основан на силовых и энергетических взаимодействиях перемещающихся при перемагничивании ферромагнетика доменных границ с дефектами кристаллической решетки, а также участии «виновников» ферромагнетизма – электронов недостроенных *d*-оболочек атомов в формировании сил межатомной связи. По этой причине любое нагружение сил межатомной связи, вызванное механическими или термическими воздействиями, сразу же отражается на магнитных свойствах металла. Магнитные методы неразрушающего контроля благодаря своей высокой чувствительности к структурным изменениям материала могут использоваться для оценки усталостного разрушения.

Магнитные методы получили широкую популярность ввиду своей простоты и доступности оборудования, по большей части обладающего весьма компактными размерами. Большинство методов не требуют обязательного присутствия в процессе измерения человека, что позволяет добиться высокого уровня

автоматизации. Основные положения и требования к проведению контроля стальных изделий магнитными методами регламентируются ГОСТ 30415-96 «Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом» [54].

Особенность методов магнитного контроля в том, что материал контролируемого изделия должен обладать хорошими магнитными свойствами. Поэтому для дальнейших исследований следует установить возможность применения магнитных методов для контроля изделий из инструментальных сталей для горячей штамповки. Для этого воспользуемся диаграммой Шеффлера.

Диаграмма Шеффлера [55,56] применяется для определения фазового состава конструкционных нержавеющей сталей. Как известно, фазовый состав непосредственно влияет на магнитные свойства сталей. α -железо, образующее феррит и мартенсит, обладает лучшими магнитными свойствами, чем γ -железо, образующее аустенит [57]. Поэтому легирующие элементы по их влиянию на фазовый состав и соответственно на магнитные свойства сталей можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся элементы, повышающие магнитную проницаемость и снижающие величину коэрцитивной силы. Для этой группы рассчитывается хромовый эквивалент m_{Cr} (%) по формуле [55,56]:

$$m_{Cr} = Cr + 1,5Si + Mo + Nb, \quad (1.9)$$

где Cr , Si , Mo и Nb – содержание соответственно хрома, кремния, молибдена и ниобия в процентах. Ко второй группе относятся элементы, уменьшающие магнитную проницаемость и повышающие коэрцитивную силу. Для этой группы элементов рассчитывается никелевый эквивалент m_{Ni} (%) по формуле [55,56]:

$$m_{Ni} = Ni + 0,5Mn + 30C, \quad (1.10)$$

где Ni , Mn и C – содержание соответственно никеля, марганца и углерода в процентах.

Для расчёта по формулам (1.9) и (1.10) использовались данные для инструментальных сталей горячей штамповки из таблицы 4, химический состав и термообработка которых определялись как среднее по разбросу допускаемых

значений содержания элемента из ГОСТ 5950 [58,59]. На рисунке 5 приведена диаграмма Шеффлера, на которой точками обозначено расположение сталей из таблицы 4.

Таблица 4 – Исходная выборка инструментальных сталей ГОШ

№	Марка материала	$T_{зак.},$ °C	$T_{отп.},$ °C	Химический состав							
				$Ni,$ %	$Mo,$ %	$W,$ %	$Cr,$ %	$Si,$ %	$V,$ %	$C,$ %	$Mn,$ %
1	3X2B8Ф	1130	650	0,18	0,25	8,00	2,45	0,28	0,35	0,35	0,28
2	3X3M3Ф	1040	600	0,20	2,75	0,10	3,15	0,25	0,50	0,31	0,35
3	4X2B2MФC	1080	630	0,18	0,95	2,10	2,75	0,45	0,75	0,46	0,45
4	4X2B5MФ	1080	550	0,20	0,75	5,00	2,60	0,25	0,75	0,35	0,28
5	4X2HMФ	910	530	0,95	0,50	0,00	2,25	0,27	0,18	0,39	0,65
6	4X3BMФ	1060	570	0,20	0,50	0,80	3,15	0,75	0,75	0,44	0,45
7	4X4BMФC	1070	680	0,30	1,35	1,00	3,60	0,80	0,75	0,41	0,35
8	4X5B2ФC	1030	540	0,20	0,10	1,90	5,00	1,00	0,75	0,40	0,30
9	4X5MФ1C	1020	580	0,20	1,35	0,10	5,00	1,05	0,95	0,39	0,35
10	4X5MФC	1000	500	0,20	1,35	0,10	5,00	1,05	0,40	0,36	0,35
11	4XMHФC	930	520	1,40	0,75	0,10	1,40	0,85	0,43	0,40	0,30
12	4XMФC	950	550	0,20	1,05	0,10	1,65	0,65	0,40	0,41	0,65
13	5X2MHФ	980	550	1,40	0,95	0,10	1,75	0,25	0,40	0,50	0,55
14	5X3B3MФC	1140	550	0,20	0,95	3,30	2,85	0,65	1,65	0,49	0,35
15	5XГМ	850	450	0,18	0,23	0,10	0,75	0,43	0,08	0,55	1,40
16	5XHB	840	500	1,60	0,10	0,55	0,65	0,25	0,08	0,55	0,65
17	5XHBС	860	500	1,00	0,10	0,55	1,45	0,75	0,08	0,55	0,45
18	5XHM	850	450	1,60	0,23	0,10	0,65	0,25	0,08	0,55	0,65
19	7X3	850	500	0,20	0,10	0,10	3,50	0,25	0,08	0,70	0,30
20	8X3	870	450	0,20	0,10	0,10	3,50	0,25	0,08	0,80	0,30

Как видно на диаграмме, большинство исследуемых сталей ГОШ находятся в области с преобладанием мартенситной и мартенситно-аустенитной составляющих, что предполагает их хорошие магнитные свойства и возможность применения к ним магнитных методов неразрушающего контроля.

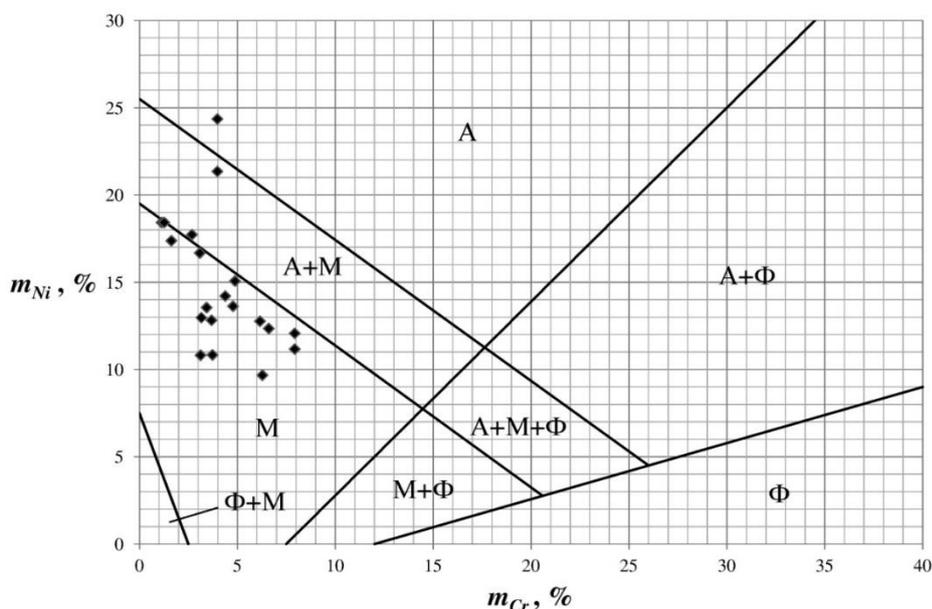


Рисунок 5 – Диаграмма Шеффлера с указанием расположения на ней точек, соответствующих инструментальным сталям ГОШ
(Ф – феррит; А – аустенит; М – мартенсит)

1.4 Коэрцитивная сила как показатель остаточного ресурса

Несмотря на всё разнообразие методов неразрушающего контроля, применение их для количественной оценки остаточного ресурса механизмов и конструкций зачастую весьма затруднительно. Выходом из такого положения может стать метод, основанный на измерении величины коэрцитивной силы, позволяющий контролировать структурное состояние материала в реальном времени.

Контроль по коэрцитивной силе уже давно используется в машиностроении для выявления внутренних дефектов при исследовании металла заготовок, изделий, конструкций, сварных швов и пр., но методически слабо проработан для количественной оценки структурного состояния материала. В «Большой Советской

Энциклопедии» [60] даётся следующее определение коэрцитивной силы: «коэрцитивная сила, коэрцитивное поле (от лат. *coërcitio* — удерживание), одна из характеристик явления гистерезиса (рисунок 6). В магнитном гистерезисе коэрцитивная сила — это напряжённость H_c магнитного поля, в котором ферромагнитный образец, первоначально намагниченный до насыщения, размагничивается... Измеряют коэрцитивную силу коэрцитиметрами. Величина коэрцитивной силы ферромагнетиков меняется в широких пределах от 10^{-3} до 10^4 э (от $8 \cdot 10^{-2}$ до $8 \cdot 10^5$ А/м). Для данного магнитного материала коэрцитивная сила в большой степени зависит от способа приготовления образца и его обработки, а также от внешних условий, например температуры... Значение коэрцитивной силы определяется факторами, препятствующими перемагничиванию образца. Наличие в образцах примесей, дефектов кристаллической решётки, различного рода неоднородностей затрудняет движение границ магнитных доменов и тем самым повышает H_c .»

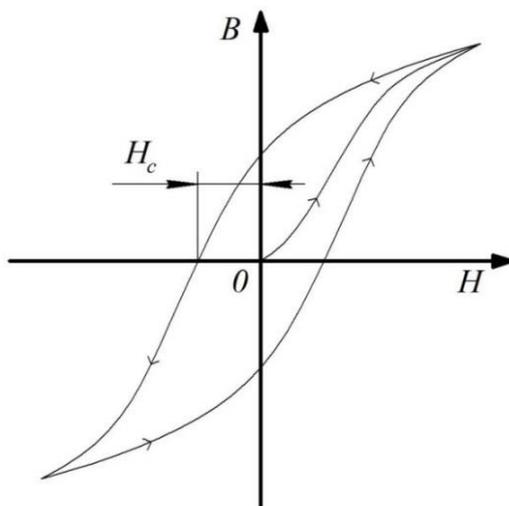


Рисунок 6 – Коэрцитивная сила H_c на петле магнитного гистерезиса

Таким образом, контроль по коэрцитивной силе даёт возможность количественно определить текущее состояние материала контролируемого изделия, тип структуры, наличие дефектов, уровень усталостных повреждений без разрушения самого изделия. Величина коэрцитивной силы зависит только от

текущей структуры материала, а не от геометрических характеристик (формы и размеров) контролируемого изделия. Вместе с тем приборы для измерения коэрцитивной силы компактны, недороги в обслуживании и позволяют оперативно снимать показания. Всё это говорит о большом потенциале коэрцитиметрии как метода неразрушающего контроля.

Принцип работы компактных приставных коэрцитиметров, например отечественного прибора КИМ-2М (рисунок 7), состоит в намагничивании контролируемого участка детали с последующим размагничиванием его нарастающим магнитным полем, фиксации напряженности поля, соответствующей коэрцитивной силе материала детали, и измерении амплитуды сигнала (тока размагничивания, пропорционального величине коэрцитивной силы H_c) с датчика Холла.



Рисунок 7 – Коэрцитиметр КИМ-2М в процессе измерения коэрцитивной силы изделия цилиндрической формы

Однако данный метод неразрушающего контроля не лишён недостатков и ограничений. Для проведения контроля необходимо, чтобы исследуемый материал обладал хорошими магнитными свойствами. Также следует отметить снижение точности измерений при появлении зазора в магнитной цепи при использовании приборов с приставными магнитами. Поэтому поверхность контролируемого объекта для точных измерений должна быть хорошо очищена от немагнитопроводящих слоёв (краска, смазки, окислы и т.п.), а также должно

обеспечиваться достаточно плотное прилегание магнитных полюсов преобразователя к контролируемой поверхности, что зачастую затруднительно при контроле изделий сложной формы. В настоящее время разрабатываются конструкции коэрцитиметров, в которых влияние зазора в магнитной цепи компенсируется на этапе предварительной обработки первичных измеренных сигналов [61]. Для контроля изделий сложной формы применяются фигурные накладки на магнитные полюса преобразователя (рисунок 7), изготовленные из электротехнической стали.

В литературе приводятся зависимости величины коэрцитивной силы от структурных параметров материала. Известно, что величина коэрцитивной силы H_c (А/м) обратно пропорциональна размеру зерна металла [62,63]:

$$H_c \approx A/d_3 + B, \quad (1.11)$$

где A , B – коэффициенты; d_3 – средний размер зерна, м. Согласно экспериментальным исследованиям [64] коэффициенты в формуле (1.11) составляют: для железа – $A = 0,0018$ А, $B = 0$; для стали – $A = 0,0032$ А, $B = 32$ А/м. Влияние плотности дислокаций N на величину коэрцитивной силы описывается формулой [62,65]:

$$H_c \approx \lambda_s G |b| \sqrt{N} / M_s, \quad (1.12)$$

где λ_s – магнитострикция материала; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса; M_s – намагниченность насыщения материала.

Известен метод определения коэрцитивной силы для конструкционных сталей в состоянии поставки (без термообработки) на основе их химического состава, предложенный Н.Д. Богачёвой [56,66]. Автор предлагает определять начальную коэрцитивную силу $H_{cн}$ (кА/м) в сталях по формуле:

$$H_{cн} = \sum_{i=2}^n k_i b_i; \quad (1.13)$$

где b_i – содержание i -ого легирующего элемента в стали, %; k_i – удельная коэрцитивная сила, приходящаяся на 1 % i -ого элемента из m легирующих элементов ($m \leq n$). Величина k_i по данным автора составляет: для углерода – $k_1 = 1,6$ кА/м; для никеля – $k_2 = 0,3$ кА/м; для марганца – $k_3 = 0,09$ кА/м; для

хрома – $k_4 = 0,06$ кА/м; для кремния – $k_5 = 0,2$ кА/м; для молибдена – $k_6 = 0,15$ кА/м; для ниобия – $k_7 = 1,2$ кА/м. Для термообработанных сталей вводится поправка вида:

$$\Delta H_{\text{сто}} = \sum_{i=1}^{n_0} a_i t_i^0, \quad (1.14)$$

где a_i – удельная ΔH_c для каждой i -ой операции; t_i^0 – температура при i -ой операции, °С; n_0 – число операций при термообработке. Для закалки $a_{\text{зак}} \approx 0,003$ (кА/м)/°С, для отпуска $a_{\text{отп}} = -0,004$ (кА/м)/°С.

В связи с тем, что на величину коэрцитивной силы оказывает сильное влияние химический состав и термообработка стали, представляются широкие возможности для применения метода контроля по коэрцитивной силе при идентификации марки материала [67,68]. Однако для точной идентификации при сортировке легированных сталей рекомендуется совмещать измерения коэрцитивной силы с другими видами контроля.

Широкие исследования в области магнитного контроля качества изделий и коэрцитиметрии, в частности, проводились сотрудниками лаборатории магнитного структурного анализа Института физики металлов Уральского отделения Российской академии наук (Михеев М.Н., Горкунов Э.С., Бида Г.В., Ничипурук А.П., Костин В.Н., Царькова Т.П. и др.) [53,61,62,69-81]. Авторами были заложены основы неразрушающего контроля поверхностно-упрочненных слоёв на деталях с помощью приставных электромагнитов. Были проведены исследования магнитных свойств широкого спектра материалов в зависимости от их механических свойств и предшествующей термообработки. Сотрудниками лаборатории разработаны приборы для неразрушающего контроля: коэрцитиметр КИФМ-1, магнитный структуроскоп МС-401 (совместно с ООО «Микроакустика»), коэрцитиметр КИФМ-1Х, ферритометр ФХ-3 для оценки количества ферромагнитной фазы в аустенитных сталях, измеритель магнитной проницаемости аустенитных сталей ИМПАС-1, измеритель индукции постоянных, переменных и импульсных магнитных полей ТХ-4, индукционный дефектоскоп ДПС-7 для контроля качества пайки соединений статоров электрических машин,

приставной коэрцитиметр на вращающихся постоянных магнитах [74]. Был разработан многопараметровый метод неразрушающего контроля качества термоупрочнённых изделий на основе коэрцитивной силы H_C , намагниченности насыщения M_s и релаксационной намагниченности M_{Hr} [75]. Исследована возможность уменьшения влияния зазора в составной цепи “преобразователь-объект” и формы контролируемых объектов на результаты локального измерения их коэрцитивной силы и индукции коэрцитивного возврата [73,77]. В работе [78] описываются закономерности изменения коэрцитивной силы в углеродистых и трубных сталях под действием двухосных нагрузок; установлена возможность определения в этих сталях степени пластической деформации и напряжённого состояния при упругой деформации по величине коэрцитивной силы при двухосном нагружении.

Также обширные исследования магнитных свойств материалов и их применение в неразрушающем контроле проводились в Институте прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (Зацепин Н.Н., Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Осипов А.А.) [82-89]. Научные достижения [90] лаборатории связаны с установлением взаимосвязи между магнитными и механическими свойствами и структурой широкой номенклатуры сталей после различных видов термической обработки. Показана принципиальная возможность контроля изделий из этих марок сталей по коэрцитивной силе и остаточной намагниченности. Разработаны математические модели, описывающие основную кривую намагничивания, предельную и частные петли магнитного гистерезиса. Получены аналитические выражения для описания центрального коэффициента размагничивания стержней круглого и прямоугольного сечений с учетом магнитных свойств материала. Установлены закономерности распределения напряженности поля остаточной намагниченности при разных режимах локального импульсного намагничивания, магнитных свойствах материала, размерах и форме изделий, в том числе явление гистерезиса остаточной намагниченности. Рассчитано распределение намагниченности внутри поля и над поверхностью плоских и полых цилиндрических изделий, находящихся в однородном и неоднородном магнитных

поля. Разработаны методики расчета параметров разрядной цепи и ее элементов для формирования импульсов магнитного поля максимальной амплитуды с заданными длительностями импульсов и их фронтов при выбранных размерах соленоида. Разработаны приборы неразрушающего контроля на основе магнитных свойств материалов: коэрцитиметр КИПФ-1; анализаторы импульсные магнитные ИМА-М и ИМА-4М; магнитные толщиномеры МТДП-1, МТКП-1, МТНП-1, МТЦ-2М, МТЦ-3, МТДП-1, УМТ-1 и др.

Разработкой оборудования для магнитного контроля, в том числе коэрцитиметров (КРЦ-Ц-2КМ), и исследованиями закономерностей изменения магнитных свойств материалов [91-94] также занималась украинская фирма «Специальные Научные Разработки». В статье [92] рассматриваются возможности коэрцитиметрии при усталостной диагностике деталей, отмечается важность нормирования величины коэрцитивной силы для сталей в начальном состоянии и в состоянии предразрушения. В статье [93] исследуется изменение коэрцитивной силы в образцах из сталей 40Х, ШХ15 и 60С2 в зависимости от величины растягивающих напряжений; установлена взаимосвязь между ростом коэрцитивной силы при упрочнении материала и её падением в результате разупрочнения материала перед разрушением; установлено, что критическому состоянию перед разрушением соответствует уровень H_C , достигаемый при максимальной растягивающей нагрузке. В работе [94] рассматриваются результаты исследования по влиянию холоднойковки и циклического нагружения на коэрцитивную силу стали 14Х17Н2 после её термообработки: установлено снижение коэрцитивной силы при ковке (предположительно из-за распада мартенсита или залечивания микротрещин при всестороннем сжатии); установлена зависимость коэрцитивной силы от амплитуды, частоты и числа циклов при циклическом нагружении; установлен рост коэрцитивной силы при циклическом нагружении до определённого максимума, после которого происходит её снижение и разрушение образца.

В статье [95] исследуется влияние усталостных напряжений в металле сварного шва на уровень коэрцитивной силы. Значение коэрцитивной силы в

металле сварного шва сталей ВСтЗсп5 и 09Г2С выше, чем в основном металле. Величина коэрцитивной силы после циклического нагружения снижается из-за снижения плотности дислокаций в области сварного шва под действием малоциклового усталости.

В статье [96] приводятся результаты исследований характера изменения коэрцитивной силы сталей 09Г2С, Ст 3сп, Ст 0 при переходе металла из упругого состояния в упруго-пластическое. Установлен сильный рост коэрцитивной силы этих сталей при увеличении действующих растягивающих напряжений, сопровождающемся переходом в пластичное состояние. При снятии нагрузки (после разрушения) коэрцитивная сила значительно не меняется, что говорит о связи коэрцитивной силы с уровнем накопленных повреждений.

В работе [97] описан метод оценки напряжённого состояния конструкций, находящихся под нагрузкой, без снятия этой нагрузки, основанный на анализе результатов ультразвукового контроля и контроля по коэрцитивной силе. Разработанный метод пригоден для оценки остаточных напряжений в элементах конструкций, изготовленных из сталей 09Г2С, 13Г1С-У и других, обладающих выраженной анизотропией коэрцитивной силы и неоднородностью распределения упругих свойств.

В статьях [98-100] рассматриваются возможности контроля по величине коэрцитивной силы ответственных элементов нефте- и газопроводов. В статье [101] методом коэрцитиметрии проведено исследование напряжённо-деформированного состояния железнодорожных рельсов из стали марки М76В при испытаниях на сжатие. Авторами сделан вывод о возможности и целесообразности применения метода для оценки напряжённого состояния ответственных деталей.

В кузнечно-штамповочном производстве метод контроля, основанный на исследовании коэрцитивной силы, на данный момент используется преимущественно для контроля заготовок и поковок [102], случаи его применения для мониторинга состояния деформирующего инструмента достаточно редки и, как правило, служат для определения механических характеристик инструментального материала.

Известен патент [103], описывающий применение контроля по коэрцитивной силе валков прокатных станов, эксплуатируемых на предприятии ПАО «Северсталь», согласно которому при превышении величины коэрцитивной силы в 2 раза от первоначальной валки списывают или отправляют на повторную термообработку.

В статье [104] рассматриваются возможности применения магнитной структуроскопии для оценки состояния листопрокатных валков под влиянием условий эксплуатации. Установлен рост коэрцитивной силы при износе валков, позволяющий сделать вывод о текущем состоянии поверхности валка и его остаточном ресурсе. В статье [105] рассмотрена возможность применения метода коэрцитиметрии при контроле твёрдости литых прокатных валков из стали 60X2H4ГМФ. Установлена экспериментальная зависимость, которая позволяет оценивать на основе показаний коэрцитивной силы уровень твёрдости без разрушения рабочей поверхности массивной отливки.

В статье [106] установлена возможность сдаточных испытаний по определению твердости скальпелей, дисковых фрез и штампов после термической обработки по значению коэрцитивной силы материала инструмента.

На данный момент в литературе приводится мало сведений об использовании метода коэрцитиметрии для определения ресурса штамповочной оснастки. На кафедре «Системы пластического деформирования» ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» под руководством профессора Корниловой А.В. проводились исследования влияния усталостной повреждаемости материала штампов для холодной листовой штамповки на величину коэрцитивной силы. Основные выводы из исследований сформулированы в работах [107-121]. Проведены исследования коэрцитивной силы материала образцов из штамповой стали X12МФ и сталей 25, 35Л; представлены результаты измерений коэрцитивной силы для отдельных штампов холодной штамповки и сделан вывод о возможности использования магнитных методов для контроля рабочих деталей штампового инструмента. Было установлено, что величина коэрцитивной силы в инструментальных штамповых материалах значительно выше, чем в углеродистых и малолегированных сталях и

растёт с увеличением числа циклов. Отмечена зависимость коэрцитивной силы от направления измерения, что говорит о различной стойкости штампа в зависимости от его ориентации в рабочем пространстве прессы. Были получены регрессионные модели, позволяющие определить скорость роста коэрцитивной силы (А/(м·цикл)) в матрице разделительного инструмента для ХЛШ в зависимости от ряда параметров штамповки:

$$\begin{aligned} \frac{dH_c}{dN} = & 0,85 \cdot (7 \cdot 10^{-5} \cdot X_1^2 - 0,073 \cdot X_1 + 19,105) \cdot (2 \cdot 10^{-6} \cdot X_2^2 - 0,008 \cdot X_2 + 8,816) \times \\ & \times (0,520 \cdot X_3^2 - 0,729 \cdot X_3 + 0,651) \cdot (3 \cdot 10^{-10} \cdot X_4^2 - 3 \cdot 10^{-6} \cdot X_4 + 1,077) \times \\ & \times (-0,142 \cdot X_5^2 + 0,652 \cdot X_5 + 0,186) \cdot (7 \cdot 10^{-6} \cdot X_6^2 - 0,005 \cdot X_6 + 2,321), \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{dH_c}{dN} = & 0,95 \cdot (10^{-4} \cdot X_1^2 - 0,112 \cdot X_1 + 29,160) \cdot (5 \cdot 10^{-6} \cdot X_2^2 - 0,017 \cdot X_2 + 14,282) \times \\ & \times (-0,024 \cdot X_3^2 + 0,384 \cdot X_3 + 0,642) \cdot (2 \cdot 10^{-9} \cdot X_4^2 - 10^{-4} \cdot X_4 + 0,129) \times \\ & \times (-0,064 \cdot X_5^2 + 0,379 \cdot X_5 + 0,465) \cdot (5 \cdot 10^{-5} \cdot X_6^2 - 0,025 \cdot X_6 + 4,648), \end{aligned} \quad (1.16)$$

где N – число циклов нагружения инструмента; X_1 и X_2 – временное сопротивление разрыву материала заготовки и матрицы соответственно, МПа; X_3 – количество перешлифовок; X_4 – число деталей, снятых со штампа на момент исследования, шт.; X_5 – толщина листа заготовки, мм; X_6 – номинальная сила прессы, кН. Формула (1.15) описывает скорость роста коэрцитивной силы в параллельном фронту прессы направлении, формула (1.16) – в перпендикулярном. На основе проведённых исследований была разработана методика определения остаточного ресурса инструмента листовой штамповки в зависимости от технологических параметров выполняемой операции.

В Череповецком государственном университете под руководством профессора Кузьмина А.Л. в 2010-2012 годах был проведен ряд исследований, показавших, что магнитные свойства чувствительны к превращениям в металле при термоциклировании [122]. Это свойство металла можно использовать для создания метода определения стойкости штампов ГОШ с применением магнитного структурно-фазового анализа – нового научного направления на стыке теории прочности, металловедения и методов неразрушающего контроля и диагностики.

В работе [123] рассматриваются возможности применения метода коэрцитиметрии для изделий с наплавленными покрытиями на ферритной основе ОЗН-6 и Т-590. Установлено, что метод позволяет оценить трещиностойкость нанесённого покрытия по перепаду коэрцитивной силы в зонах покрытия и подложки, что может быть полезным при контроле штампового инструмента с ферромагнитным покрытием.

1.5 Выводы по главе

1. Качество изготавливаемых горячей штамповкой поковок напрямую зависит от состояния инструмента. Поэтому для стабилизации выхода годного важно обеспечить высокую стойкость штампового инструмента (особенно по критериям сопротивления износу и смятию).

2. Стойкость штамповой оснастки определяется множеством различных факторов (металловедческих, технологических, конструкционных), совокупность которых необходимо учитывать при подготовке технологического процесса и проектирования инструмента.

3. Не существует универсального подхода к определению стойкости штамповой оснастки для ГОШ. Существующие аналитические подходы отличаются большим разбросом получаемых значений на выходе и учитывают лишь немногие параметры технологического процесса. Большинство методов неразрушающего контроля не позволяют дать количественную оценку структурных изменений в инструментальном материале, которые неизбежно происходят при воздействии на инструмент двух факторов – силового и температурного.

4. Основой метода количественной оценки состояния материала штампов ГОШ может стать измерение величины коэрцитивной силы, позволяющее фиксировать уровень накопленных повреждений в материале детали вне зависимости от её геометрии и размеров.

5. На основе метода неразрушающего контроля по величине коэрцитивной силы предполагается создать экспериментально-расчетную методику определения текущей стойкости штампов ГОШ.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШТАМПОВКИ НА КГШП ПОКОВОК ТИПА «КОЛЬЦО»

2.1 Основные положения модели

В данном параграфе приведены основные положения разработанной математической модели, описывающей штамповку поковок типа «кольцо» (рисунок 8) на КГШП, позволяющей с высокой точностью спрогнозировать заполнение штамповой полости и изменение силовых характеристик на протяжении всего технологического процесса. Кроме того, была поставлена задача повысить качество изготавливаемых поковок путём оптимизации течения материала и снижения вероятности образования дефектов в виде зажимов.

Модель может быть использована для рационализации разработки технологического процесса штамповки «колец» и подбора оптимальных с точки зрения нагрузки на инструмент параметров технологического процесса

В работах [2-5] приведены математические модели горячей объёмной штамповки поковки типа «шестерня» в открытых штампах на КГШП и на молотах, отличающиеся наличием у данных поковок зоны ступицы помимо зоны перемычки и кольцевой части.

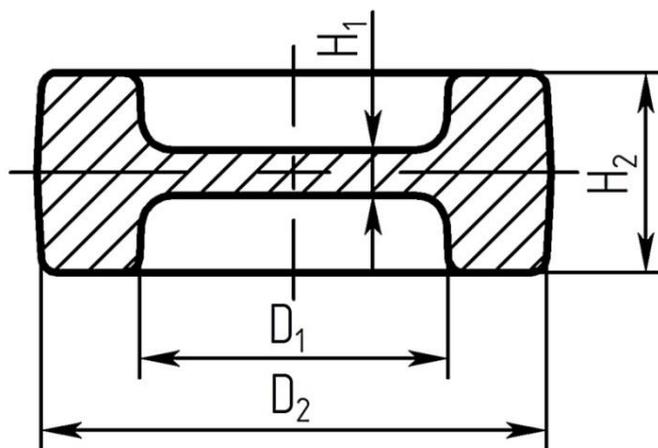


Рисунок 8 – Кольцевая поковка с непробитой перемычкой без облоя

На рисунке 8 показана форма типичной кольцевой поковки с припусками. Данную поковку можно условно разделить на зоны перемычки и кольца с размерами D_1 , H_1 и D_2 , H_2 соответственно. Детали, получаемые из таких поковок, широко используются в машиностроении в качестве втулок, колец подшипников, фланцев, бандажей, шестерён, венцов зубчатых колёс и т.д.

В качестве исходных заготовок для штамповки при разработке модели будем рассматривать круглый сортовой прокат, который нарезается на цилиндрические заготовки. Математическая модель рассчитывалась для штамповки поковок при использовании кривошипных горячештамповочных прессов. При создании модели примем допущение, что вследствие малых штамповочных уклонов и малых радиусов скругления углов полости штампа их влияние на расчеты объема заготовки и геометрических параметров модели непосредственно не учитывается. Объем заготовки V_0 определяется по объёму поковки с учётом технологического припуска δ , который включает в себя долю металла на облой, штамповочные уклоны и радиусы скругления полости штампа:

$$V_0 = \frac{\pi}{4} [D_2^2 H_2 + D_1^2 (H_1 - H_2)] (1 + \delta). \quad (2.1)$$

Возможны два варианта цилиндрической заготовки для штамповки кольцевой поковки с объёмом V_0 . Можно использовать заготовку с диаметром меньшим или равным внутреннему диаметру кольца $D_0 \leq D_1$, высотой $H_0 = \frac{4V_0}{\pi D_0^2}$. Полости перемычки и кольца в этом случае заполняются радиальным выдавливанием материала с заполнением углов кольцевой полости на конечной стадии процесса, характеризующейся образованием облоя. Ограничениями этого варианта являются вероятность потери устойчивости при осадке высокой заготовки из-за нарушения неравенства $H_0/D_0 < 2,5$, а также вероятность образования складки (зажима) при пластическом смятии кромки заготовки в кольцевой полости при малой глубине полости $H_2 - H_1$. Поэтому целесообразнее принять вариант заготовки с диаметром $D_0 > D_1$, при котором происходит осадка заготовки на участке перемычки с одновременным выдавливанием материала в

кольцевую полость. В этом случае маловероятны потеря устойчивости высокой заготовки по варианту $D_0 \leq D_1$ и образование складки в кольцевой полости. Размеры заготовки D_0 и H_0 выбираются по приводимым ниже формулам.

Контактные давления и технологическое усилие P при заполнении полости штампа определяются отдельно по участкам перемычки и кольцевой полости с использованием среднего напряжения текучести σ_s в зависимости от скорости деформации \dot{e}_p и температуры T :

$$\sigma_s = \sigma_0 (\dot{e}_p / \dot{e}_0)^{n_1} \exp[n_2 (T/T_0 - 1)], \quad (2.2)$$

где σ_0 – значение σ_s при скорости деформации \dot{e}_0 и температуре T_0 . Коэффициенты n_1 и n_2 определяются аппроксимацией экспериментальных данных [124]. Средняя скорость деформации \dot{e}_p определяется удельной мощностью внешних сил в пластической области [125,126]. При штамповке на КГШП осадкой заготовки величина \dot{e}_p рассчитывается по формуле:

$$\dot{e}_p = vq/h_e, \quad (2.3)$$

где v – скорость ползуна прессы и верхнего штампа; q – безразмерное среднее давление; h_e – отношение объема пластической области к горизонтальной проекции площади контакта заготовки с инструментом. На участках перемычки и облойного мостика величина h_e равна текущей толщине перемычки и облоя соответственно.

Изменение средней температуры материала T за время при заполнении полости штампа определяется по тепловому балансу с учетом выделения тепла пластического деформирования и контактного трения и теплопередачи от заготовки к штампу [2-5]:

$$\Delta T = \frac{\Delta t}{(c\rho)} [\sigma_s (\dot{e}_p + 2\mu v_s / h_e) - \alpha_k (T - T_{III}) / h_k], \quad (2.4)$$

где Δt – приращение времени при малом перемещении штампа Δs ; $(c\rho)$ – произведение удельной теплоёмкости на плотность материала заготовки; μ – коэффициент пластического трения по Прандтлю; v_s – скорость скольжения материала по границе контакта со штампом; α_k – коэффициент конвективного теплообмена на границах контакта со штампом; T_{III} – средняя температура штампа

на удалении от границы контакта с заготовкой; h_k – отношение объёма рассматриваемой части заготовки к площади контакта со штампом.

Кинематика КГШП используется для расчёта скорости v и перемещения ползуна от нижней мёртвой точки s_n по формулам, приведённым в работе [127]:

$$v = \omega R \left(\sin \alpha + \frac{1}{2} \lambda \sin 2\alpha \right); \quad (2.5)$$

$$s_n = R \left[1 - \cos \alpha + \frac{1}{4} \lambda (1 - \cos 2\alpha) \right], \quad (2.6)$$

где ω – угловая частота вращения кривошипного вала; R – радиус кривошипа; α – угол поворота кривошипа относительно нижней мёртвой точки; λ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

При моделировании за независимую переменную принимаем перемещение верхнего штампа s от начала деформирования. Перемещение штампа связано с перемещением ползуна зависимостью $s_n = H_0 - H_1 - s + E_s$ и изменяется в пределах $E_s \leq s \leq H_0 - H_1 + E_s$, где E_s – поправка на раскрытие станины прессы под действием технологической силы, определяется по формуле:

$$E_s = P_m / C_n, \quad (2.7)$$

где P_m – максимальное усилие на ползуне при штамповке поковки; C_n – упругая жёсткость станины прессы.

Из формулы (2.6) определяется значение угла α :

$$\cos \alpha = \frac{1}{\lambda} \left[\sqrt{1 + \lambda^2 + 2\lambda(1 - s_n / R)} - 1 \right], \quad (2.8)$$

затем по формулам (2.5) и (2.3) определяются v и \dot{e}_p . На участке рабочего хода ползуна происходит снижение угловой частоты вращения кривошипа ω вследствие затрат кинетической энергии подвижных частей прессы на работу пластического деформирования заготовки A_p , трение в шарнирах кривошипно-ползунного механизма A_f и упругую деформацию прессы A_e :

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2(A_p + A_f + A_e) / J_n}, \quad (2.9)$$

где ω_0 – угловая частота вращения кривошипа с учетом потерь на трение холостого хода и включение муфты; J_n – приведенный к кривошипу момент инерции подвижных частей пресса. Затраты определяем по формулам:

$$A_p = \int_0^s P(s)ds, \quad A_f = m_f \int_0^\alpha P(\alpha)da, \quad A_e = \frac{1}{2} P^2(s)/C_n, \quad (2.10)$$

где $P(s)$ и $P(\alpha)$ – зависимости технологического силы от s и α ; m_f – плечо сил трения в шарнирах, определяется по формуле [127]:

$$m_f = f[(1 + \lambda)R_A + \lambda R_B + R_0], \quad (4.11)$$

где f – коэффициент трения по Кулону; R_A – радиус соединения шатуна с ползуном; R_B – радиус соединения шатуна с кривошипом; R_0 – радиус опор кривошипа.

Учтём в модели вероятность того, что при большом снижении ω по сравнению с синхронной частотой ω_c , приведенной к кривошипу, может произойти аварийный останов электродвигателя пресса при нижнем положении ползуна вследствие превышения критического скольжения $S = 1 - \omega/\omega_c$.

В процессе пластического формоизменения поковки из цилиндрической заготовки с диаметром $D_0 > D_1$ рассматриваются две стадии заполнения полости штампа: осадка перемычки с выдавливанием материала в кольцевую полость до диаметра D_2 и окончательное заполнение кольцевой полости при выдавливании материала в облой. Каждая из этих стадий имеет свои особенности, которые трудно описать общими зависимостями. Поэтому имеет смысл получить зависимости для каждой стадии в отдельности, вследствие чего модель приобретает нестационарную форму.

На рисунке 9 показана схема формоизменения заготовки на первой стадии (вследствие симметричности рисунка относительно осей r и z рассматривается четвертая часть сечения полотна штампа). Пластические области на рисунке закрашены. Пунктиром показан контур исходной заготовки.

На участке перемычки происходит сжатие пластического слоя толщиной h и радиусом $r = D_1/2$ при свободном радиальном выдавливании в кольцевую полость.

В области $r > D_1/2$ принимается радиальное течение $v_r = v_r(r)$, при котором сохраняется постоянная высота заготовки H_0 [2-5].

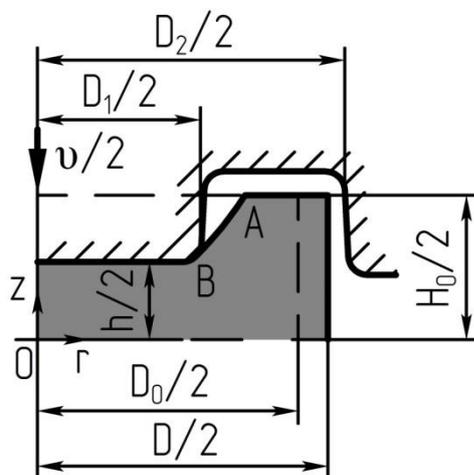


Рисунок 9 – Схема формоизменения заготовки на первой стадии штамповки

Компоненты напряжений в области $|z| \leq h/2$ находятся из уравнения равновесия:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \quad (2.12)$$

которое приобретает такой вид при $\sigma_z = 0$. Подставив условие пластичности Треска $\sigma_s = \sigma_\theta - \sigma_r$ в формулу (2.12), получим уравнение с разделяющимися переменными:

$$d\sigma_r = \sigma_s \frac{dr}{r}, \quad (2.13)$$

которое после интегрирования приобретает вид:

$$\sigma_r = \sigma_s \ln r + C_1. \quad (2.14)$$

Константа C_1 определяется из граничного условия $\sigma_r = 0$ при $r = D/2$:

$$C_1 = -\sigma_s \ln \frac{D}{2}. \quad (2.15)$$

Подставив (2.15) в (2.14), получим формулу для определения компоненты напряжений σ_r :

$$\sigma_r = -\sigma_s \ln \frac{D}{2r}. \quad (2.16)$$

Тогда при соблюдении условия пластичности Треска компонента σ_θ будет определяться по формуле:

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left(1 - \ln \frac{D}{2r}\right). \quad (2.17)$$

Радиусы галтели AB r и свободной цилиндрической поверхности $R = D/2$, можно определить по следующему методу. Используется условие пластической несжимаемости, из которого следует равенство потоков скорости на границе контакта выступов штампа D_1 с заготовкой и на границе $r = D_1/2$:

$$\frac{\pi}{4} D_1^2 v = \pi D_1 h v_r, \quad (2.18)$$

где v_r – радиальная скорость на боковой границе.

Отсюда

$$v_r = \frac{1}{4} \frac{D_1}{h} v. \quad (2.19)$$

Условие пластической несжимаемости при $v_z = 0$ принимает вид:

$$\frac{dv_r}{dr} + \frac{v_r}{r} = 0. \quad (2.20)$$

Проинтегрируем обе части уравнения:

$$C_2 v_r = 1/r. \quad (2.21)$$

Постоянную интегрирования C_2 находим из условия равенства потоков скоростей при $r = D_1/2$, подставляя (2.19) в (2.21). В результате получим:

$$v_r = v \frac{D_1^2}{8rh}. \quad (2.22)$$

Введём обозначение переменной толщины галтели ψ , которая изменяется в пределах $H_0 \leq \psi \leq h$. Так как $v_r = \frac{dr}{dt}$ и $v = -\frac{d\psi}{dt}$, то из (2.22) получаем дифференциальное уравнение для переменных r и ψ :

$$r dr = -\frac{D_1^2}{8} \frac{d\psi}{\psi}. \quad (2.23)$$

Решение уравнения (2.23) имеет вид:

$$\frac{r^2}{2} + C_3 = -\frac{D_1^2}{8} \ln \psi. \quad (2.24)$$

Находим константу C_3 из условия $r = D_1/2$ при $\psi = H_0$:

$$C_3 = -\frac{D_1^2}{8} (1 + \ln H_0). \quad (2.25)$$

Из (2.24) и (2.25) находим радиус галтели AB (рисунок 9) как зависимость от величины ψ :

$$r = \frac{D_1}{2} \sqrt{1 + \ln \frac{H_0}{\psi}}. \quad (2.26)$$

Для определения текущего значения $R = D/2$ постоянную C_3 в уравнении (2.24) находим из условия $R = D_0/2$ при $\psi = H_0$:

$$C_3 = -\frac{1}{8}(D_0^2 + D_1^2 \ln H_0). \quad (2.27)$$

Подстановкой (2.27) в (2.24) находим радиус R в зависимости от ψ :

$$R = \frac{D_1}{2} \sqrt{\left(\frac{D_0}{D_1}\right)^2 + \ln \frac{H_0}{\psi}}. \quad (2.28)$$

Первая стадия штамповки заканчивается при толщине перемычки h_1 , когда заготовка касается боковой границы и дна полости штампа. Подставив в формулу (2.28) граничное условие $R = D_2/2$, получим:

$$h_1 = H_0 \exp \frac{D_0^2 - D_2^2}{D_1^2}. \quad (2.29)$$

Если нарушается неравенство $H_0 < h_1 + H_2 - H_1$, то до контакта заготовки с боковой стенкой штампа D_2 появляется контакт с дном полости штампа, который вызывает пластическое смятие, приводящее к зажиму материала на кромке заготовки с диаметром $D < D_2$. Для исключения этого дефекта в модели предусмотрен расчёт оптимальных размеров заготовки D_0 и H_0 по условию одновременного контакта заготовки со стенкой и дном кольцевой полости в конце первой стадии формоизменения. Подставляя $h_1 = H_0 + H_1 - H_2$ в левую часть формулы (2.29) и используя соотношение $V_0 = \pi D_0^2 H_0 / 4$, получаем трансцендентное уравнение для D_0^2 в виде:

$$4V_0 \left(1 - \exp \frac{D_0^2 - D_2^2}{D_1^2}\right) + \pi D_0^2 (H_1 - H_2) = 0. \quad (2.30)$$

Уравнение (2.30) решается относительно D_0 методом касательных Ньютона. Для этого принимается начальное приближение $D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2}$. Достоверное значение диаметра цилиндрической заготовки можно получить уже на третьей итерации. Затем определяется высота заготовки H_0 по формуле:

$$H_0 = \frac{4V_0}{\pi D_0^2}. \quad (2.31)$$

Действующее в зоне перемены давления q , используемое при вычислении средней скорости деформации по формуле (2.3), имеет две составляющие p_1 и q_1 . Здесь p_1 – давление, определяемое по теории сжатия диска толщиной h . Оно определяется по формуле [128]:

$$p_1 = \sigma_s \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{D_1}{h} \right). \quad (2.32)$$

Давление q_1 учитывает подпор металла со стороны кольцевой части заготовки:

$$q_1 = \sigma_s \ln(D/D_1). \quad (2.33)$$

После подстановки безразмерного давления $q = \frac{q_1}{\sigma_s} + \frac{p_1}{\sigma_s}$ формула (2.3) приобретает вид:

$$\dot{e}_p = \frac{v \left(\frac{q_1 + p_1}{\sigma_s} \right)}{h}. \quad (2.34)$$

Исходя из формулы (2.19) скорость скольжения на границе контакта со штампом v_s определяется по формуле:

$$v_s = \frac{1}{2} \frac{rv}{h}. \quad (2.35)$$

Радиус элемента перемены r в данный момент времени определяется из условия несжимаемости материала $\frac{\pi}{4} r^2 h = \frac{\pi}{4} r_0^2 (h + \Delta s)$, где r_0 – начальный радиус элемента, и составляет:

$$r = r_0 \sqrt{1 + \Delta s/h}. \quad (2.36)$$

Подставим (2.34) и (2.35) в (2.4) с учётом $h_e = h$, $h_k = \frac{1}{2} h$, $\Delta t = \Delta s/v$ и получим дифференциальное уравнение для температуры элемента перемены:

$$\Delta T = \frac{\Delta s}{h(c\rho)} [\sigma_s (p_1 + q_1 + \mu r/h) - 2\alpha_k (T - T_{ш})/v]. \quad (2.37)$$

Уравнение (2.37) решается методом Рунге-Кутты второго порядка [129] при известных по предыдущему шагу напряжении текучести σ_s и температуре элемента T . Полученное значение температуры используется для вычисления значения напряжения текучести материала по формуле (2.2).

Полная сила P_1 , действующая на штамп на первой стадии штамповки, определяется по формуле:

$$P_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2 (p_1 + q_1). \quad (2.38)$$

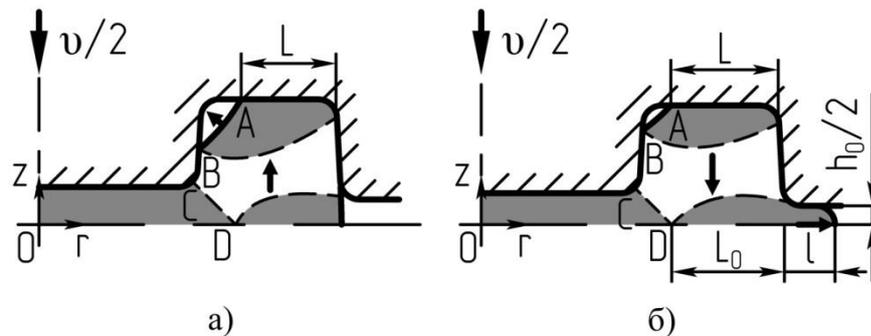


Рисунок 10 – Схема формоизменения заготовки на второй стадии штамповки:

а – заполнение углов; б – выдавливание в облой

На рисунке 10 показана схема формоизменения полуфабриката на второй стадии штамповки. На этой стадии происходят процессы заполнения углов кольцевой полости и выдавливания материала в облой, определяемые условием равновесия жесткой зоны в кольцевой полости. Значения давления, рассчитываемые по пластическому течению в облой и для пластической области при заполнении углов полости штампа, равны по условию статического равновесия. Это условие определяет зависимость длины контакта L и радиуса заполнения угла полости штампа от длины l и толщины облоя h_0 . Если значение давления при пластическом течении в углы кольцевой полости больше значения давления при выдавливании облоя, то происходит пластическое течение в облой (рисунок 10, б). В противном случае большее значение давления при выдавливании облоя вызывает смещение жесткой области в сторону пластической области в углах кольцевой полости, увеличивая длину контакта L и давление при пластическом течении в углы кольцевой полости (рисунок 10, а).

Длину границы контакта полуфабриката с дном полости венца L до выдавливания материала в облой можно определить из условия сохранения объёма

поковки $V_0 = V$, где V – объём полуфабриката при толщине перемычки h . Для удобства расчёта будем считать границу AB прямолинейной. Из условия сохранения объёма длина L определяется по формуле:

$$L = \frac{a - \sqrt{a^2 - 16b}}{8}, \quad (2.39)$$

где $a = 2(D_1 + 2D_2)$; $b = D_2^2 + D_1D_2 - 2D_1^2 - 3 * \frac{D_1^2h + (D_2^2 - D_1^2)(h + H_2 - H_1) - D_0^2H_0}{h + H_2 - H_1 - h_1}$.

При малой длине L в начале процесса пластическая область на границе контакта полуфабриката с дном полости штампа моделируется центрированным полем линий скольжения с особой точкой A и свободной границей с углом наклона $\beta = \arctg\left(\frac{c}{d}\right)$ (рисунок 11) [130-132], где $c = 0,5(h + H_2 - H_1 - h_1)$, $d = 0,5(D_2 - D_1 - 2L)$. При $L < d/\cos\gamma$, где $\gamma = \frac{1}{2}\arccos(2\mu)$, давление на границе контакта определяется по формуле [2-5]:

$$q_{01} = \sigma_{s1} \left[\frac{3\pi}{4} - (\beta + \gamma) + \frac{1}{2}(1 + \sin 2\gamma) \right]. \quad (2.40)$$

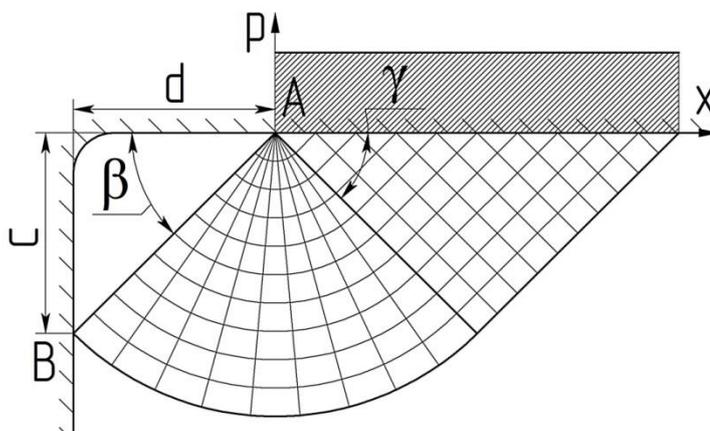


Рисунок 11 – Вид поля линий скольжения в начале стадии заполнения углов

Напряжение текучести σ_{s1} материала рассчитывается по средней скорости деформации с учётом изменения температуры в области заполнения углов. Температура материала определяется по формуле (2.4). Средняя скорость деформации определяется по формуле (2.3) при $q = q_{01}/\sigma_{s1}$ и $h_e = L$:

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{Vq_{01}}{\sigma_{s1}L}. \quad (2.41)$$

Среднее давление q_{21} , передаваемое на жёсткую область, можно определить из равенства $q_{01}S_0 = q_{21}S_2$, где $S_0 = \frac{\pi}{4}[D_2^2 - (D_2 - 2L)^2]$ – площадь контакта полуфабриката с дном полости штампа, $S_2 = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)$ – площадь проекции жёсткой области, на которую действует давление q_{21} . Тогда q_{21} определяется по формуле:

$$q_{21} = q_{01} \frac{4L(D_2 - L)}{D_2^2 - D_1^2}. \quad (2.42)$$

Сила, действующая на штамп в кольцевой полости, определяется по формуле:

$$P_{21} = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)q_{21}. \quad (2.43)$$

В начале второй стадии, когда длина границы L ещё невелика, облой ещё не формируется и общая сила, действующая на ползун прессы, определяется как сумма сил $P = P_1 + P_{21}$. Сила в зоне перемычки P_1 определяется по формуле (2.38) с учётом того, что давление подпора со стороны кольца равно $q_1 = \ln(D_2/D_1)$.

При дальнейшем уменьшении толщины перемычки h длины границ L и AB уменьшаются, значительно возрастает давление на жёсткую область. При $L \geq d/\cos\gamma$ пластическая область моделируется полем линий скольжения с наклонной свободной границей и двумя особыми точками A и B с коэффициентом трения μ на границе контакта L (рисунок 12).

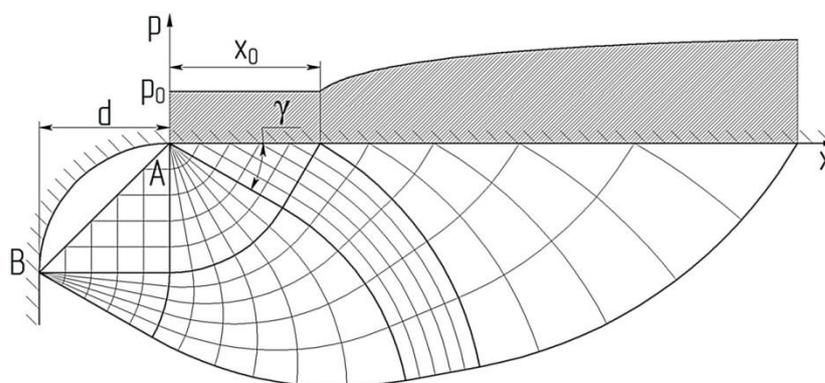


Рисунок 12 – Вид поля линий скольжения в конце стадии заполнения углов

Отнесённое к σ_{s1} безразмерное контактное давление p , полученное численным расчётом поля линий скольжения, аппроксимируется функцией [2-5]:

$$p = \begin{cases} p_0, & 0 \leq x \leq x_0 \\ p_0 + C_4 \ln(x/x_0), & x_0 \leq x \leq L \end{cases} \quad (2.44)$$

где p_0 определяется по формуле (2.43) при $\beta = \frac{\pi}{4}$, $x_0 = d/\cos \gamma$; $C_4 = (p(L) - p_0)/\ln(L/x_0)$.

Для того чтобы определить среднее давление q_{21} , действующее на жёсткую зону, снова воспользуемся равенством $q_{01}S_0 = q_{21}S_2$. В данном случае произведение среднего давления q_{01} , действующего на площадь контакта полуфабриката и дна полости штампа S_0 , определяется как помноженный на σ_{s1} объём фигуры, полученной вращением эпюры давлений p вокруг оси симметрии штампа. При $S_2 = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)$ находим среднее давление q_{21} , действующее на жёсткую зону металла в кольцевой полости:

$$q_{21} = \sigma_{s1} \frac{4p_0L(D_2-L) + 2C_4[2(L \ln L - L \ln x_0 - L + x_0)(D_2 - 2L) + L^2(2 \ln L - 2 \ln x_0 - 1) + x_0^2]}{D_2^2 - D_1^2}. \quad (2.45)$$

Пластическая область при выдавливании в облой моделируется полем линий скольжения, которое определяется угловой точкой перехода от кольцевой полости к облойному мостику и равенством нулю касательных напряжений в плоскости симметрии поковки. Эта область сопрягается через зоны однородного напряжённого состояния с пластической областью перемычки в точке D и с облоем на границе $r = \frac{1}{2}D_2$ (рисунок 13). При этом выполняются статические и кинематические условия по аналогии с задачами объёмной штамповки при плоской деформации [124,125].

Длина пластической области L_0 с неоднородным напряжённым состоянием определяется по формуле:

$$L_0 = \frac{1}{2}(D_2 - D_1 - h). \quad (2.46)$$

Напряжение текучести металла σ_{s2} в пластической зоне, находящейся в средней плоскости штампа, определяется по формуле (2.2) с учётом скорости деформации (2.3) и изменения температуры (2.4).

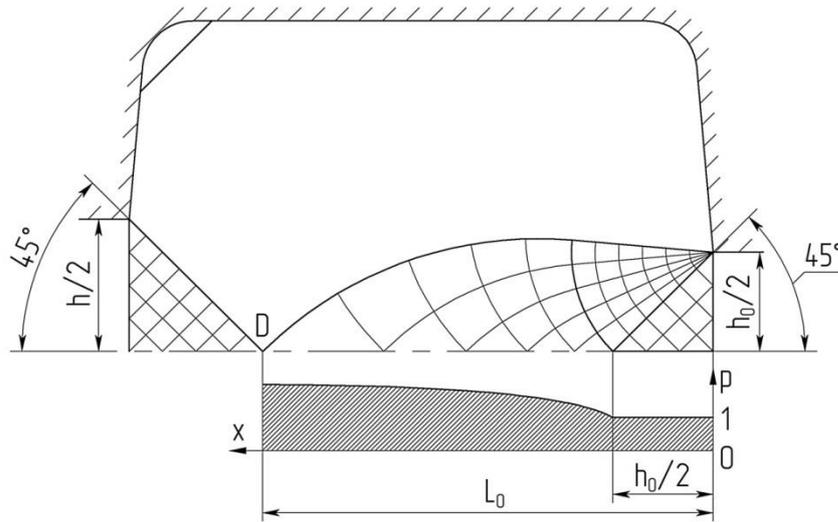


Рисунок 13 – Вид поля линий скольжения в средней плоскости штампа

Безразмерное давление p на длине L_0 , полученное численными расчётами поля линий скольжения от свободной границы $r = \frac{1}{2}D_2$, аппроксимируется функцией [2-5]:

$$p = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq \frac{h_0}{2} \\ 1 + C_5 \ln\left(\frac{2x}{h_0}\right), & \frac{h_0}{2} \leq x \leq L_0 \end{cases}, \quad (2.47)$$

где h_0 – текущая толщина обля, $C_5 = (p(L_0) - 1) / \ln\left(\frac{2L_0}{h_0}\right)$. Из (2.47) можно найти давление в точке D , передаваемое в пластическую область перемычки, приняв $x = L_0$:

$$p_D = \sigma_{s2} C_5 \ln\left(\frac{2L_0}{h_0}\right). \quad (2.48)$$

Распределение (2.48) интегрируется аналогично (2.44). Среднее давление на границе L_0 определяется отношением произведения объёма полученной вращением эпюры давлений вокруг оси штампа фигуры на напряжение текучести материала в рассматриваемой пластической области σ_{s2} к площади проекции этой области на плоскость разъёма штампа:

$$q_3 = \sigma_{s2} \left[1 + \frac{C_5}{8} \cdot \frac{8D_2 \left(L_0 \ln \frac{2L_0}{h_0} - L_0 + \frac{h_0}{2} \right) - 8L_0^2 \ln \frac{2L_0}{h_0} - 4L_0^2 + h_0^2}{L_0(D_2 - L_0)} \right]. \quad (2.49)$$

Давление обля на границе $r = D_2/2$ определяется по формуле [128]:

$$p_0 = \frac{2\sigma_{s3}\mu l}{h_0}, \quad (2.50)$$

где σ_{s3} – предел текучести металла в зоне облойного мостика, учитывающий скорость деформации и температуру облоя; l – текущая длина облоя, которая ограничена длиной облойного мостика l_0 и изменяется в пределах $0 \leq l \leq l_0$.

Среднее давление q_{22} , действующее на жёсткую область в кольцевой полости со стороны пластической зоны, включающей границу L_0 , определяется по формуле:

$$\begin{aligned} q_{22} &= p_0 + \frac{\frac{\pi}{4}[(D_1+h)^2 - D_1^2](p_D + \sigma_{s2}) + \frac{\pi}{4}[D_2^2 - (D_2 - 2L_0)^2]q_3}{\frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)} = \\ &= p_0 + \frac{h(2D_1+h)(p_D + \sigma_{s2}) + 4L_0(D_2 - L_0)q_3}{D_2^2 - D_1^2}. \end{aligned} \quad (2.51)$$

При $q_{21} > q_{22}$ происходит выдавливание в облой, при этом его длина увеличивается на значение Δl , которое определяется из равенства объёма материала, вытесненного за малое перемещение штампа Δs , объёму кольца толщиной Δl и шириной h_0 при отсутствии течения металла в углы кольцевой полости $\frac{\pi}{4}D_{06}^2\Delta s = \frac{\pi}{4}[(D_{06} + 2\Delta l)^2 - D_{06}^2]h_0$, где $D_{06} = D_2 + 2l$ – диаметр облойного мостика. Решая уравнение, получим формулу для определения величины приращения облоя Δl :

$$\Delta l = \frac{D_{06}}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\Delta s}{h_0}} - 1 \right). \quad (2.52)$$

При $q_{21} < q_{22}$ происходит заполнение углов штампа и увеличение границы L и давления q_{21} по условию статического равновесия. Значение давления q_{22} , рассчитанное по формуле (2.51), подставляется вместо q_{21} в формулу (2.42):

$$4q_{01}(L)L(D_2 - L) = q_{22}(D_2^2 - D_1^2), \quad (2.53)$$

где q_{01} – среднее давление на границе L . Из уравнения (2.53) методом Ньютона определяется величина границы L , при этом в качестве начального приближения используется значение L для предыдущего положения штампа. Функция $q_{01}(L)$ определяется по формулам (2.42) и (2.45):

$$\begin{aligned} q_{01}(L) &= q_{21} \frac{D_2^2 - D_1^2}{4L(D_2 - L)} = \\ &= \sigma_{s1} \left[p_0 + C_4 (\ln L - \ln x_0 - 1 + x_0/L) + \frac{1}{2} L \frac{2 \ln L - 2 \ln x_0 - 1 + x_0^2/L^2}{D_2 - L} \right]. \end{aligned} \quad (2.54)$$

При заполнении углов приращение облоя Δl рассчитывается с учётом уменьшения радиусов заполнения углов:

$$\Delta l = \frac{\sqrt{D_{06}^2 + 4e - D_{06}}}{2}, \quad (2.55)$$

где $e = \frac{D_{06}^2 \Delta s - 2 \left[D_1 (d_0^2 - d^2) + \frac{2}{3} (d_0^3 - d^3) \right]}{4h_0}$

Сила, действующая на штамп в кольцевой полости при выдавливании в облой, определяется по формуле:

$$P_{22} = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) q_{22}. \quad (2.56)$$

Среднее давление q_4 на участке облойного мостика определяется по формуле [2-5]:

$$q_4 = \sigma_{s3} \left[1 + \frac{\mu}{h_0} \left(D_{06} - \frac{2}{3} \frac{D_{06}^3 - D_2^3}{D_{06}^2 - D_2^2} \right) \right], \quad (2.57)$$

где σ_{s3} – напряжение текучести материала на облойном мостике.

Сила P_3 , действующая на участке облойного мостика, определяется по формуле:

$$P_3 = \frac{\pi}{4} (D_{06}^2 - D_2^2) q_4. \quad (2.58)$$

Полная сила, действующая на ползун пресса с учётом сформировавшегося облоя, определяется как сумма сил $P = P_1 + P_2 + P_3$. Здесь P_1 – сила в зоне перемычки, определяющаяся по формуле (2.41) при $q_1 = \ln(D_2/D_1)$. Сила $P_2 = P_{21}$, если давление q_{22} по формуле (2.51) превышает давление q_{21} по (2.45) и происходит заполнение углов полости штампа; $P_2 = P_{22}$, если q_{21} , определяющееся формулой (2.45), больше давления q_{22} по (2.51) и происходит выдавливание в облой.

На основе приведённой расчётной модели была разработана программа на языке программирования Fortran. Исходный текст программы приведён в приложении А. Программа предназначена для прогнозирования заполнения полости штампа и определения силовых характеристик при облойной штамповке кольцевых поковок на кривошипных горячештамповочных прессах.

На вход программы подаются следующие данные: D_1 – внутренний диаметр кольца (мм); D_2 – наружный диаметр кольца (мм); D_3 – наружный диаметр облойного мостика (мм); H_1 – толщина перемычки (мм); H_2 – высота кольца (мм); H_3 – толщина облоя (мм); δ – отношение объема облоя к объему поковки; P_m – максимальная сила штамповки в начальном приближении (кН); T – начальная температура заготовки ($^{\circ}\text{C}$); $T_{ш}$ – температура штампа вне границы контакта ($^{\circ}\text{C}$); μ – коэффициент пластического трения по Прандтлю; f – коэффициент трения по Кулону в шарнирах и опорах кривошипного вала прессы; C_n – упругая жесткость прессы (кН/мм); J_n – приведенный момент инерции к оси кривошипа ($\text{кНм}\cdot\text{с}^2$); ω_0 – угловая скорость кривошипа перед деформацией заготовки (с^{-1}); ω_c – синхронная угловая скорость двигателя прессы, приведенная к кривошипному валу (с^{-1}); S – предельное допускаемое скольжение двигателя прессы; ds – шаг перемещения ползуна (мм); R – радиус кривошипа (мм); $R_L=1/\lambda$ – отношение длины шатуна к радиусу кривошипа; R_A – радиус шарнира шатун-кривошип (мм); R_B – радиус шарнира шатун-ползун (мм); R_O – радиус опоры кривошипного вала (мм); σ_0 – значение предела текучести при скорости деформации $\dot{\epsilon}_p$ и температуре T_0 (МПа); T_0 – табличное значение температуры T_0 для определения предела текучести ($^{\circ}\text{C}$); n_1, n_2 – тепловые постоянные, использующиеся при расчёте напряжения текучести по формуле (2.2); $(c\rho)$ – произведение удельной теплоёмкости на плотность материала заготовки (МПа/ $^{\circ}\text{C}$); α_k – коэффициент конвективного теплообмена на границах контакта со штампом ($\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$); C_4, C_5 – коэффициенты аппроксимации давления в полости штампа при заполнении углов и на границе с обломом.

На выходе программой выдаются следующие данные:

- зависимости радиуса заполнения улов штампа d (мм), длины облоя l (мм), технологической силы на ползуне прессы P (кН) от высоты перемычки h и толщины облоя h_0 ;
- рекомендуемые размеры цилиндрических заготовок D_0 и H_0 (мм) для штамповки данной поковки;

- распределение температуры T ($^{\circ}\text{C}$), напряжения текучести σ_s (МПа) и давления p (МПа) по радиусу перемычки r (мм);
- зависимости силы пластического деформирования P (кН) и угловой скорости кривошипа ω (с^{-1}) от перемещения ползуна s (мм) и угла наклона кривошипа к вертикали α (рад).

2.2 Экспериментальная проверка разработанной модели

В связи с отсутствием технических возможностей для проверки полученной модели штамповкой колец на КГШП было принято решение проводить эксперименты, используя в качестве материала заготовок технически чистый свинец для имитации условий горячей деформации стали. Температурно-скоростной режим деформирования в этом случае подобен режиму горячего деформирования стали, титановых и медных сплавов, поскольку при температуре 20°C в свинце успевают полностью пройти процессы рекристаллизации, обеспечивая, с одной стороны, интенсивное разупрочнение, а с другой зависимость напряжения текучести от скорости деформации, подобную той, которая имеет место при горячей штамповке стали. Однако при этом наблюдаются значительно меньшие контактные напряжения, чем при деформировании стали, и невозможно имитировать прочностную неоднородность стальных поковок, вызванную неравномерностью охлаждения [133].

Были проведены отдельные эксперименты для проверки модели на стадии прошивки и при полной штамповке.

1. Прошивка. Для проверки правильности расчётной модели на первой стадии, а именно принятой схемы течения металла и определения силы деформирования, был проведён эксперимент по упрощённой схеме штамповки. В ходе эксперимента цилиндрические заготовки подвергались открытой прошивке на гидравлической машине цилиндрическими пуансонами с малым радиусом скругления улов. Штамповочные уклоны на пуансонах не учитывались. Схема

штампа показана на рисунке 14. В эксперименте использовались пуансоны одинакового диаметра $D_1 = 11,75$ мм.

При проведении эксперимента использовалась гидравлическая испытательная машина ИМЧ-30 с максимальным усилием на ползуне 300 кН. В ходе эксперимента самописцем гидравлической машины считывались показатели технологической силы на ползуне на всём ходу деформирования заготовки.

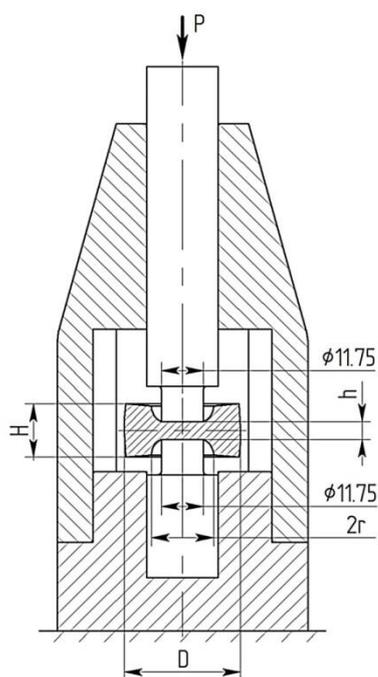


Рисунок 14 – Схема эксперимента по прошивке цилиндрических заготовок

В качестве образцов использовались цилиндрические заготовки из технически чистого свинца. Заготовки были получены отрезкой от прутка $\text{Ø}25$ на пиле JET HVBS-712K. Для контроля и измерений использовали штангенциркуль.

Для определения скорости перемещения пуансона v была замерена средняя продолжительность деформирования каждой заготовки t при помощи секундомера.

После проведения эксперимента были измерены такие характеристики полученных полуфабрикатов как: h – толщина перемычки; D – диаметр внешней свободной поверхности заготовки (ввиду заметной бочкообразности замеры производились по торцам полуфабрикатов); $2r$ – внутренний диаметр кольцевой

части; H – высота полуфабриката в кольцевой части. Размеры цилиндрических свинцовых заготовок, размеры полученных образцов и продолжительность деформирования t приведены в таблице 5.

Для проверки правильности расчётных зависимостей, описывающих течение материала заготовки на первой стадии, был произведён расчёт размеров $2r_{расч}$ по формуле (2.26) и $D_{расч}$ по формуле (2.28) для конечной толщины перемычки h . Результаты расчёта также приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Размеры заготовок и полученных образцов

№ обр.	D_0 , мм	H_0 , мм	h , мм	D , мм	$D_{расч}$, мм	$2r$, мм	$2r_{расч}$, мм	H , мм	t , с
1	29,7	14,9	9,2	30,7	30,80	12,7	14,30	14,8	20
2	29,7	14,7	4,75	31,8	32,22	13,7	17,15	14,2	20
3	29,7	14,6	2,6	32,2	33,47	14,8	19,40	14,1	20
4	29,7	14,9	2,4	32,8	33,68	15,3	19,75	14,5	15

Расчётные значения внутреннего диаметра $2r$ несколько отличаются от экспериментальных в большую сторону (среднее отклонение – 24,5%), что объяснимо влиянием острых кромок пуансонов и загибом краёв заготовки в сторону оси симметрии. Значение критерия Фишера для $2r$, рассчитанных по модели, составляет 101,1 при критическом значении 16,7 ($p=0,99$; $f_1=3$; $f_2=4$), что позволяет говорить об адекватности модели. Для диаметра D , рассчитанного по модели, критерий Фишера равен 211,4 при критическом значении 16,7 ($p=0,99$; $f_1=3$; $f_2=4$), что также говорит об адекватности модели.

Изменение высоты свободной части полуфабриката H по сравнению с высотой заготовки H_0 столь мало, что позволяет подтвердить исходное положение о сохранении высоты кольцевой части на протяжении всей первой стадии штамповки.

Также проведена проверка правильности расчёта силовых характеристик деформирования заготовки на первой стадии штамповки. Были вычислены значения компонент давления p_1 и q_1 , а также технологической силы $P_{расч}$.

Ввиду того, что в качестве материала заготовок использовался технически чистый свинец и испытания проводились при температуре $T \approx 20^\circ\text{C}$, напряжение текучести материала σ_s определялось в зависимости от степени деформации e_p в зоне перемычки и скорости деформации \dot{e}_p по результатам испытаний, опубликованных в работе [134]. Средняя скорость перемещения пуансона v определялась как отношение пройденного ползуном пути $s = H_0 - h$ к времени t . Давление p_1 определялось по формуле (2.32) для конечной толщины перемычки h при коэффициенте контактного трения $\mu=0,2$. Давление подпора q_1 определялось по формуле (2.33), при расчёте использовалось вычисленное значение внешнего диаметра полуфабриката $D_{расч}$. Степень деформации определялась по формуле $e_p = \ln \frac{h}{H_0}$. Средняя скорость деформации \dot{e}_p определялась по формуле (2.3). Сила деформирования заготовки $P_{расч}$ при прошивке для конечной толщины перемычки h определялась по формуле (2.38). Результаты расчёта силовых характеристик прошивки приведены в таблице 6.

На рисунке 15 представлены экспериментальные графики зависимости силы деформирования от величины хода для всех образцов. Крестиками отмечены расчётные значения силы для четырёх образцов в конечный момент деформирования. Наблюдается некоторое отклонение расчётного значения силы для 4 образца, что объяснимо погрешностями измерений и расчёта.

Значение критерия Фишера для выборок, представленных конечными расчётными и экспериментальными силами деформирования, составляет 33,59 при критическом значении 16,7 ($p=0,99$; $f_1=3$; $f_2=4$), что позволяет говорить об адекватности модели.

Таблица 6 - Результаты расчёта силовых характеристик при прошивке

№ обр.	v , мм/с	p_1	q_1	e_p	\dot{e}_p , с ⁻¹	σ_s , МПа	$P_{расч}$, кН
1	0,29	1,09	0,96	-0,48	0,06	31,5	7,00
2	0,50	1,16	1,01	-1,13	0,23	38,8	9,14
3	0,60	1,30	1,05	-1,73	0,53	42,4	10,80
4	0,83	1,33	1,05	-1,83	0,82	42,9	11,06

В итоге можно сделать вывод, что все приведённые зависимости, описывающие формообразование заготовки на первой стадии штамповки колец, подтверждаются результатами эксперимента.

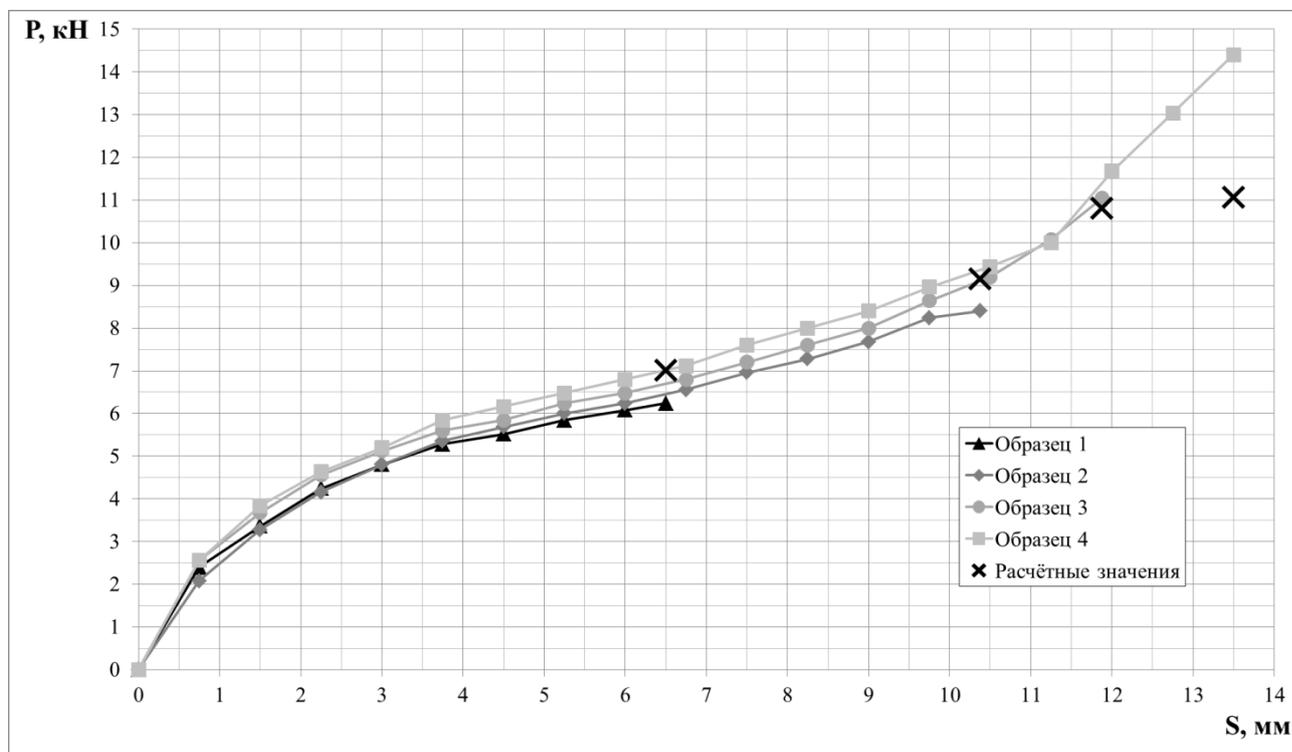


Рисунок 15 – Экспериментальный график зависимости усилия деформирования образца от перемещения пуансона

2. Полная штамповка. Для экспериментальной проверки расчётной модели на всех стадиях формообразования был сконструирован и изготовлен штамп для гидравлической машины (рисунок 16) с профилем ручья, наиболее приближенным к реальным условиям открытой объёмной штамповки на КГШП. Размеры заготовок и поковок, изготавливаемых на данном штампе, показаны на рисунке 17. Схема штампа представлена на рисунке 18.

Размеры поковок, изготавливаемых на данном штампе, выбирались с учётом условия (2.30) при использовании цилиндрических свинцовых заготовок, отрезаемых от прутка $D_0 = 25$ мм. В торцевой части заготовок рекомендуется получить методами выдавливания или резания небольшое углубление для точного центрирования заготовки при установке её на вставку штампа. Это позволяет

избежать неравномерного заполнения полости штампа. Использовались заготовки как с углублениями для центрирования согласно рисунку 17, а, полученными выдавливанием на гидравлической машине цилиндрическим пуансоном $\varnothing 20$ мм, так и без углубления. Размеры заготовок приведены в таблице 7.



Рисунок 16 – Набор экспериментальной технологической оснастки и полученная поковка

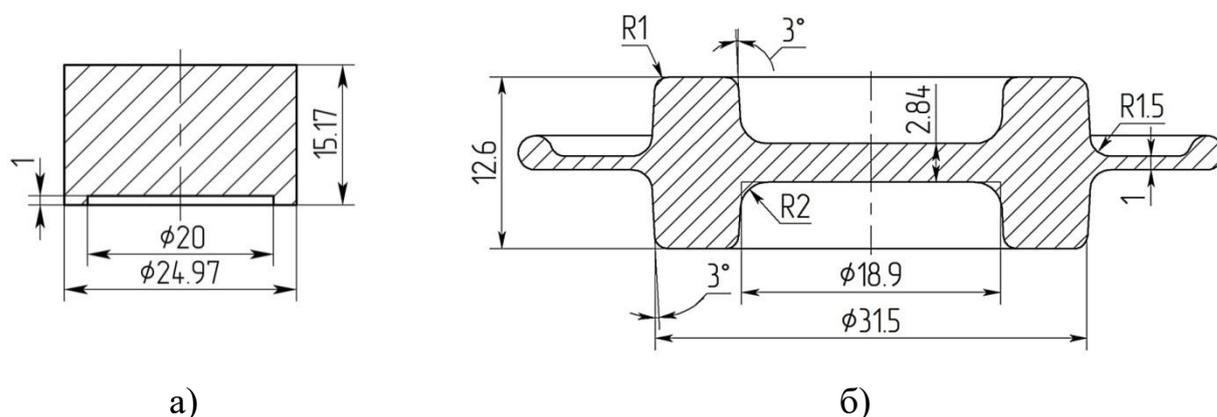


Рисунок 17 – Эскиз заготовки (а) для экспериментального штампа и поковки (б)

При проведении эксперимента использовалась гидравлическая испытательная машина VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig. Ход ползуна гидравлической машины назначался для получения образцов на различных стадиях

заполнения полости штампа. В ходе эксперимента самописцем гидравлической машины считывались показатели технологической силы на ползуне на всём ходу деформирования заготовки. Заготовки отрезались при помощи пилы JET HVBS-712K. Для контроля и измерений использовались штангенциркуль и микрометр. Для определения средней скорости перемещения пуансона v была замерена средняя продолжительность деформирования каждой заготовки t при помощи секундомера.

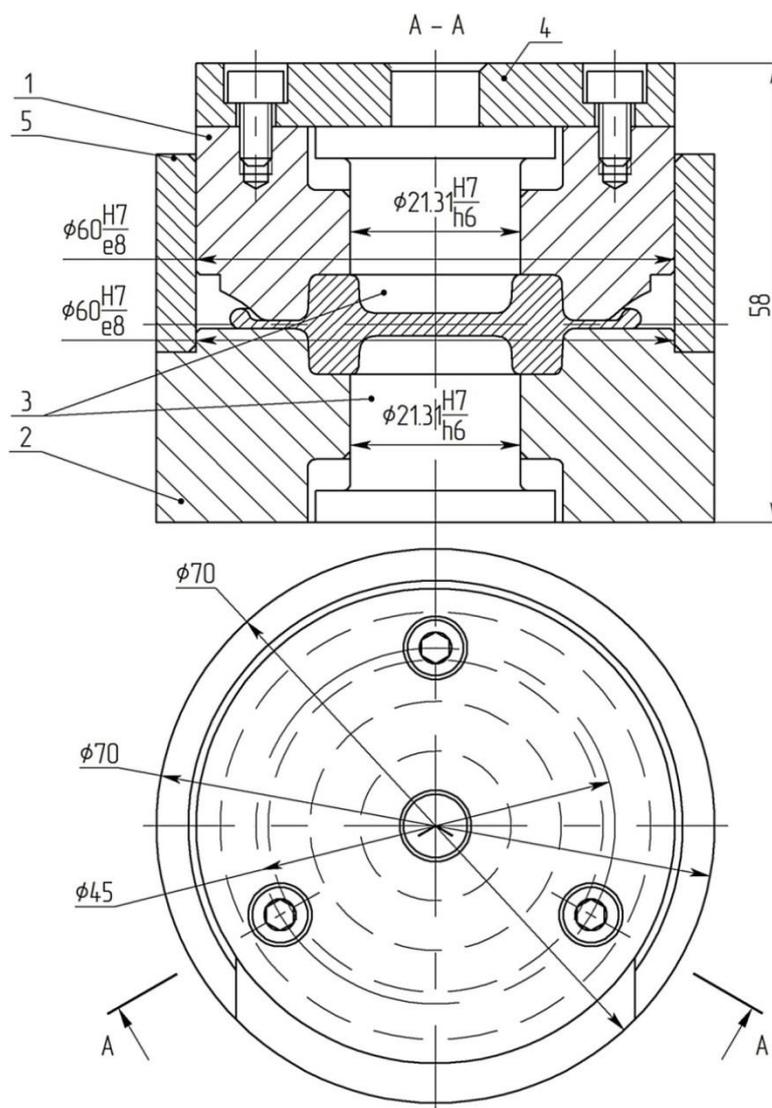


Рисунок 18 – Схема экспериментального штампа: 1 – матрица верхняя; 2 – матрица нижняя; 3 – вставки; 4 – пластина; 5 – кольцо-направляющая

После штамповки были произведены измерения полученных поковок. Измерялись такие параметры как: D_1 – внутренний диаметр кольца;

D_2 – наружный диаметр кольца; D_3 – средний диаметр по облою; H_1 – высота перемычки; H_2 – высота кольца; H_3 – толщина облойного мостика. Размеры полученных поковок приведены в таблице 8. Пропуски на месте размеров H_3 и D_3 в таблице означают то, что облой не сформировался.

Таблица 7 – Размеры заготовок

№ образца	D_0 , мм	H_0 , мм	Наличие углубления
1	24,9	16,9	Нет
2	25,0	16,5	Нет
3	24,9	16,4	Нет
4	24,9	16,4	Нет
5	24,9	16,9	Нет
6	25,0	16,3	Нет
7	24,7	16,3	Нет
8	25,0	16,3	Нет
9	24,9	16,5	Да
10	25,0	15,2	Да
11	24,8	15,3	Да

Таблица 8 – Размеры полученных поковок и параметры штамповки

№ обр.	H_1 , мм	H_2 , мм	H_3 , мм	D_1 , мм	D_2 , мм	D_3 , мм	S , мм	t , с	δ , %	v , мм/с
1	14,46	15,63	–	17,30	25,46	–	2,39	46,0	0,159	19,25
2	9,52	15,38	–	19,55	27,40	–	6,98	19,6	0,144	2,81
3	6,17	14,76	–	21,85	29,19	–	10,23	24,3	0,128	2,38
4	5,18	14,32	–	23,32	30,11	–	11,22	31,7	0,128	2,83
5	3,33	13,16	1,52	22,25	31,79	36,25	13,57	5,9	0,162	0,43
6	2,72	12,72	0,86	19,52	32,07	39,74	13,58	26,4	0,130	1,94
7	2,66	12,40	0,86	20,19	32,08	37,77	13,64	29,3	0,103	2,15
8	2,33	12,27	0,66	19,47	32,19	46,00	13,97	31,2	0,130	2,23
9	2,58	12,29	0,74	19,50	31,90	46,73	13,92	35,0	0,135	0,40
10	2,26	11,81	0,41	19,53	32,13	39,90	12,94	35,0	0,054	0,37
11	2,25	12,03	0,39	19,60	32,13	43,53	13,05	35,0	0,044	0,37

Для проверки модели использовалась упрощённая версия разработанной модели, оптимизированная для изотермической штамповки свинцовых кольцевых поковок на гидравлической машине. Исходный код программы на языке Fortran приведён в приложении Б. Напряжение текучести материала в этом случае не зависит от температуры и определяется по аппроксимирующей формуле:

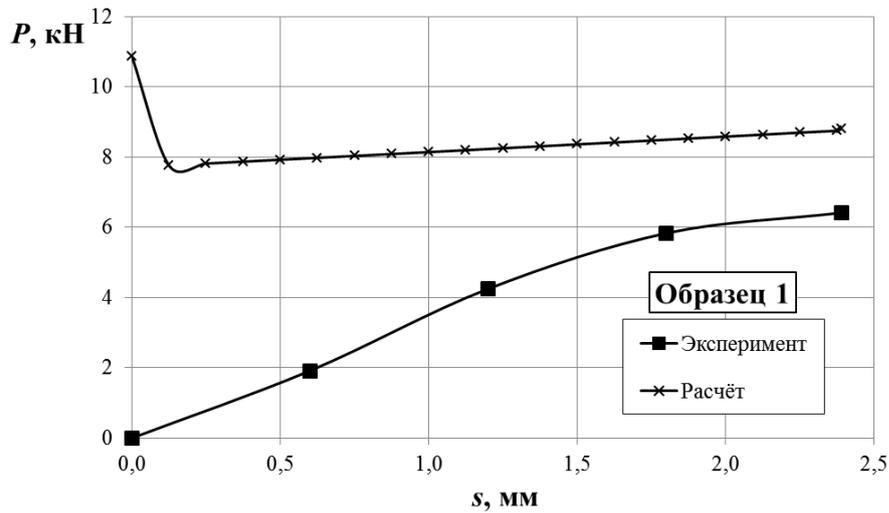
$$\sigma_s = \sigma_{s0} \dot{\epsilon}_p^n, \quad (2.62)$$

где σ_{s0} – начальное значение сопротивления текучести; $\dot{\epsilon}_p$ – скорость деформации по формуле (2.3); n – показатель степени. Коэффициенты σ_{s0} и n в формуле (2.62) определялись аппроксимацией теоретических и экспериментальных данных.

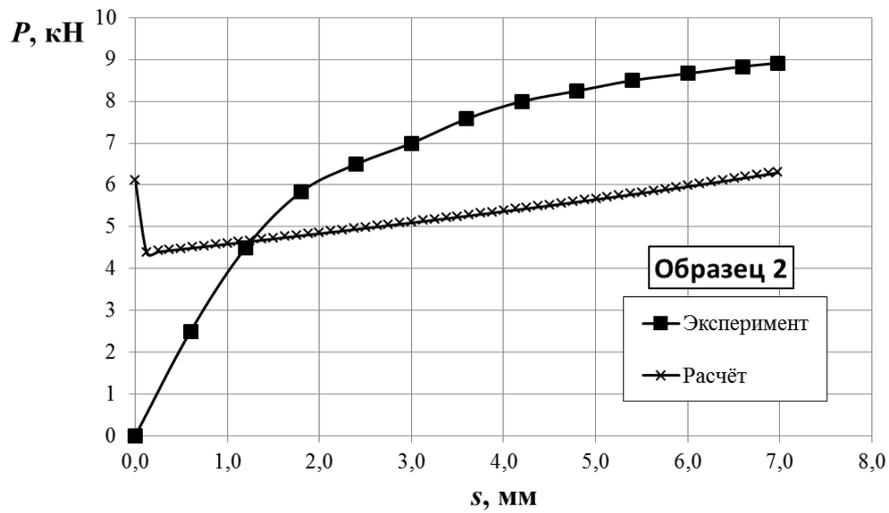
На вход программы подаются следующие параметры: D_1, D_2, H_1, H_2 – диаметральные и высотные размеры поковки (мм); D_3, H_3 – диаметр и толщина облойного мостика (мм); δ – доля металла на технологический припуск; μ – коэффициент пластического трения по Прандтлю; ds – шаг перемещения ползуна (мм); v_1, v_2 – скорость перемещения ползуна на первой и второй стадиях штамповки (мм/с); σ_{s0} – начальное значение сопротивления текучести (МПа); n – показатель степени; C_4, C_5 – коэффициенты аппроксимации давления в полости штампа при заполнении углов и на границе с облоем. На выходе программы: D_0, H_0 – рекомендуемые размеры заготовки (мм); зависимости технологической силы P (кН), радиуса заполнения улов полости штампа d (мм) и длины облоя L_0 (мм) от толщины перемычки h и толщины облоя h_0 ; значение напряжения текучести σ_s и распределение давления p на перемычке в МПа; зависимость технологической силы P (кН) от перемещения ползуна s (мм) на всём рабочем ходу.

При расчете в программе для полученных в эксперименте образцов использовались следующие значения параметров: $D_1=18,9$ мм; $D_2=31,5$ мм; $D_3=43,5$ мм; $H_1=2,84$ мм, $H_2=12,6$ мм и $H_3=1$ мм – для образцов 1-5; для образцов 6-11 значения H_1, H_2 и H_3 назначались по таблице 8; δ – по таблице 8; $\mu=0,1$; $ds=0,125$ мм; $v_1=v_2$ – по таблице 8; $\sigma_{s0}=25$ МПа; $n=0,3$; $C_4=1,076$; $C_5=1,247$.

На рисунке 19 представлены фотографии полученных поковок, а также графики экспериментальных и расчётных зависимостей силы деформирования P от перемещения ползуна прессы s для всех образцов.

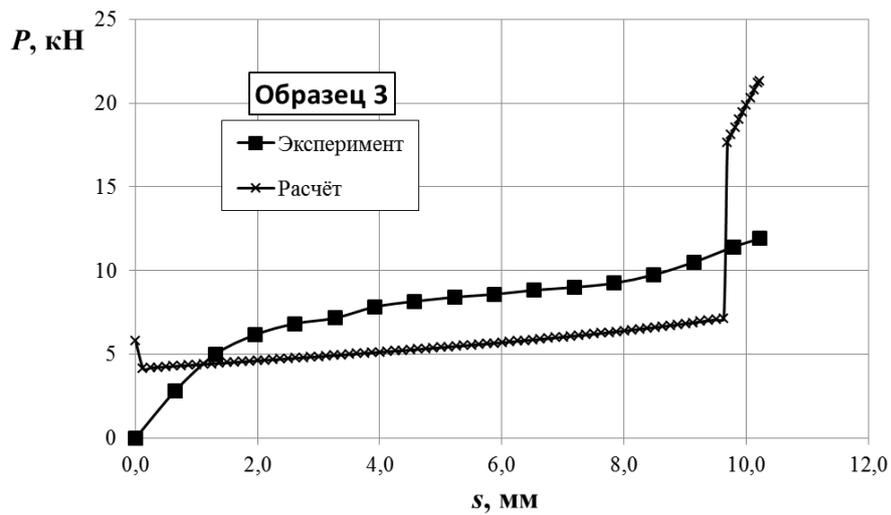


а)

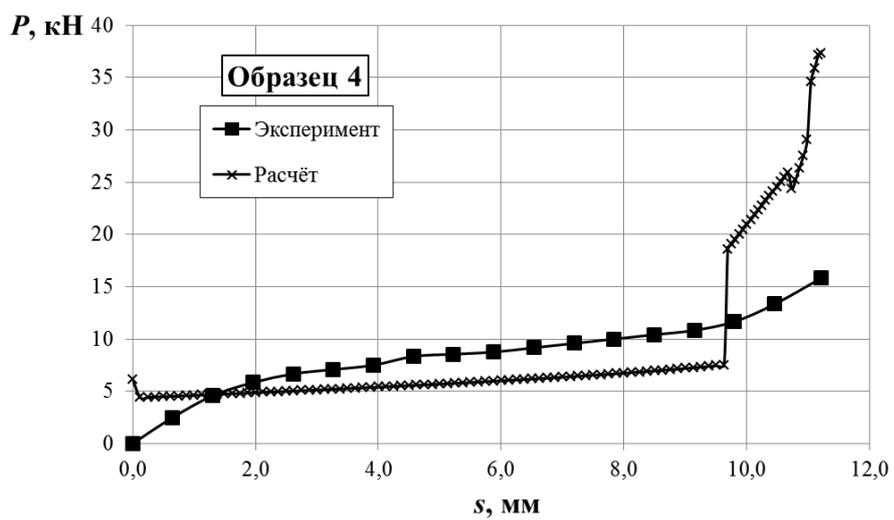


б)

Рисунок 19 – Экспериментальные и расчётные графики зависимости силы деформирования P от перемещения ползуна s : а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4; д – образец 5; е – образец 6; ж – образец 7; з – образец 8; и – образец 9; к – образец 10; л – образец 11

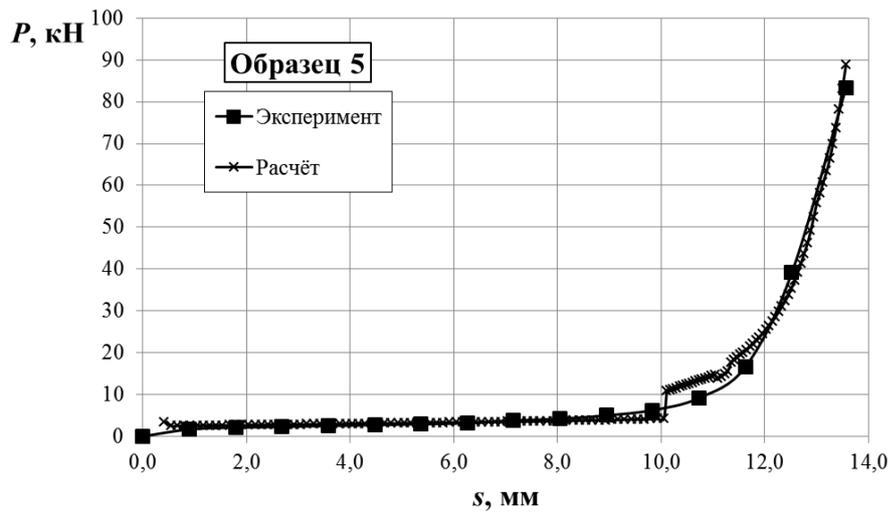


В)

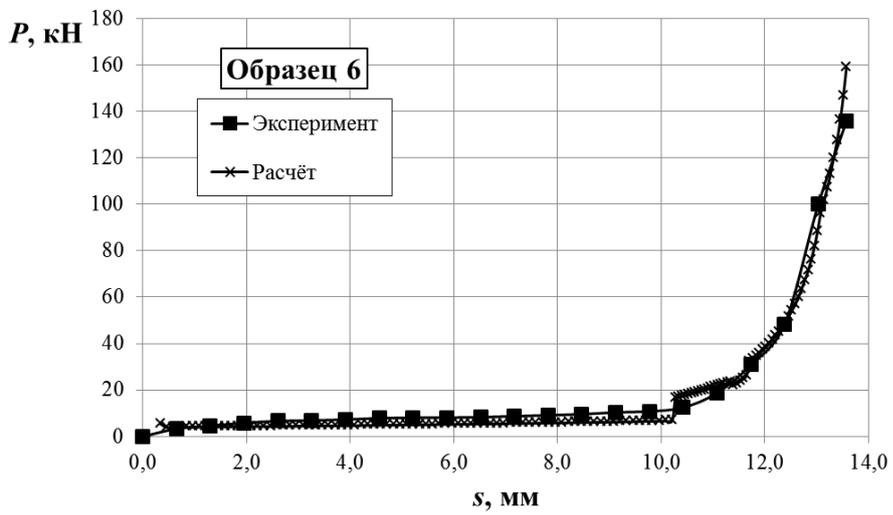


Г)

Рисунок 19 – Экспериментальные и расчётные графики зависимости силы деформирования P от перемещения ползуна s (продолжение)

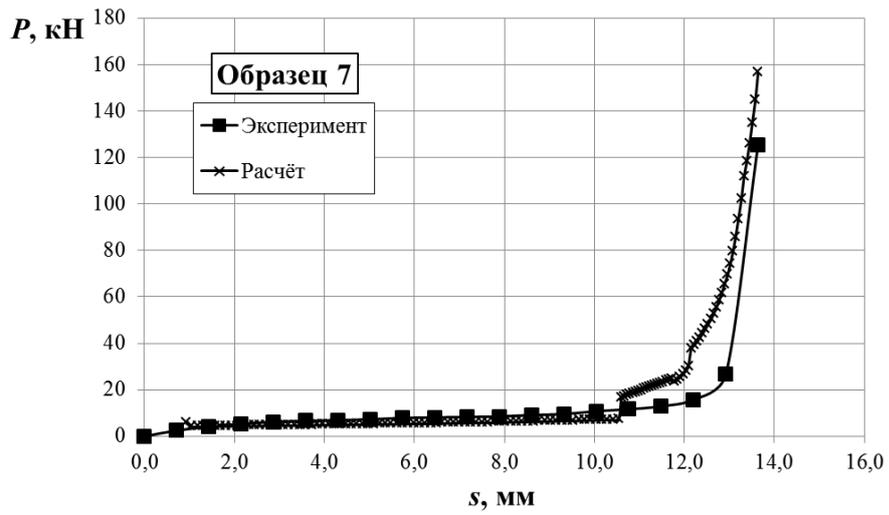


д)

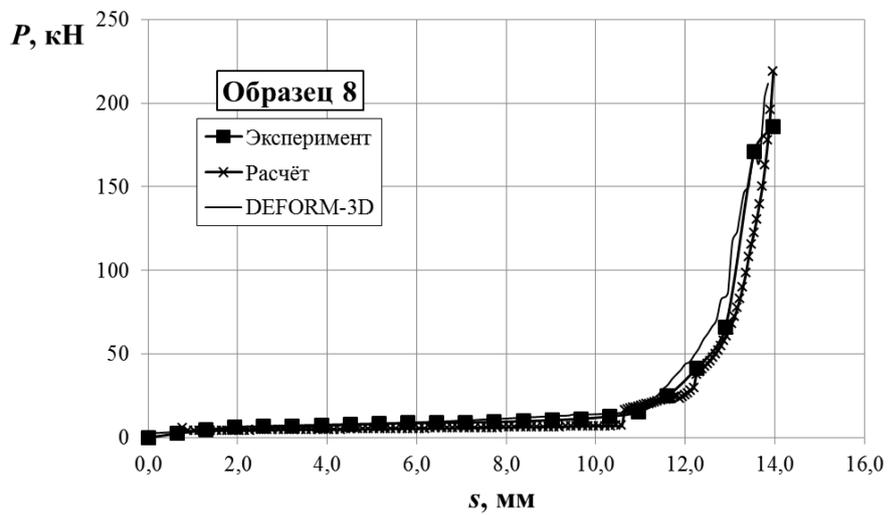


е)

Рисунок 19 – Экспериментальные и расчётные графики зависимости силы деформирования P от перемещения ползуна s (продолжение)

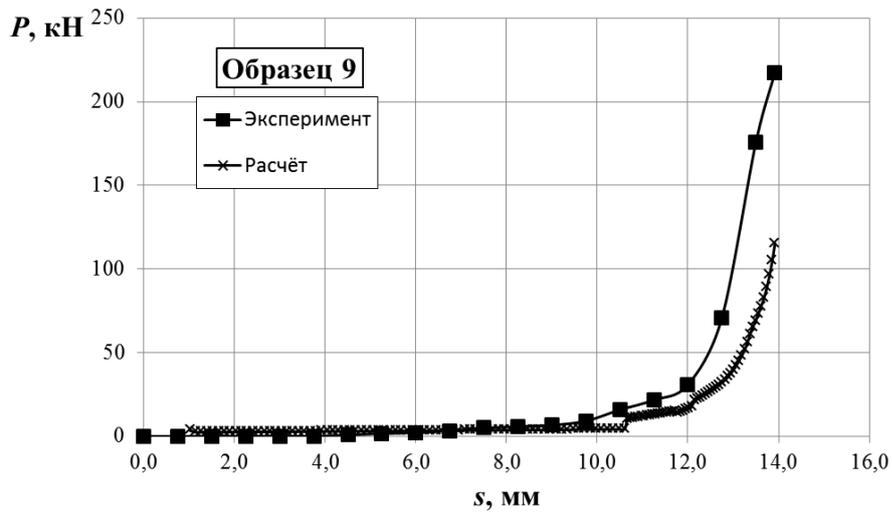


ж)

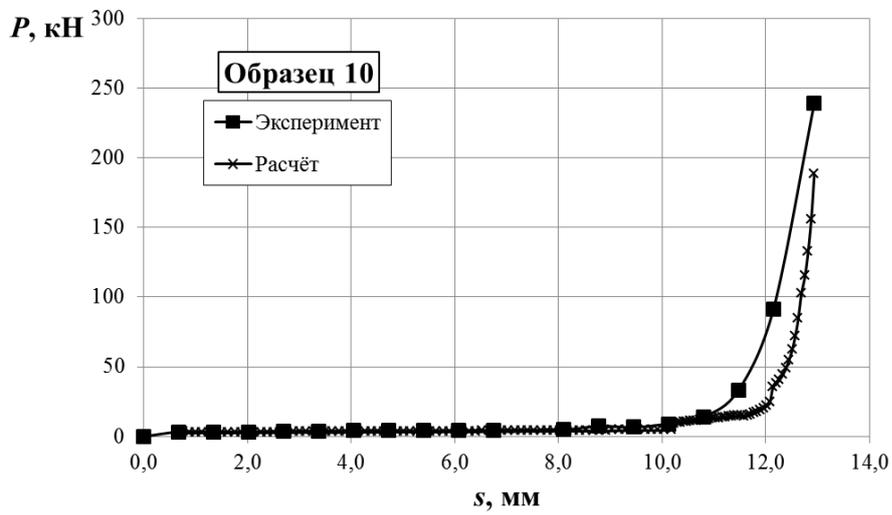


з)

Рисунок 19 – Экспериментальные и расчётные графики зависимости силы деформирования P от перемещения ползуна s (продолжение)

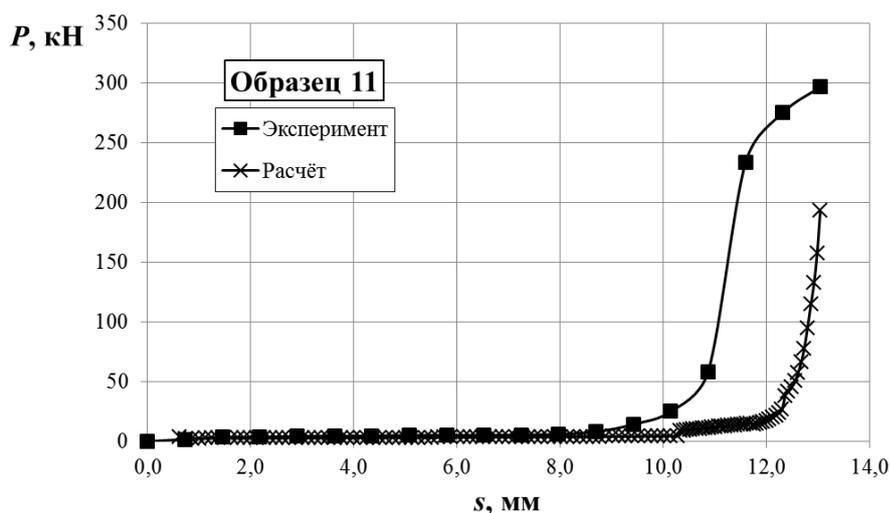


и)



к)

Рисунок 19 – Экспериментальные и расчётные графики зависимости силы деформирования P от перемещения ползуна s (продолжение)



л)

Рисунок 19 – Экспериментальные и расчётные графики зависимости силы деформирования P от перемещения ползуна s (окончание)

Образцы 1-4 подвергались небольшим деформациям и представляют собой, в основном, результат прошивки цилиндрической заготовки вставками штампа. Следует отметить резкий скачок силы деформирования на расчётных графиках для образцов 3 и 4, вызванный контактом торцов кольцевой поковки с дном полости штампа и началом заполнения углов. Скачок расчётной силы можно объяснить тем, что заготовка на стадии осадки приобретает более сложную форму, чем предусмотрено моделью (рисунок 20). При радиальном выдавливании металла на стадии осадки образуется бочкообразная наружная цилиндрическая поверхность заготовки, а также происходит загиб торцов кольцевой части в сторону оси штампа. Из-за сложной формы полуфабриката площадь контакта его с гравюрой штампа в начале второй стадии увеличивается постепенно, а не одновременно, как в расчётной модели. Вследствие этого реальная сила деформирования возрастает на этом этапе более монотонно.

В случае образцов 2 и 4 также заметна неравномерность течения металла, предположительно вызванная погрешностями отрезки и установки заготовок.

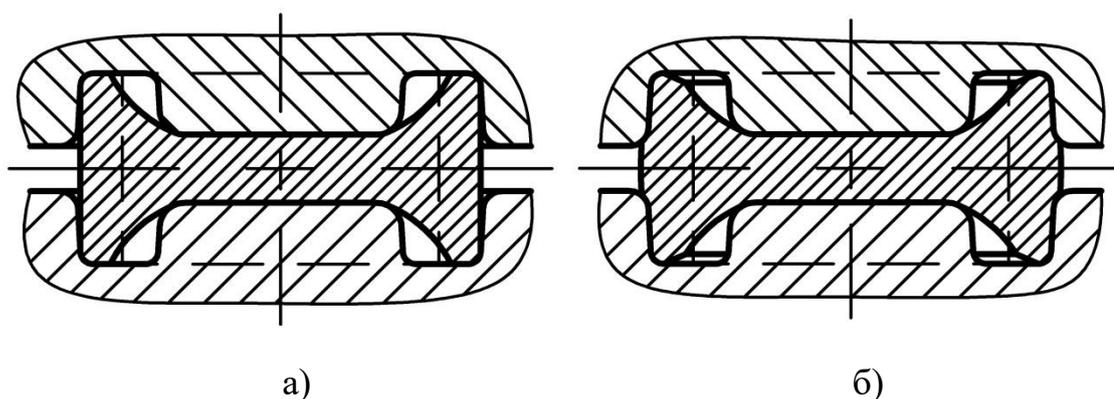


Рисунок 20 – Вид профиля поковки в конце стадии осадки: а – по модели; б – реальный

Образцы 5-8 подвергались деформациям, соответствующим полному рабочему ходу штамповки. Отмечается хорошая сходимость экспериментальных и расчётных данных. Для образцов 5-7 заметна недоштампованность из-за погрешностей отрезки и установки заготовки. На расчётных графиках два скачка силы: при контакте торцов кольца с дном полости штампа и в начале выдавливания металла в облой.

Для перештампованных образцов 9-11 наблюдается некоторое отклонение по значению хода s расчётной зависимости от экспериментальной, вызванное, вероятно, изменением картины течения металла из-за наличия выдавленного в заготовке перед экспериментом углубления. Погрешность по величине силы деформирования P для этих образцов вызвана неравномерностью распределения облоя по мостику, которая присутствует даже несмотря на установку заготовки по углублению и усиливается из-за малой величины припуска металла δ .

Падение точности расчёта также можно объяснить тем, что при расчёте используются не фактические размеры заготовок, а полученные исходя из размеров поковки и припуска для оптимального течения металла.

Для сравнения результатов, получаемых при помощи разработанной модели и расчётом по методу конечных элементов, было проведено моделирование штамповки образца 8 в DEFORM-3D. Полученный график силы на ползуне приведён на рисунке 19, з.

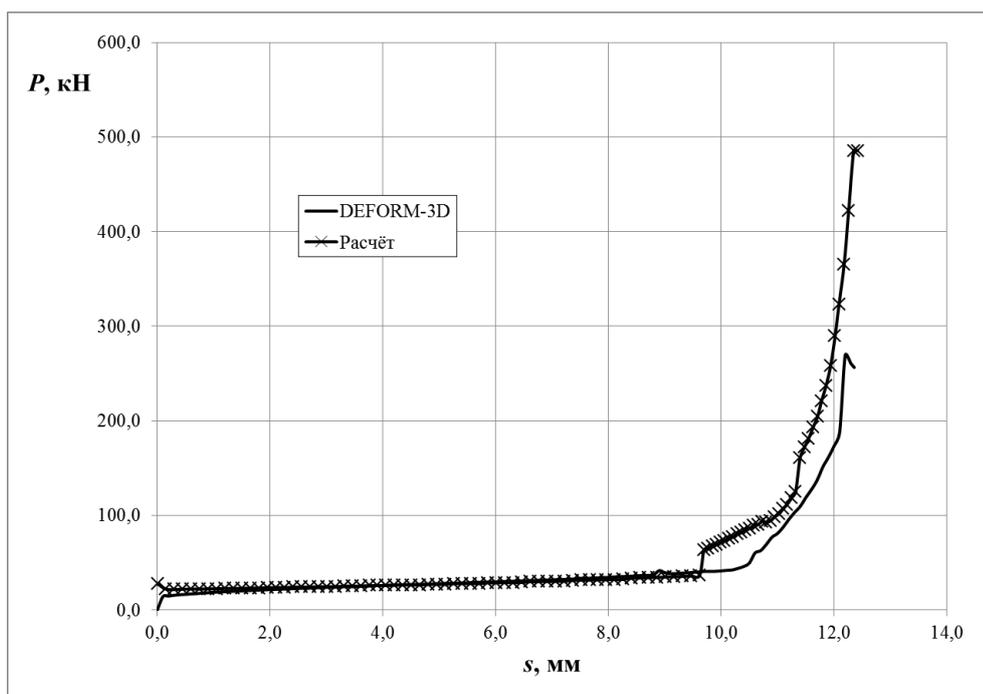


Рисунок 21 – Графики зависимости силы деформирования P от перемещения s ползуна кривошипного прессы, полученные расчётом по модели и в DEFORM-3D ($\delta=0,05$)

Также было проведено сравнение результатов расчёта по разработанной модели горячей штамповки колец из стали 45 на КГШП с результатами моделирования процесса штамповки в DEFORM-3D. Расчёт производился с использованием заготовок без выточки по рисунку 17 и штампа по рисунку 18. Параметры расчёта: $D_1=18,9$ мм; $D_2=31,5$ мм; $D_3=43,5$ мм; $H_1=2,84$ мм; $H_2=12,6$ мм; $H_3=1$ мм; $\delta=0,05$; $P_m=0$ кН; $T=1250$ °C; $T_{ш}=250$ °C; $\mu=0,35$; $f=0,05$; $C_n=5400$ кН/мм; $J_n=2400$ кНм·с²; $\omega_0=3,14$ с⁻¹; $\omega_c=3,305$ с⁻¹; $S=0,1$; $ds=0,15$ мм; $R=150$ мм; $R_L=0,15$; $R_A=280$ мм; $R_B=180$ мм; $R_O=170$ мм; $\sigma_0=104$ МПа; $T_0=1000$ °C; $n_1=0,097$; $n_2=-2,767$; $(c\rho)=5,14$ МПа/°C; $\alpha_k=20$ Вт/(м²·°C); $C_4=1,076$; $C_5=1,247$. Полученные графики силы на ползуне прессы представлены на рисунке 21. Максимальное значение силы на ползуне в конце хода, полученное расчётом МКЭ заметно ниже значения по разработанной модели, причём в конце рабочего хода наблюдается необоснованный спад силы деформирования.

Так как в ходе экспериментов было установлено, что припуск $\delta=0,05$ слишком мал для образования достаточного для заполнения штампа облоя, для дальнейших расчётов было принято решение использовать заготовки с повышенным запасом металла на облой и скругления $\delta=0,3$. Оптимальные размеры цилиндрической заготовки при $D_1=18,9$ мм, $D_2=31,5$ мм, $H_1=2,84$ мм; $H_2=12,6$ мм составляют $D_0=26,2$ мм, $H_0=17$ мм. Прочие параметры не менялись. Графики силы на ползуне пресса, полученные расчётом по модели и МКЭ представлены на рисунке 22. Максимальная сила деформирования в таком случае увеличивается в 1,6-2,4 раза, чем при использовании припуска $\delta=0,05$. Как и в предыдущем случае, на полученном МКЭ графике виден спад роста силы в конце штамповки.

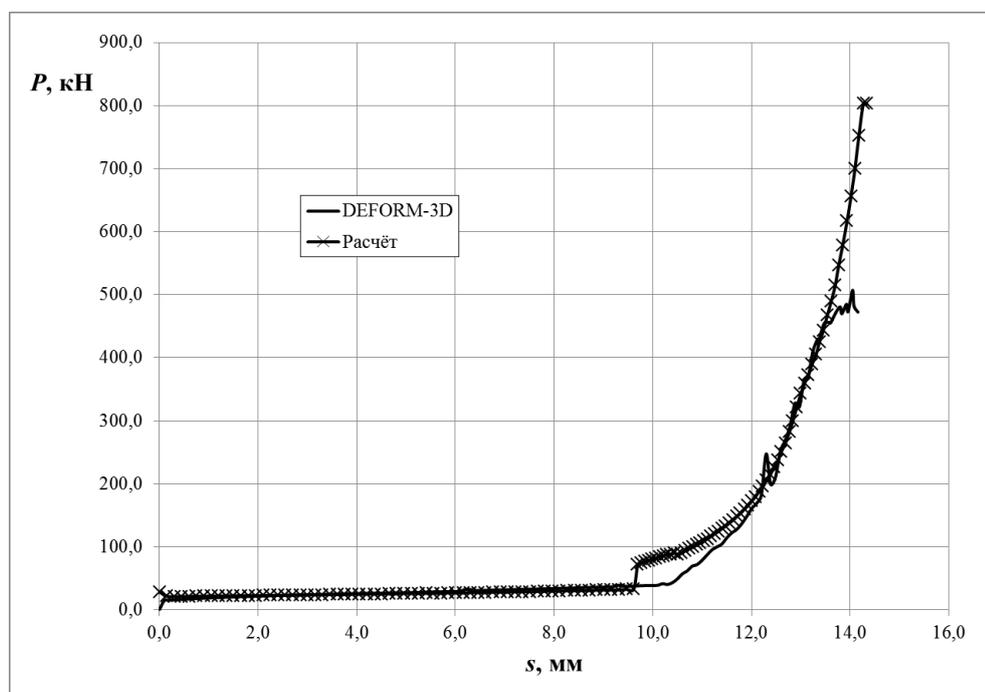


Рисунок 22 – Графики зависимости силы деформирования P от перемещения s ползуна кривошипного пресса, полученные расчётом по модели и в DEFORM-3D ($\delta=0,3$)

2.3 Анализ факторов, влияющих на качество штамповки и стойкость штампов для кольцевых поковок

Как известно, облой предназначен для создания давления подпора штампуемого металла, необходимого для равномерного заполнения всех углов и полостей штампа. При назначении малого припуска на облой возрастает шанс получить брак поковки по заполнению, главным образом из-за невозможности точной установки заготовки в штамп. Назначение припуска на облой больше необходимого ведёт не только к нерациональному расходованию материала, но и к чрезмерному росту давления в полости штампа и на облойной канавке, к повышенному износу облойного мостика. Такой рост давления в свою очередь ведёт к росту напряжений в штампе и к снижению его стойкости, к росту усилий на ползуне и снижению ресурса ответственных деталей кузнечно-штамповочного оборудования.

Например, согласно результатам расчёта, представленным на рисунке 22, при преодолении ползуном прессы последнего миллиметра рабочего хода усилие деформирования возрастает почти вдвое. Причём большая часть энергии затрачивается на деформирование тонкого слоя металла облойного мостика. Поэтому изменение параметров облойного мостика может сильно сказаться на напряжённом состоянии штампа и заполняемости поковки.

Согласно расчёту по предлагаемой модели, полость штампа в рассматриваемом случае полностью заполнена уже при толщине мостика 2,6 мм (в DEFORM-3D – 2,2 мм) при радиусах скругления штампа, равных 1 мм. При радиусах скругления 1,5 мм штамп заполнен уже при толщине облоя 3,2 мм. В дальнейшем происходит только выдавливание избыточного металла в облой и его сжатие, сопровождающееся резким ростом усилий деформирования.

Увеличение толщины мостика на 1 мм ($H_3=2$ мм) при прочих равных параметрах позволяет снизить максимальную силу деформирования в 2 раза по результатам расчёта в представленной программе и в 1,4 раза по данным DEFORM-3D. При этом сохраняется заполняемость штампа: при скруглениях в

1 мм штамп заполнен при толщине мостика 2,9 мм (в DEFORM-3D – 2,75 мм), при скруглениях в 1,5 мм – при толщине мостика 3,5 мм.

Дальнейшее увеличение толщины мостика до $H_3=3$ мм приводит к ещё большему снижению нагрузок. Максимальная сила деформирования при этом уменьшается в 2,8 раз (по данным DEFORM-3D в 1,7 раз) по сравнению с первоначальным значением. Углы штампа с радиусами скругления 1 мм заполнены при толщине облоя 3,1 мм (в DEFORM-3D – 3,23 мм), с радиусами 1,5 мм – при толщине облоя 3,8 мм.

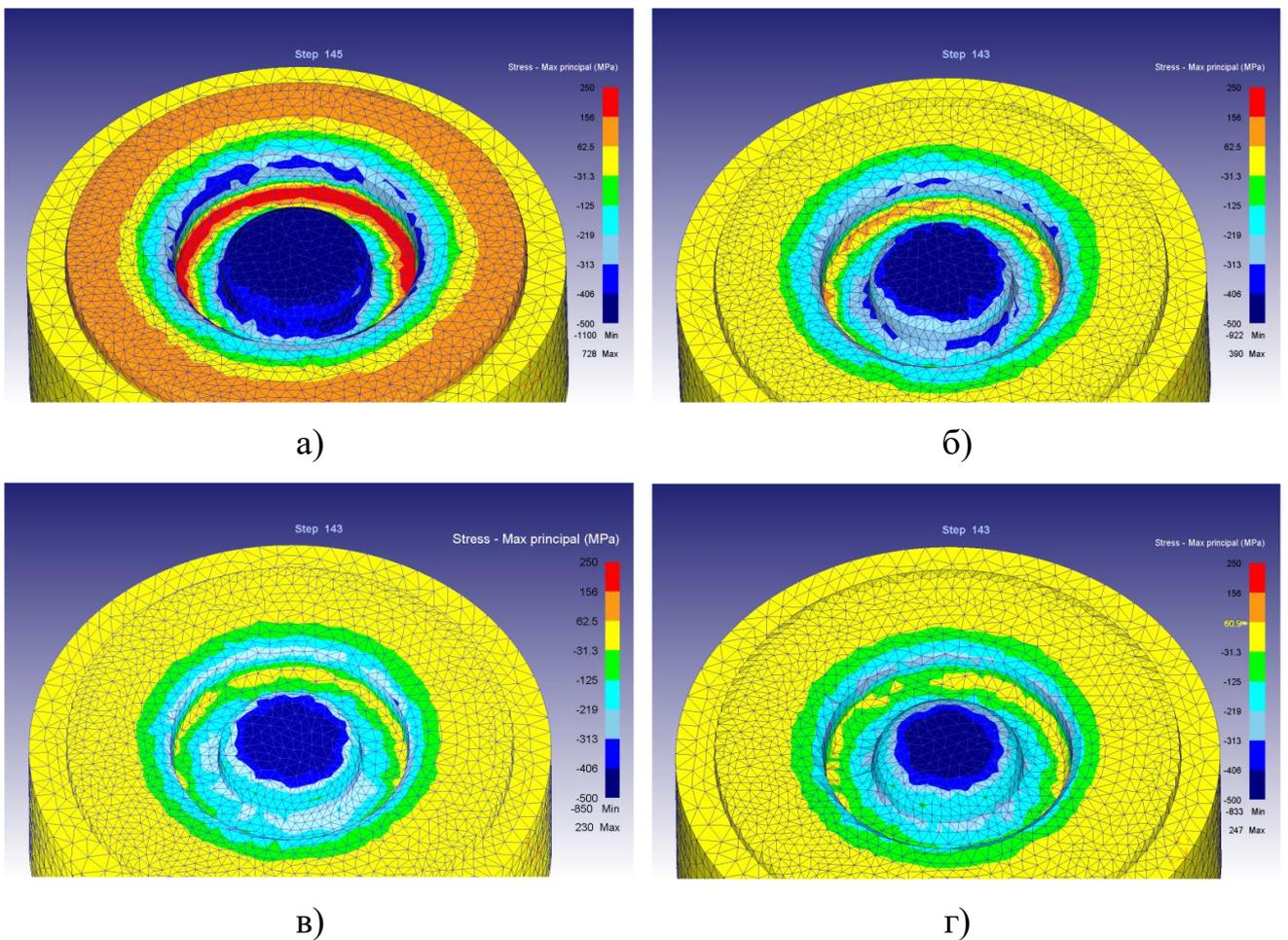


Рисунок 23 – Эпюры максимальных напряжений на поверхности штампа для кольцевых поковок: а – $H_3=1$ мм, скругления 1 мм; б – $H_3=2$ мм, скругления 1 мм; в – $H_3=3$ мм, скругления 1 мм; г – $H_3=3$ мм, скругления 1,5 мм

Для оценки влияния толщины облойного мостика на напряжённое состояние штампа в конце операции штамповки были проведены расчёты нижнего штампа методом конечных элементов, реализованном программными средствами DEFORM-3D. Результаты расчёта приведены на рисунке 23. Увеличение толщины облойного мостика на 1 мм при прочих равных условиях позволяет снизить максимальные растягивающие напряжения в 1,9 раз, а сжимающие в 1,2 раза. Увеличение конечной толщины облоя до 3 мм позволяет снизить растягивающие напряжения в 3,2 раза, а сжимающие в 1,3 раза по сравнению с первоначальным вариантом. При этом значительно снижается вероятность образования трещин в углах кольцевой полости и несколько снижается смятие и износ центральной вставки.

Увеличение радиусов скругления штампа с 1 мм до 1,5 мм в расчёте (рисунок 23, *г*) не дало ощутимого эффекта снижения концентрации напряжений, что вызвано, вероятно, неточностью построения сетки конечных элементов. Тем не менее, так как скругления штампа больших радиусов заполняются при меньшем давлении металла в полости штампа, есть возможность увеличить вместе с радиусом скруглений и толщину облойного мостика до требуемой величины.

Повышение температуры штампуемой заготовки на 50°C, согласно расчётам по модели, приводит к снижению максимальной силы деформирования на 87,7 кН. Снижение температуры на 50°C приводит к повышению максимальной силы на 97,5 кН.

По полученным результатам также можно судить о необходимости повышенных требований к контролю параметров процесса штамповки, так как даже небольшая погрешность регулировки закрытой высоты прессы или остывание заготовки могут привести к значительному росту напряжений в теле штампа.

2.4 Выводы по главе

1. Разработана математическая нестационарная модель штамповки кольцевых поковок на кривошипных горячештамповочных прессах, позволяющая исключить дефекты течения металла и повысить стойкость штамповой оснастки, снизив требуемые технологические усилия штамповки за счёт подбора оптимальных технологических параметров.

2. Разработанная модель штамповки кольцевых поковок реализована на языке программирования Fortran.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА КАЧЕСТВО ПОКОВОК И РЕСУРС ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА НА ПРИМЕРЕ ПОКОВКИ «КОРПУС»

Зачастую на производстве уделяется недостаточно внимания оптимизации технологического процесса изготовления изделий, в то время как современное программное обеспечение открывает большие возможности для этих целей ещё на этапе проектирования штамповой оснастки.

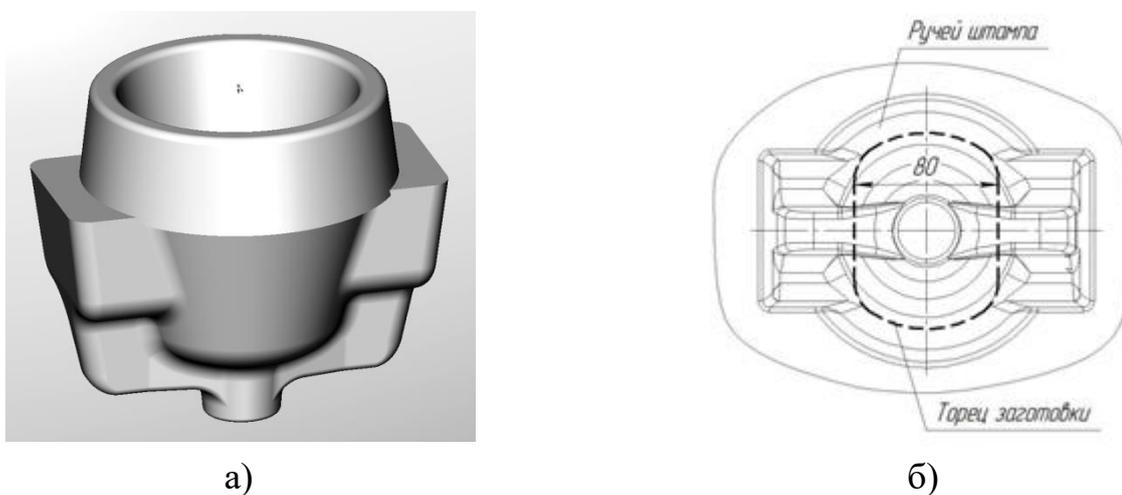


Рисунок 24 – Поковка корпус (а) и схема установки заготовки в штамп (б) по принятой технологии

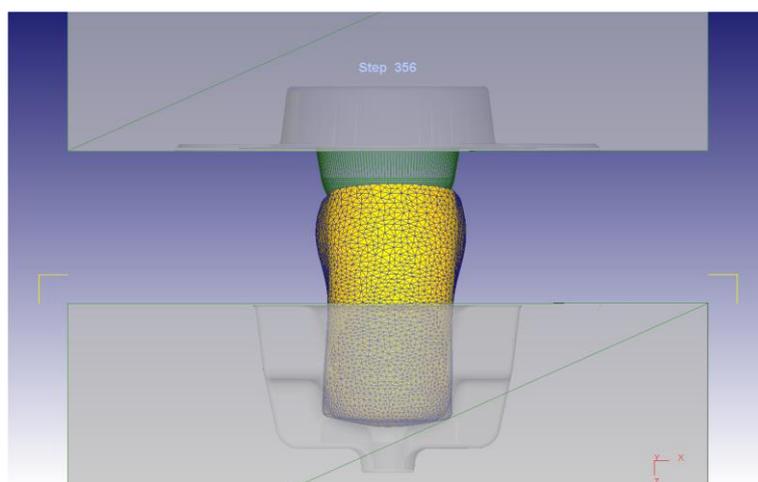


Рисунок 25 – Потеря заготовкой устойчивости при моделировании штамповки по принятому техпроцессу

В качестве примера оптимизации конструктивных и технологических параметров рассмотрим процесс штамповки поковки «корпус» представленной на рисунке 24, а. Принятым технологическим процессом штамповки поковок «корпус» предусмотрены следующие операции: отрезка исходной заготовки диаметром 100 мм и длиной 199 мм; проточка одного конца заготовки на радиус $R=10$ мм; первая осадка нагретой заготовки в торец до $H=170$ мм; вторая осадка заготовки плашмя до $B=80$ мм; установка заготовки в штамп согласно рисунку 24, б; собственно штамповка поковки.

В ходе моделирования процесса штамповки поковки «корпус» по приведённому алгоритму в программном комплексе DEFORM-3D была установлена возможность потери заготовкой устойчивости на начальной стадии штамповки, хорошо заметная на рисунке 25. Такая потеря устойчивости может привести к браку по заполняемости штампа и по неоднородности механических свойств изготавливаемых поковок. Неоднородность можно, в частности, наблюдать в сечении поковки, представленной на рисунке. 26. На рисунке 26, а показаны результаты измерений твёрдости при помощи твердомера неразрушающего действия ТЕМП-4. Неоднородность структурного состояния металла поковки подтверждают результаты замеров коэрцитивной силы, приведённые на рисунке 26, б.

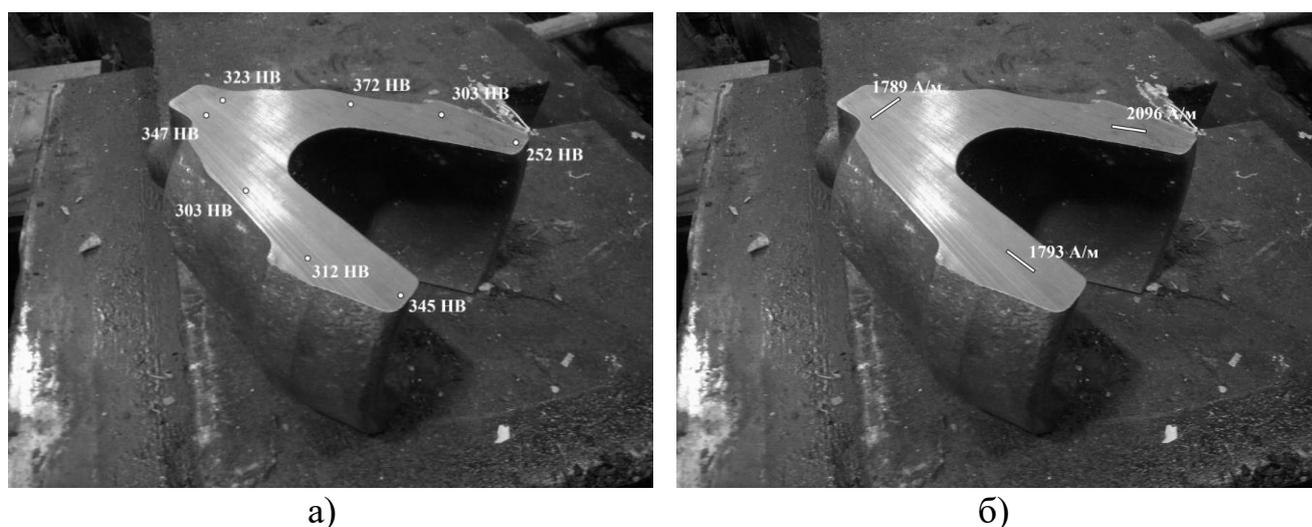


Рисунок 26 – Результаты замеров твёрдости (а) и коэрцитивной силы (б) в сечении поковки «корпус»

По установленному технологическому процессу осаженная в торец и затем плашмя заготовка устанавливается в полость штампа, имеющую коническую форму. Предшествующие деформации сообщают заготовке сложную форму, вследствие чего она имеет малую площадь контакта с гравюрой штампа, что хорошо заметно на рисунке 27. Из-за округлой формы и малого размера пятна контакта возникает опрокидывание заготовки на начальной стадии штамповки. Поэтому нужно подобрать такие размеры заготовки, при которых обеспечивается наибольшая площадь контакта её со штампом в начальный момент деформирования (при дальнейшем деформировании площадь контакта и, соответственно, устойчивость заготовки за счёт трения её с гравюрой штампа увеличиваются). При анализе размеров заготовки условимся использовать заготовки с установленными техпроцессом начальными размерами – длиной 199 мм и диаметром 100 мм. Произведём 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 .

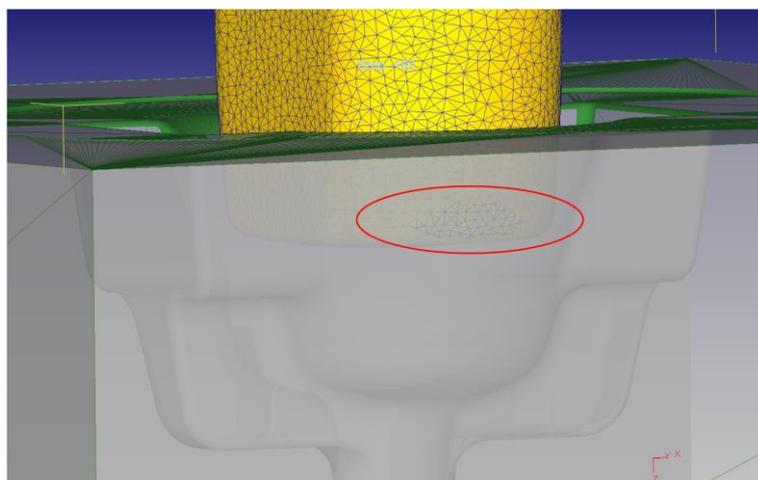


Рисунок 27 – Начальное пятно контакта заготовки и нижнего штампа

Для оценки влияния конечной высоты заготовки после осадки в торец на её устойчивость были смоделированы техпроцессы штамповки со следующими параметрами: $H=160$ мм при $B=80$ мм; $H=170$ мм при $B=80$ мм; $H=180$ мм при

$B=80$ мм. Результаты расчёта представлены на рисунке 28. Так как программные средства DEFORM-3D не позволяют точно определить площадь контакта при установке заготовки из-за погрешности построения сетки конечных элементов, площадку контакта будем оценивать визуально. При увеличении H пятно контакта становится длиннее при сохраняющейся ширине, что благоприятно сказывается на устойчивости заготовки. Напротив, уменьшение H приводит к уменьшению длины контактной площадки и к потере устойчивости. В крайнем случае, устранение операции осадки заготовки в торец (при сохранении операции осадки плашмя) приводит к дальнейшему увеличению контакта между штампом и заготовкой. Так как отношение исходной высоты заготовки к её диаметру составляет 1.99 и не превышает критическое значение 2.5, есть возможность полностью исключить операцию осадки в торец из технологического процесса. При этом устойчивость заготовки при установке хоть и должна повышаться за счёт лучшего контакта её со штампом, но из-за увеличения длины заготовки потеря устойчивости проявляется сильнее. Поэтому оптимизация устойчивости заготовки при её установке за счёт одного только варьирования размера H невозможна.

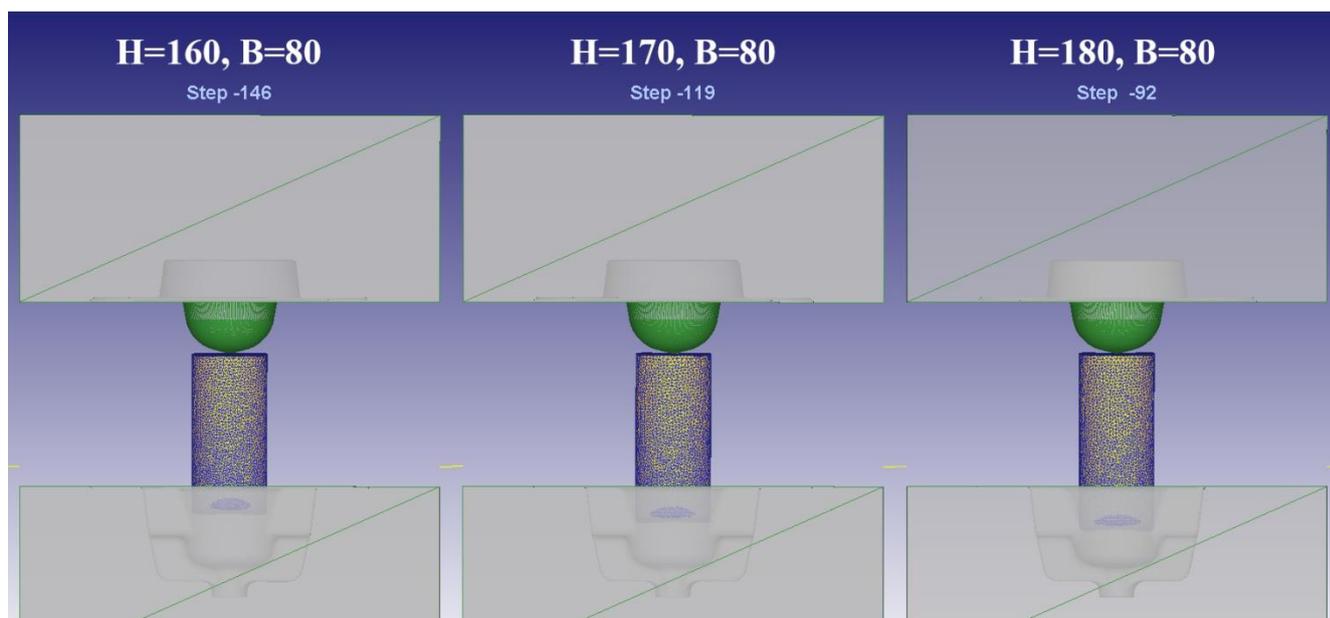


Рисунок 28 – Влияние размера H на контакт заготовки с нижним штампом

При осадке плашмя заготовка принимает сложную форму, снижающую её устойчивость при установке в штамп, и характеризуется овальностью, заметной на рисунке 29 (при круглой форме сечения штампа), и неровностями на торцах заготовки (рисунок 30), негативно влияющими на устойчивость в начале штамповки при контакте верхнего штампа с заготовкой.



Рисунок 29 – Вид с торца заготовки при установке её в штамп

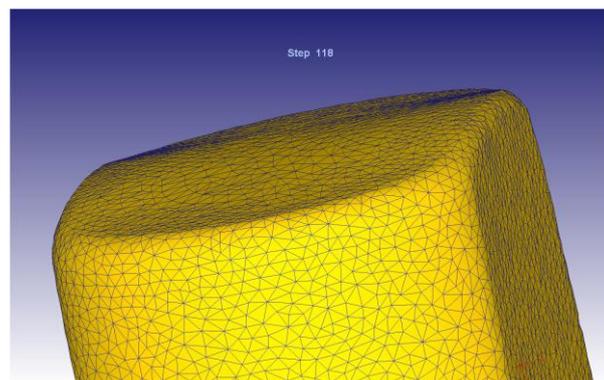


Рисунок 30 – Форма торца заготовки после двух операций осадки

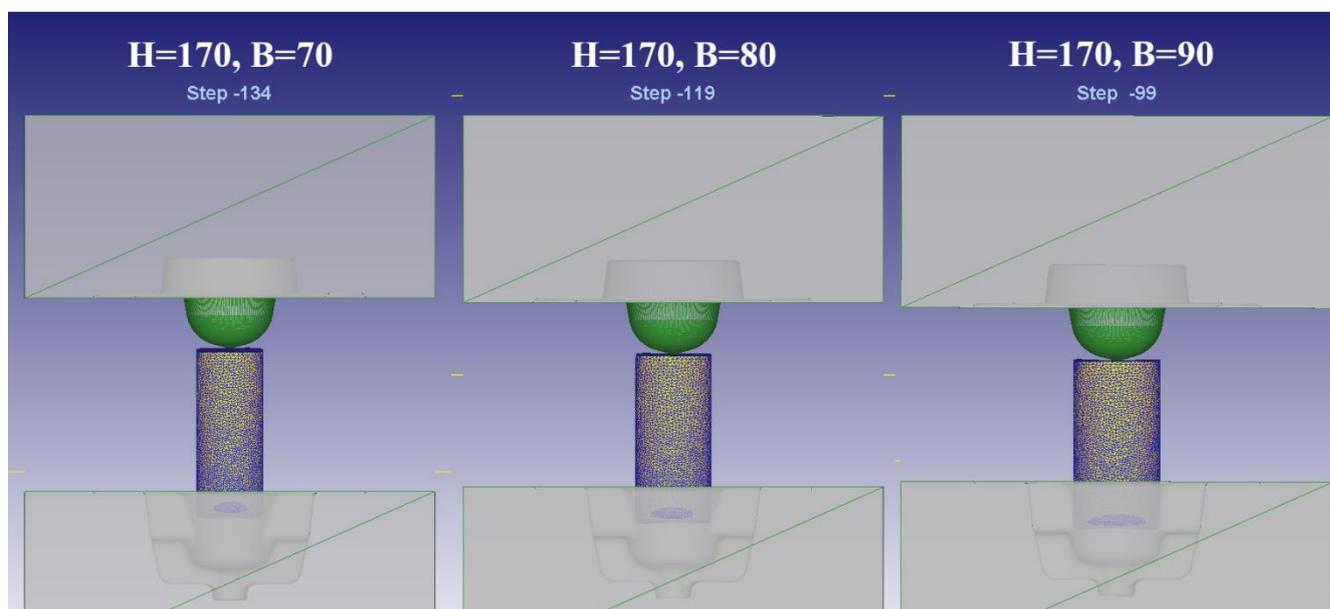


Рисунок 31 – Влияние размера B на контакт заготовки с нижним штампом

Результаты анализа влияния осадки плашмя заготовки для различных значений B приведён на рисунке 31. Как и следовало из предыдущих наблюдений, осадка на меньший размер B приводит к увеличению геометрических искажений и

к уменьшению площадки контакта. Увеличение размера B , напротив, ведёт к улучшению условий позиционирования заготовки в штампе и повышению её устойчивости. Полное устранение из тех. процесса операции осадки плашмя приводит к лучшим результатам. Кроме того, за счёт формы заготовки, более приближенной к форме гравюры штампа, улучшается заполняемость штампа.

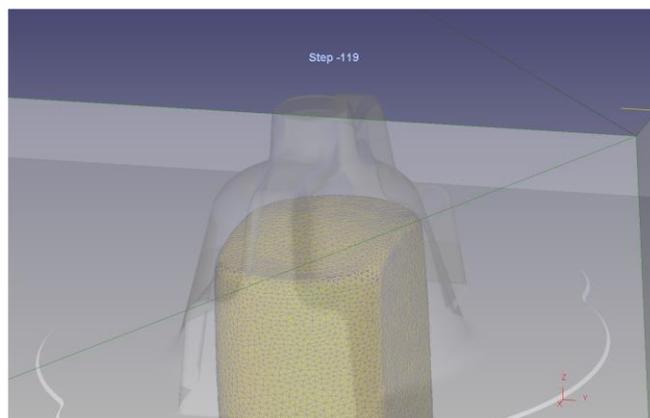


Рисунок 32 – Вариант установки заготовки с поворотом на 90°

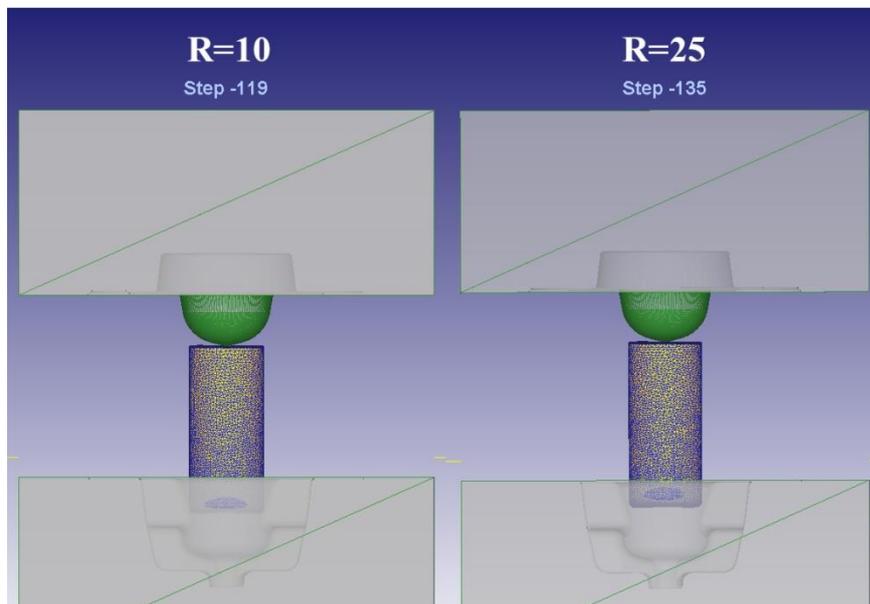


Рисунок 33 – Влияние размера R на контакт заготовки с нижним штампом

Был проанализирован также процесс штамповки с расположением осаженной в торец и плашмя заготовки в полости штампа с поворотом на 90° по отношению к общей оси штампов (рисунок 32). Заготовка в таком положении

приблизительно повторяет форму полости штампа, что обеспечивает наилучшую заполняемость. Достоинства такого расположения заготовки, помимо лучшей заполняемости, в том, что при установке её в штамп образуется 4 площадки контакта вместо двух, что должно положительно влиять на устойчивость. Однако, как показал дальнейшее моделирование, площади пятен контакта недостаточно для полной устойчивости заготовки.

Сравнение результатов моделирования штамповки с разными радиусами скругления торца заготовки R приведены на рисунке 33. Заметно незначительное увеличение ширины контактной площадки, но её длина остаётся постоянной. Кроме того, следует отметить смещение контактной площадки вверх, что объяснимо усложнением формы получаемой осадкой в торец заготовки при большем радиусе $R=25$ мм.

Итак, повысить устойчивость заготовки в штампе при штамповке «корпуса» 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).

Наибольшее негативное влияние на устойчивость оказывает использование операции осадки заготовки плашмя, так как она после осадки принимает сложную форму. Поэтому влияние данной операции следует свести к минимуму, в идеале – исключить её из технологического процесса.

На рисунке 34 показаны результаты анализа моделирования штамповки при использовании только одной операции осадки в торец с исключением осадки плашмя. При $H=170$ мм и $R=10$ мм наблюдается наибольшая длина пятна контакта. При $H=170$ мм и $R=25$ мм длина пятна контакта снижена, но его ширина больше. Максимизировать площадь пятна контакта при $R=25$ можно, увеличив размер H (например, как на рисунке 35, где исключены обе операции осадки).

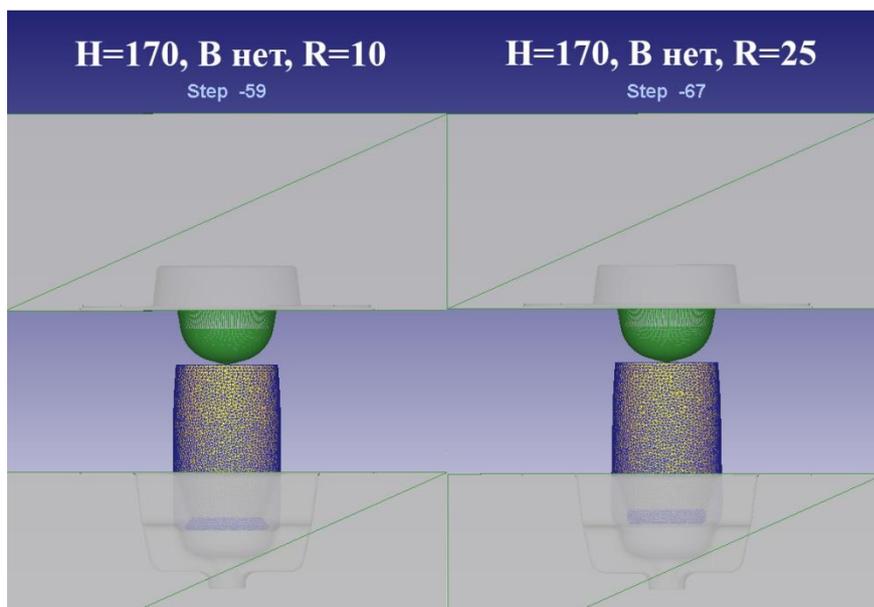


Рисунок 34 – Результаты исключения из техпроцесса операции осадки плашмя

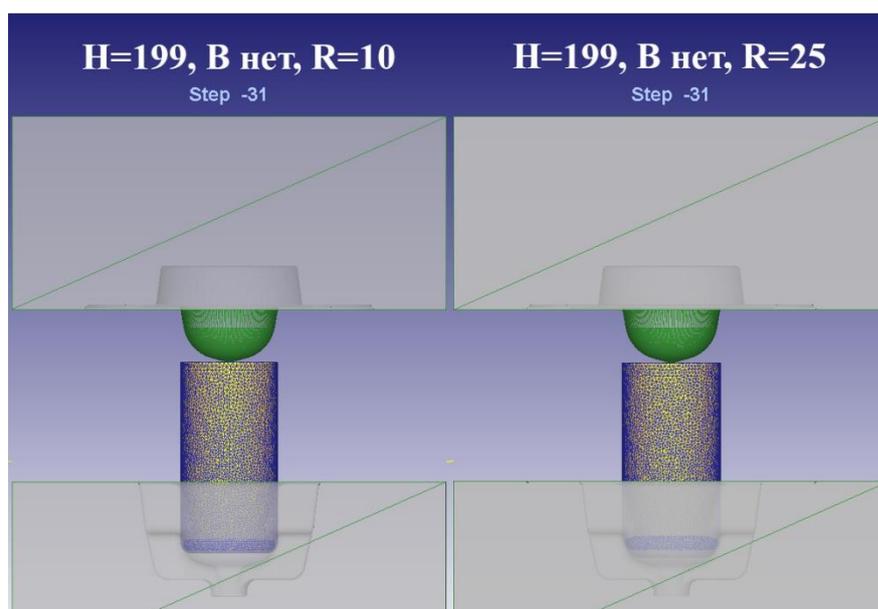


Рисунок 35 – Результаты исключения из техпроцесса двух операций осадки

Повышение устойчивости заготовки возможно также за счёт увеличения коэффициента трения, но является нецелесообразным. Также следует уделить особое внимание точности позиционирования друг относительно друга верхнего и нижнего штампа, так как даже небольшая несоосность при установке может привести к опрокидыванию заготовки.

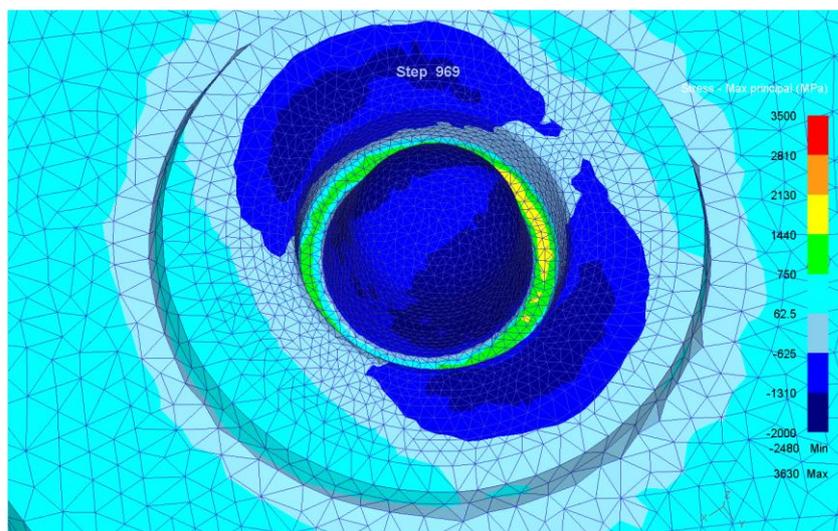


Рисунок 36 – Эпюра напряжений на поверхности верхнего штампа поковки «корпус»

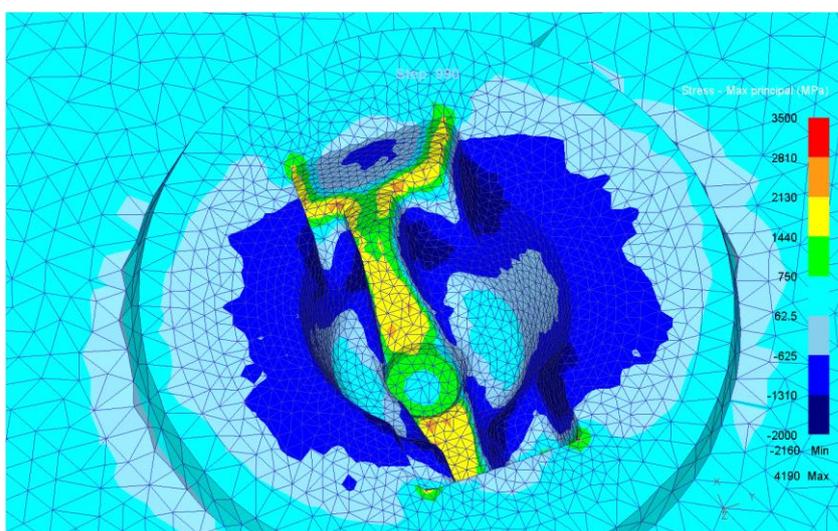
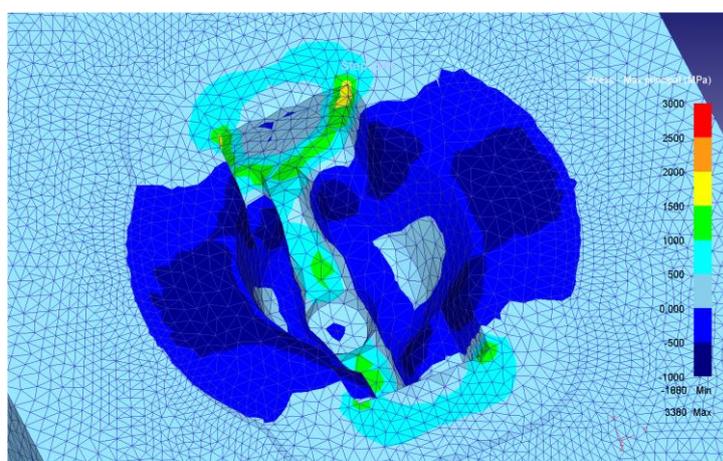


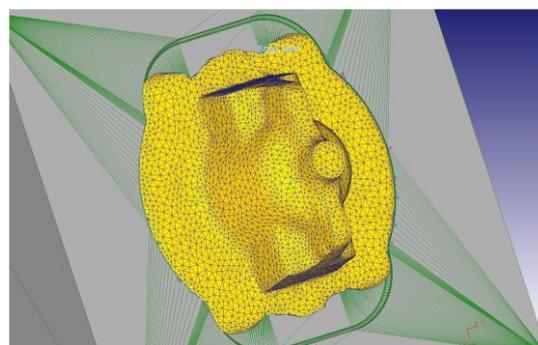
Рисунок 37 – Эпюра напряжений на поверхности нижнего штампа поковки «корпус»

Для того, чтобы установить характер влияния на стойкость штамповой оснастки изменения вышеперечисленных параметров процесса штамповки, было принято решение произвести расчёт программными средствами DEFORM-3D наиболее опасных участков инструмента. Установлено, что максимальные растягивающие напряжения в нижнем и верхнем штампах возникают в конце процесса штамповки при повышении давления в полости штампа, вызванном подпором текущего металла со стороны облойного мостика. Зона максимальных

растягивающих напряжений в верхнем штампе приходится на участок посадки запрессованной сменной штамповой вставки (рисунок 36), поэтому шансы образования трещин там невысоки и может происходить только небольшое раскрытие посадочного отверстия под нагрузкой. Нижний штамп имеет сложную форму гравюры с зонами повышенной концентрации напряжений, испытывающих в ходе штамповки максимальные растягивающие напряжения (рисунок 37), поэтому значительно возрастает риск образования там трещин. Вследствие этого дальнейшие расчёты проводились только для нижнего штампа.

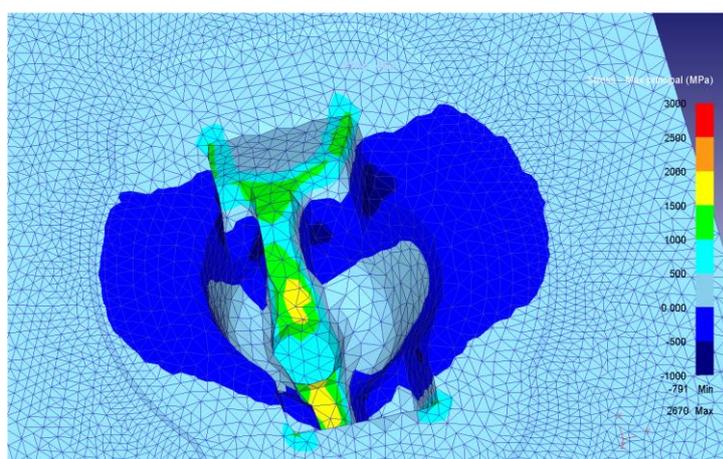


а)

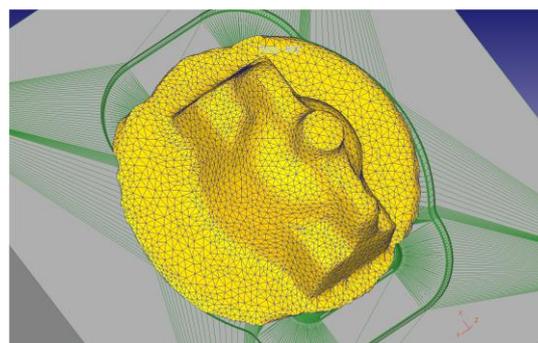


б)

Рисунок 38 – Напряжения в нижнем штампе (а) и заполняемость (б) при $H=170$ мм, $B=80$ мм, $R=10$ мм



а)



б)

Рисунок 39 – Напряжения в нижнем штампе (а) и заполняемость (б) при $H=199$ мм, $B=80$ мм, $R=10$ мм

Ниже представлены результаты расчётов напряжённого состояния и заполняемости нижнего штампа, выполненные при одинаковых технологических условиях, за исключением оговоренных варьируемых параметров. В связи с большим объёмом данных расчёт инструмента производился только для нескольких последних шагов моделирования штамповки поковки «корпус» в DEFORM-3D.

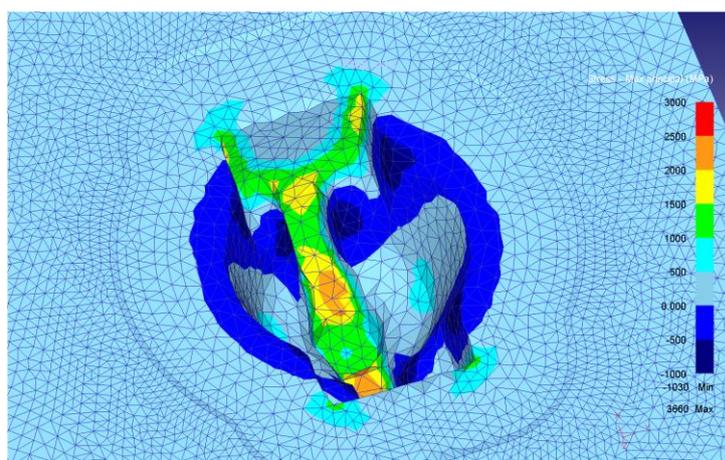
Расчёт с использованием заготовок, полученных по принятой технологии с осадкой в торец до 170 мм и осадкой плашмя до 80 мм, показывает (рисунок 38), что помимо потери устойчивости при установке заготовки в штамп наблюдается слабое течение металла при заполнении углов полости штампа, но усиленное течение в направлении, перпендикулярном указанному. Вследствие этого возможен брак по заполняемости углов штампа, усиливающийся вследствие потери заготовкой устойчивости. Из-за неравномерного течения металла отдельные участки облойного мостика могут испытывать повышенный износ и смятие при преобладании на них сжимающих напряжений.

В случае уменьшения эффекта или полного исключения первой операции осадки (рисунок 39), как уже было замечено, увеличивается площадь контакта заготовки со штампом при её установке, но недостаточно для полного устранения потери устойчивости. При этом усиливается эффект потери устойчивости, что можно наблюдать на рисунке 39, б. Облой по мостику распределён неравномерно, что привело к снижению давления в полости штампа и сильному снижению заполняемости.

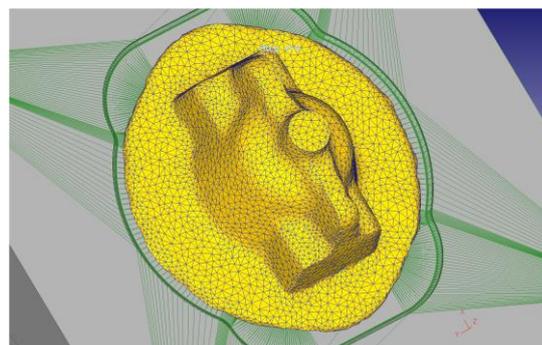
Уменьшение эффекта или полное исключение второй операции осадки приводит к значительному повышению устойчивости устанавливаемой в штамп заготовки. Вместе с этим улучшается и заполняемость, так как форма заготовки становится почти эквидистантной форме полости штампа (рисунок 40), поэтому исключается возможность брака по недостаточному заполнению углов. По рисунку 40, а также можно отметить некоторое повышение растягивающих напряжений и снижение сжимающих по сравнению с исходным процессом. Это

объяснимо более равномерным подпором текущего металла, создаваемым облойным мостиком.

Исключение двух операций осадки приводит к ещё большей устойчивости заготовки. Картина напряжённого состояния и заполняемости штампа при этом значительно не меняются (рисунок 41), но повышается стабильность результатов штамповки.

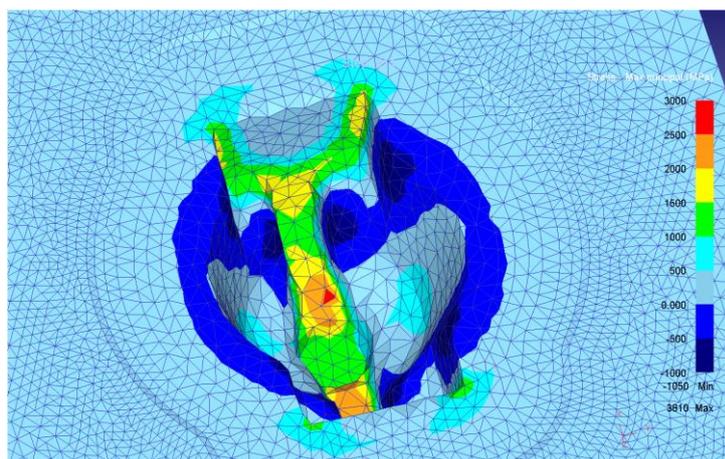


а)

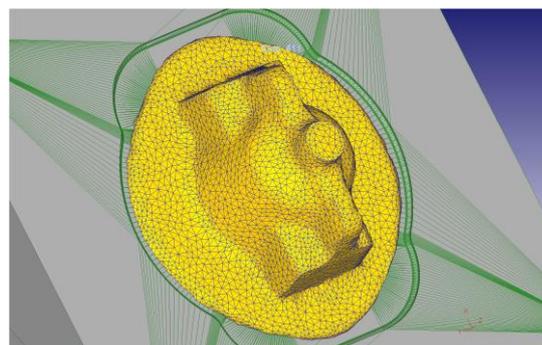


б)

Рисунок 40 – Напряжения в нижнем штампе (а) и заполняемость (б) при $H=170$ мм, B нет, $R=10$ мм

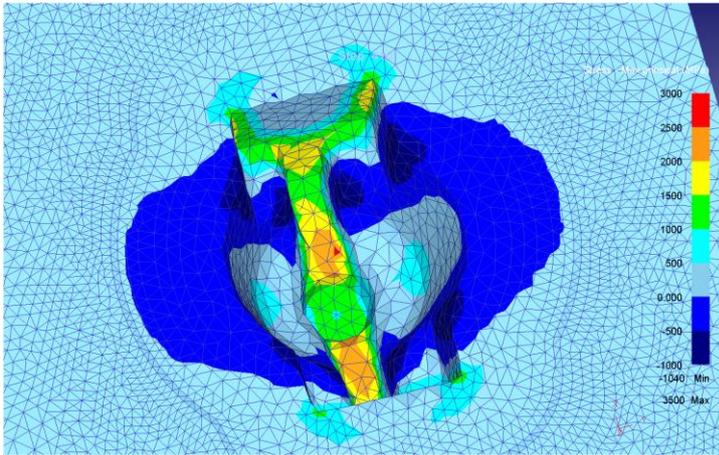


а)

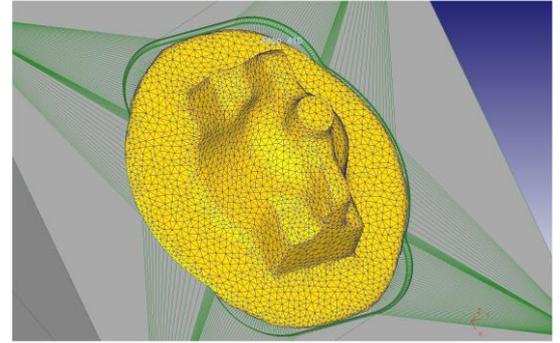


б)

Рисунок 41 – Напряжения в нижнем штампе (а) и заполняемость (б) при $H=199$ мм, B нет, $R=10$ мм

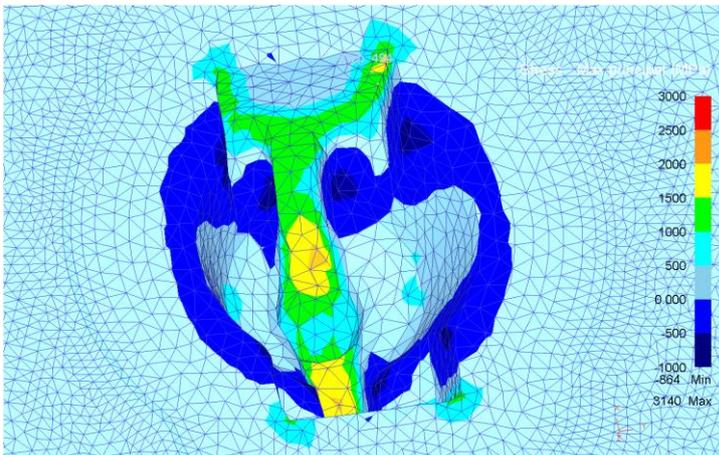


а)

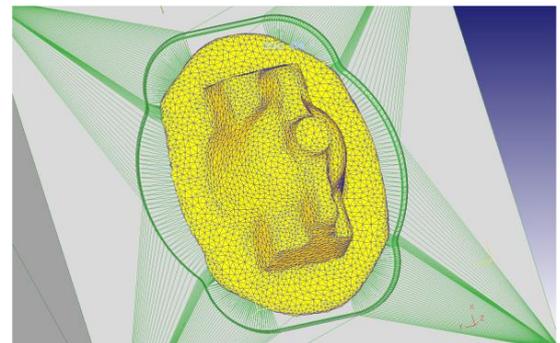


б)

Рисунок 42 – Напряжения в нижнем штампе (а) и заполняемость (б) при $H=199$ мм, B нет, $R=25$ мм



а)



б)

Рисунок 43 – Напряжения в нижнем штампе (а) и заполняемость (б) при $H=170$ мм, $B=80$ мм, $R=10$ мм, заготовка повёрнута на 90°

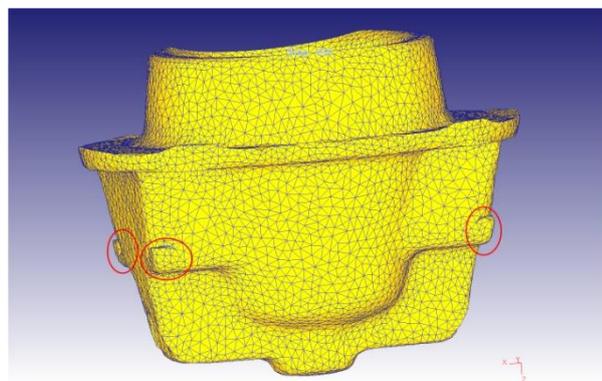


Рисунок 44 – Образование дефектов (зажимов) при штамповке «корпуса»

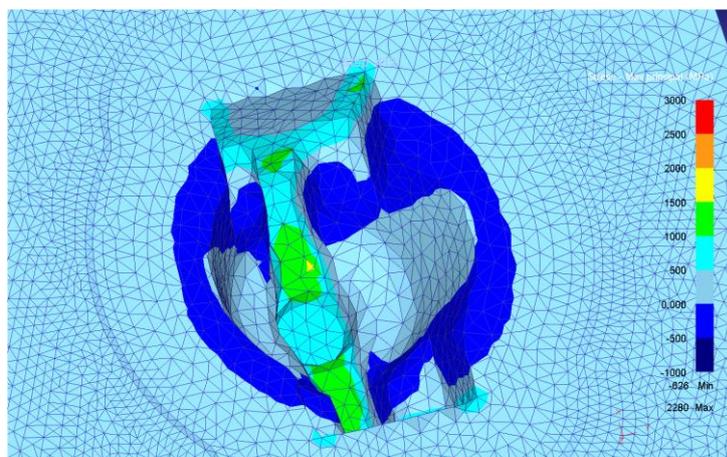
Аналогичная ситуация наблюдается и при увеличении радиуса R на торце заготовки с 10 мм до 25 (рисунок 42). Устойчивость повышается за счёт увеличения пятна контакта, но значения напряжений не меняются. Заметно лишь небольшое снижение максимальных растягивающих напряжений по сравнению с предыдущим вариантом, вызванное, вероятно, уменьшением объёма металла заготовки при введении новых радиусов скругления.

При варианте с повернутой на 90° заготовкой обеспечивается сильное снижение сжимающих напряжений по сравнению с исходным процессом (рисунок 43), а также значительно улучшается заполняемость штампа (на рисунке 42, б хорошо заметна неравномерность течения металла в облой из-за потери устойчивости заготовки). Однако при этом варианте высока вероятность образования дефектов поковки в виде зажимов (рисунок 44).

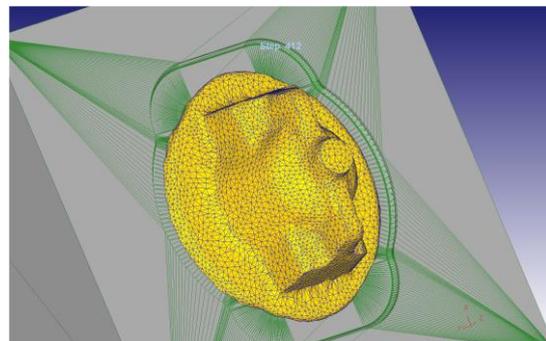
Итак, при оптимизации процесса штамповки «корпуса» за счёт повышения устойчивости заготовки в штампе путём уменьшения эффекта осадок в торец и плашмя и увеличения радиуса скругления R можно добиться лучшего заполнения полости штампа и более равномерного износа и смятия отдельных участков гравюры. Однако, несмотря на положительный эффект, выраженный в уменьшении количества брака, при этом присутствует и отрицательная составляющая в виде повышения давления штампуемого металла в полости штампа и снижении стойкости штамповой оснастки по показателю трещиностойкости.

Компенсировать повышение давления в полости можно за счёт изменения параметров облойного мостика, например его толщины. Увеличение толщины облойного мостика даёт значительное снижение усилий на деформирование тонкого слоя металла облоя. Так как предлагаемые выше меры позволяют добиться более равномерного заполнения полости штампа, одновременное снижение подпора за счёт облоя не должно повлиять на выход брака по заполняемости штампа. Так, например, увеличение толщины мостика на 2 мм при штамповке с исключением операции осадки плашмя (как наиболее влияющей на заполняемость штампа) позволяет добиться снижения в 3 раза максимальных сжимающих и

в 1,5 раз растягивающих напряжений по сравнению с исходным процессом (рисунок 45) при сохранении заполняемости штампа.

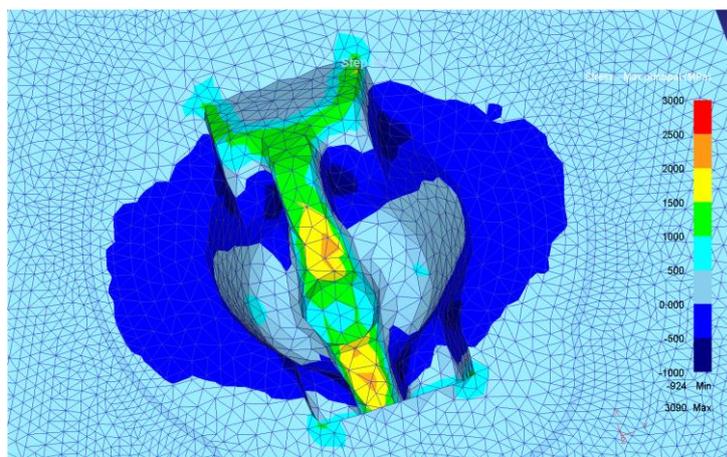


а)

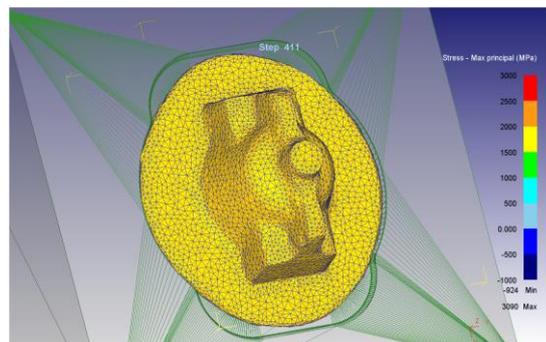


б)

Рисунок 45 – Напряжения в нижнем штампе (а) и заполняемость (б) при $H=170$ мм, B нет, $R=10$ мм, толщине мостика +2 мм



а)



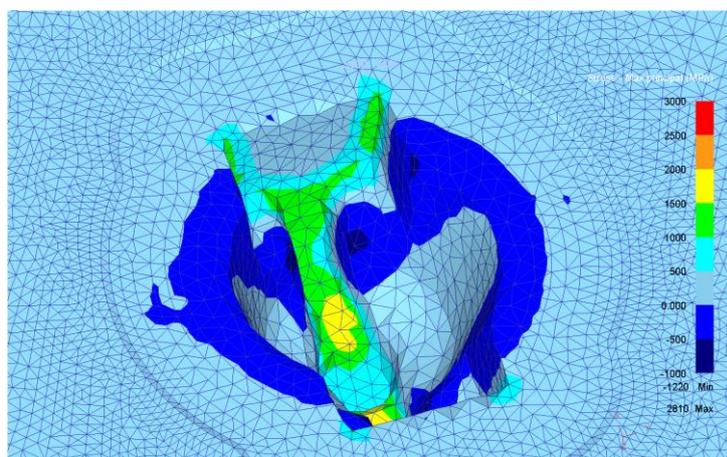
б)

Рисунок 46 – Напряжения в нижнем штампе (а) и заполняемость (б) при $H=199$ мм, B нет, $R=25$ мм, толщине мостика +1 мм

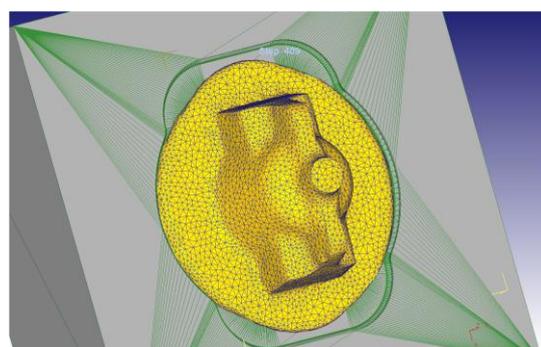
Увеличение толщины мостика на 1 мм в случае исключения двух операций осадки при $R=25$ мм позволяет снизить в 2 раза максимальные сжимающие и в 1,1 раз растягивающие напряжения по сравнению с исходным процессом (рисунок 46). При дальнейшем увеличении толщины мостика (рисунок 47) наблюдается некоторое снижение эффекта в случае сжимающих напряжений при

снижении максимальных растягивающих напряжений в 1,2 раза. При увеличенной на 3 мм толщине мостика (рисунок 48) сжимающие напряжения уменьшаются в 2,5 раза по сравнению с исходным процессом, а растягивающие – в 1,3 раза. При этом облоя остаётся более чем достаточно для заполнения углов полости штампа.

Следует отметить, что при увеличении толщины облоя возрастает технологическая сила при дальнейшей его обрезке, что ведёт к повышенному износу обрезного инструмента.

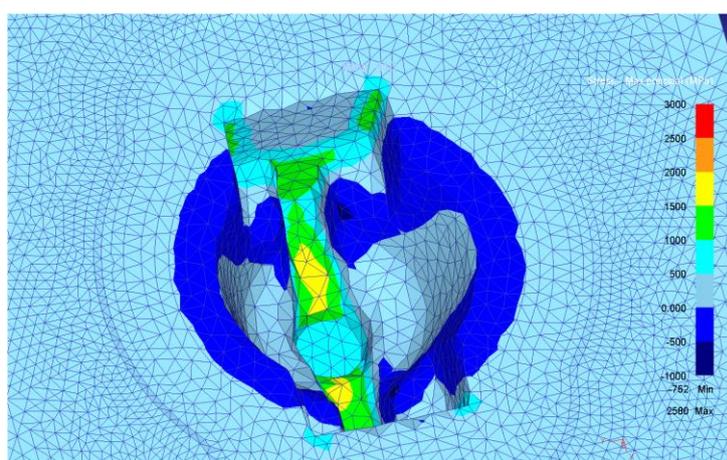


а)

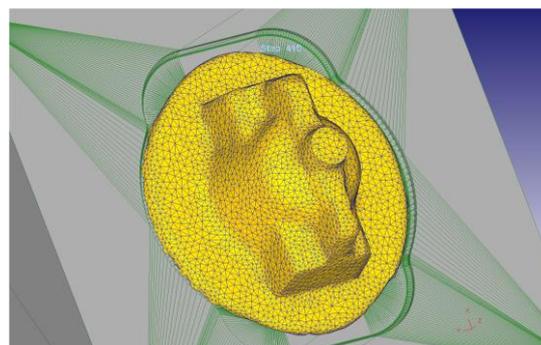


б)

Рисунок 47 – Напряжения в нижнем штампе (а) и заполняемость (б) при Н=199 мм, В нет, R=25 мм, толщине мостика +2 мм



а)



б)

Рисунок 48 – Напряжения в нижнем штампе (а) и заполняемость (б) при Н=199 мм, В нет, R=25 мм, толщине мостика +3 мм

Проведённое исследование позволяет сделать следующие **выводы**. Исследовано влияние конструктивных и технологических параметров горячей объёмной штамповки на качество поковок и стойкость штамповой оснастки на примере технологии изготовления поковки «корпус». Выявлено, что путём оптимизации конструктивных и технологических параметров процесса штамповки можно добиться значительного снижения нагрузок на инструмент и повысить стабильность выхода годной продукции.

ГЛАВА 4 СБОР СВЕДЕНИЙ ОБ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ В МАТЕРИАЛЕ ШТАМПОВ ГОШ

4.1 Оценка возможностей контроля по коэрцитивной силе штампов ГОШ

Рассмотрим возможности метода контроля стойкости по коэрцитивной силе в отношении различных видов предельных состояний штампового инструмента для ГОШ.

Изнашивание гравюры. Абразивная и адгезионная износостойкость мартенситных сталей в значительной степени зависит от содержания углерода в α -растворе, которое в свою очередь влияет на уровень коэрцитивной силы. Поэтому представляется возможным установление корреляционных зависимостей между износостойкостью стали и коэрцитивной силой [80]. По известной величине износостойкости, скорости течения металла заготовки и времени его контакта со штампом, можно определить приблизительное число ударов до предельного износа элементов гравюры. Характеристики течения материала заготовки с успехом моделируются при помощи расчёта процесса штамповки методом конечных элементов. Основную сложность представляет собой получение экспериментальных данных об износостойкости используемой стали в горячем состоянии, так как требует значительных затрат ресурсов и специального оборудования.

Механические трещины. Как известно, механизм образования трещин связан с накоплением дефектов кристаллической решётки, их объединением и выходом их на поверхность. Известно, что при усталостном нагружении деталей в холодном состоянии происходит постепенное увеличение числа дислокаций в материале, сопровождающееся ростом коэрцитивной силы, поэтому неразрушающий контроль по критерию образования усталостных трещин в этом случае весьма эффективен. В то же время механизм образования дефектов и изменения коэрцитивной силы при повышенных значениях температуры ещё недостаточно изучен. Поэтому требуется провести исследования характера изменения коэрцитивной силы в материале штампов ГОШ при их эксплуатации.

Также требуется определить величину коэрцитивной силы в материале рабочих деталей штампа в исходном состоянии (перед началом эксплуатации инструмента) и в состояниях, предшествующих разрушению. В литературе приводится недостаточно данных о коэрцитивной силе в инструментальных сталях ГОШ в состоянии поставки и после термообработки, и практически отсутствуют данные о величине коэрцитивной силы в рабочих деталях штампов, выработавших часть своего ресурса или весь свой ресурс.

Разгарные трещины. Как и в случае с усталостными трещинами, контроль по коэрцитивной силе предположительно позволяет фиксировать накопление дефектов кристаллической решётки и рост остаточных напряжений, происходящих из-за термоциклирования поверхностных слоёв гравюры в ходе работы штампа. Однако данная гипотеза требует экспериментального подтверждения.

Деформация участков гравюры штампа. Применение метода коэрцитивной силы к данному критерию разрушения весьма затруднительно главным образом из-за сложности фиксирования изменений формы и размеров гравюры. К тому же деформации могут происходить на значительной глубине от поверхности гравюры, в то время как коэрцитивная сила в большинстве переносных измерительных приборов замеряется на глубине не более 10 мм. Возможно лишь опосредственное применение метода для оценки механических свойств материала штампа как показателей сопротивления деформированию.

4.2 Исследование коэрцитивной силы в материале штампов, частично или полностью выработавших свой ресурс

Для выяснения возможности применения метода контроля по коэрцитивной силе и выявления закономерностей её изменения для материала штампов ГОШ была проведена серия натуральных экспериментов на штамповом инструменте, отработавшем большую часть своего ресурса или вышедшего из строя по различным критериям разрушения. Большая часть исследуемых деталей эксплуатировалась в составе штампов для ГОШ, установленных на кривошипных

горячештамповочных прессах. Кроме того, было рассмотрено несколько рабочих деталей штампов для ГОШ, устанавливавшихся на гидравлических прессах.

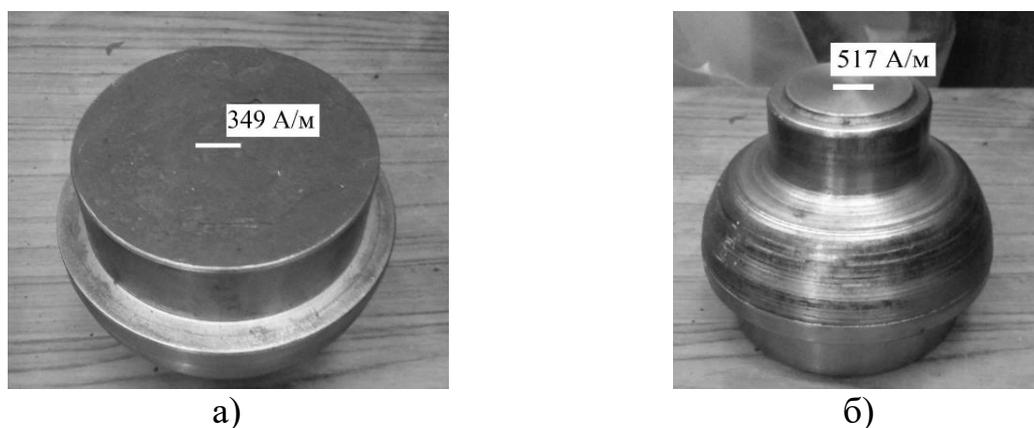
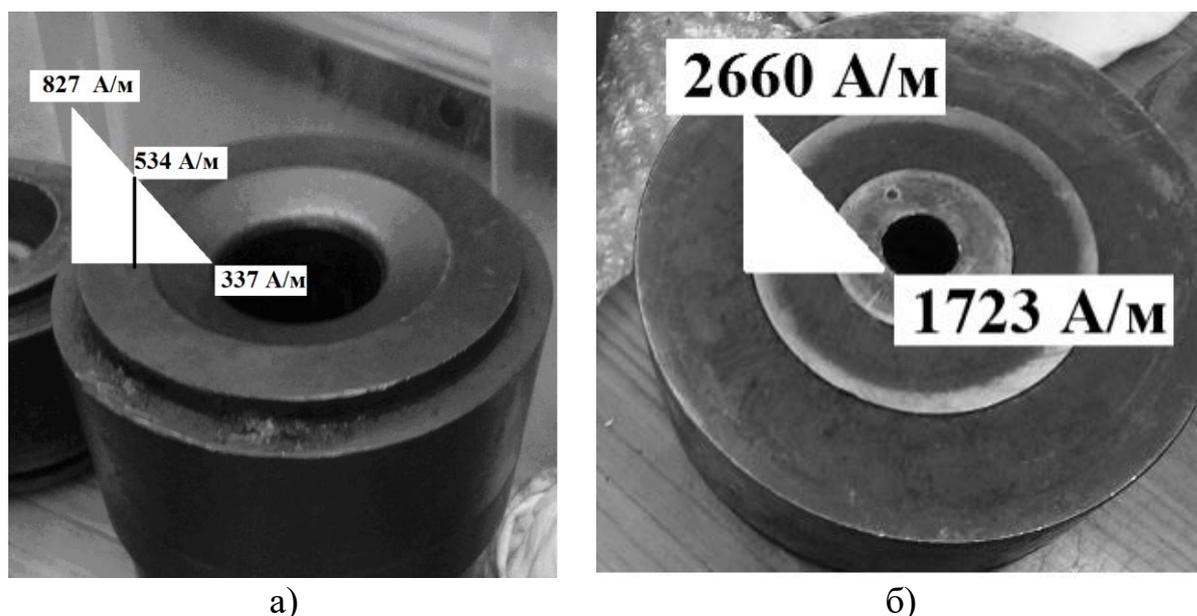


Рисунок 49 – Результаты измерения коэрцитивной силы детали штампа ГОШ:
а – в центре рабочей поверхности (месте воздействия технологической нагрузки);
б – на наиболее удаленном от места приложения нагрузок участке

Величину коэрцитивной силы H_c (А/м) измеряли аттестованным и настроенным на образцах из комплекта СОКС-1 ГСО 2192-89 коэрцитиметром КИМ-2М лаборатории неразрушающего контроля ЗАО «Прочность» (ранее отдел прочности ВНИИМЕТМАШ). Были применены следующие параметры измерения – ток размагничивания 155 мА, 3 импульса намагничивания. Приведены средние значения коэрцитивной силы по результатам трёх замеров в каждой зоне. Исследования проводились при температуре материала деталей, близкой к комнатной.

Для детали штампа, показанной на рисунке 49, отношение величины коэрцитивной силы в наиболее нагруженной зоне по отношению к периферийному участку составило 1,5. Это значение выходит за рамки разброса механических свойств металла и существенно выше допустимой погрешности показаний прибора (по паспорту она составляет $\pm 1,5 \%$). Подобная тенденция сохраняется и для остальных исследованных деталей штампового инструмента для ГОШ и жидкой штамповки (рисунок 50). Анализ экспериментальных данных по замерам коэрцитивной силы как параметра повреждаемости на подвергающихся тепловому

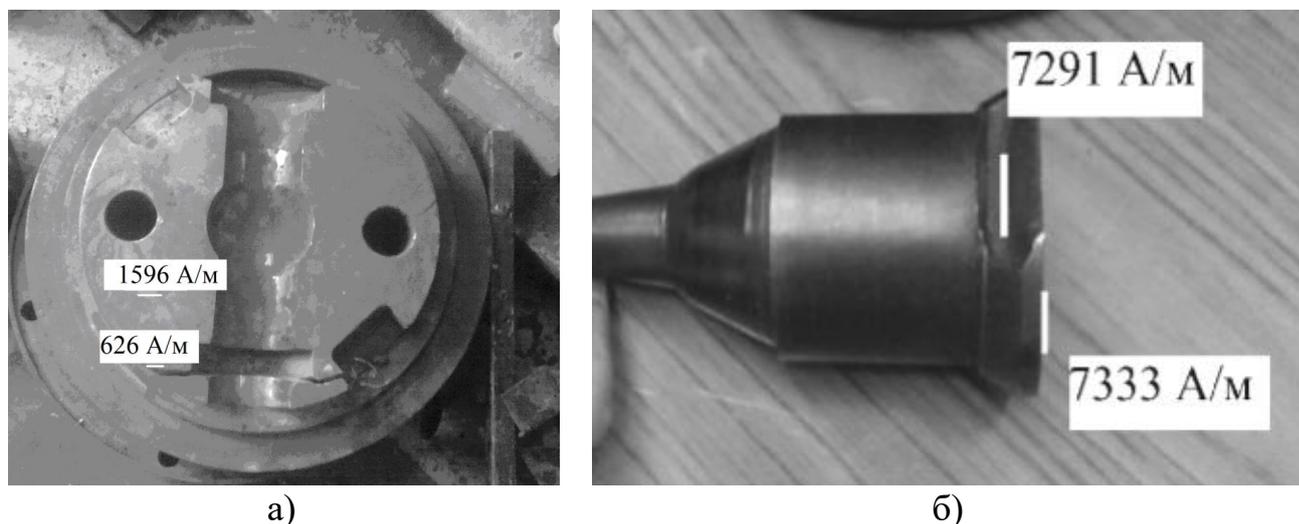
и силовому воздействию поверхностях штампов, изготовленных из различных штамповых сталей и отработавших различное количество циклов на разном технологическом оборудовании, показал одну и ту же качественную картину: коэрцитивная сила падает вблизи места приложения наибольших технологических сил.



а) б)
Рисунок 50 – Экспериментальное распределение коэрцитивной силы на поверхностях рабочих деталей штампов: а – матрицы штампа для высадки (КГШП); б – пуансона штампа для тиксоштамповки корпуса (гидравлический пресс)

На рисунке 51 приведены фотографии и результаты измерений коэрцитивной силы деталей штампов, пришедших в негодность по критерию роста трещин. На рисунке 51, а видно, что вблизи зоны разрушения величина коэрцитивной силы заметно падает по сравнению с зоной, отдалённой от трещиноподобного макродефекта. Отношение величины коэрцитивной силы в зоне штампа без макродефектов к коэрцитивной силе вблизи зоны разрушения составило 2,5. Можно сделать предположение, что в отличие от штампов холодного деформирования в штампах для ГОШ с увеличением циклов нагружения величина коэрцитивной силы в наиболее нагруженных зонах уменьшается, пока не

происходит разрушение материала. На рисунке 51, б показан пуансон, пришедший в предельное состояние практически по хрупкому механизму разрушения после штамповки небольшого количества изделий, поэтому падение величины коэрцитивной силы прослеживается слабо.



а) б)
Рисунок 51 – Результаты измерений коэрцитивной силы рабочих деталей штампов ГОШ, пришедших в предельное состояние по критерию роста трещин: а – вставка штампа (горячештамповочный пресс тройного действия); б – пуансон штампа для обратного выдавливания (гидравлический пресс)

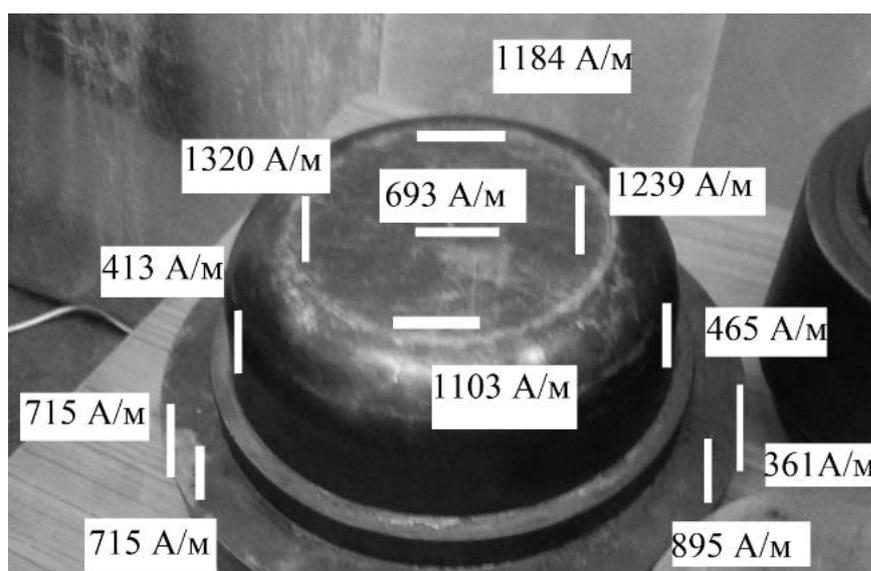


Рисунок 52 – Результаты измерений коэрцитивной силы пуансона штампа для тиксоштамповки чаши (гидравлический пресс)

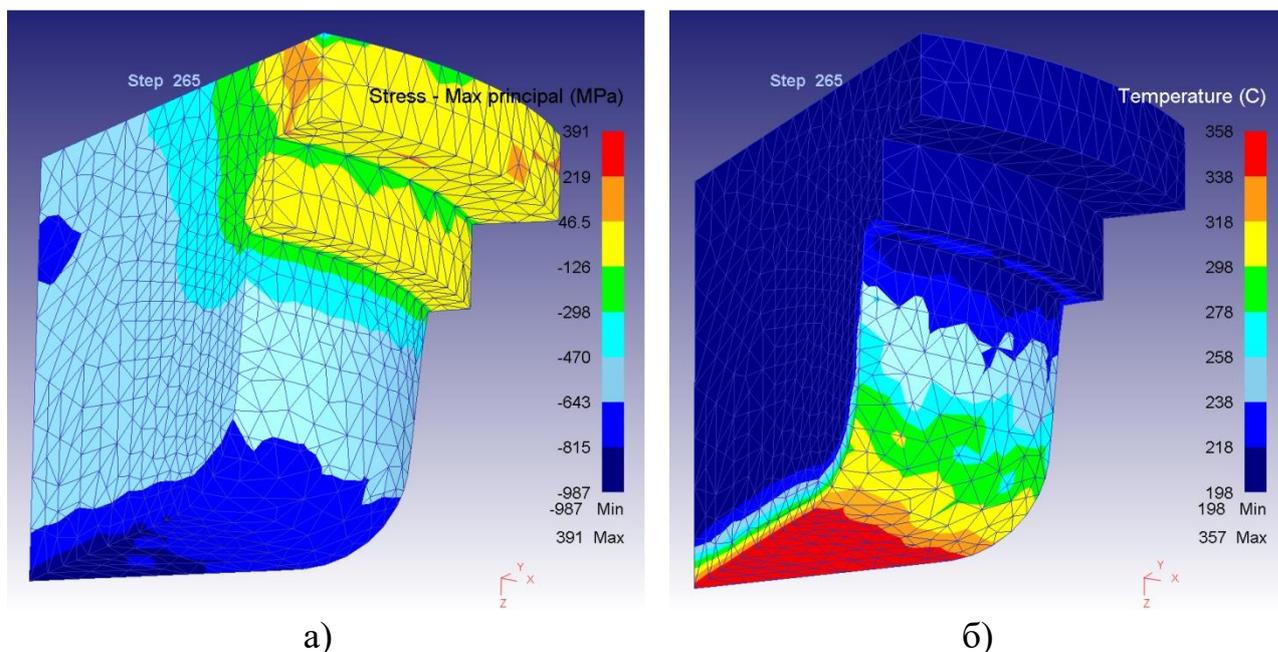


Рисунок 53 – Результаты расчёта напряжений (а) и температуры (б) в конечный момент штамповки на поверхности пуансона в программном комплексе DEFORM-3D

Представленные на рисунках 49-51 детали эксплуатировались на оборудовании с закрытыми станинами. На рисунке 53 показано распределение величины коэрцитивной силы по поверхности пуансона для жидкой штамповки изделия «чаша». Пуансон применялся в штампе, эксплуатировавшемся на гидравлическом прессе с открытой станиной. В данном случае прослеживается неравномерность распределения коэрцитивной силы, предположительно связанная с деформациями станины. Падение коэрцитивной силы в центре пуансона вызвано более сильным механическим и термическим нагружением этой зоны при штамповке (рисунок 53).

Можно установить, что результаты эксперимента подтверждают возможность неразрушающего контроля по величине коэрцитивной силы повреждаемости материала штампов ГОШ. Кроме того, данный эксперимент выявил, что в отличие от холодной листовой штамповки, для штампов ГОШ анизотропия коэрцитивной силы вдоль фронта прессы и в направлении, перпендикулярном ему, практически отсутствует. Это можно объяснить более

жесткими конструкциями станин и исполнительных механизмов оборудования для горячей штамповки, в то время как для ХЛШ используются преимущественно кривошипные прессы с менее жёсткими станинами открытого типа.

Подведём итоги эксперимента по исследованию закономерностей изменения коэрцитивной силы в материале штампов ГОШ:

1. В штампах для ГОШ с увеличением циклов нагружения величина коэрцитивной сила падает. Её падение максимально вблизи зоны приложения наибольших нагрузок. Если в инструменте имеются дефекты технологического характера (включая макродефекты), и эта зона подвергается тепловому воздействию, то именно на эту зону приходится минимальное значение коэрцитивной силы.
2. Полученные зависимости надёжно соблюдались по всей репрезентативной выборке экспериментальных данных. Следовательно, представляется возможным создание методики определения стойкости инструмента для ГОШ с применением магнитного структурно-фазового анализа – нового научного направления на стыке теории прочности, металловедения и методов неразрушающего контроля и диагностики.
3. Для дальнейшей разработки метода требуется нормировать величину коэрцитивной силы штамповых сталей в начале эксплуатации инструмента и в состояниях, предшествующих его выходу из строя, а также установить влияние на характер изменения коэрцитивной силы внешних факторов, действующих на инструмент при его изготовлении и эксплуатации.

4.3 Определение коэрцитивной силы инструментальных сталей для ГОШ в неповреждённом состоянии

Для определения предположительной величины коэрцитивной силы H_{Co} в инструментальных сталях для ГОШ в неповреждённом состоянии была поставлена задача разработать математическую модель на основе взаимосвязи известных значений коэрцитивной силы и структурного состояния стали.

Таблица 9 – Исходная выборка инструментальных сталей ГОШ

№	Марка материала	H_{C0} , А/м	ΔH_{C0} , %	$T_{зак.}$, °С	$T_{омн.}$, °С	Химический состав						
						Ni, %	Mo, %	Cr, %	Si, %	C, %	Mn, %	Nb, %
1	4X2B5MФ	2320* 2004 ¹⁾	13,6	1080	550	0,20	0,75	2,60	0,25	0,35	0,28	0,00
2	4X2HMФ	2100* 1842 ¹⁾	12,3	910	530	0,95	0,50	2,25	0,27	0,39	0,65	0,00
3	4X5B2ФC	1720* 2172 ¹⁾	26,3	1030	540	0,20	0,10	5,00	1,00	0,40	0,30	0,00
4	4X5MФC	3700* 2380 ¹⁾	35,7	1000	500	0,20	1,35	5,00	1,05	0,36	0,35	0,00
5	5XHB	2730* 2043 ¹⁾	25,2	840	500	1,60	0,10	0,65	0,25	0,55	0,65	0,00
6	5XHM	1500* 2292 ¹⁾	52,8	850	450	1,60	0,23	0,65	0,25	0,55	0,65	0,00
7	7X3	2039* 2032 ¹⁾	0,3	850	500	0,20	0,10	3,50	0,25	0,70	0,30	0,00
8	8X3	3200* 2452 ¹⁾	23,4	870	450	0,20	0,10	3,50	0,25	0,80	0,30	0,00

Прим.: * – известные значения; ¹⁾ – расчёт по методу Богачевой Н.Д. [56,66]; ΔH_{C0} – относительная погрешность расчёта.

В качестве параметров разрабатываемой модели было принято решение использовать такие характеристики структурного состояния материала, как химический состав и параметры термической обработки. Модель составлялась при помощи метода Брандона [135-137] по представленной в таблице 9 выборке сталей с известной из литературных источников и по результатам предварительных экспериментов коэрцитивной силой. Модель приводилась к формуле вида:

$$H_{C0} = a_0 \cdot F(T_{зак.нр.}) \cdot F(T_{омн.нр.}) \cdot F(Ni) \cdot F(Mo) \cdot F(W) \cdot F(Cr) \cdot F(Si) \cdot F(V) \cdot F(Mn) \cdot F(C),$$

где a_0 – коэффициент; $F(T_{зак.нр.})$, $F(T_{омн.нр.})$, $F(Ni)$, $F(Mo)$, $F(W)$, $F(Cr)$, $F(Si)$, $F(V)$, $F(Mn)$, $F(C)$ – функции, описывающие влияние на величину коэрцитивной силы приведённой температуры закаливания $T_{зак.нр.} = T_{зак.}/100$, приведённой температуры отпуска $T_{омн.нр.} = T_{омн.}/100$ и процентного содержания соответствующего легирующего элемента в стали. Химический состав сталей определялся как среднее по разбросу допускаемых значений содержания элемента по ГОСТ 5950 [58,59].

В отличие от метода определения коэрцитивной силы в конструкционных сталях, предложенной Н.Д. Богачевой [56,66], полученные модели разрабатывались исключительно для инструментальных сталей ГОШ. Для сравнения результаты расчёта коэрцитивной силы по методу Н.Д. Богачёвой в исследованных сталях ГОШ представлены в таблице 9. При расчёте по формулам (1.13) и (1.14) использовались коэффициенты k_i и a_i , приведённые автором в работе [66].

Ниже приведены два варианта разработанной модели. В первом случае для аппроксимации использовались линейные функции. Данный вариант модели описывается формулой:

$$\begin{aligned}
 H_{C01} = & (0,0013 \cdot T_{\text{зак.нр.}} + 0,9882) \times (0,0154 \cdot T_{\text{отн.нр.}} + 0,9228) \times \\
 & \times (-0,0556 \cdot Ni + 1,0358) \times (915,09 \cdot Mo + 2044,2) \times (-0,0005 \cdot W + 1,0005) \times \\
 & \times (-0,0037 \cdot Cr + 1,0106) \times (0,1805 \cdot Si + 0,9208) \times (-0,0864 \cdot V + 1,026) \times \\
 & \times (-0,0042 \cdot Mn + 1,0014) \times (0,9048 \cdot C + 0,5387).
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Данный вариант модели является универсальным для всех инструментальных сталей ГОШ. Несмотря на то, что первый вариант разработанной модели адекватен по критерию Фишера (см. таблицу 11), точность определения по ней величины коэрцитивной силы недостаточно высока (коэффициент детерминации $R^2=0,546$). Поэтому был предложен второй вариант модели, аппроксимирующий исходные данные с повышенной точностью:

$$\begin{aligned}
 H_{C02} = & 1,0001 \times (0,0095 \cdot T_{\text{зак.нр.}}^3 - 0,2836 \cdot T_{\text{зак.нр.}}^2 + 2,7995 \cdot T_{\text{зак.нр.}} - 8,1616) \times \\
 & \times (-0,7061 \cdot T_{\text{отн.нр.}}^2 + 7,1348 \cdot T_{\text{отн.нр.}} - 16,932) \times (-0,0684 \cdot Ni^2 + 0,1252 \cdot Ni + 0,9727) \times \\
 & \times (2273,6 \cdot Mo^2 - 2154,1 \cdot Mo + 2508,1) \times (-0,0094 \cdot W^2 + 0,0493 \cdot W + 0,9855) \times \\
 & \times (-0,0278 \cdot Cr^2 + 0,125 \cdot Cr + 0,9404) \times (-0,027 \cdot Si + 1,0121) \times \\
 & \times (-0,4874 \cdot V^2 + 0,3671 \cdot V + 0,9712) \times (0,009 \cdot Mn + 1,0211) \times \\
 & \times (288,57 \cdot C^4 - 646,82 \cdot C^3 + 534,38 \cdot C^2 - 192,58 \cdot C + 26,414).
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Второй вариант модели позволяет с достаточной точностью ($R^2=0,914$) определить коэрцитивную силу в неповреждённых температурной и технологической нагрузкой термообработанных сталях, химический состав и термообработка которых соответствуют следующим условиям:

$T_{зак.}=(840\div 1080)^{\circ}\text{C}$; $T_{омн.}=(450\div 550)^{\circ}\text{C}$; $Ni=(0,2\div 1,6)\%$; $Mo=(0,1\div 1,35)\%$; $W=(0\div 5)\%$; $Cr=(0,65\div 5)\%$; $Si=(0,25\div 1,05)\%$; $V=(0,08\div 0,75)\%$; $C=(0,35\div 0,8)\%$; $Mn=(0,28\div 0,65)\%$.

В иных случаях для определения коэрцитивной силы рекомендуется использовать первый вариант модели.

Разработанные модели использовались для расчёта коэрцитивной силы в неповреждённом металле некоторых инструментальных сталей ГОШ. Характеристики данных сталей и результаты расчёта приведены в таблице 10.

Также были получены статистические модели на основе эквивалентов Шеффлера и углеродного эквивалента. Так как эквиваленты Шеффлера [55,56] используются для определения фазового состава сталей, можно выявить зависимость между ними и такой магнитной характеристикой металла, как коэрцитивная сила. По алгоритму Брандона для сталей, представленных в таблице 9, была составлена следующая статистическая модель:

$$H_{C03} = 1,01265 \times (0,0132 \cdot m_{Cr}^3 - 0,1481 \cdot m_{Cr}^2 + 0,4244 \cdot m_{Cr} + 0,7092) \times \\ \times (0,7994 \cdot m_{Ni}^4 - 56,308 \cdot m_{Ni}^3 + 1472,2 \cdot m_{Ni}^2 - 16909 \cdot m_{Ni} + 73941) \times \\ \times (-0,0714 \cdot T_{зак.нр.} + 1,6664) \times (0,2584 \cdot T_{омн.нр.}^{0,8312}), \quad (4.3)$$

где m_{Cr} и m_{Ni} – хромовый и никелевый эквиваленты Шеффлера по формулам (1.9) и (1.10). Данная модель обладает достаточной точностью ($R^2=0,735$) для сталей, свойства которых лежат в пределах:

$m_{Cr}=(1,1\div 7,9)\%$; $m_{Ni}=(10,8\div 24,4)\%$; $T_{зак.}=(840\div 1080)^{\circ}\text{C}$; $T_{омн.}=(450\div 550)^{\circ}\text{C}$.

Кроме того, была разработана модель расчёта начальной величины коэрцитивной силы по углеродному эквиваленту $C_{эkv}$ (%). Углеродный эквивалент может служить для определения трещиностойкости стали. Для расчёта углеродного эквивалента принимаем формулу из ГОСТ 7524-89 [138]:

$$C_{эkv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{40} + \frac{V}{14},$$

где C , Mn , Si , Cr , Ni , Cu , V – содержание соответствующего легирующего элемента в процентах.

Таблица 10 – Коэрцитивная сила инструментальных сталей ГОШ в неповреждённом состоянии

№	Марка материала	H_{C0} , А/м	$T_{зак.}$, °С	$T_{омн.}$, °С	Химический состав							
					Ni , %	Mo , %	W , %	Cr , %	Si , %	V , %	C , %	Mn , %
1	3X2B8Ф	1975 ¹⁾	1130	650	0,18	0,25	8,00	2,45	0,28	0,35	0,35	0,28
2	3X3M3Ф	3693 ¹⁾	1040	600	0,20	2,75	0,10	3,15	0,25	0,50	0,31	0,35
3	4X2B2MФC	2808 ¹⁾	1080	630	0,18	0,95	2,10	2,75	0,45	0,75	0,46	0,45
4	4X2B5MФ	2320* 2242 ¹⁾ 2270 ²⁾	1080	550	0,20	0,75	5,00	2,60	0,25	0,75	0,35	0,28
5	4X2HMФ	2100* 2161 ¹⁾ 2141 ²⁾	910	530	0,95	0,50	0,00	2,25	0,27	0,18	0,39	0,65
6	4X3BMФ	2465 ¹⁾	1060	570	0,20	0,50	0,80	3,15	0,75	0,75	0,44	0,45
7	4X4BMФC	3196 ¹⁾	1070	680	0,30	1,35	1,00	3,60	0,80	0,75	0,41	0,35
8	4X5B2ФC	1720* 2085 ¹⁾ 1747 ²⁾	1030	540	0,20	0,10	1,90	5,00	1,00	0,75	0,40	0,30
9	4X5MФ1C	3159 ¹⁾	1020	580	0,20	1,35	0,10	5,00	1,05	0,95	0,39	0,35
10	4X5MФC	3700* 3177 ¹⁾ 3603 ²⁾	1000	500	0,20	1,35	0,10	5,00	1,05	0,40	0,36	0,35
11	4XMHФC	2258 ²⁾	930	520	1,40	0,75	0,10	1,40	0,85	0,43	0,40	0,30
12	4XMФC	2481 ²⁾	950	550	0,20	1,05	0,10	1,65	0,65	0,40	0,41	0,65
13	5X2MHФ	2437 ²⁾	980	550	1,40	0,95	0,10	1,75	0,25	0,40	0,50	0,55
14	5X3B3MФC	2714 ¹⁾	1140	550	0,20	0,95	3,30	2,85	0,65	1,65	0,49	0,35
15	5XГМ	2427 ¹⁾	850	450	0,18	0,23	0,10	0,75	0,43	0,08	0,55	1,40
16	5XHB	2730* 2075 ¹⁾ 2411 ²⁾	840	500	1,60	0,10	0,55	0,65	0,25	0,08	0,55	0,65
17	5XHBС	2599 ²⁾	860	500	1,00	0,10	0,55	1,45	0,75	0,08	0,55	0,45
18	5XHM	1500* 2175 ¹⁾ 1759 ²⁾	850	450	1,60	0,23	0,10	0,65	0,25	0,08	0,55	0,65
19	7X3	2039* 2518 ¹⁾ 2281 ²⁾	850	500	0,20	0,10	0,10	3,50	0,25	0,08	0,70	0,30
20	8X3	3200* 2692 ¹⁾ 2891 ²⁾	870	450	0,20	0,10	0,10	3,50	0,25	0,08	0,80	0,30

Примечания: * – известные значения; ¹⁾ – расчёт по формуле (4.1); ²⁾ – расчёт по формуле (4.2).

Для сталей, представленных в таблице 9, получаем следующую статистическую модель:

$$\begin{aligned}
 H_{C04} = & 0,99995 \times (0,179 \cdot C_{\text{экг}} + 0,7792) \times \\
 & \times (-0,0605 \cdot T_{\text{зак.нр.}}^2 + 1,2661 \cdot T_{\text{зак.нр.}} - 5,4907) \times \\
 & \times (-2324,2 \cdot T_{\text{омн.нр.}}^2 + 22748 \cdot T_{\text{омн.нр.}} - 52917).
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Данная модель справедлива для сталей со следующими свойствами: $C_{\text{экг}}=(0,85 \div 1,57)$; $T_{\text{зак.}}=(840 \div 1080)^\circ\text{C}$; $T_{\text{омн.}}=(450 \div 550)^\circ\text{C}$.

Несмотря на то, что полученная модель расчёта по углеродному эквиваленту проходит проверку адекватности по Фишеру, точность определения по ней коэрцитивной силы недостаточно высока ($R^2=0,356$). Поэтому можно установить, что влияние углеродного эквивалента на величину коэрцитивной силы прослеживается не столь явно.

В таблице 11 приведены точностные характеристики полученных моделей. Средняя относительная ошибка δ [138], максимальная относительная ошибка δ_{max} [138], средняя квадратичная ошибка S [138], коэффициент несоответствия Тейла ν [138], коэффициент детерминации R^2 [140] и расчётное значение критерия Фишера F [141] определялись по формулам:

$$\begin{aligned}
 \delta = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \left| \frac{H_{C0} - H_{C0m}}{H_{C0m}} \right|, \quad \delta_{\text{max}} = \max \left| \frac{H_{C0} - H_{C0m}}{H_{C0m}} \right|, \quad S = \frac{1}{8} \sqrt{\sum_{i=1}^8 \left(\frac{H_{C0} - H_{C0m}}{H_{C0m}} \right)^2}, \\
 \nu = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^8 (H_{C0} - H_{C0m})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^8 H_{C0}^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^8 H_{C0m}^2}}, \quad R^2 = \frac{1 - \sum_{i=1}^8 (H_{C0} - H_{C0m})^2}{\sum_{i=1}^8 (H_{C0} - \bar{H}_{C0})}, \quad F = \frac{R^2}{1 - R^2} (n - 2),
 \end{aligned}$$

где H_{C0} – известное значение коэрцитивной силы по таблице 9; H_{C0m} – значение коэрцитивной силы, полученное по модели; \bar{H}_{C0} – среднее значение по известной коэрцитивной силе из таблицы 9; $n=2 \times 8=16$ – общее число опытов. Критическое значение критерия Фишера указано для доверительной вероятности $p=0,99$ при степенях свободы $f_1=7$ и $f_2=8$.

Таблица 11 - Точностные характеристики разработанных моделей

Модель	Средняя относительная ошибка δ	Максимальная относительная ошибка δ_{max}	Средняя квадратичная ошибка S	Коэффициент несоответствия Тейла ν	Коэффициент детерминации R^2	Расчётное/ критическое значение критерия Фишера $F / F_{крит.}$
(4.1)	0,176	0,316	0,072	0,096	0,546	16,8 / 6,2
(4.2)	0,072	0,147	0,032	0,041	0,914	149,4 / 6,2
(4.3)	0,126	0,291	0,054	0,073	0,735	38,8 / 6,2
(4.4)	0,218	0,340	0,082	0,114	0,356	7,7 / 6,2

4.4 Исследование изменений коэрцитивной силы при эксплуатации штампового инструмента

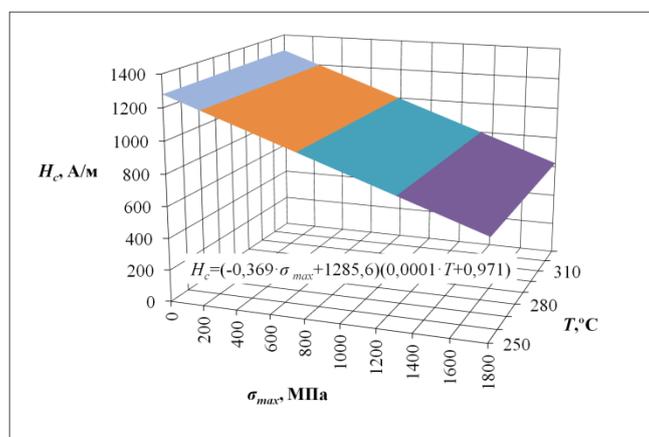
Были проведены исследования закономерностей изменения коэрцитивной силы материала молотовых штампов ГОШ из сталей 5ХНВ и 5ХНМ для поковок различной конфигурации в условиях производства. Замеры проводились по возможности на всех этапах изготовления и эксплуатации инструмента при помощи аттестованного коэрцитиметра КИМ-2М, настроенного по комплекту СОКС-1 ГСО 2192-89. Температура материала штампов при проведении замеров близка к комнатной, за исключением оговоренных случаев. Замеры в каждой точке по возможности производились по двум перпендикулярным направлениям, далее производился расчёт среднего значения в точке. Также в тех же точках по возможности измерялась твёрдость при помощи портативного твердомера ТЭМП-4.

Параллельно вёлся расчёт процесса штамповки в программном комплексе DEFORM-3D по установленной для исследуемых штампов производственной технологии с учётом особенностей применяемого оборудования. Моделирование штампового инструмента и исходных заготовок выполнялось в программных комплексах SolidWorks и КОМПАС-3D. В ходе расчёта были получены распределения напряжений и температуры в штамповом инструменте в характерные моменты штамповки.

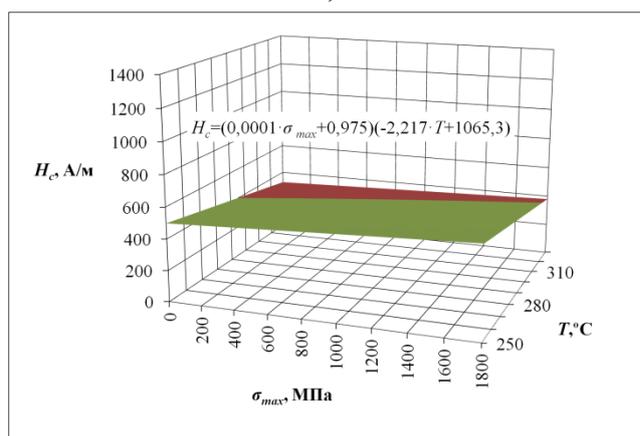
Далее были составлены выборки измеренных значений коэрцитивной силы и расчётных значений максимальных нормальных напряжений и температуры в соответствующих точках гравюры для каждого исследуемого состояния штампа. Использовались значения напряжений и температуры для конечного шага расчёта последнего удара при штамповке/калибровке. Для состояний штампов до проведения операций штамповки/калибровки (на этапе мехобработки, термообработки) использовались значения напряжений и температуры, характерные для тех же точек гравюры при последующей операции (штамповка или калибровка).



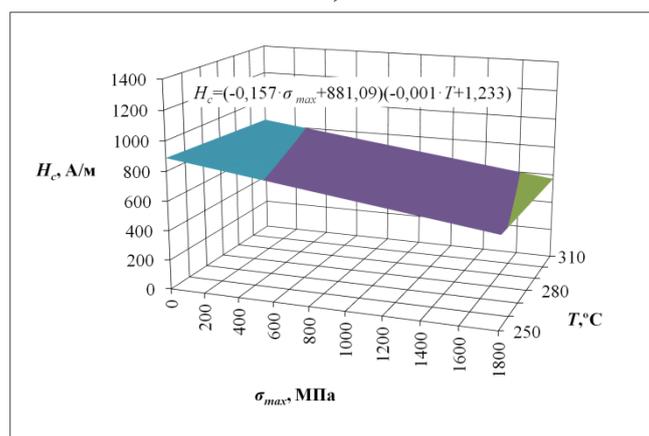
а)



б)



в)



г)

Рисунок 54 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для верхнего штампа поковки «вилка» (а) в состоянии: б – до эксплуатации, в – после штамповки 1530 поковок и переточки гравюры; г – после штамповки 1963 поковок; материал штампа – сталь 5ХНВ

Такое решение позволяет получить наглядные распределения коэрцитивной силы по поверхности штампа и проследить её изменения в зависимости от загруженности участков гравюры при совершении штамповочных операций.

Далее по методу Брандона [135-137] была проведена аппроксимация значений коэрцитивной силы по модулям напряжений и температуре с использованием линейных функций. Полученные уравнения поверхностей позволяют наглядно оценить уровень коэрцитивной силы в зависимости от нагруженности и нагрева штампа.

Такое решение позволяет получить наглядные распределения коэрцитивной силы по поверхности штампа и проследить её изменения в зависимости от загруженности участков гравюры при совершении штамповочных операций.

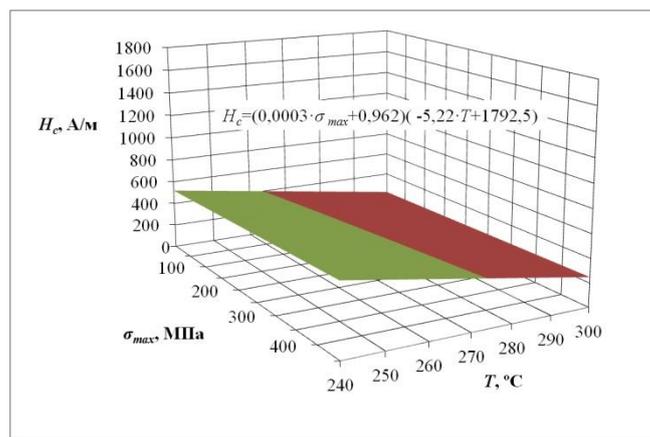
Далее по методу Брандона [135-137] была проведена аппроксимация значений коэрцитивной силы по модулям напряжений и температуре с использованием линейных функций. Полученные уравнения поверхностей позволяют наглядно оценить уровень коэрцитивной силы в зависимости от нагруженности и нагрева штампа.

Влияние термообработки. На рисунке 54, *б* и *в* представлены полученные расчётные зависимости коэрцитивной силы в верхнем штампе для поковки «вилка» (приложение В, штамп 1.2, замеры 1 и 2). Замеры производились для штампа в закалённом состоянии до эксплуатации и в разупрочнённом состоянии после эксплуатации и переточки гравюры. Отмечается снижение коэрцитивной силы в 2-3 раза между замерами, при этом коэрцитивная сила после обработки распределена однороднее по всем точкам гравюры. На рисунке 54, *г* приведён график для данного штампа после закалки и штамповки 1963 поковок, на котором заметно значительное повышение уровня коэрцитивной силы.

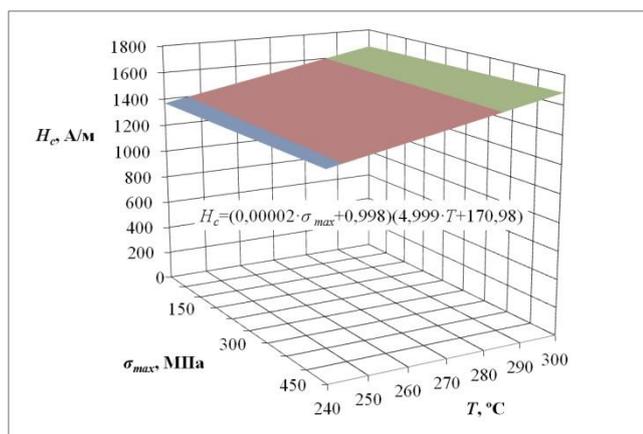
На рисунке 55 приведены графики для нижнего штампа поковки «бугель» в состояниях до и после закалки с отпуском и небольшой эксплуатацией (приложение В, штамп 3.1, замеры 1 и 3). Между замерами произошёл рост коэрцитивной силы в 3-4 раза.



а)



б)



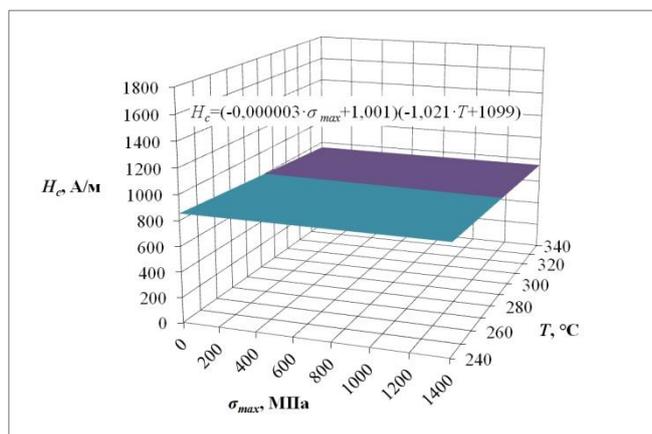
в)

Рисунок 55 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «бугель» (а) в состоянии: б – до закалки, в – после закалки с отпуском и калибровки 90 поковок; материал штампа – сталь 5ХНМ

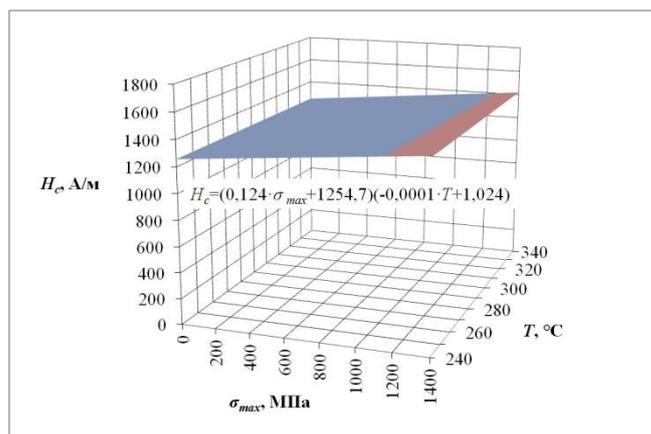
При отжиге стали происходит рост зёрен, сопровождающийся уменьшением суммарной длины межзёренных границ, которые препятствуют смещению доменных границ и соответственно намагничиванию материала, вследствие чего снижается значение коэрцитивной силы. Закалка, напротив, сопровождается увеличением длины межзёренных границ из-за образования мелкодисперсной структуры с выделением свободного углерода и карбидов, что приводит к возрастанию коэрцитивной силы. Такое свойство коэрцитивной силы изменяться в ходе термообработки используется в промышленности для контроля качества термообработки и определения твёрдости сталей.

Влияние механической обработки. На рисунке 56 приведены расчётные графики распределения коэрцитивной силы в штампе для поковки «корпус»

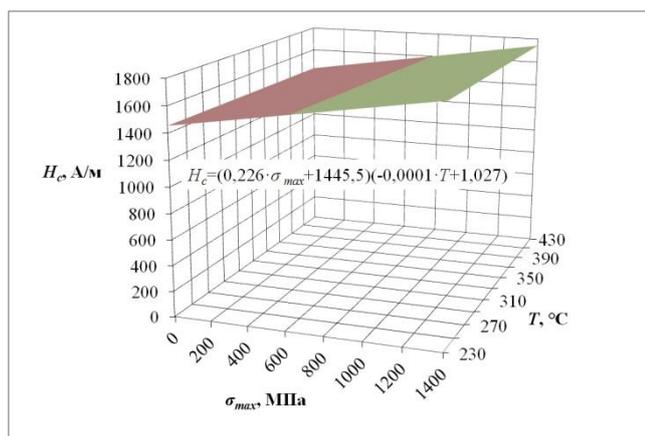
(рисунок 24, а) на различных этапах его изготовления (приложение В, штамп 2.4, замеры 1-3). Первый замер коэрцитивной силы осуществлялся в закалённом и отпущенном штампе, покрытом коркой твёрдых окислов. Из-за окислов, препятствующих намагничиванию, уровень замеренной коэрцитивной силы низок для данной стали. Следующий замер проводился после черновой обработки штампа, когда большая часть окислов была удалена. Отмечается повышение общего уровня коэрцитивной силы, особенно в зонах штампа, испытывающих при дальнейшей эксплуатации наибольшие нагрузки. В третьем замере, когда штамп отшлифован и полностью готов к работе, продолжается общий рост коэрцитивной силы с преобладанием в нагруженных областях.



а)



б)



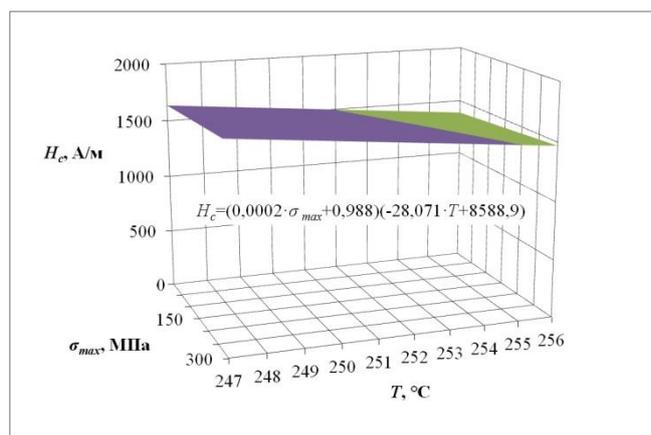
в)

Рисунок 5б – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «корпус» в состоянии: а – после термообработки, б – после черновой мехобработки, в – после чистовой мехобработки; материал штампа – сталь 5ХНМ

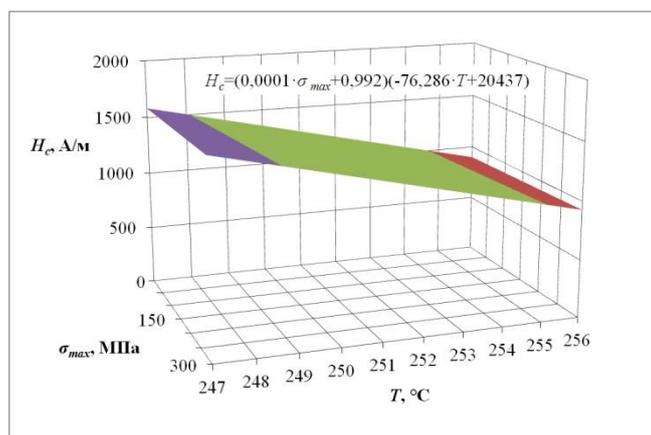
Так как нагруженные области штампа подвергаются более интенсивной обработке для получения заданной технологической документацией точности и качества поверхности, можно сделать вывод, что данная обработка заметно повлияла на величину коэрцитивной силы из-за накопления микрповреждений в поверхностном слое материала.

Влияние калибровки. При калибровке поковок, в отличие от штамповки, теплообмен между поковкой и штампом минимален. В то же время давление деформируемого при калибровке материала оказывается на большую площадь гравюры, что ведёт к значительным напряжениям в материале штампа.

На рисунке 57 и рисунке 58 показаны расчётные зависимости коэрцитивной силы для верхнего (приложение В, штамп 2.1, замеры 1 и 2) и нижнего (приложение В, штамп 2.3, замеры 2 и 3) штампов поковки «корпус» в состояниях до и после калибровки 307 поковок, штампы работали совместно. На рисунке 55, в и рисунке 59 приведены графики коэрцитивной силы для штампа поковки «бугель» в состояниях соответственно до и после калибровки 718 поковок, а также после калибровки дополнительно 300 поковок (приложение В, штамп 3.1, замеры 3-5).

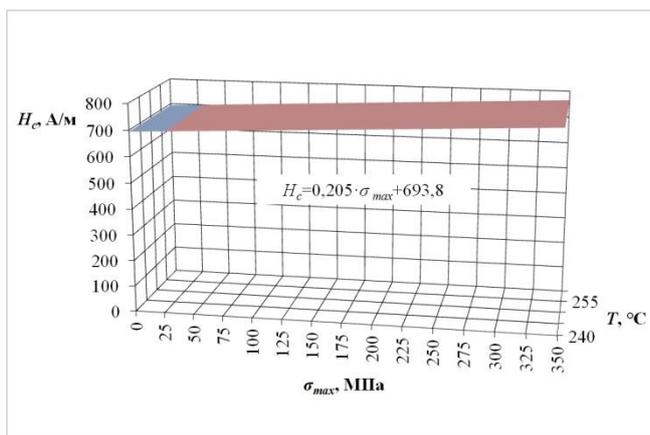


а)

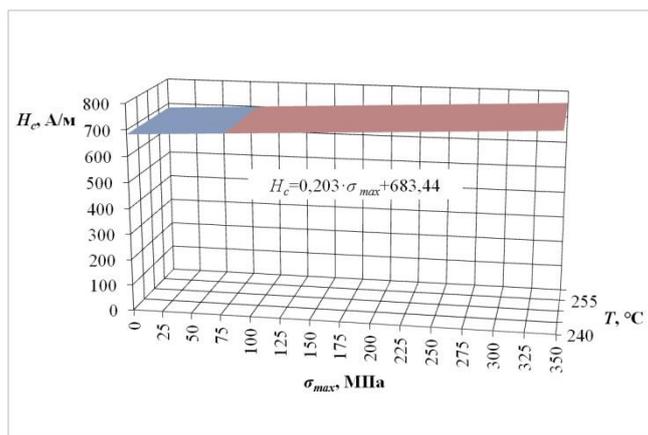


б)

Рисунок 57 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для верхнего штампа поковки «корпус» в состоянии: а – до эксплуатации, б – после калибровки 307 поковок; материал штампа – сталь 5ХНВ

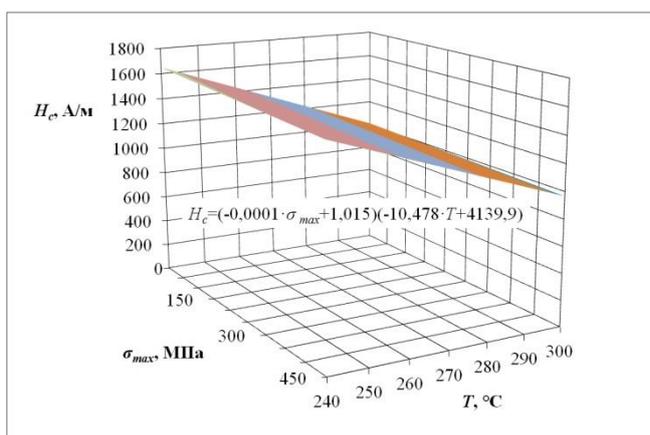


а)

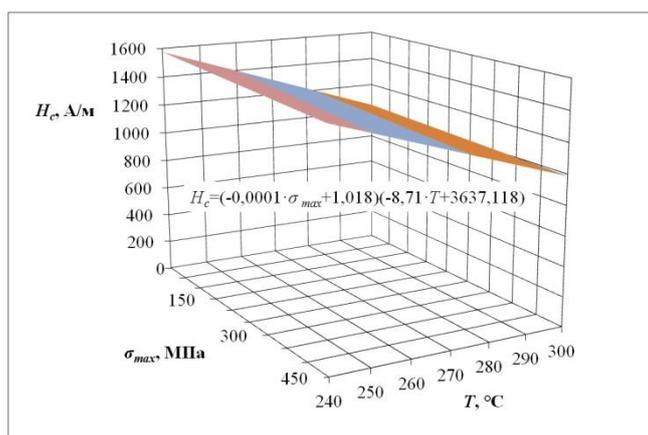


б)

Рисунок 58 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «корпус» в состоянии: а – до эксплуатации, б – после калибровки 307 поковок; материал штампа – сталь 5ХНМ



а)



б)

Рисунок 59 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «бугель» в состоянии: а – после калибровки 718 поковок, б – после калибровки дополнительно 300 поковок; материал штампа – сталь 5ХНМ

Для рассмотренных штампов характерно небольшое общее снижение коэрцитивной силы после калибровки. Наибольшее снижение коэрцитивной силы наблюдается в областях максимальных напряжений и, несмотря на слабый нагрев инструмента при калибровке, в областях максимальных температур. На рисунке 59, а следует отметить некоторое повышение величины коэрцитивной силы в областях гравюры, не подвергшихся нагреву.

Для штампа с рисунка 58 также характерен весьма низкий для стали 5ХНМ уровень коэрцитивной силы в закалённом и отпущенном состоянии. Можно сделать предположение, что на величину коэрцитивной силы повлияла длительная эксплуатация штампового кубика.

Влияние штамповки. При штамповке, в отличие от калибровки, повышается роль теплообмена между заготовкой и инструментом.

На рисунке 60 приведены расчётные зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «вилка» (приложение В, штамп 1.1, замеры 2 и 3). После штамповки партии поковок штамп пришёл в негодность ввиду чрезмерной деформации профиля знака. Отмечается значительное снижение величины коэрцитивной силы в зонах, подверженных нагреву при штамповке, особенно вблизи деформированных участков. Однако, в данном случае не следует исключать вероятность снижения точности замера коэрцитивной силы из-за влияния зазора между полюсами коэрцитиметра и повреждённой деформацией поверхностью штампа.

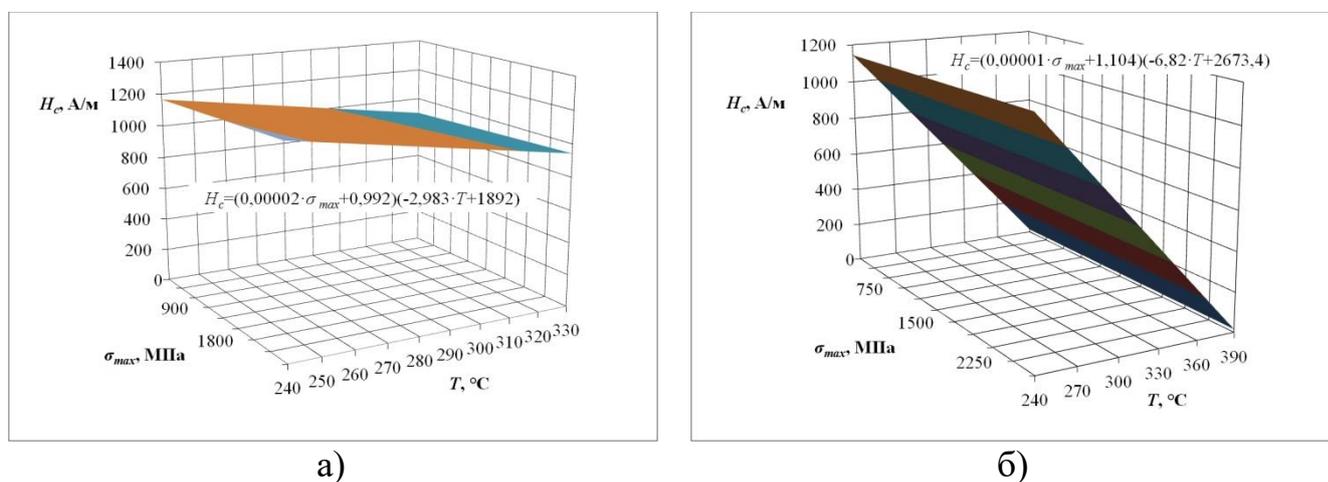


Рисунок 60 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «вилка» в состоянии: а – до эксплуатации, б – после штамповки 1963 поковок; материал штампа – сталь 5ХНВ

На рисунке 61 приведены зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего (приложение В, штамп 1.3, замер 1) и верхнего

(приложение В, штамп 1.4, замер 1) штампов поковки вилка после штамповки 2500 поковок. В случае первого штампа (рисунок 61, а) отмечается сниженное значение величины коэрцитивной силы в зонах, подверженных нагреву. Для второго штампа (рисунок 61, б) отмечается снижение коэрцитивной силы с ростом напряжений и пока необъяснимое повышение с ростом температуры.

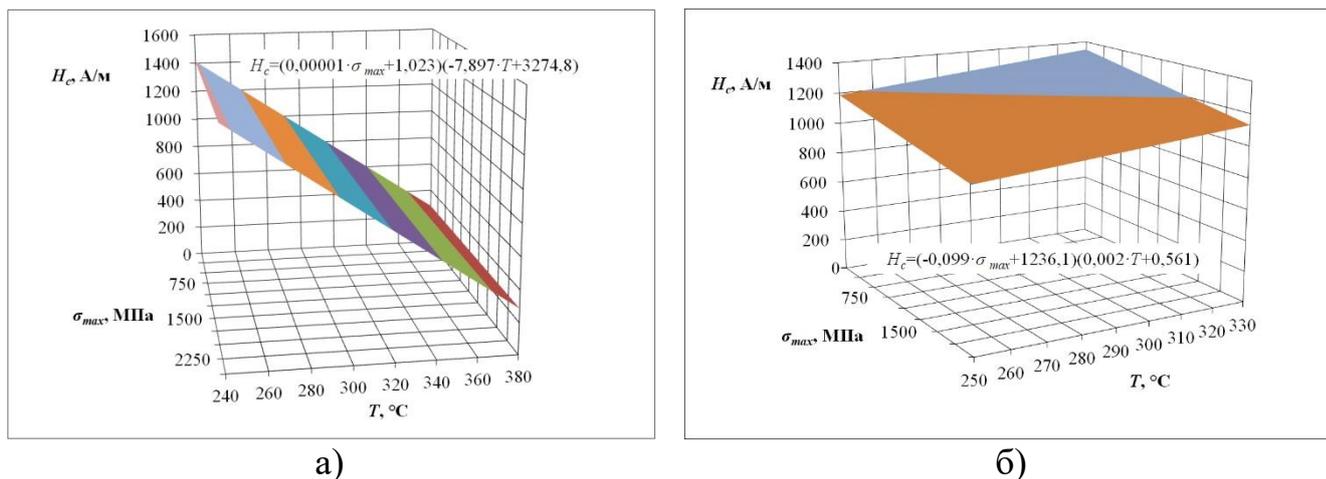


Рисунок 61 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего (а) и верхнего (б) штампов поковки «вилка» в состоянии после штамповки 2500 поковок; материал штампов – сталь 5ХНВ

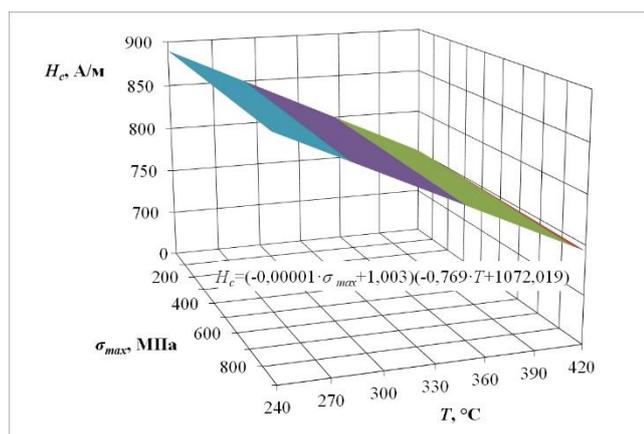


Рисунок 62 – Зависимость коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «корпус» в состоянии после штамповки 150 поковок; материал штампа – сталь 5ХНМ

На рисунке 58, б и рисунке 62 приведены расчётные графики коэрцитивной силы для штампа поковки «корпус» в состояниях до и после штамповки 150 поковок (приложение В, штамп 2.3, замеры 3 и 4). Для штампа характерно повышение коэрцитивной силы между замерами в малонагруженных и не подвергшихся нагреву зонах при сохранении уровня коэрцитивной силы в областях повышенных температур.

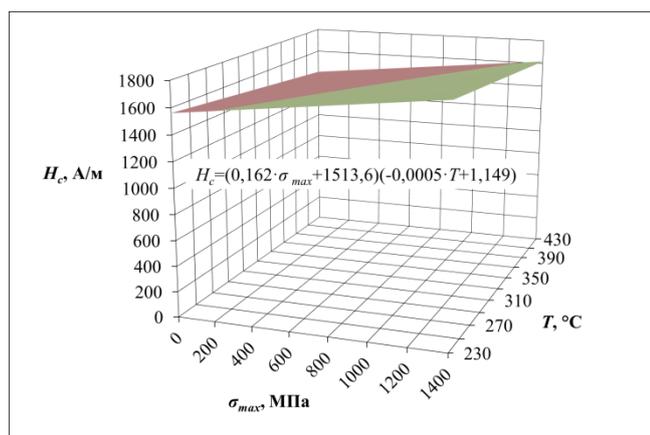


Рисунок 63 – Зависимость коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «корпус» в состоянии после штамповки 342 поковок; материал штампа – сталь 5ХНМ

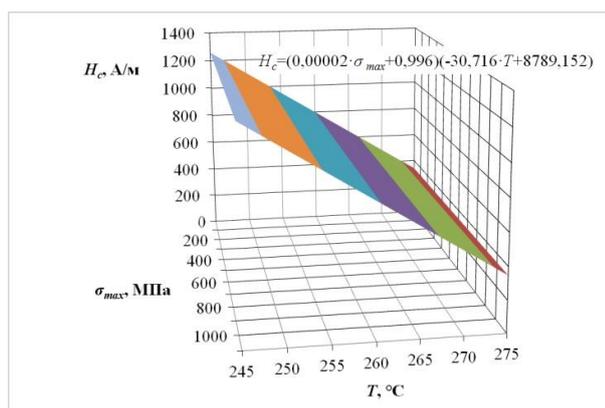


Рисунок 64 – Зависимость коэрцитивной силы от температуры и напряжений для верхнего штампа поковки «корпус» в состоянии после штамповки 150 поковок; материал штампа – сталь 5ХНВ

На рисунке 56, в и рисунке 63 приведены зависимости для штампа поковки «корпус» в состояниях после изготовления и после штамповки 342 поковок (приложение В, штамп 2.4, замеры 3 и 4). В зонах, мало подверженных нагреву и нагружению отмечен небольшой рост коэрцитивной силы.

На рисунке 64 приведён график для верхнего штампа поковки «корпус» в состоянии после штамповки 150 поковок (приложение В, штамп 2.5, замер 1). Прослеживается снижение величины коэрцитивной силы с ростом температуры.

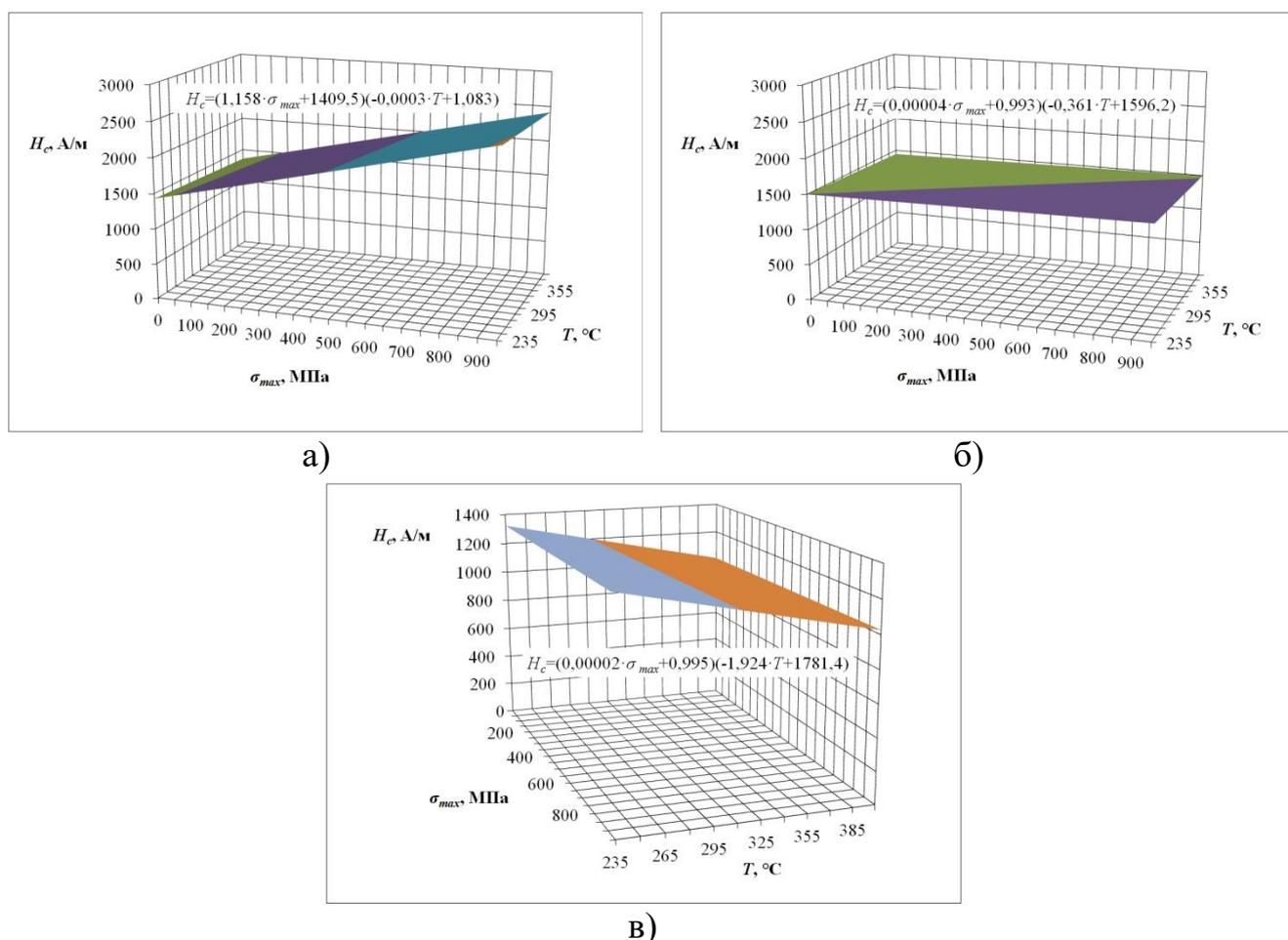


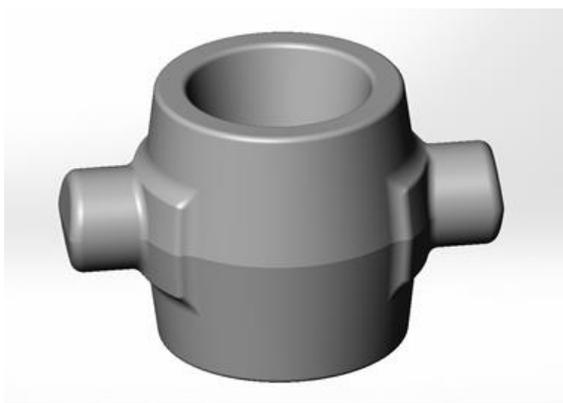
Рисунок 65 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для штампа поковки «бугель» в состоянии: а – до эксплуатации, б – после штамповки 718 поковок, в – после штамповки дополнительно 300 поковок; материал штампа – сталь 5ХНМ

Для зависимостей на рисунке 65 (приложение В, штамп 3.3, замеры 2-4) характерно незначительное повышение уровня коэрцитивной силы в

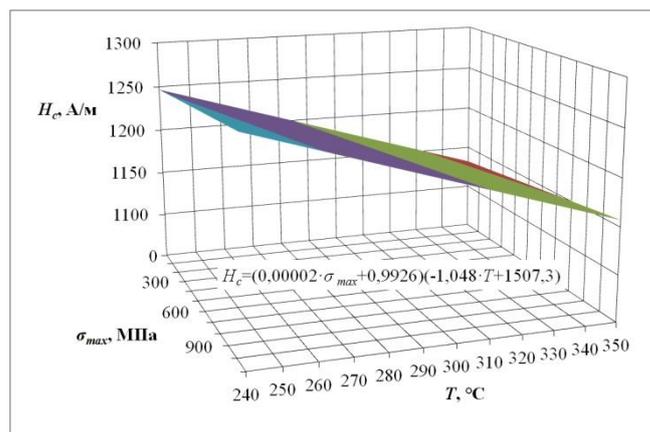
малонагруженных зонах штампа при её сильном падении в нагруженных областях после штамповки 718 поковок. После штамповки ещё 300 поковок наблюдается общее снижение коэрцитивной силы, особенно заметно проявляющее с ростом температуры.

Для штампа с рисунка бб (приложение В, штамп 4.1, замеры 1 и 2) характерно небольшое падение коэрцитивной силы в зонах высоких напряжений и небольшое повышение в малонагруженных областях. Изменения коэрцитивной силы под действием температуры выражены слабо.

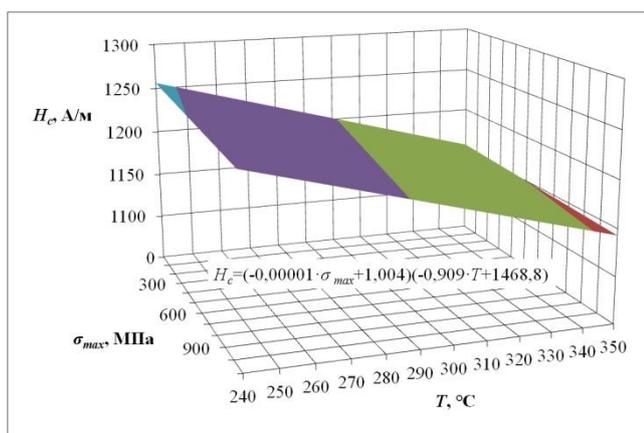
Для зависимостей на рисунке 67 (приложение В, штамп 4.2, замеры 1 и 2) наблюдается снижение коэрцитивной силы в нагруженных зонах штампа и её повышение в малонагруженных нагретых областях.



а)

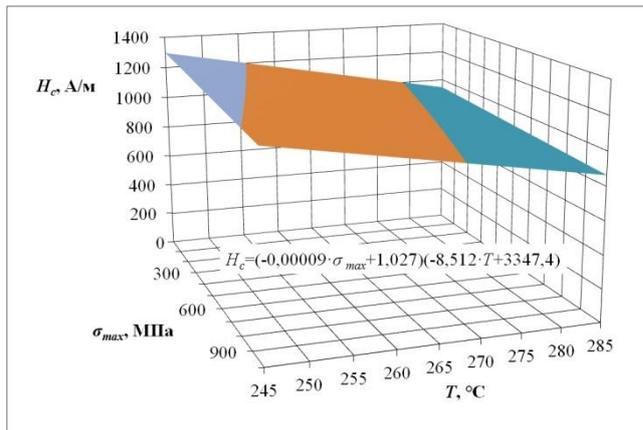


б)

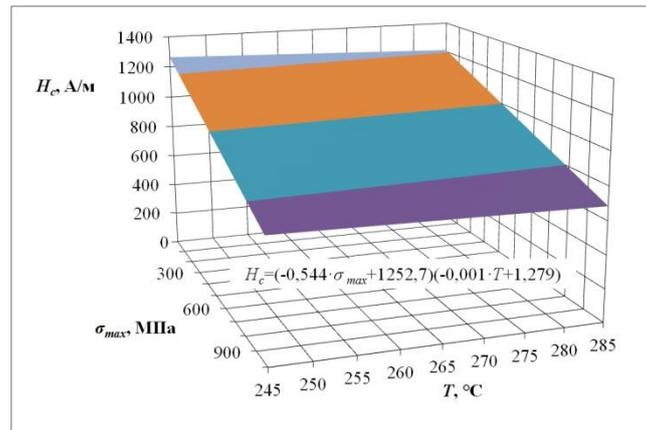


в)

Рисунок бб – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «корпус кардана» (а) в состоянии: б – до эксплуатации, в – после штамповки 248 поковок; материал штампа – сталь 5ХНВ



а)



б)

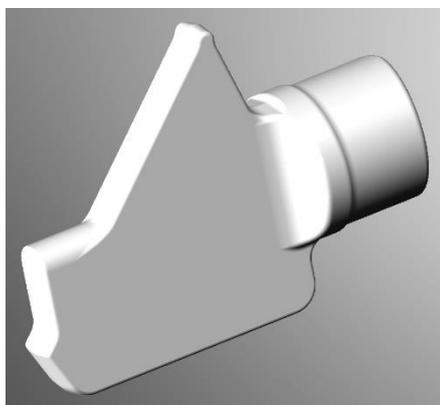
Рисунок 67 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для верхнего штампа поковки «корпус кардана» в состоянии: а – до эксплуатации, б – после штамповки 248 поковок; материал штампа – сталь 5ХНМ

Для штампа с рисунка 68 (приложение В, штамп 5.1, замеры 1-3) после штамповки и калибровки 1001 поковки наблюдается сильное снижение коэрцитивной силы в нагретых зонах и незначительное в нагруженных областях. После штамповки и калибровки ещё 1020 поковок происходит незначительное снижение величины коэрцитивной силы в зонах, не подверженных нагреву.

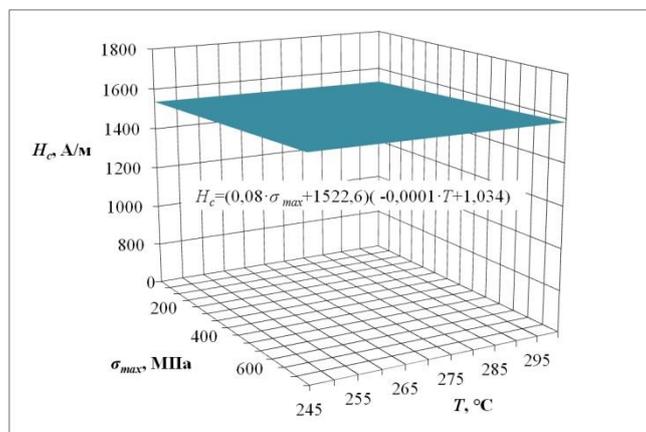
Для зависимостей с рисунка 69 (приложение В, штамп 5.2, замеры 1-3) после штамповки и калибровки 1001 поковки отмечается сильное падение коэрцитивной силы в нагруженных зонах штампа, падение коэрцитивной силы в областях высоких температур. После штамповки и калибровки ещё 1020 поковок происходит пока необъяснимое незначительное повышение коэрцитивной силы с ростом температуры.

На рисунке 70 приведены расчётные графики для нижнего штампа поковки «корпус газогенератора» (приложение В, штамп 6.1, замеры 1 и 2). Отмечается заметное падение коэрцитивной силы в малонагруженных зонах. Для верхнего штампа (приложение В, штамп 6.2, замеры 1 и 2), графики для которого

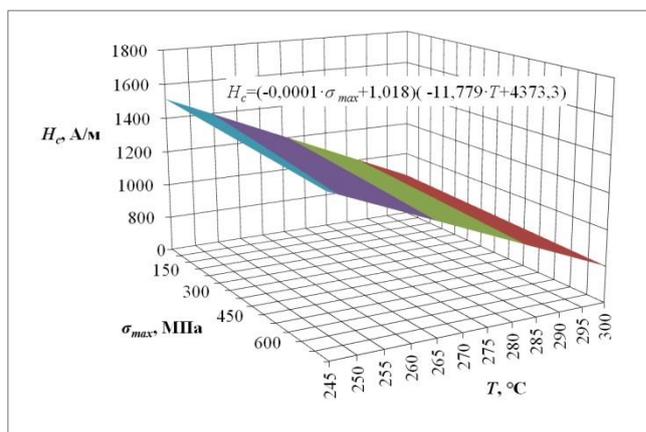
представлены на рисунке 71, характерно общее снижение величины коэрцитивной силы после штамповки и калибровки 181 поковки.



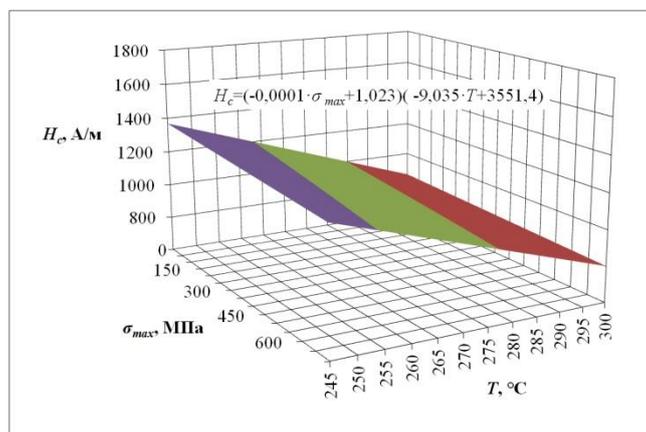
а)



б)



в)



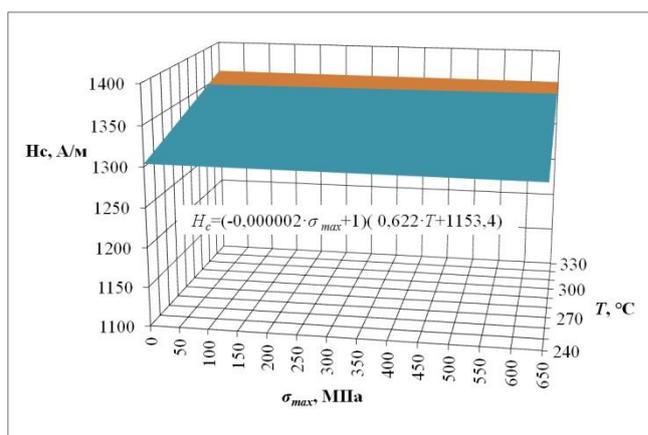
г)

Рисунок 68 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для верхнего штампа поковки «корпус руля» (а) в состоянии: б – до эксплуатации, в – после штамповки и калибровки 1001 поковки, г – после штамповки и калибровки дополнительно 1020 поковок; материал штампа – сталь 5ХНВ

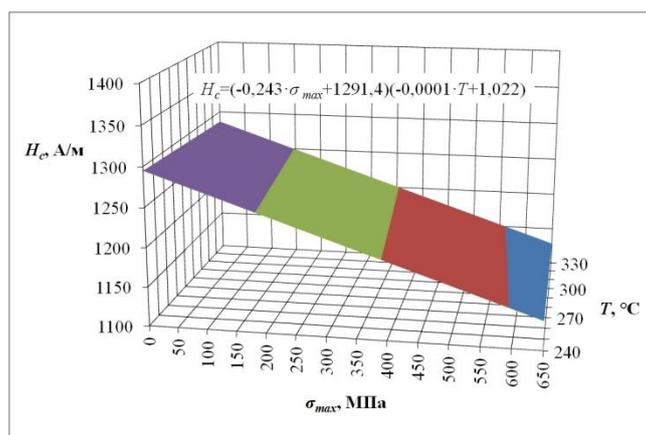
Предельное состояние штампов. Для оценки уровня коэрцитивной силы материала, находящегося в предельном состоянии, рассмотрим два штампа. Данные для штампа поковки «корпус» представлены на рисунке 72 (приложение В, штамп 2.2). Штамп имеет большую наработку и подвергся значительному числу переточек. Низкий общий уровень коэрцитивной силы в стали 5ХНВ при твёрдости гравюры порядка 37 HRC может свидетельствовать о большой наработке штампа.

Характер распределения коэрцитивной силы позволяет сделать предположение о её снижении в процессе эксплуатации под действием повышенных температур.

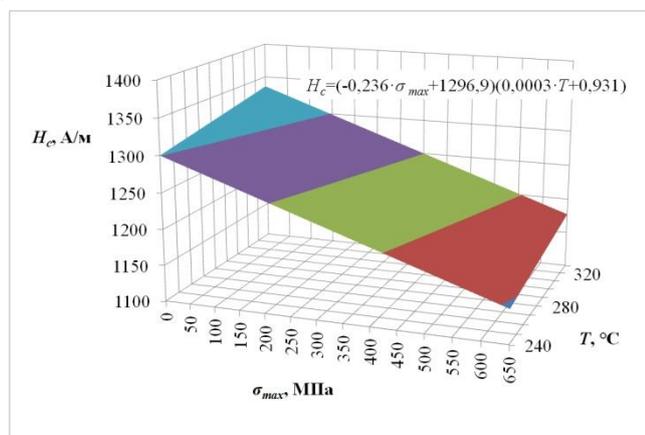
На рисунке 73 представлен расчётный график для треснувшего при нагреве штампа поковки «бугель» (приложение В, штамп 3.2). Невысокий для стали 5ХНВ уровень коэрцитивной силы говорит о большой наработке штампа. Наиболее низкие значения коэрцитивной силы отмечаются в нагруженных зонах.



а)



б)



в)

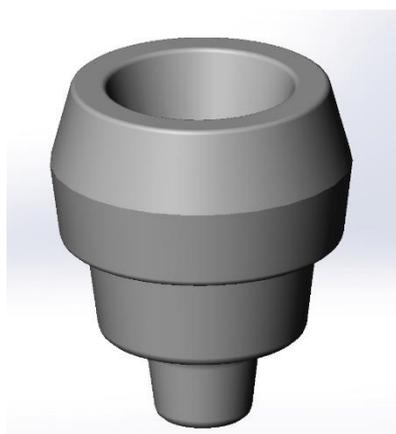
Рисунок 69 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «корпус руля» в состоянии: а – до эксплуатации, б – после штамповки и калибровки 1001 поковки, в – после штамповки и калибровки дополнительно 1020 поковок; материал штампа – сталь 5ХНМ

Подведём итоги данного исследования.

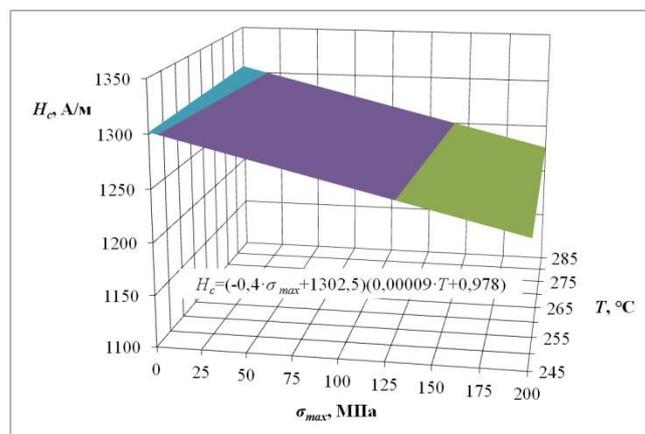
1. Коэрцитивная сила повышается в предварительно подогретых до рекомендуемых температур (200-300 °С), но не подвергающихся значительному

механическому и тепловому нагружению участков гравюры штампа ГОШ при его эксплуатации. Этот рост можно объяснить известным механизмом повышения коэрцитивной силы при накоплении дефектов кристаллической решётки. Диффузионные процессы, происходящие в материале при таких температурах, не могут полностью скомпенсировать образование дефектов.

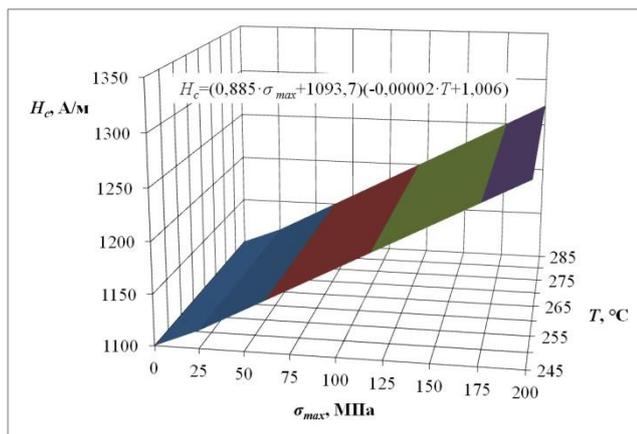
2. Коэрцитивная сила уменьшается в наиболее нагруженных и нагретых областях гравюры, что подтверждает выводы, приведённые в параграфе 4.2. Падение можно объяснить уменьшением длины межзёрненных границ вследствие увеличения зёрен при нагреве, а также повышением эффективности залечивания дефектов кристаллической решётки из-за усиления диффузии атомов.



а)



б)



в)

Рисунок 70 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «корпус газогенератора» (а) в состоянии:

б – до эксплуатации, в – после штамповки и калибровки 181 поковки;

материал штампа – сталь 5ХНМ

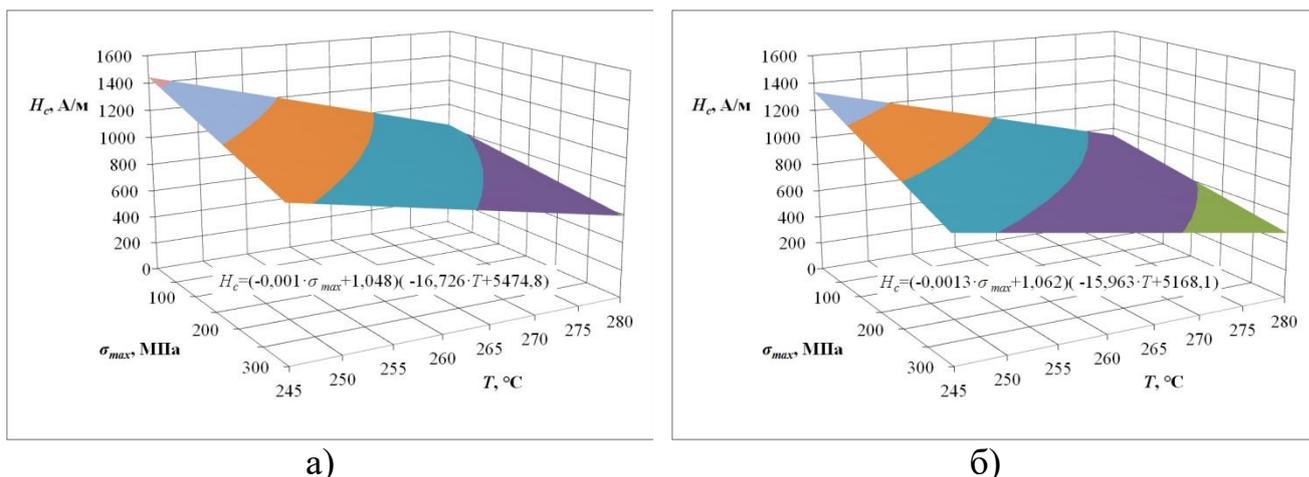


Рисунок 71 – Зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений для верхнего штампа поковки «корпус газогенератора» в состоянии:
 а – до эксплуатации, б – после штамповки и калибровки 181 поковки;
 материал штампа – сталь 5ХНМ

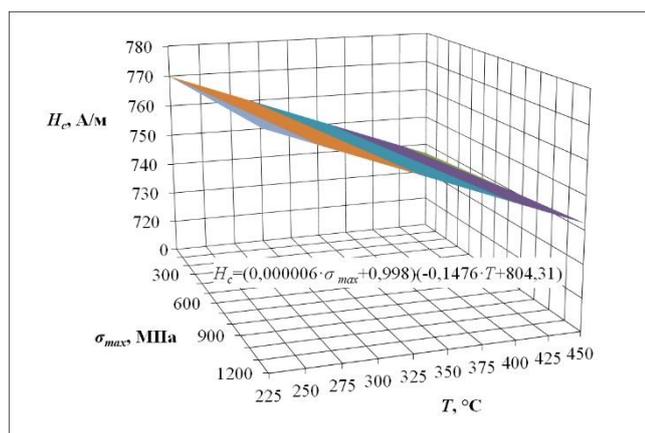
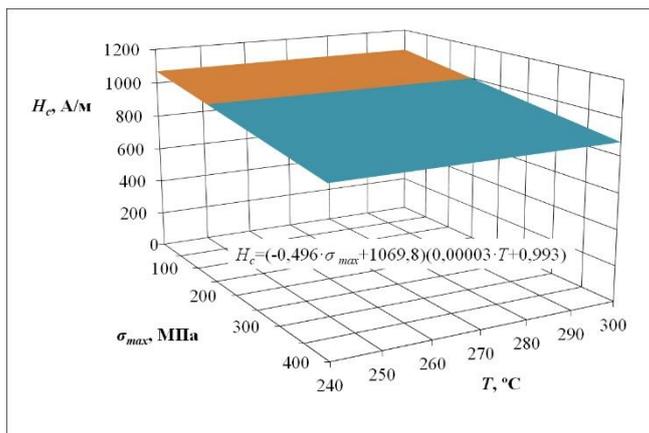


Рисунок 72 – Зависимость коэрцитивной силы от температуры и напряжений для нижнего штампа поковки «корпус» с большой наработкой по штамповке;
 материал штампа – сталь 5ХНВ

3. Коэрцитивная сила стали 5ХНВ уменьшается при отжиге в 2-3 раза. Коэрцитивная сила стали 5ХНМ возрастает в 3-4 раза при закалке. Это можно объяснить изменением дисперсности структуры материала при термообработке.
4. Коэрцитивная сила повышается при мехобработке (без значительного удаления материала) из-за накопления дефектов кристаллической решётки в поверхностном слое материала.



а)

б)

Рисунок 73 – Зависимость коэрцитивной силы от температуры и напряжений (а) для треснувшего нижнего штампа поковки «бугель» (б); материал штампа – сталь 5ХНВ

4.5 Взаимосвязь между твёрдостью и коэрцитивной силой сталей 5ХНВ и 5ХНМ

Для выявления зависимостей между твёрдостью и коэрцитивной силой сталей 5ХНВ и 5ХНМ (рисунок 74) использовались данные для нескольких штампов из приложения В, отличающихся геометрией и наработкой, поэтому точность полученных моделей невысока из-за различного уровня накопленных повреждений в материале исследуемых штампов. Определить приблизительную твёрдость по Бринеллю HB стали 5ХНВ по величине коэрцитивной силы H_c (А/м) можно по формуле:

$$HB = 0,0754 \cdot H_c + 259,3; \quad (4.5)$$

твёрдость HB стали 5ХНМ – по формуле:

$$HB = 0,095 \cdot H_c + 219,1. \quad (4.6)$$

Полученные модели адекватны экспериментальным данным по критерию Фишера при уровне значимости 0,01.

По графикам на рисунке 74 можно установить, что твёрдость и коэрцитивная сила сталей 5ХНВ и 5ХНМ находятся практически в прямой зависимости друг от друга, то есть при возрастании твёрдости растёт коэрцитивная сила и наоборот, что

подтверждает приведённую выше гипотезу о характере изменения коэрцитивной силы при термообработке.

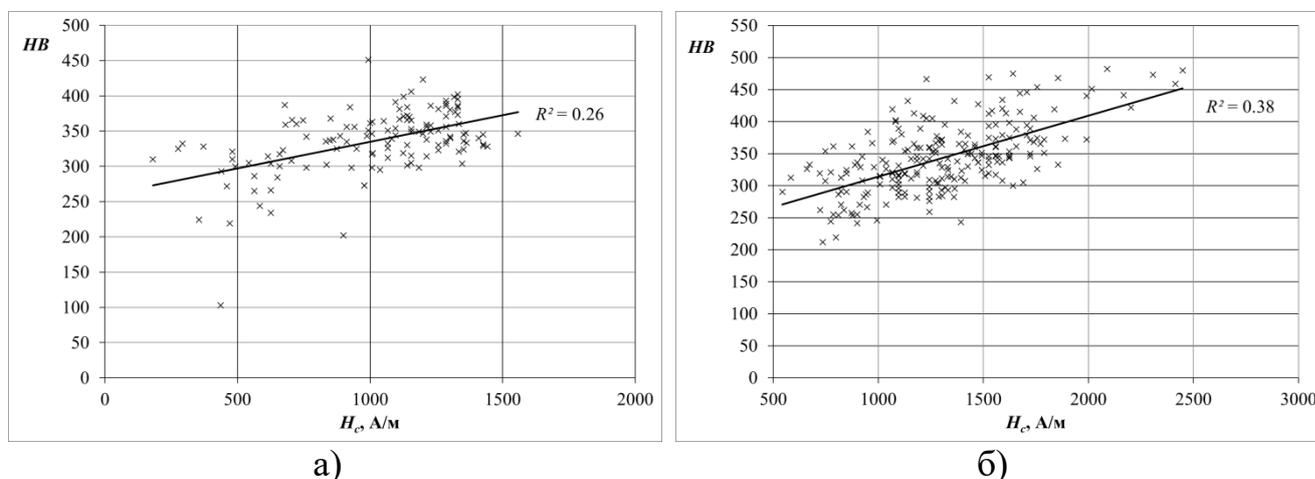


Рисунок 74 – Зависимости твёрдости HV от величины коэрцитивной силы для штамповых сталей: а – 5XНВ; б – 5XНМ

4.6 Выводы по главе

1. Установлена возможность применения неразрушающего контроля по коэрцитивной силе к изделиям из инструментальных сталей ГОШ, подвергающихся в ходе эксплуатации механическим и термическим нагрузкам.

2. Разработаны статистические модели для расчёта предположительной величины коэрцитивной силы материала штамповых сталей ГОШ в неповреждённом состоянии после термообработки по их химическому составу и термообработке, эквивалентам Шеффлера, углеродному эквиваленту.

3. Проведены исследования характера изменения величины коэрцитивной силы материала штампов ГОШ в ходе их изготовления и эксплуатации. Установлено падение коэрцитивной силы в зонах, подвергшихся максимальному нагреву и нагружению, и её рост в малонагруженных и слабо нагретых областях. Установлен рост коэрцитивной силы при закалке сталей и её падение при отжиге. Установлен рост коэрцитивной силы в поверхностном слое материала изделия при его механической обработке (без значительного удаления материала).

4. Разработаны статистические модели для определения предположительной твёрдости сталей 5ХНВ и 5ХНМ в зависимости от величины коэрцитивной силы материала изделия.

5. На основе полученных результатов исследований представляется возможной разработка метода определения стойкости штампов ГОШ по текущей величине коэрцитивной силы материала инструмента.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВ ГОШ ПО ВЕЛИЧИНЕ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ

5.1 Алгоритм определения стойкости штампов ГОШ

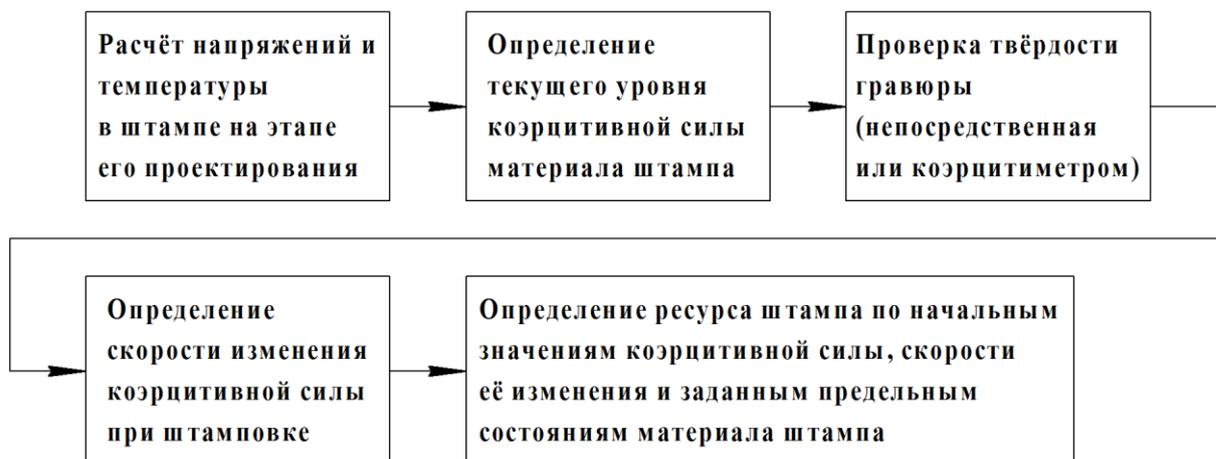


Рисунок 75 – Алгоритм определения стойкости штампа ГОШ

Для оценки стойкости штампов по величине коэрцитивной силы материала предлагается алгоритм, представленный на рисунке 75.

1. **Расчёт напряжений и температуры в штампе на этапе его проектирования.** Разработка конструкторской документации на штамповочную оснастку в настоящее время выполняется при активном использовании САПР. Параллельно с разработкой документации целесообразно проведение проверки технологичности процесса штамповки численными методами, например методом конечных элементов. Такой расчёт позволяет определить опасные сечения штампа и предотвратить образование дефектов поковок из-за особенностей течения штампуемого материала. В результате расчёта можно также получить распределения напряжений и температур, которые впоследствии могут использоваться для оценки стойкости штампа.

2. **Определение текущего уровня коэрцитивной силы материала штампа.** Для оценки текущего состояния материала штампа необходимо провести замеры коэрцитивной силы по возможности в самых нагруженных зонах гравюры и около опасных сечений штампа. В том случае, когда не представляется

возможным провести замер, а штамповый кубик ранее не использовался, для определения начальной величины коэрцитивной силы можно воспользоваться разработанными моделями, приведёнными в параграфе 4.3.

3. Проверка твёрдости гравюры. Высокие механические свойства поверхностных слоёв материала штампа положительно влияют на износостойкость и уменьшают вероятность деформирования элементов гравюры. Оценить качество термообработки рабочих поверхностей штампа можно при помощи переносного твердомера неразрушающего действия или по уже известным зависимостям твёрдости применяемого инструментального материала от величины коэрцитивной силы. Для оценки предположительной твёрдости сталей 5ХНВ и 5ХНМ по величине коэрцитивной силы можно воспользоваться формулами (4.5) и (4.6).

4. Определение скорости изменения коэрцитивной силы при штамповке.

Для определения скорости изменения коэрцитивной силы материала штамповых сталей ГОШ в процессе эксплуатации инструмента была поставлена задача разработать модели вида $\Delta H_{CN} = f(T)f(\sigma)f(N)$ или $\Delta H_{CN} = f(T)f(\sigma)f(N_y)$, где ΔH_{CN} (А/м) – прирост величины коэрцитивной силы после изготовления N поковок или проведения N_y ударов молота; $f(T)$, $f(\sigma)$, $f(N)$, $f(N_y)$ – линейные функции, описывающие влияние температуры T (°С), напряжений σ (Мпа), числа отштампованных поковок N (шт.), количества проведённых ударов молота N_y на прирост коэрцитивной силы. В качестве исходных данных использовались выборки значений коэрцитивной силы, температуры и напряжений, описанные в параграфе 4.4. Производился отдельный расчёт для инструментальных сталей 5ХНМ и 5ХНВ, а также операций штамповки и калибровки. В результате были получены следующие зависимости:

- штамповка, сталь 5ХНМ, по числу поковок –
 $\Delta H_{CN1} = (-2,0882 \cdot T + 439,09)(-0,0006 \cdot \sigma + 0,0422)(-0,0019 \cdot N + 1,8436)$, $R^2 = -0,51$;
- штамповка, сталь 5ХНМ, по числу ударов –
 $\Delta H_{CN2} = (-2,0882 \cdot T + 439,09)(-0,0015 \cdot \sigma + 0,8969)(-0,0005 \cdot N_y + 2,1795)$, $R^2 = -0,22$;
- штамповка, сталь 5ХНВ, по числу поковок –
 $\Delta H_{CN3} = (-0,0435 \cdot T + 12,628)(0,0014 \cdot \sigma + 0,3932)(-0,2022 \cdot N + 41,827)$, $R^2 = -1,55$;

- штамповка, сталь 5ХНВ, по числу ударов –
 $\Delta H_{CN4} = (-0,0049 \cdot T - 0,153)(-0,1611 \cdot \sigma - 92,589)(-0,0002 \cdot N_y + 1,3174)$, $R^2=0,04$;
- калибровка, сталь 5ХНМ, по числу поковок –
 $\Delta H_{CN5} = (-6,5262 \cdot T + 1641,8)(0,0123 \cdot \sigma + 8,5651)(0,0128 \cdot N - 3,8198)$, $R^2=-330,58$;
- калибровка, сталь 5ХНМ, по числу ударов –
 $\Delta H_{CN6} = (-6,5262 \cdot T + 1641,8)(-0,0016 \cdot \sigma + 1,2025)(0,0057 \cdot N_y - 2,7869)$, $R^2=-0,17$;
- калибровка, сталь 5ХНВ, по числу поковок –
 $\Delta H_{CN7} = (-0,0002 \cdot T + 1,0548)(-0,0025 \cdot \sigma - 0,5804) \cdot N$, $R^2=0,19$;
- калибровка, сталь 5ХНВ, по числу ударов –
 $\Delta H_{CN8} = (-0,0002 \cdot T + 1,0548)(-0,0025 \cdot \sigma - 0,5804) \cdot N_y$, $R^2=0,19$.

Как видно по коэффициенту детерминации, чёткую взаимосвязь между рассмотренными параметрами и величиной коэрцитивной силы установить не удалось, что вызвано большим разбросом экспериментальных данных. Поэтому можно сделать предположение, что для штампов ГОШ, на величину коэрцитивной силы которых в ходе работы оказывает влияние значительное число факторов, разработка универсальных моделей для определения прироста коэрцитивной силы нецелесообразна.

Поэтому предлагается иной подход для определения скорости изменения коэрцитивной силы. Для этого необходимо провести повторный замер значений коэрцитивной силы после изготовления партии поковок в тех же точках штампа, где производился первый замер. Скорость изменения коэрцитивной силы определяется как отношение разности второго и первого замеров к числу поковок изготовленной партии. Данный расчёт необходимо провести только один раз для штампа заданной геометрии, свойств инструментального материала и других условий штамповки. Результаты расчёта можно использовать впоследствии для расчёта стойкости аналогичных штампов.

5. Определение ресурса штампа по начальным значениям коэрцитивной силы, скорости её изменения и заданным предельным состояниям материала штампа. Стойкость штампа определяется как отношение разности между предельным и текущим значениями коэрцитивной силы к скорости её изменения. Для определения остаточного ресурса необходимы сведения о скорости изменения

коэрцитивной силы и об уровне коэрцитивной силы используемого штампового материала в рассматриваемых предельных состояниях.

5.2 Практическая реализация метода определения стойкости штампов ГОШ

Ниже представлены различные варианты метода определения остаточного ресурса штампов ГОШ по величине коэрцитивной силы инструментального материала на основе приведённого на рисунке 75 алгоритма. Принято допущение, что при эксплуатации штампа происходит только снижение величины коэрцитивной силы, рост не учитывается.

1. **По точкам замера.** Необходимы данные двух замеров коэрцитивной силы (до эксплуатации штампа и после штамповки заданного числа поковок), значения напряжений σ и температуры T в точках замера, а также данные о величине коэрцитивной силы находящегося в предельном состоянии штампового материала. Данные о предельной величине коэрцитивной силы могут быть заданы функцией вида $H_{ck} = (a_{k1}T + b_{k1})(a_{k2}\sigma + b_{k2})$, где a_{k1} , b_{k1} , a_{k2} , b_{k2} – коэффициенты, определяющиеся аппроксимацией экспериментальных данных по методу Брандона.

Расчёт стойкости проводится в каждой замеренной точке. Сначала в каждой точке производится расчёт скорости изменения коэрцитивной силы от числа поковок в промежутке между двумя замерами по формуле:

$$\Delta H_c = \frac{H_{c1} - H_{c0}}{N_1}, \quad (5.1)$$

где H_{c1} – величина коэрцитивной силы в точке после штамповки партии N_1 поковок; H_{c0} – величина коэрцитивной силы в точке до эксплуатации штампа.

Величину коэрцитивной силы материала штампа в точке замера в любой момент времени можно определить по формуле

$$H_c = H_{c0} + \Delta H_c \cdot N, \quad (5.2)$$

где N – число отштампованных поковок. Подставляя в формулу (5.2) вместо H_c предельное значение коэрцитивной силы H_{ck} в точке, получим уравнение для

определения числа поковок, после штамповки которых материал штампа должен переходить в предельное состояние:

$$N = \frac{H_{CK} - H_{C0}}{\Delta H_C}. \quad (5.3)$$

Далее определяется минимальное значение стойкости N по всем точкам.

Аналогичным способом рассчитывается предположительная стойкость штампа по критерию разупрочнения поверхности гравюры до предельной твёрдости H_{B_k} . Для этого по формулам (4.5) для стали 5ХНВ и (4.6) для стали 5ХНМ рассчитываются значения твёрдости гравюры в точках замеров. Расчёт стойкости по разупрочнению проводится по формулам (5.3) и (5.1) при замене переменных коэрцитивной силы H_C на аналогичные переменные твёрдости H_B . Стойкость для сталей 5ХНВ и 5ХНМ рассчитывается отдельно.

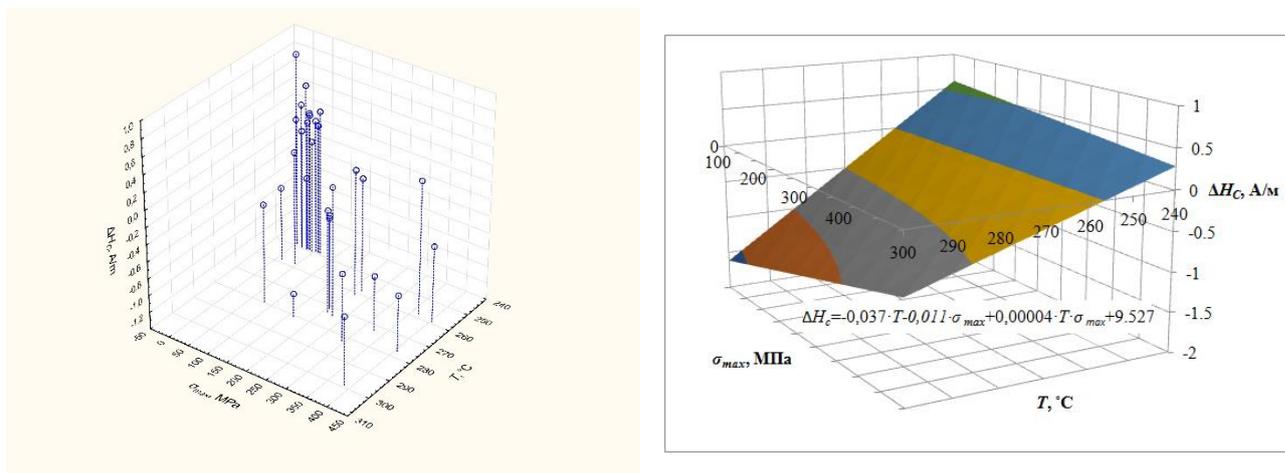
Реализация данного метода на языке программирования Fortran представлена в приложении Г.

Достоинства данного метода заключаются в его простоте и точности даже при небольшом числе замеров. Основной недостаток заключается в необходимости проведения парных замеров коэрцитивной силы каждого штампа для определения скорости её изменения, что плохо сказывается на универсальности метода. Кроме того, высока вероятность влияния на результаты расчёта погрешностей измерения.

2. По точкам замера с усреднением скорости изменения коэрцитивной силы. Для определения стойкости необходимы данные двух замеров коэрцитивной силы, значения напряжений σ и температуры T в точках замера, данные о величине коэрцитивной силы находящегося в предельном состоянии инструментального материала. Данный метод определения стойкости аналогичен предыдущему за исключением того, что после расчёта скорости изменения коэрцитивной силы в каждой точке по формуле (5.1) происходит аппроксимация значений скорости функцией вида $\Delta H_C = (a_1 T + b_1)(a_2 \sigma + b_2) = a_{v1} T + b_{v1} \sigma + c_{v1} T \sigma + d_{v1}$ по алгоритму Брандона, где $a_{v1} = a_1 b_2$, $b_{v1} = a_2 b_1$, $c_{v1} = a_1 a_2$, $d_{v1} = b_1 b_2$ (рисунок 76). После этого производится расчёт значений скорости по полученной функции в каждой точке

замера и определяется стойкость. Стойкость по разупрочнению гравюры рассчитывается аналогично методу 1.

Реализация данного метода на языке программирования Fortran приведена в приложении Д.



а)

б)

Рисунок 76 – Поле рассеяния (а) и результат аппроксимации (б) скорости изменения коэрцитивной силы материала штампа для поковки «бугель» (калибровка 718 поковок между замерами)

Данный вариант расчёта позволяет получить коэффициенты a_{VI} , b_{VI} , c_{VI} , d_{VI} зависимости скорости изменения коэрцитивной силы от температуры и напряжений для рассматриваемого штампа, которые могут использоваться в дальнейших расчётах остаточного ресурса штампов данной конфигурации и схожих условий работы при помощи методов 3 и 5, что устраняет основной недостаток предыдущего метода. Тем не менее, на результаты расчёта по-прежнему оказывают влияние возможные погрешности измерений.

Для оценки адекватности аппроксимации скорости изменения коэрцитивной силы использовались экспериментальные данные, приведённые в приложении В. Результаты оценки адекватности аппроксимации скорости изменения коэрцитивной силы в зависимости от температуры и напряжений приведены в таблице 12. Точность аппроксимации скорости изменения коэрцитивной силы оценивалась при помощи коэффициента детерминации R^2 .

Таблица 12 - Точность аппроксимации данных методами 2 и 4

Номер штампа по прил. В, наименование поковки	Номера замеров	Точность аппроксимации ΔH_C по методу 2 (R^2)	Точность аппроксимации по методу 4 (R^2)			Примечания
			H_{C0}	H_{C1}	ΔH_C	
1.1, «вилка»	2 и 3	0,630	0,303	0,572	0,603	Штамповка 1963 поковок
2.1, «корпус»	1 и 2	0,193	0,079	0,481	0,166	Калибровка 307 поковок
2.3, «корпус»	2 и 3	0,000	0,040	0,034	0,000	Калибровка 307 поковок
2.3, «корпус»	3 и 4	0,296	0,302	0,095	0,303	Штамповка и калибровка 150 поковок
2.4, «корпус»	3 и 4	0,151	0,330	0,288	0,109	Штамповка и калибровка 342 поковок
3.1, «бугель»	3 и 4	0,474	0,170	0,370	0,479	Калибровка 718 поковок
3.1, «бугель»	4 и 5	0,018	0,370	0,237	0,019	Калибровка 300 поковок
3.3, «бугель»	2 и 3	0,473	0,304	0,013	0,470	Штамповка 718 поковок
3.3, «бугель»	3 и 4	0,105	0,005	0,098	0,105	Штамповка 300 поковок
4.1, «корпус кардана»	1 и 2	0,019	0,407	0,129	0,034	Штамповка 248 поковок
4.2, «корпус кардана»	1 и 2	0,188	0,422	0,642	-0,018	Штамповка 248 поковок
5.1, «корпус руля»	1 и 2	0,360	0,015	0,409	0,385	Штамповка и калибровка 1001 поковки
5.1, «корпус руля»	2 и 3	0,016	0,378	0,378	0,015	Штамповка и калибровка 1020 поковок
5.2, «корпус руля»	1 и 2	0,170	0,043	0,212	0,171	Штамповка и калибровка 1001 поковки
5.2, «корпус руля»	2 и 3	0,085	0,252	0,274	0,052	Штамповка и калибровка 1020 поковок
6.1, «корпус газогенератора»	1 и 2	0,436	0,192	0,345	0,437	Штамповка и калибровка 181 поковки
6.2, «корпус газогенератора»	1 и 2	0,065	0,718	0,689	0,083	Штамповка и калибровка 181 поковки

При расчёте по предложенному варианту есть вероятность получить неадекватный результат, видимо, из-за невозможности точной аппроксимации сложных распределений скорости изменения коэрцитивной силы линейными функциями для двух переменных. Использование функций высоких порядков при аппроксимации также не даёт адекватных результатов, так как повышается вероятность получить аномальные данные. Повысить точность расчёта можно, исключив одну из переменных, наименее связанную с величиной коэрцитивной силы.

3. По точкам замера с известной скоростью изменения коэрцитивной силы.

Для определения стойкости необходимы данные одного замера коэрцитивной силы, значения напряжений σ и температуры T в точках замера, данные о величине коэрцитивной силы находящегося в предельном состоянии материала и о скорости изменения коэрцитивной силы материала исследуемого штампа. Данный метод аналогичен методу 2 за исключением того, что для исследуемого штампа и условий штамповки уже известна зависимость скорости изменения коэрцитивной силы инструментального материала от температуры и напряжений ΔH_C , коэффициенты которой определяются по методу 2 (или 4) на основе экспериментальных данных. Поэтому для определения остаточного ресурса штампа достаточно данных только одного замера коэрцитивной силы. Стойкость по разупрочнению гравюры рассчитывается аналогично методу 1 за исключением того, что скорость разупрочнения ΔHB определяется по формуле:

$$\Delta HB = \frac{HB_1 - HB_0}{N_1} = \frac{(a \cdot H_{C1} + b) - (a \cdot H_{C0} + b)}{N_1} = a \cdot \frac{H_{C1} - H_{C0}}{N_1} = a \cdot \Delta H_C,$$

где a и b – коэффициенты линейной аппроксимации моделей (4.5) и (4.6).

Реализация метода на языке программирования Fortran приведена в приложении Е.

4. С нахождением начальной зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений, а также зависимости после штамповки партии поковок.

Для определения стойкости необходимы данные двух замеров коэрцитивной силы, значения напряжений σ и температуры T в точках замера,

данные о величине коэрцитивной силы находящегося в предельном состоянии штампового материала. Для данных двух замеров по алгоритму Брандона рассчитываются коэффициенты зависимостей коэрцитивной силы от температуры и напряжений в точках замера вида $H_{C1} = (a_1T + b_1)(a_2\sigma + b_2)$ для замера после штамповки партии N_1 поковок и $H_{C0} = (a_3T + b_3)(a_4\sigma + b_4)$ для замера до эксплуатации штампа (рис 77). Тогда скорость изменения коэрцитивной силы от числа поковок будет равна:

$$\Delta H_C = \frac{H_{C1} - H_{C0}}{N_1} = \frac{(a_1T + b_1)(a_2\sigma + b_2) - (a_3T + b_3)(a_4\sigma + b_4)}{N_1} = a_{v2}T + b_{v2}\sigma + c_{v2}T\sigma + d_{v2}, \quad (5.4)$$

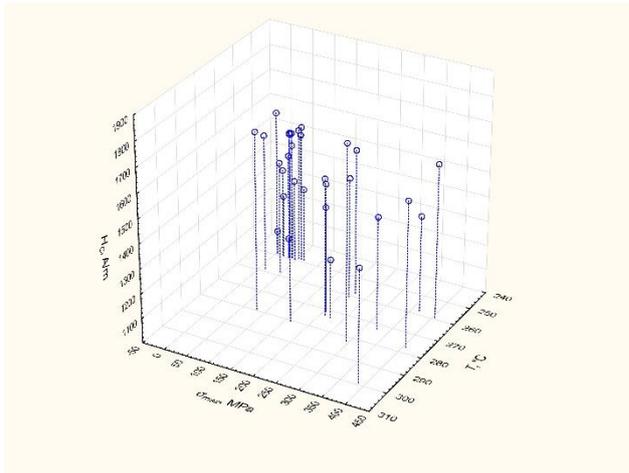
где $a_{v2} = \frac{a_1b_2 - a_3b_4}{N_1}$, $b_{v2} = \frac{a_2b_1 - a_4b_3}{N_1}$, $c_{v2} = \frac{a_1a_2 - a_3a_4}{N_1}$, $d_{v2} = \frac{b_1b_2 - b_3b_4}{N_1}$.

Далее производится расчёт стойкости штампа по формуле (5.3) в точках и определение минимального значения N . Стойкость по разупрочнению гравюры рассчитывается аналогично методу 1.

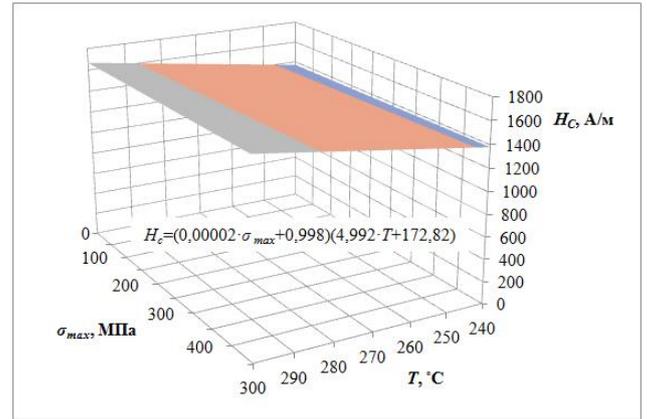
Реализация данного метода на языке программирования Fortran приведена в приложении Ж.

Данный метод позволяет получить коэффициенты a_{v2} , b_{v2} , c_{v2} , d_{v2} зависимости скорости изменения коэрцитивной силы от температуры, напряжений и числа поковок, которые могут использоваться в дальнейших расчётах стойкости штампов аналогичной геометрии и условий работы при использовании методов 3 и 5. Благодаря аппроксимации экспериментальных данных коэрцитивной силы удаётся снизить влияние погрешности измерений и неоднородности материала на конечный результат, но для достижения хорошей точности расчёта требуется большее число замеров.

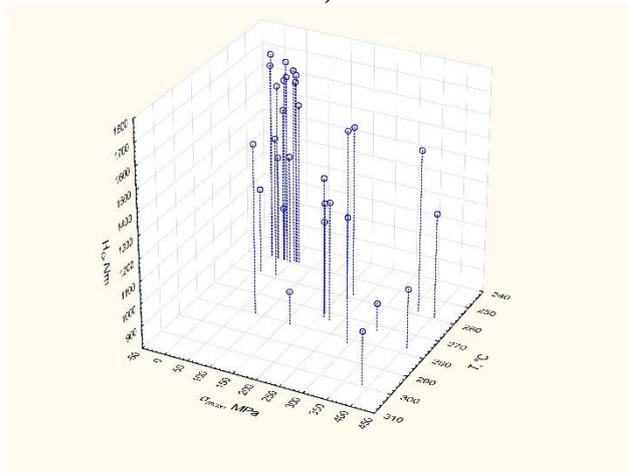
Анализ работы метода с использованием экспериментальных данных (таблица 12) показывает лучший результат аппроксимации скорости изменения коэрцитивной силы от температуры и напряжений, чем при использовании метода 2. Экспериментальные распределения коэрцитивной силы аппроксимируются по температуре и напряжениям адекватно, но заметно значительное влияние на результат разброса исходных данных.



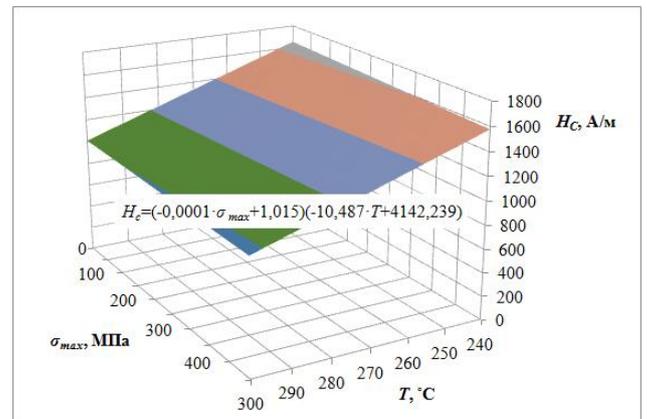
а)



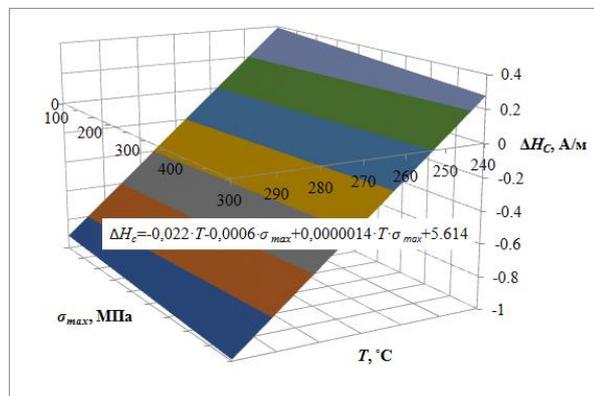
б)



в)



г)



д)

Рисунок 77 – Поля рассеяния (а, в) и результаты аппроксимации (б, г) коэрцитивной силы материала штампа для поковки «бугель» в состояниях до (а, б) и после (в, г) калибровки 718 поковок; д – расчётное распределение скорости изменения коэрцитивной силы от температуры и напряжений

5. С нахождением распределения коэрцитивной силы и известной скоростью её изменения. Для определения стойкости необходимы данные одного замера коэрцитивной силы, значения напряжений σ и температуры T в точках замера, данные о величине коэрцитивной силы находящегося в предельном состоянии материала и о скорости изменения коэрцитивной силы материала исследуемого штампа. Данный метод аналогичен методу 4 за исключением того, что для определения стойкости штампа используется данные одного замера коэрцитивной силы, а скорость её изменения для данного штампа и условий его работы уже известна по предыдущим расчётам методом 4 (или 2). Стойкость по разупрочнению гравюры рассчитывается аналогично методу 3.

Реализация данного метода на языке программирования Fortran приведена в приложении И.

В приложении К приведён текст программы на языке программирования Fortran для нахождения методом Брандона коэффициентов a_{k1} , b_{k1} , a_{k2} , b_{k2} функции $H_{ck} = (a_{k1}T + b_{k1})(a_{k2}\sigma + b_{k2})$ на основе экспериментальных замеров коэрцитивной силы инструментального материала, находящегося в предельном состоянии, и расчётных значений температуры и напряжений в точках замеров.

Для проверки адекватности расчёта в качестве предельных состояний было принято решение использовать аппроксимированные распределения коэрцитивной силы штампов из стали 5ХНВ, вышедших из строя по критериям трещинообразования (рисунок 73), а также смятия и износа (рисунок 78). В качестве предельных значений использовались минимальные значения коэрцитивной силы представленных на рисунке 73 и рисунке 78 зависимостей, характерные для температурно-напряжённого состояния каждого рассмотренного в расчёте штампа. В качестве предельного состояния по разупрочнению принято значение твёрдости 280 НВ.

Как видно из таблицы 13, расчётные значения ресурса штампов в основном превышают наработку между замерами за исключением штампа 1.1 для поковки «вилка», который в ходе работы подвергся чрезмерному смятию и износу.

Аномальные значения прогнозируемого ресурса, характерные для расчёта стойкости штампов 4.1 и 5.1, можно объяснить недостаточной точностью аппроксимации скорости изменения коэрцитивной силы.

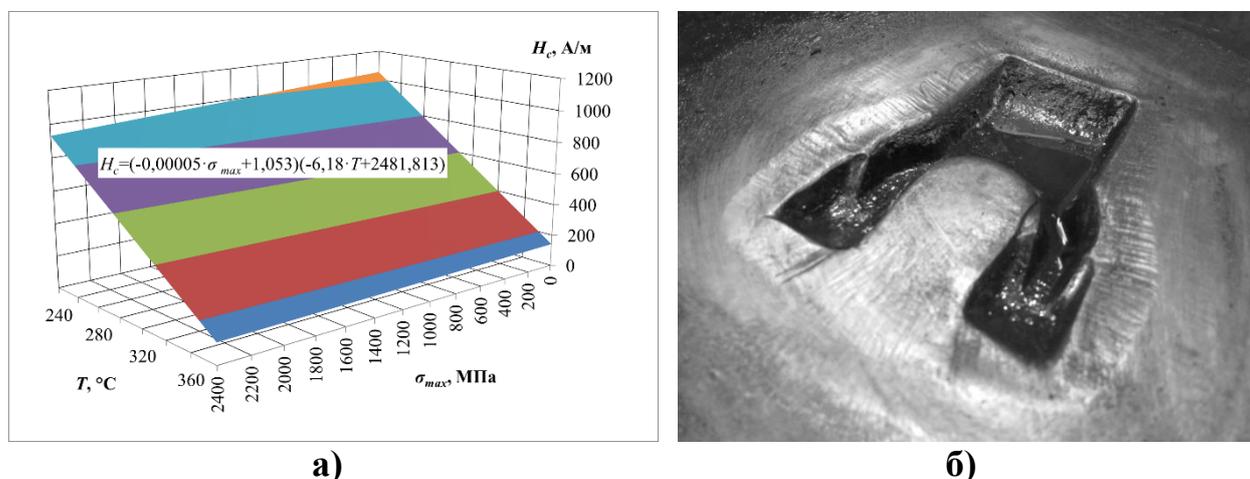


Рисунок 78 – Зависимость коэрцитивной силы от температуры и напряжений (а) для подвергшихся смятию и износу (б) двух половин штампа поковки «вилка»

Таблица 13 – Результаты расчёта предположительной стойкости

Номер штампа по прил. В	Наименование поковки	Наработка штампа между замерами	Прогнозируемый ресурс, шт. поковок		
			Трещины	Смятие и износ	Снижение твёрдости
1.1	Вилка	Штамповка 1963 поковок	2658/ 3166/ 3011	1275/ 1644/ 1546	1707
2.1	Корпус	Калибровка, 307 поковок	388/ 403/ 455	383/ 397/ 449	838
4.1	Корпус кардана	Штамповка 248 поковок	1022/ 8016/ 7731	1163/ 9320/ 8868	1464
5.1	Корпус руля	Штамповка и калибровка 1001 поковок	1110/ 1142/ 1312	1149/ 1207/ 1372	1591
		Штамповка и калибровка 1020 поковок	895/ 1092/ 4969	962/ 1475/ 5480	1733

В приложении Л приведён текст программы на языке программирования Fortran для корректировки коэффициентов функции скорости изменения коэрцитивной силы от температуры и напряжений, определяемых по методу 2 или 4. Данный подход позволяет повысить точность прогнозирования характера изменения величины коэрцитивной силы при наличии двух или более расчётных

зависимостей скорости изменения коэрцитивной силы от температуры и напряжений, полученных при обработке экспериментальных данных по методу 2 или 4. Перерасчёт коэффициентов проводится с учётом весового фактора, основанного на числе отштампованных поковок.

Таблица 14 - Результаты прогнозирования величины коэрцитивной силы

Номер штампа по прил. В	Исходные данные (номер замера)	Прогнозируемые данные (номер замера)	Данные о скорости (на основе замеров)	Интервалы варьирования температуры и напряжений	Погрешность прогноза	Погрешность прогноза с учётом корректировки
2.3	2	3	3 и 4	240-260 °С 0-350 МПа	57,6 %	18,8 %
2.3	3	4	2 и 3	240-320 °С 0-900 МПа	23,7 %	12,1 %
3.1	3	4	4 и 5	240-300 °С 0-450 МПа	30,4 %	9,0 %
3.1	4	5	3 и 4	240-300 °С 0-450 МПа	12,7 %	9,0 %
3.3	2	3	3 и 4	235-400 °С 0-950 МПа	26,0 %	7,7 %
3.3	3	4	2 и 3	235-400 °С 0-950 МПа	13,8 %	9,8 %
5.1	1	2	2 и 3	245-300 °С 0-700 МПа	34,3 %	17,3 %
5.1	2	3	1 и 2	245-300 °С 0-700 МПа	6,0 %	17,7 %
5.2	1	2	2 и 3	240-330 °С 0-650 МПа	9,8 %	5,1 %
5.2	2	3	1 и 2	240-330 °С 0-650 МПа	1,4 %	5,2 %

Данное решение было протестировано на экспериментальных данных, приведённых в приложении В. Для двух замеров коэрцитивной силы (до и после штамповки/калибровки) рассчитывались зависимости распределения коэрцитивной силы по методу 4. Далее по полученной формуле первоначального распределения и формуле скорости изменения коэрцитивной силы, которая была получена при расчёте методом 4 двух других замеров для того же штампа в состояниях до и после штамповки/калибровки партии поковок, рассчитывалась предполагаемая величина коэрцитивной силы после выполнении на штампе

операции штамповки/калибровки. Погрешность прогноза оценивалась как среднее арифметическое отклонений равномерно распределённых точек прогнозируемой и полученной при помощи расчёта поверхностей. Расчёт с учётом корректировки производился аналогичным способом при использовании формулы скорости изменения коэрцитивной силы, полученной перерасчётом вышеуказанным способом коэффициентов двух аппроксимированных зависимостей. Результаты прогнозирования приведены в таблице 14.

5.3 Выводы по главе

1. Предложен алгоритм определения стойкости штампов ГОШ на основе данных замера коэрцитивной силы инструментального материала.

2. Разработано 3 варианта метода определения ресурса штампа на основе данных двух замеров коэрцитивной силы и 2 варианта на основе данных одного замера и известной скорости изменения коэрцитивной силы.

3. Все разработанные методы реализованы на языке программирования Fortran. Также разработана программа для аппроксимации распределения коэрцитивной силы от температуры и напряжений для материала, находящегося в предельном состоянии, и программа для корректировки коэффициентов уравнения скорости изменения коэрцитивной силы на основе вновь полученных экспериментальных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фомичёв, А.Ф. Компьютерное исследование технологических параметров при штамповке / А.Ф. Фомичёв, Э.Е. Юргенсон, С.Ю. Панин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2010. – №8. – С. 38-42.
2. Непершин, Р.И. Моделирование открытой объёмной штамповки поковки шестерни // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2011. – №3. – С. 8-17.
3. Непершин, Р.И. Моделирование горячей объёмной штамповки поковки шестерни на КГШП и на молоте // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2011. – №7. – С. 42-45.
4. Непершин, Р.И. Моделирование горячей объёмной штамповки поковки шестерни на КГШП и на молоте (продолжение) // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2011. – №8. – С. 23-32.
5. Непершин, Р.И. Пластическое формообразование поковки шестерни при штамповке на КГШП // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2012. – №1. – С. 68-79.
6. Михайлов, В.Н. Совершенствование технологии изготовления поковок колец синхронизатора автомобиля КАМАЗ / В.Н. Михайлов, И.М. Володин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – №10. – С. 254-260.
7. Володин, А.И. Повышение качества круглых в плане поковок на основе совершенствования технологии штамповки: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Володин Александр Игоревич. – Липецк, 2010. – 23 с.
8. Резников, Ю.Н. - Уменьшение длительности стадии доштамповки на основе моделирования формоизменения / Ю.Н. Резников, А.В. Вовченко, А.В. Быкодоров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2001. – №4. – С. 33-36.
9. Резников, Ю.Н. Расчёт и оптимизация процессов объёмной штамповки / Ю.Н. Резников, А.В. Вовченко // Вестник ДГТУ. – 2007. – Т.7. №1(32).

10. Тюрин, В.А. Деформации и зонообразование в заготовках при производстве поковок колец / В.А. Тюрин, Д.В. Батяев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2012. – №10. – С. 40-44.
11. ГОСТ 21546-88 – Штампы молотовые для объёмной штамповки. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 21 с.
12. Довнар, С.А. Термомеханика упрочнения и разрушения штампов объёмной штамповки / С.А. Довнар. – М.: Машиностроение, 1975. – 255 с.
13. Wilfried J. Bartz. Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung / Wilfried J. Bartz. – Expert-Verlag GmbH, 2003.
14. Тылкин, М.А. Штампы для горячего деформирования металлов / М.А. Тылкин, Д.И. Васильев, А.М. Рогалев, А.П. Шкатов, Е.И. Бельский; под ред. М.А. Тылкина. – М.: Высш. школа, 1977. – 496 с.
15. Бойцов, В.В. Горячая штамповка / В.В. Бойцов, И.Д. Трофимов. – М.: Высшая школа, 1978. – 304 с.
16. Лобанов, В.К. Повышение стойкости молотовых штампов / В.К. Лобанов, В.М. Пилипенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1986. – №3. – С. 14-15.
17. Электрошлаковая наплавка изношенных кузнечных штампов [Электронный ресурс] // НТК «ИЭС им. Е.О. Патона». – Режим доступа: <http://stc-paton.com/rus/equipment/recovery22>.
18. Бартенев, Д.В. Разработка наплавочного сплава и технологии упрочнения и ремонта штампов горячего деформирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Бартенев Денис Викторович. – Курск, 2008. – 139 с.
19. Позняк, Л.А. Штамповые стали / Л.А. Позняк, Ю.М. Скрынченко, С.И. Тишаев. – М.: Металлургия, 1980. – 244 с.
20. Горицкий, В.М. Тепловая хрупкость сталей / В.М. Горицкий. – М.: Металлургиздат, 2007. – 384 с.
21. Степанский, Л.Г. Выбор материала инструмента дляковки и горячей штамповки / Л.Г. Степанский // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2002. – №7. – С. 23-27.

22. Тюрин, В.А. Возможности повышения стойкости деформирующего инструмента в условиях циклического нагружения / В.А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2015. – №3. – С. 26-30.
23. Гурьев, А.М. Новая технология изготовления и термоциклическая обработка литых штампов для горячего объемного деформирования / А.М. Гурьев // Ползуновский альманах. – 2001. – № 1-2.
24. Пат. 2111099 РФ, МПК В23К25. Устройство для электрошлакового литья / В.Г. Ярмач, Лычко И.И., Сущук-Слюсаренко И.И.; заявитель и патентообладатель Ин-т электросварки имени Е.О. Патона АН Украины.
25. Пат. 2392085 РФ, МПК В21J013/02, В21J005/08. Твердосплавная матрица для высадки многогранных изделий / Жернаков В.С., Газизов Х.Ш., Валиев Р.Ш.; заявитель и патентообладатель Уфимский гос. авиационный техн. ун-т. – № 2009116304/02; заявл. 28.04.09; опубл. 20.06.10.
26. ГОСТ 3882-74 – Сплавы твёрдые спеченные. Марки. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 13 с.
27. Елагина, О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / О.Ю. Елагина. – М.: Логос, 2009. – 488 с.
28. Барановский, М.А. В помощь кузнецу-штамповщику / М.А. Барановский. – Минск: Беларусь, 1976. – 207 с.
29. А.с. 515807 СССР, МПК С21D7/14, С21D9/22, С21D1/78. Способ термомеханической обработки штампов / С.А. Довнар. – № 2075414/02; заявл. 18.11.74; опубл. 30.05.76, Бюл. № 20. – 2 с.
30. Смирнов, М.А. Высокотемпературная термомеханическая обработка и интеркристаллитная хрупкость сталей / М.А. Смирнов // Фазовые и структурные превращения в сталях: Вып. 1: Тр. школы-семинара, 20-24 ноября 2000 г., г. Магнитогорск / В. Н. Урцев. – Магнитогорск: Магнитог. дом печати, 2001. – С. 192-208 .
31. Иващенко, В.Ю. Анализ причин разрушения гравюры и повышения стойкости штампового инструмента из стали 5ХНМ с помощью ТЦО /

- В.Ю. Иващенко // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. – Маріуполь, 2006. – Вип. 9. – С. 46-49.
32. Райцес, В.Б. Термическая обработка: В помощь рабочему-термисту / В.Б. Райцес. – М.: Машиностроение, 1980. – 192 с.
33. Жихарев, А.В. Научное обоснование и разработка технологии предварительной термической обработки конструкционных азотируемых сталей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Жихарев Алексей Викторович. – Москва, 2004. – 202 с.
34. Трусова, Е.В. Низкотемпературная нитроцементация штамповых сталей и наплавленных покрытий для повышения долговечности штампового инструмента: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Трусова Елена Валентиновна. – Курск, 2011. – 159 с.
35. Материаловедение и технология конструкционных материалов: курс лекций / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т.; сост.: М.Е. Перфилов. – Новосибирск, 2012. – 283 с.
36. Локтев, Д. Основные виды износостойких покрытий / Д. Локтев, Е. Ямашкин // Наноиндустрия. – 2007. – №5. – С. 24-30.
37. Пат. 2456112 РФ, МПК В21J13/02, С23С14/32. Штамп для горячей штамповки деталей из титановых сплавов / Дыбленко Ю.М., Смыслов А.М., Смылова М.К., Мингажев А.Д., Котельников Г.П.; заявитель и патентообладатель ООО "НПП "Уралавиаспецтехнология", НПКП "Технопарк авиационных технологий". – Заявл. 13.05.10; опубл. 20.07.12.
38. Тополянский, П.А. Выбор и области применения трибологических покрытий [Электронный ресурс] / П.А. Тополянский // МирПром. – Режим доступа: <http://www.mirprom.ru/public/vybor-i-oblasti-primeneniya-tribologicheskikh-pokrytiy.html>.
39. ГОСТ 10051-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Типы. – М: Издательство стандартов, 2003.– 13 с.

40. Конструкционные материалы: справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
41. Ковка и горячая штамповка: справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семёнов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 2 т.
42. А.с. 829297 СССР, МПК В21J13/02. Устройство для деформирования горячим выдавливанием / В.И. Семендий, Н.Н. Волосов, Ю.А. Ахминеев, В.Л. Данилевич, В.А. Кочетков, В.А. Тюрин, С.С. Гнучев, Ю.Н. Буленков. – № 2704347/25-27; заявл. 20.12.78; опубл. 15.05.81, Бюл. № 18. – 2 с.
43. Акаро, И.Л. Термостабилизация режима работы кузнечных штампов / И.Л. Акаро // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – №6. – С. 19-21.
44. ГОСТ 7505-89. Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 53 с.
45. Ковка и объёмная штамповка стали. Справочник в двух томах / Колл. авторов. Под ред. д-ра техн. наук М.В. Сторожева. – М.: Машиностроение, 1967. – 2 т.
46. Ненашев, В.Ю. Исследование стойкости открытого штампа с расширяющейся облойной канавкой / В.Ю. Ненашев, В.В. Сорокин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – №3. – С. 20-21.
47. Пат. 2484913 РФ, МПК В21К1/12. Способ изготовления стержневых изделий с продольными рёбрами из алюминиевых сплавов / Артес А.Э., Володин А.М., Смеликов В.Г., Сосёнушкин Е.Н., Рыжков И.В., Рогозников П.А., Третьюхин В.В., Гуреева Т.Т.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН". – Заявл. 28.12.11; опубл. 20.06.13.
48. Шевелев, Л.П. Резервы прочности кузнечной матрицы / Л.П. Шевелев, И.П. Рындин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2004. – №4. – С. 30-35.
49. Корнилова, А.В. Разработка методов обеспечения долговечности силовых деталей кузнечно-прессовых машин и инструмента: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.03.05 / Корнилова Анна Владимировна. – М., 2009. – 314 с.

50. Петров, А.Н. Научное обоснование выбора коллоидно-графитовых смазочных материалов и покрытий для горячей штамповки на прессах: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.02.09 / Петров Александр Николаевич. – М., 2013. – 28 с.
51. Петров, А.Н. Статистический анализ стойкости штампов кривошипных горячештамповочных прессов / А.Н. Петров // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – №1. – С. 116-122.
52. Петров, А.Н. Выбор оптимальных коллоидно-графитовых смазочных материалов для штампов горячего деформирования / А.Н. Петров // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – №2. – С. 209-214.
53. Горкунов, Б.М. Анализ методов и устройств для контроля упрочнённого слоя металлических изделий / Б.М. Горкунов, А.А. Тищенко // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Электроэнергетика та перетворювальна техніка. – 2010. – №12. – С. 128-135.
54. ГОСТ 30415-96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 12 с.
55. Schaeffler, A.L. Constitution diagram for stainless steel weld metal. // Metal Progress. – 1949. – V. 56. – P. 680-680B.
56. Богачева, Н.Д. Расширение возможностей применения метода коэрцитивной силы / Н.Д. Богачева // В мире неразрушающего контроля. – 2005. – №2(28). – С. 8-10.
57. Толмачев, И.И. Магнитные методы контроля и диагностики: учебное пособие / И.И. Толмачев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 216 с.
58. ГОСТ 5950-2000. Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 40 с.
59. ГОСТ 5950-1973. Прутки и полосы из инструментальной легированной стали. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 66 с.
60. Большая советская энциклопедия: В 30 т. – М.: "Советская энциклопедия", 1969-1978.

61. Василенко, О.Н. Методы и средства многопараметровой магнитной структуроскопии изделий с использованием составных разомкнутых магнитных цепей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 01.04.11 / Василенко Ольга Николаевна. – Екатеринбург, 2014. – 24 с.
62. Горкунов Э.С. Определение напряженного состояния растянутого стержня по его измеренным магнитным характеристикам / Э.С. Горкунов, И.Г. Емельянов, С.Ю. Митропольская // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49, № 5. – С. 205-211.
63. Yensen, T. D. Magnetic properties of iron as affected by carbon, oxygen and grain-size / T.D. Yensen, N.A. Ziegler // Trans. Amer. Soc. Met. – 1935. – V. 23. – P. 556–557.
64. Моисеев, Ю.В. Неразрушающий контроль структурного состояния металлических изделий / Ю.В. Моисеев // Процессы литья. – 2010. – №5 (83). – С. 59-65.
65. Тройбле, Г. Влияние дефектов кристаллической решетки на процессы намагниченности в ферромагнитных монокристаллах / Г. Тройбле, А. Зегер // Пластическая деформация монокристаллов. – М.: Мир, 1969. – С. 201–264.
66. А.с. 1817050 СССР, МПК G01R33/12. Способ определения величины коэрцитивной силы конструкционных сталей / Н.Д. Богачева (СССР). – № 4622562/21; заявл. 20.12.88; опубл. 23.05.93, Бюл. № 19. – 3 с.
67. Кашубовский А.Н. Идентификация марок сплавов с использованием методов неразрушающего контроля / А.Н. Кашубский, Г.Г. Крушенко // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54, № 4. – С. 33-37.
68. Кашубский, А.Н. Идентификация марок сплавов с использованием методов неразрушающего контроля / А.Н. Кашубский, Г.Г. Крушенко // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2011. – Т.54, №4. – С. 33-37.
69. Михеев, М.Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
70. Щербинин, В.Е. Магнитный контроль качества металлов / В.Е. Щербинин, Э.С. Горкунов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 264 с.

71. Бида, Г.В. Магнитный контроль механических свойств проката / Г.В. Бида, Э.С. Горкунов, В.М. Шевнин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 252 с.
72. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
73. Бида, Г.В. Магнитные свойства термоупрочнённых сталей и неразрушающий контроль их качества / Г.В. Бида. – М.: Маршрут, 2006. – 304 с.
74. Горкунов, Э.С. Приставной коэрцитиметр на постоянных магнитах / Э.С. Горкунов, В.П. Табачник, А.А. Сивенцев, Ю.П. Носов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – №8. – С. 36-38.
75. Бида, Г.В. Многопараметровый метод неразрушающего контроля качества термоупрочнённых изделий [Электронный ресурс] / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук, А.Н. Сташков // Институт физики металлов УрО РАН. – Режим доступа: <http://imp.uran.ru/UserFiles/File/dostizhenia/Bida.pdf>.
76. Костин, В.Н. Измерение магнитных свойств вещества при наличии зазора в составной цепи преобразователь-объект / В.Н. Костин, О.Н. Василенко // Научные известия НТСМ. – 2012. – №1(133). – С. 46-49.
77. Пат. 2483301 РФ, МПК G01N27/72. Способ локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов / Василенко О.Н., Костин В.Н.; заявитель и патентообладатель ИФМ УрО РАН. – № 2011147435/28; заявл. 22.11.11; опубл. 27.05.13, Бюл. № 15. – 12 с.
78. Горкунов Э.С. Изменение коэрцитивной силы при двухосных деформациях / Э.С. Горкунов, А.И. Ульянов, В.В. Захаров // Научни известия на НТСМ. – 2013. – №2(139). – С. 3-8.
79. Ульянов А.И. Влияние сильных пластических деформаций на структурное состояние и коэрцитивную силу патентированной проволоки стали 70 и порошков сплава Fe – 5 ат. % С / А.И. Ульянов, Э.С. Горкунов, С.В. Смирнов, Е.П. Елсуков, Г.Н. Коньгин, А.В. Загайнов, Н.Б. Арсентьева, С.Ю. Митропольская // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т.8, №2. – С. 81-88.

80. Gorkunov E.S. Magnetic structural-phase analysis as applied to diagnosing and evaluating the lifetime of products and structural components. Part 1 // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – Issue 1. – P.6-40.
81. Захаров, В.А. Закономерности изменения коэрцитивной силы при двухосном асимметричном деформировании стали Ст3 / В.А. Захаров, А.И. Ульянов, Э.С. Горкунов // *Дефектоскопия*. – 2010. – №3. – С. 55-69.
82. Зацепин Н.Н., Коржова Л.В. *Магнитная дефектоскопия*. Мн., "Наука и техника", 1981, 208 с.
83. Мельгуй, М. А. *Магнитный контроль механических свойств сталей* / М.А. Мельгуй; под ред. Н.Н. Зацепина; Академия наук БССР, Институт прикладной математики. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
84. Матюк, В.Ф. Приборы с накладными преобразователями для магнитного контроля прочностных характеристик ферромагнитных изделий / В.Ф. Матюк, В.Б. Кратиров, В.Д. Пиунов, А.А. Осипов, М.Н. Делендик // XLVI Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», 15-17 октября 2007 года, Витебск, Беларусь: материалы конференции. Ч. 1. УО «ВГТУ». – Витебск: УО «ВГТУ», 2007. – С. 124-130.
85. Матюк, В.Ф. Определение магнитных свойств ферромагнитных материалов по их измерению на изделиях конечных размеров с целью прогнозирования прочностных свойств / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов // XLVI Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», 15-17 октября 2007 года, Витебск, Беларусь: материалы конференции. Ч. 1. УО «ВГТУ». – Витебск: УО «ВГТУ», 2007. – С. 130-136.
86. Матюк, В.Ф. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии / В.Ф. Матюк, В.Н. Кулагин // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2010. – №3. – С. 4-14.
87. Матюк, В.Ф. Измерение магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий при квазистатическом перемагничивании / В.Ф. Матюк,

- А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – №4. – С. 3-34.
88. Матюк, В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального двухполярного импульсного намагничивания / В.Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – №4. – С. 20-45.
89. Матюк, В.Ф. Влияние температур закалки и отпуска на структуру и магнитные свойства инструментальных углеродистых сталей / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак, З.М. Короткевич, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – №1. – С. 25-49.
90. Лаборатория магнитных методов контроля [Электронный ресурс] // ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси. – Режим доступа: <http://www.iaph.bas-net.by/structure/lab6.html>
91. Пат. RU 2186381 С1 РФ, МПК G01N27/72, G01R33/12. Устройство для измерения коэрцитивной силы магнитных материалов / Безлюдько Г.Я., Волохов С.А., Косовский Д.И., Мужичкий В.Ф., Соболев Н.В., Сухотин Е.Г.; заявитель и патентообладатель ЗАО "Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО "Спектр" – № 2001110302/28; заявл. 16.04.2001; опубл. 27.07.2002, Бюл. № 17. – 11 с.: ил.
92. Безлюдько, Г.Я. Коэрцитиметрия как основной метод неразрушающего контроля усталости и как приоритетный метод в диагностическом наборе / Г.Я. Безлюдько, Е.И. Елкина, Р.Н. Соломаха, Б.Е. Попов // Сборник материалов 10й Европейской конференции по неразрушающему контролю - ECNDT2010. Москва, Россия. Июнь 7-10. – 2010. – С. 38-39.
93. Мацевитый, В.М. Некоторые закономерности изменения коэрцитивной силы пластичных (незакаленных) сталей при активном растяжении / В.М. Мацевитый, Г.Я. Безлюдько, К.В. Вакуленко, И.Б. Казак, В.В. Карабин // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Технології в машинобудуванні. – 2010. – №25.
94. Мацевитый, В.М. Коэрцитивная сила термоупрочненной стали 14X17H2 послековки и циклического нагружения / В.М. Мацевитый, Г.Я. Безлюдько //

- Сборник материалов 10й Европейской конференции по неразрушающему контролю - ECNDT2010. Москва, Россия. Июнь 7-10. – 2010.
95. Прохоров, А.В. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) уровня накопленных усталостных повреждений при циклических нагрузках в сварных соединениях сталей 09Г2С и ВСтЗсп5 / А.В. Прохоров // Нефтегазовое дело. – 2002. – №1.
 96. Губский, С.А. Контроль напряженного состояния сталей по коэрцитивной силе / Губский С.А., Сухомлин В.И., Волох В.И. // Машинобудовання. – 2014. – №13. С. 6-10.
 97. Курашкин, К.В. Использование результатов ультразвуковых и магнитных исследований для оценки напряжений без разгрузки материала / К.В. Курашкин, В.В. Мишакин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №4(101). – С. 246-255.
 98. Игнатов, А.Г. Оценка напряженного состояния и качества лазерных сварных соединений из стали 40ХН2МА магнитным методом / А.Г. Игнатов, В.И. Криворотов, Р.Ч. Муратов, А.Н. Калинин, В.Н.Шестов // MEGATECH. Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. – 2011. – №4. – С. 8-15.
 99. Левченко, А.М. Исследование методом коэрцитивной силы напряжённого состояния электросварных труб для нефтегазопроводов в процессе их производства / А.М. Левченко, В.И. Криворотов, Р.Ч. Муратов, Д.В. Петров // MEGATECH. Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. – 2011. – №4. – С. 18-25.
 100. Збродов, Н.А. Исследование методом коэрцитивной силы напряжённого состояния газопроводных труб при гидроиспытаниях /Н.А. Збродов, В.И. Криворотов, Р.Ч. Муратов // MEGATECH. Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. – 2011. – №4. – С. 26-32.
 101. Мухина, М.А. Исследование методом коэрцитивной силы напряжённо-деформированного состояния железнодорожных рельсов при испытаниях на

- сжатие / М.А. Мухина, В.И. Криворотов, В.М. Олеков, Р.Ч. Муратов // MEGATECH. Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. – 2011. – №4. – С. 34-39.
102. Скобло Т.С. Коэрцитивная сила как индикатор оценки напряжённо-деформированного состояния профильных изделий / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, М.В. Марченко, А.И. Листопад, Г.Я. Безлюдько // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2009. – №11. – С. 43-46.
103. Пат. 2240879 РФ, МПК В21В28/02. Способ эксплуатации прокатного вала / Зыков П.А., Казюкевич И.Л., Безлюдько Г.Я., Луценко А.Н., Ламухин А.М., Ровкин А.М., Монида В.А., Рослякова Н.Е. Трайно А.И., Тяпаев О.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Северсталь». – № 2003108187/02; заявл. 24.03.03; опубл. 27.11.04.
104. Крутикова, Л.А. Применение магнитной структуроскопии прокатных валков для управления качеством проката / Л.А. Крутикова // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – №3. – С. 21-27.
105. Власовец, В.М. Оценка твердости отливок из стали 60X2H4ГМФ по коэрцитивной силе / В.М. Власовец // Вестник ХНАДУ. – 2010. – №51. – С. 84-84.
106. Максимов, А.Б. Определение твердости изделий из инструментальной стали с помощью коэрцитивной силы [Электронный ресурс] / А.Б. Максимов // Publishing house Education and Science s.r.o. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/11_NPE_2013/Tecnic/8_134458.doc.htm
107. Корнилова, А.В. Методы повышения долговечности рабочих деталей разделительного инструмента для холодной листовой штамповки» / А.В. Корнилова, И.М. Идармачев // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2012. – № 3. – С.41-46.
108. Корнилова, А.В. Возможности магнитных методов для определения повреждаемости материала штампов для ХЛШ / А.В. Корнилова,

- И.М. Идармачев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – №3. – С.35-42.
109. Корнилова, А.В. Некоторые практические аспекты применения магнитных методов неразрушающего контроля и диагностики / А.В. Корнилова, И.М. Идармачев, Тет Паинг, Чжо Заяр // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – №3. – С.50-53.
110. Корнилова, А.В. Методика определения ресурса штампового инструмента с применением магнитных методов неразрушающего контроля и диагностики / А.В. Корнилова, И.М. Идармачев, Тет Паинг, Чжо Заяр // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. – №5. – С.98-104.
111. Kornilova A.V. A Method of Determination of the Service Life of a Die Tool with Application of Magnetic Methods of Nondestructive Control and Diagnostics / A.V. Kornilova, I.M. Idarmachev, Tet Paing, Chzho Zayar // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol. 43, No. 5. – Pp. 439-444.
112. Идармачев, И.М. Повышение долговечности инструмента для холодной листовой штамповки / И.М. Идармачев // Материалы I-го тура студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2012)» Сборник докладов. Факультет Машиностроительных технологий и оборудования. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2012. – С.16-20.
113. Корнилова, А.В. Применение магнитных методов для исследования повреждаемости металла штампов / А.В. Корнилова, И.М. Идармачев // Сборник материалов 4-й международной научно-технической конференции «Научоёмкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении ТМ-2012». – 2012. – С.115-120.
114. Корнилова, А.В. Методы исследования повреждаемости штампов и способы увеличения долговечности штампового инструмента / А.В. Корнилова, И.М. Идармачев // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Достижения и проблемы развития технологий и

- машин обработки металлов давлением», 2013, Краматорск. – 2013. – С.265-270.
115. Карпухин, И.И. Оценка технического состояния конструкций по критерию микроповрежденности / И.И. Карпухин, И.Н. Сильверстов, А.В. Корнилова, И.М. Идармачев // Черная металлургия. – 2013. – №6 (1362). – С.93-98.
116. Корнилова, А.В. Исследование процесса накопления повреждаемости в деталях кузнечно-прессового оборудования и инструмента магнитными методами / А.В. Корнилова, И.М. Идармачев // Материалы международной научно-технической конференции «Современные технологии обработки материалов давлением: моделирование, проектирование, производство», посвященной 70-летию кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением» им. И.А. Норицына, 2013, г. Москва. – 2013. – С.184-188.
117. Карпухин, И.И. Оценка технического состояния конструкций по критерию микроповрежденности / И.И. Карпухин, Сильверстов И.Н., А.В. Корнилова, И.М. Идармачев // Сборник трудов "Неделя металлов в Москве 13-16 ноября 2012". – М.: ОАО АХК ВНИИМЕТМАШ, 2013. – С.207-216.
118. Корнилова, А.В. Повышение долговечности рабочих деталей разделительного инструмента для холодной листовой штамповки» / А.В. Корнилова, И.М. Идармачев // Международный промышленный журнал «Мир Техники и Технологий». – 2013. – №5. – С.48-50.
119. Корнилова, А.В. Исследование скорости накопления повреждаемости в штампах магнитными методами / А.В. Корнилова, И.М. Идармачев // Сборник докладов X-ой Юбилейной Международной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии». – 2013. – С. 22-26.
120. Идармачев, И.М. Диагностика штампового инструмента магнитными методами / И.М. Идармачев // Материалы I-го тура научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2015)» Сборник докладов. Факультет Машиностроительных технологий и оборудования. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2015. – С.71-74.

121. Пат. 2570604 РФ, МПК В21В28/02. Способ определения стойкости рабочих деталей инструмента / Корнилова А.В., Идармачев И.М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН". – Оpubл. 10.12.15.
122. Кузьминов, А.Л. К вопросу обеспечения надежности и безопасности машин и оборудования металлургической промышленности / А.Л. Кузьминов, А.В. Карышев // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 5. – С. 35-38.
123. Пантелеенко, Ф.И. Адаптация разработанной методики оценки состояния металлоконструкций к контролю изделий с наплавленными покрытиями / Ф.И. Пантелеенко, А.С. Снарский // Приборы и методы измерений. – 2012. – №1 (4). – С. 121-126.
124. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др.; Под науч. ред. В.И. Зюзина, А.В. Третьякова. – М.: Металлургия, 1982. – 334 с.
125. Ивлев, Д.Д. Предельное состояние деформированных тел и горных пород / Д.Д. Ивлев, Л.А. Максимова, Р.И. Непершин, Ю.Н. Радаев, С.И. Сенашов, Е.Н. Шемякин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 832 с.
126. Непершин, Р.И. Проектирование технологических процессов в машиностроении: учебное пособие. – М: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2011. – 106 с.
127. Ланской, Е.Н. Элементы расчета деталей и узлов кривошипных прессов / Е.Н. Ланской, А.Н. Банкетов. – М.: Машиностроение, 1966. – 380 с.
128. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
129. Кольцова, Э.М. Численные методы решения уравнений математической физики и химии [Электронный ресурс] / Э.М. Кольцова, Л.С. Гордеев, А.С. Скичко, А.В. Женса. – Электрон. учебник. – Режим доступа: <http://ikt.muctr.ru/html2>, свободный.
130. Druyanov, B.A. Problems of Technological Plasticity / B.A. Druyanov, R.I. Nepershin. – ELSEVIER, Amsterdam, 1994. – 426 с.

131. Ишлинский, А.Ю. Математическая теория пластичности / А.Ю. Ишлинский, Д.Д. Ивлев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 704 с.
132. Джонсон, В. Теория пластичности для инженеров / В. Джонсон, П. Меллор. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
133. Сосёнушкин, Е.Н. Технологические процессы и оборудование обработки пластическим деформированием: Лабораторный практикум / Е.Н. Сосёнушкин. – М.: МГТУ «Станкин», 1999. – 79 с.
134. Томсен, Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш.. – М.: Машиностроение, 1976. – 504 с.
135. Brandon, D.B. Developing mathematical models for computer control // Instrument Society of America (ISA) Journal. – 1959. – V.6, №7.
136. Методы и средства автоматизированного расчёта химико-технологических систем: учеб. пособ. для вузов / Н.В. Кузичкин, С.Н. Саутин, А.Е. Пунин и др. – Л.: Химия, 1987. – 152 с.
137. Голубев, В.О. Реализация алгоритма построения статистической модели объекта по методу Брандона [Электронный ресурс] / В.О. Голубев, Т.Е. Литвинова // Math Designer. – Режим доступа: www.mathdesigner.ru/publications/Метод%20Брандона.pdf
138. ГОСТ 7524-89. Шары стальные мелющие для шаровых мельниц. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1998. – 6 с.
139. Розенберг, Г.С. Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов) / Г.С. Розенберг, В.К. Шитиков, П.М. Брусиловский. – Тольятти, 1994. – 182 с.
140. Социология: Энциклопедия / Сост. А.А. Грицанов, В.Л. Абушенко, Г.М. Евелькин, Г.Н. Соколова, О.В. Терещенко. – Минск: Интерпрессервис; Книжный Дом, 2003. – 1312 с.
141. Доугерти, К. Введение в эконометрику: Учебник. 3-е изд. Пер. с англ. / К. Доугерти. – М.: ИНФРА-М, 2009. – XIV, 402 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Код программы для моделирования штамповки кольцевых поковок на КГШП

PROGRAM DFORG4

DIMENSION FP(150,4),RG2(150,4)

COMMON C(8),fpr,TD,Pi,RP0,XC0

COMMON/C1/ RK,RL,RA,RB,RO,fqu,Cpr,RI,OMo,Cmf

COMMON/C2/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

C

C Штамповка на КГШП кольцевой поковки с перемычкой

C Теория сжатия пластического слоя на участках перемычки и обля.

C Заполнение углов полости штампа и образование обля по

C критерию минимальной силы при течении в углы или в облой.

C Зависимость напряжения текучести от деформации,

C скорости деформации и температуры (Целиков, Зюзин...).

C Кинематика КГШП, "скольжение" двигателя по теореме об

C изменении кинетической энергии с учетом трения в

C шарнирах и упругой деформации пресса.

C Поковка с участками: 1 - перемычка, 2 - кольцо, 3 - облойный мостик

C D1 - внутренний диаметр кольца, мм

C D2 - наружный диаметр кольца, мм

C D3 - наружный диаметр облойного мостика, мм

C H1 - толщина перемычки, мм

C H2 - высота кольца, мм

C H3 - толщина обля, мм

C RI - приведенный момент инерции к оси кривошипа, $\text{кНм} \cdot \text{с}^2$

C OMo - угловая скорость кривошипа перед деформацией заготовки

C OMс - синхронная угловая скорость двигателя пресса, приведенная

- С к кривошипному валу
- С Scr - предельное допускаемое скольжение двигателя прессы
- С Spr - упругая жесткость прессы, кН/мм
- С RK - радиус кривошипа, мм
- С RL - отношение длины шатуна к радиусу кривошипа
- С RA - радиус шарнира шатун-кривошип, мм
- С RB - радиус шарнира шатун-ползун, мм
- С RO - радиус опоры кривошипного вала, мм
- С f_{pr} - коэффициент пластического трения по Прандтлю
- С f_{qu} - коэффициент трения по Кулону в шарнирах и опорах кривошипного вала прессы
- С TZ - начальная температура заготовки, град. С
- С TD - температура штампа вне границы контакта, град. С
- С P_m - максимальная сила штамповки (начальное приближение), кН
- С C(8) - постоянные материала, определяющие напряжение текучести: SG 1- SG0, МПа, 2- T0, град.С, 3- a_1 , 4- a_2 и тепловые постоянные 5 -(сro), 6 - $alfk$ и аппроксимации давления в полости штампа при заполнении углов -7 и на границе с облоем -8
- С A0 - отношение объема облоя к объему поковки
- С S - перемещение ползуна от начального контакта с заготовкой
- С DS - шаг перемещения ползуна - верхней половины штампа
- С ALF - угол поворота кривошипа на участке деформирования заготовки, отсчитываемый от крайнего нижнего положения
- С FP - зависимость силы пластического деформирования P(1) и угловой скорости кривошипа OMEG(2) от S(3) и ALF(4) для N шагов перемещения ползуна
- С RG2 - расчетные данные в узловых точках переменычки: 1- диаметр, 2- температура, 3- напряжение текучести SG, 4- давление DP

C

```
OPEN(2,FILE='DF4INP.DAT',STATUS='OLD')
OPEN(3,FILE='DF4OUT.DAT',STATUS='UNKNOWN')
READ(2,*) D1,D2,D3,H1,H2,H3,A0,Pm
READ(2,*) TZ,TD,fpr,fqu,Cpr,RI,OMo,OMc,Scr
READ(2,*) DS,RK,RL,RA,RB,RO
READ(2,*) C
WRITE(3,1) D1,D2,D3,H1,H2,H3,A0,
*      TZ,TD,fpr,fqu,OMo,OMc,Scr,Cpr,RI
WRITE(3,2) RK,RA,RB,RO,RL,(C(I),I=1,6),C(7),C(8),Pm
Pi=3.141592
Cmf=fqu*(RA*(1.+RL)+RB*RL+RO)
GAM=0.5*ACOS(2.*fpr)
RP0=0.5*(1.+Pi+SIN(2.*GAM))-GAM
XC0=1./COS(GAM)
```

C

C Объем и размеры заготовки

C

```
Z1=D1*D1
Z2=D2*D2
Z3=D3*D3
V0=(1.+A0)*PI*(Z1*(H1-H2)+Z2*H2)/4.
A =4.*V0/(PI*Z2*D2)
CALL SLAB (A,CL)
Z0=D0*D0
CH1=0.66666*(H0*(Z2-Z0)/Z1+(Z2/Z1-1.)*(H2-H1))
CH2=0.66666*Z2/Z1
ES=Pm/Cpr
Sp=H0-H1+ES
CALL PRESS (Sp,OMo,V,ALF)
```

```

Q0=1.+LOG(D0/D1)
IF (D1.LT.H0) THEN
    Q=Q0
ELSE
    Q=Q0+fpr*D1/(3.*H0)
END IF
EPS=Q*V/H0
OMEG=OMo
CALL SIGM (EPS,TZ,SG)
P0=0.001*PI*Q*SG*Z1/4.
FP(1,1)=0.001*PI*Q*SG*Z1/4.
FP(1,2)=OMEG
FP(1,3)=P0/Cpr
FP(1,4)=ALF
N2=120
DD=D1/N2
DJ=0.
DO J=1,N2
    RG2(J,1)=DJ
    RG2(J,2)=TZ
    RG2(J,3)=SG
    IF (D1.LT.H0) THEN
        PR=Q0
    ELSE
        PR=Q0+fpr*(D1-DJ)/H0
    END IF
    RG2(J,4)=SG*PR
    DJ=DJ+DD
END DO

```

С Выдавливание материала из перемычки до
С контакта с границей полости штампа D2

С

S=0.

T0=TZ

OMEG=OMo

AP=0.

AF=0.

S1=H2-H1

H=H0

N1=INT(S1/DS)

DS1=S1/N1

DO I=2,N1

 S=S+DS1

 H=H-DS1

 Sp=Sp-DS1

 CALL PRESS (Sp,OMEG,V,AL)

 Z0=SQRT(1.+LOG(H0/H))

 X0=LOG(Z0)/(H0-H)

 EPS=V*X0

 T2=RG2(N2,2)

 CALL SIGM (EPS,T2,SG)

 T2=T2+SG*DS1*X0/C(5)

 RP=SG*LOG(Z0)

 CALL PROB1 (N2,H,Sp,DS1,F1,OMEG,ALF,RG2,RP)

 DN=RG2(N2,1)

 IF (DN.GT.D1) THEN

 N2=N2-1

 RG2(N2,1)=D1

 RG2(N2,2)=RG2(N2-1,2)

```

      RG2(N2,3)=RG2(N2-1,3)
      RG2(N2,4)=RG2(N2-1,4)
    END IF
    II=I-1
    CALL OMEGA (II,AP,AF,ALF,F1,DS1,Sp,OMEG,FP)
    FP(I,1)=F1
    FP(I,2)=OMEG
    FP(I,3)=S+F1/Cpr
    FP(I,4)=ALF
  END DO
  WRITE(*,7) N1,N2
7 FORMAT(3X,'N1,N2=',2I3)
  PAUSE 1
C
C   Заполнение углов полости штампа и образование обля
C
  DS=0.5*DS
  S2=H-H1
  TC=TZ
  IF (S2.LE.DS) THEN
    N3=1
    DS1=S2
  ELSE
    N3=INT(S2/DS)+1
    DS1=S2/N3
  END IF
  I1=N1+1
  N=N1+N3
  ZL=0.
  N0=0

```

```

IS=0
WRITE(3,25)
25 FORMAT(/3X,'Заполнение углов штампа и выдавливание облоя'//
*5X,'N',7X,'R',9X,'H',8X,'Ho',8X,'Lo',8X,'P'/)
AA=0.5*(H2-H1)
DO I=I1,N
  S=S+DS1
  H=H-DS1
  ZH=H-H1+H3
  Sp=Sp-DS1
  CALL PRESS (Sp,OMEG,V,AL)
  IF (ZL.EQ.0.) THEN
    AA=AA-0.5*DS1
    CC=(CH1-CH2*S)/AA
    RR=0.75*D1*(SQRT(1.+CC)-1.)
    RL1=0.5*(D2-D1)-RR
    BET=ATAN(0.5*AA/RR)
  END IF
  RL1=0.5*(D2-D1)-RR
  X1=D1*(H2-H1-2.*RR)
  X2=D2*(H2-H3)+RL1*(D2-0.5*RL1)
  X3=0.25*(Z2-Z1)*(H+H2-H1)
  X4=RR*RR*(D1+0.33333*RR)
  X0=(X1+X2)/(X3-X4)
  DT=(ALF-AL)/OMEG
  T2=T2-(DT/C(5))*C(6)*(T2-TD)*X0
  IF (RR.GT.1.) THEN
    CALL PRES1 (GAM,RR,RL1,T2,V,DT,Q1,SG1)
  ELSE
    Q1=1.E+03

```

```

END IF
A1=0.5*(D2-D1-H)
CALL PRES2 (H,A1,ZL,T2,T23,V,DT,Q2,RP1,RP2,SG2,SG3)
X1=H*(2.*D1+H)*(RP2*SG3+SG2)/(Z2-Z1)
X2=4.*AA*(D2-A1)*Q2*SG3/(Z2-Z1)
Q12=RP1*SG3+X1+X2
Q11=Q1*SG1
X2=(Z2-Z1)*(H+H2-H1)-4.*RR*RR*(D1+0.3333*RR)
IF (Q11.LT.Q12) THEN

```

C

C Заполнение углов штампа

C

```

    IF (ZL.EQ.0.) THEN
        EPS=V*Q1/H
        CALL SIGM (EPS,T2,SG)
        X1=(Z2-Z1)*Q1*SG1+Z2*RP2*SG
        T2=T2+(DS1/C(5))*X1/X2
        CALL SIGM (EPS,T2,SG)
        F3=0.
    ELSE
        Q11=Q12
        Q1=Q11/SG1
        del=0.1
        CALL RLPR1 (DS1,H,Q1,RR,ZL,RL1,5,del)
        IF (RR.LE.0.8) THEN
            PAUSE 'Предельный радиус заполнения угла'
        END IF
        CALL PRES3 (H,ZL,T23,T3,V,DT,Q4,SG4)
        DF=D2+2.*ZL
        IF (DF.GT.D3) DF=D3
    
```

F3=0.001*PI*(DF*DF-Z2)*Q4*SG4/4.

END IF

F2=0.001*PI*Q11*(Z2-Z1)/4.

IF (Sp.LE.DS1) THEN

T3=T2

N0=I

GO TO 22

END IF

IF (ZL.EQ.0.) THEN

RP=SG*LOG(D2/D1)

ELSE

RP=RP2*SG2

END IF

CALL PROB1 (N2,H,Sp,DS1,F1,OMEG,ALF,RG2,RP)

ELSE

C

C Выдавливание в облой

C

F2=0.001*PI*Q12*(Z2-Z1)/4.

X1=Q12+Z1*RP2*SG3

T2=T2+(DS1/C(5))*X1/X2

ZH=H-H1+H3

DF0=D2+2.*ZL

IF (DF0.GT.D3) DF0=D3

ZL=ZL+0.25*DS1*DF0/ZH

IF (ZL.GT.1.E-4) THEN

CALL PRES3 (H,ZL,T23,T3,V,DT,Q4,SG4)

DF=D2+2.*ZL

IF (DF.GT.D3) DF=D3

F3=0.001*PI*(DF*DF-Z2)*Q4*SG4/4.

```

        ELSE
            ZL=0.
            F3=0.
        END IF
        RP=RP2*SG2
        IF (Sp.LE.DS1) THEN
            N0=I
            GO TO 22
        END IF
        CALL PROB1 (N2,H,Sp,DS1,F1,OMEG,ALF,RG2,RP)
    END IF
    FS=F2+F3
    FF=FS+F1
    DN=RG2(N2,1)
    IF (DN.GT.D1) THEN
        N2=N2-1
        RG2(N2,1)=D1
        RG2(N2,2)=T2
        RG2(N2,3)=RG2(N2-1,3)
        RG2(N2,4)=RG2(N2-1,4)
    END IF
    WRITE(3,14) I,RR,H,ZH,ZL,FF
14 FORMAT(3X,I4,1X,1P5E10.3)
    II=I-1
    CALL OMEGA (II,AP,AF,ALF,FF,DS1,Sp,OMEG,FP)
22 CONTINUE
    FP(I,1)=FF
    FP(I,2)=OMEG
    FP(I,3)=S+FF/Cpr
    FP(I,4)=ALF

```

```

END DO
20 CONTINUE
DO I=1,N2
    RG2(I,1)=0.5*RG2(I,1)
END DO
DEL=FF/Cpr
WRITE(3,3) FF,DEL,T2,T3,D0,H0,RR,S
WRITE(3,4) ((RG2(I,J),J=1,4),I=1,N2)
WRITE(3,5)
WRITE(3,6) ((FP(I,J),J=1,4),I=1,N)
10 CLOSE (2)
CLOSE (3)
STOP
1 FORMAT(//3X,'Штамповка на КГШП поковки кольца '//
* 3X,'D1,D2,D3=',3F7.2/3X,'H1,H2,H3=',3F7.2/3X,'Ao=',
* F5.3,2X,'TZ,TD=',2F7.2,2X,'fpr,fqu=',2F4.2/
* 3X,'OMo,OMc,Scr=',3F6.3,2X,'Cpr,RI=',1P2E10.3)
2 FORMAT(3X,'RK,RA,RB,RO,RL=',4F7.2,F4.2/3X,'Cm=',1P6E10.3/
* 3X,'Cq=',1P2E10.3/3X,'Pm=',1PE10.3//)
3 FORMAT(//3X,'Pmax=',1PE10.3,2X,'DEL=',1PE10.3,2X,'T2=',1PE10.3,
*2X,'T3=',1PE10.3/3X,'D0=',1PE10.3,2X,'H0=',1PE10.3,2X,'RR=',
*1PE10.3,2X,'S=',1PE10.3//3X,'Распределения температуры '
*'напряжения текучести'/3X,'и давления по радиусу перемычки'
*//8X,'R',8X,'T',8X,'SG',8X,'Pr'/)
4 FORMAT(3X,1P4E10.3)
5 FORMAT(//9X,'P',7X,'OMEG',9X,'Se',9X,'ALF'/)
6 FORMAT(3X,1P4E11.3)
END

```

```

SUBROUTINE PROB1 (N2,H,Sp,DS,F1,OMEG,AL0,RG2,RP)

```

```
DIMENSION RG2(150,4)
COMMON C(8),fpr,TD,Pi,RP0,XC0
COMMON/C2/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3
```

C

C Температура, давление, сила при сжатии перемишки

C

```
J=N2
DO WHILE (J.GT.1)
  CALL TEMPR (J,N2,H,Sp,DS,OMEG,AL0,RG2)
  DJ=RG2(J,1)
  J=J-1
END DO
DN=RG2(N2,1)
IF (DN.GT.D1) N2=N2-1
CALL PRESF (N2,H,F1,RG2,RP)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE OMEGA (I1,AP,AF,ALF,FP12,DS,Sp,OMEG,FP)
DIMENSION FP(150,4)
COMMON/C1/ RK,RL,RA,RB,RO,fqu,Cpr,RI,OMo,Cmf
```

C

C Работа и угловая скорость кривошипа OMEG

C

```
AP=AP+0.5*(FP12+FP(I1,1))*DS
AE=0.5*FP12*FP12/Cpr
CALL PRESS (Sp,OMEG,V,ALF)
DAL=FP(I1,4)-ALF
AF=AF+Cmf*0.5*(ALF+FP(I1,4))*DAL
AA=Ap+AE+AF
```

```
OMEG=SQRT(OMo*OMo-0.001*2.*AA/RI)
```

```
CALL PRESS (Sp,OMEG,V,ALF)
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
SUBROUTINE PRESS (Sp,OMEG,V,ALF)
```

```
COMMON/C1/ RK,RL,RA,RB,RO,fqu,Cpr,RI,OMo,Cmf
```

```
C
```

```
C Угол поворота кривошипа ALF и скорость ползуна
```

```
C V в зависимости от Sp и OMEG
```

```
C
```

```
X0=Sp/RK
```

```
IF (X0.GT.0.015) THEN
```

```
    Z0=1.+RL*RL
```

```
    Z1=(SQRT(Z0+2.*RL*(1.-X0))-1.)/RL
```

```
    ALF=ACOS(Z1)
```

```
ELSE
```

```
    IF (X0.GT.0.) THEN
```

```
        ALF=SQRT(2.*X0/(1.+RL))
```

```
    ELSE
```

```
        ALF=0.
```

```
    END IF
```

```
END IF
```

```
V=OMEG*RK*(SIN(ALF)+0.5*RL*SIN(2.*ALF))
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
SUBROUTINE SIGM (EPS,T,SGS)
```

```
COMMON C(8),fpr,TD,Pi,RP0,XC0
```

```
C
```

C Напряжение текучести SGS в зависимости от
C скорости деформации EPS и температуры T
C

$$XT=(T/C(2))-1.$$

$$A1=C(3)$$

$$A2=C(4)$$

$$Z1=EPS**A1$$

$$Z2=EXP(A2*XT)$$

$$SGS=C(1)*Z1*Z2$$

RETURN

END

SUBROUTINE TEMPR (J,N2,H,Sp,DS,OMEG,AL0,RG2)

DIMENSION RG2(150,4)

COMMON C(8),fpr,TD,Pi,RP0,XC0

COMMON/C2/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

C

C Температура и напряжение текучести в узловой
C точке J полотна, интегрировании уравнения теплового
C баланса методом Рунге-Кутты второго порядка

C

$$DJ=RG2(J,1)*SQRT(1.+DS/H)$$

$$J1=J$$

$$R0=0.5*RG2(J1,1)$$

$$R1=0.5*DJ$$

$$X0= H-DS$$

$$S0=Sp-DS$$

$$DI= RG2(J1,1)$$

$$T0= RG2(J1,2)$$

$$SG0=RG2(J1,3)$$

```

CP0=RG2(J1,4)
CALL PRESS (Sp,OMEG,V1,ALF)
DT=(AL0-ALF)/OMEG
CALL PRESS (S0,OMEG,V0,ALF)
Z1=CP0+SG0*0.25*fpr*DI/X0
Z2=2.*C(6)*(T0-TD)
F0=(Z1*DS-Z2*DT)/(X0*C(5))
T1=T0+F0
EPS=(V1*CP0)/(H*SG0)
CALL SIGM (EPS,T1,SG1)
U1=SG1*(1.+2.*fpr*(R1-0.5*DJ)/H)
U0=SG0*(1.+2.*fpr*(R0-0.5*DI)/X0)
RP=CP0*U1/U0
Z1=RP+SG1*0.25*fpr*DJ/H
F1=(Z1*DS-Z2*DT)/(H*C(5))
T1=T0+0.5*(F0+F1)
EPS=(V1*RP)/(H*SG1)
CALL SIGM (EPS,T1,SGS)
RG2(J,1)=DJ
RG2(J,2)=T1
RG2(J,3)=SGS
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE PRESF (N2,H,F1,RG2,RP)
DIMENSION RG2(150,4),RI(150)
COMMON C(8),fpr,TD,Pi,RP0,XC0
COMMON/C2/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

```

C

C Давление в узловых точках перемычки

C и сила F1 на участке перемычки

C

RI(1)=0.

DO J=2,N2

SG=0.5*(RG2(J,3)+RG2(J-1,3))

RI(J)=RI(J-1)+SG*(RG2(J,1)-RG2(J-1,1))

END DO

DO J=1,N2

RG2(J,4)=RG2(J,3)+RP+fpr*(RI(N2)-RI(J))/H

END DO

FP=0.

DO J=2,N2

ZP=0.5*(RG2(J,4)+RG2(J-1,4))

ZD=0.5*(RG2(J,1)+RG2(J-1,1))

DR=0.5*(RG2(J,1)-RG2(J-1,1))

FP=FP+ZP*ZD*DR

END DO

F1=0.001*PI*FP

RETURN

END

SUBROUTINE PRES1 (GAM,RR,RL1,T2,V,DT,Q1,SG1)

COMMON C(8),fpr,TD,Pi,RP0,XC0

COMMON/C2/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

C

C Среднее давление Q1 и напряжение текучести SG1

C при заполнении угла радиуса RR в полости штампа

C при температуре жесткой зоны T2

C

Z0=RR/COS(GAM)

```

IF (RL1.LE.Z0) THEN
  X1=0.25*(D2*D2-D1*D1)
  X2=RL1*(D2-RL1)
  Q1=RP0*X2/X1
  EPS=RP0*V/RL1
ELSE
  X0=RP0*XC0*(XC0+(D2-2.*RL1)/RR)
  XD=D2/RR
  XL=RL1/RR
  X1=XL*(XD-XL)
  X2=(RP0-C(7)*LOG(XC0))*(XL-XC0)*(XD-XL+XC0)
  X3=XL*LOG(XL)
  X4=XC0*LOG(XC0)
  X5=0.5*(XC0*XC0-XL*XL)
  X3=C(7)*((XD-2.*XL)*(X3-X4+XC0-XL)+XL*X3-XC0*X4+X5)
  Q0=(X0+X2+X3)/X1
  X1=0.25*(D2*D2-D1*D1)
  X2=RL1*(D2-RL1)
  Q1=Q0*X2/X1
  EPS=0.5*Q0*V/RR
END IF
CALL SIGM (EPS,T2,SG)
T=T2+(DT/C(5))*SG*EPS
CALL SIGM (EPS,T,SG1)
RETURN
END

SUBROUTINE PRES2 (H,AA,ZL,T2,T23,V,DT,Q2,RP1,RP2,SG2,SG3)
COMMON C(8),fpr,TD,Pi,RP0,XC0
COMMON/C2/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

```

С
С Давления Q0,RP1,RP2 и напряжения текучести SG2,SG3
С при пластическом течении в средней части полости
С штампа и в облой при температуре жесткой зоны T2
С T23 - температура на границе с облоем
С

$$h_o = H + H_3 - H_1$$

IF (ZL.EQ.0.) THEN

$$RP1 = 0.$$

ELSE

$$RP1 = 2. * f_{pr} * ZL / h_o$$

END IF

$$X1 = AA / h_o$$

$$X2 = D2 / h_o$$

$$RP2 = C(8) * LOG(2. * X1)$$

$$X3 = X1 * (X2 - X1)$$

$$X4 = 0.5 * (X2 - 0.5)$$

$$X5 = (1. + C(8) * 0.69315) * (X1 - 0.5) * (X2 - X1 - 0.5)$$

$$X6 = X2 * (X1 * (LOG(X1) - 1.) + 0.8466)$$

$$X7 = X1 * X1 * (LOG(X1) - 0.5) + 0.2983$$

$$X6 = C(8) * (X6 - X7)$$

$$Q2 = (X4 + X5 + X6) / X3$$

$$EPS = 0.5 * Q2 * V / h_o$$

CALL SIGM (EPS,T2,SG)

$$T23 = T2 + (DT / C(5)) * SG * EPS$$

CALL SIGM (EPS,T23,SG3)

$$EPS = V / H$$

CALL SIGM (EPS,T2,SG)

$$T = T2 + (DT / C(5)) * SG * EPS$$

CALL SIGM (EPS,T,SG2)

RETURN

END

SUBROUTINE PRES3 (H,ZL,T23,T3,V,DT,Q4,SG4)

COMMON C(8),fpr,TD,Pi,RP0,XC0

COMMON/C2/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

C

C Среднее давление Q4, напряжение текучести SG4

C и температура T3 облоя длиной ZL

C

ho=H+H3-H1

Do=D2+2.*ZL

IF (Do.GT.D3) THEN

 D=D3

ELSE

 D=Do

END IF

X1=D**3-D2**3

X2=D**2-D2**2

Q4=1.+fpr*(D-0.6667*X1/X2)/ho

EPS=Q4*V/ho

CALL SIGM (EPS,T23,SG)

T3=T23+(DT/C(5))*(SG*EPS-2.*C(6)*(T23-TD)/ho)

CALL SIGM (EPS,T3,SG4)

T3=T23+(DT/C(5))*(SG4*EPS-2.*C(6)*(T3-TD)/ho)

CALL SIGM (EPS,T3,SG4)

RETURN

END

SUBROUTINE RLPR1 (DS,H,Q1,RR,ZL,RL,N,del)

COMMON C(8),fpr,TD,Pi,RP0,XC0

COMMON/C2/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

C

C Длина границы контакта RL, радиус заполнения

C угла венца RR и длина облоя ZL при заданном

C безразмерном давлении Q1 в жесткой зоне венца

C Метод Ньютона, N итераций с шагом del

C

R0=RR

DO I=1,N

 X0=RR

 CALL FUNC(Q1,X0,F0,RL)

 X1=X0+del

 CALL FUNC(Q1,X1,F1,RL)

 RR=X0-del*F0/(F1-F0)

 IF (RR.LT.0.5) THEN

 RR=0.5

 GO TO 3

 END IF

END DO

3 CONTINUE

ZH=H-H1+H3

X1=D2+2.*ZL

IF (X1.GT.D3) X1=D3

X2=D1*(R0*R0-RR*RR)

X3=0.66667*(R0**3-RR**3)

ZL=ZL+(0.25*X1*X1*DS/X1-(X2+X3)/X1)/ZH

IF (RR.LT.0.2) RR=0.2

RETURN

END

```

SUBROUTINE FUNC(Q,RR,F,RL)
COMMON C(8),fpr,TD,Pi,RP0,XC0
COMMON/C2/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

```

C

C Функция $F=Q-Q1(RR)$, Q - заданное безразмерное

C давление на жесткую область в полости штампа

C

```

RL=0.5*(D2-D1)-RR
X0=RP0*XC0*(XC0+(D2-2.*RL)/RR)
XD=D2/RR
XL=RL/RR
X1=XL*(XD-XL)
X2=(RP0-C(7)*LOG(XC0))*(XL-XC0)*(XD-XL+XC0)
X3=XL*LOG(XL)
X4=XC0*LOG(XC0)
X5=0.5*(XC0*XC0-XL*XL)
X3=C(7)*((XD-2.*XL)*(X3-X4+XC0-XL)+XL*X3-XC0*X4+X5)
Q0=(X0+X2+X3)/X1
X1=0.25*(D2*D2-D1*D1)
X2=RL*(D2-RL)
F=Q-Q0*X2/X1
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE SLAB (A,CL)
COMMON/C2/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

```

C

C Размеры заготовки $D0,H0$ по условию контакта

C с дном и стенкой полости штампа при свободном

C заполнении полости при перемещении штампа H2-H1

C CL- длина контакта плоского торца заготовки с

C дном полости штампа

C

$$C=(D1*D1)/(D2*D2)$$

$$B=(H2-H1)/D2$$

$$D0=0.5*(D1+D2)/D2$$

$$X=A/(D0*D0)$$

$$I=0$$

1 CONTINUE

$$Z1=X/(X-B)$$

$$Z2=LOG(Z1)$$

$$FX=X*(1.-C*Z2)-A$$

$$Z0=ABS(FX)$$

IF (Z0.GT.1.E-04) THEN

$$DF=1.-C*(1.+Z2-Z1)$$

$$X1=X-FX/DF$$

$$I=I+1$$

$$X=X1$$

IF (I.EQ.5) THEN

 WRITE(*,2) I,X1,FX

 PAUSE 'SLAB'

 RETURN

END IF

GO TO 1

END IF

$$H0=D2*X$$

$$D0=D2*SQRT(A/X)$$

$$H=H0-(H2-H1)$$

$$Z0=LOG(H0/H)$$

```
DA=D1*SQRT(1.+Z0)
CL=0.5*(D2-DA)
RETURN
2 FORMAT(3X,'I,X,F=',I2,1P2E10.3)
3 FORMAT(3X,'I,D0,H0,DA,D2,CL=',I2,1P5E10.3)
END
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

Код программы для моделирования штамповки кольцевых поковок на гидравлической машине

```
PROGRAM DFORG5
DIMENSION FP(150,2),RG2(100,3)
COMMON C(4),fpr,Pi,RP0,XC0
COMMON/C1/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3
C
C Изотермическая штамповка кольцевой поковки на гидравлической
C машине. Сжатие пластического слоя на участках перемычки и облоя.
C Заполнение углов полости штампа и образование облоя по
C критерию минимальной силы при течении в углы или в облой.
C Зависимость напряжения текучести от скорости деформации.
C Поковка с участками: 1 - перемычка, 2 - кольцо, 3 - облойный мостик
C D1 - внутренний диаметр кольца, мм
C D2 - наружный диаметр кольца, мм
C D3 - наружный диаметр облойного мостика, мм
C H1 - толщина перемычки, мм
C H2 - высота кольца, мм
C H3 - толщина облоя, мм
C V1 - скорость траверсы при выдавливании в полость штампа, мм/с
C V2 - скорость траверсы при заполнении углов полости штампа
C и выдавливании в облой, мм/с
C fpr - коэффициент пластического трения по Прандтлю
C C(4) - постоянные материала, определяющие напряжение
C текучести SG 1- SG0, МПа, 2- n, и аппроксимации давления
C в полости штампа при заполнении углов -3 и на границе
C с облоем -4
```

- C A0 - отношение объема облоя к объему поковки
- C S - перемещение траверсы от начального контакта с заготовкой
- C DS - шаг перемещения траверсы - верхней половины штампа
- C FP - зависимость силы деформирования P(1) от S(2)
- C для N шагов перемещения траверсы
- C RG2 - расчетные данные в узловых точках перемычки
- C 1- диаметр, 2- напряжение текучести SG, 2- давление p

C

```

OPEN(2,FILE='DF5INP.DAT',STATUS='OLD')
OPEN(3,FILE='DF5OUT.DAT',STATUS='UNKNOWN')
READ(2,*) D1,D2,D3,H1,H2,H3,A0,fpr,DS
READ(2,*) V1,V2,C
WRITE(3,1) D1,D2,D3,H1,H2,H3,A0,fpr,DS
WRITE(3,2) V1,V2,(C(I),I=1,4)

```

C

```

Pi=3.141592
GAM=0.5*ACOS(2.*fpr)
RP0=0.5*(1.+Pi+SIN(2.*GAM))-GAM
XC0=1./COS(GAM)

```

C

- C Объем и размеры заготовки

C

```

Z1=D1*D1
Z2=D2*D2
Z3=D3*D3
V0=(1.+A0)*PI*(Z1*(H1-H2)+Z2*H2)/4.
A =4.*V0/(PI*Z2*D2)
CALL SLAB (A,CL)
Z0=D0*D0

```

$$CH1=0.66666*(H0*(Z2-Z0)/Z1+(Z2/Z1-1.)*(H2-H1))$$

$$CH2=0.66666*Z2/Z1$$

C

$$Q0=1.+LOG(D0/D1)$$

IF (D1.LT.H0) THEN

$$Q=Q0$$

ELSE

$$Q=Q0+fpr*D1/(3.*H0)$$

END IF

$$EPS=Q*V1/H0$$

CALL SIGM (EPS,SG)

$$FP(1,1)=0.001*PI*Q*SG*Z1/4.$$

$$FP(1,2)=0.$$

$$N2=80$$

$$DD=D1/N2$$

$$DJ=0.$$

DO J=1,N2

$$RG2(J,1)=DJ$$

$$RG2(J,2)=SG$$

IF (D1.LT.H0) THEN

$$PR=Q0$$

ELSE

$$PR=Q0+fpr*(D1-DJ)/H0$$

END IF

$$RG2(J,3)=SG*PR$$

$$DJ=DJ+DD$$

END DO

C

C Выдавливание материала из перемычки до

C контакта с границей полости штампа D2

C

```
S=0.  
S1=H2-H1  
H=H0  
N1=INT(S1/DS)  
DS1=S1/N1  
DO I=2,N1  
    S=S+DS1  
    H=H-DS1  
    Z0=SQRT(1+LOG(H0/H))  
    X0=LOG(Z0)/(H0-H)  
    EPS=V1*Q/((D0/D1)*(D0/D1)*H0-H)  
    CALL SIGM (EPS,SG)  
    RP=SG*LOG(Z0)  
    CALL PROB1 (N2,H,V1,F1,RG2,RP)  
    FP(I,1)=F1  
    FP(I,2)=S  
END DO  
WRITE(*,7) N1,N2  
7 FORMAT(3X,'N1,N2=',2I3)  
PAUSE 1
```

C

C Заполнение углов полости штампа и образование облоя

C

```
DS=0.5*DS  
S2=H-H1  
IF (S2.LE.DS) THEN  
    N3=1  
    DS1=S2  
ELSE
```

```

N3=INT(S2/DS)+1
DS1=S2/N3
END IF
I1=N1+1
N=N1+N3
ZL=0.
WRITE(3,25)
25 FORMAT(/3X,'Заполнение углов штампа и выдавливание обля'//
*5X,'N',7X,'R',9X,'H',8X,'Ho',8X,'Lo',8X,'P'/)
AA=0.5*(H2-H1)
DO I=I1,N
S=S+DS1
H=H-DS1
ZH=H-H1+H3
IF (ZL.EQ.0.) THEN
AA=AA-0.5*DS1
CC=(CH1-CH2*S)/AA
RR=0.75*D1*(SQRT(1.+CC)-1.)
RL1=0.5*(D2-D1)-RR
BET=ATAN(0.5*AA/RR)
END IF
RL1=0.5*(D2-D1)-RR
IF (RR.GT.1.) THEN
CALL PRES1 (GAM,RR,RL1,V2,Q1,SG1)
ELSE
Q1=1.E+03
END IF
A1=0.5*(D2-D1-H)
CALL PRES2 (H,A1,ZL,V2,Q2,RP1,RP2,SG2,SG3)
X1=H*(2.*D1+H)*(RP2*SG3+SG2)/(Z2-Z1)

```

$X2=4.*AA*(D2-A1)*Q2*SG3/(Z2-Z1)$

$Q12=RP1*SG3+X1+X2$

$Q11=Q1*SG1$

IF (Q11.LT.Q12) THEN

C

C Заполнение углов штампа

C

IF (ZL.EQ.0.) THEN

 F3=0.

ELSE

 Q11=Q12

 Q1=Q11/SG1

 del=0.1

 CALL RLPR1 (DS1,H,Q1,RR,ZL,RL1,5,del)

 IF (RR.LE.0.8) THEN

 PAUSE 'Предельный радиус заполнения угла'

 END IF

 CALL PRES3 (H,ZL,V2,Q4,SG4)

 DF=D2+2.*ZL

 IF (DF.GT.D3) DF=D3

 F3=0.001*PI*(DF*DF-Z2)*Q4*SG4/4.

END IF

F2=0.001*PI*Q11*(Z2-Z1)/4.

IF (ZL.EQ.0) THEN

 EPS=V2*Q1/H

 CALL SIGM (EPS,SG)

 RP=SG*LOG(D2/D1)

ELSE

 RP=RP2*SG2

END IF

```

        CALL PROB1 (N2,H,V2,F1,RG2,RP)
ELSE
C
C   Выдавливание в облой
C
        F2=0.001*PI*Q12*(Z2-Z1)/4.
        ZH=H-H1+H3
        DF0=D2+2.*ZL
        IF (DF0.GT.D3) DF0=D3
        ZL=ZL+0.25*DS1*DF0/ZH
        IF (ZL.GT.1.E-4) THEN
                CALL PRES3 (H,ZL,V2,Q4,SG4)
                DF=D2+2.*ZL
                IF (DF.GT.D3) DF=D3
                F3=0.001*PI*(DF*DF-Z2)*Q4*SG4/4.
        ELSE
                ZL=0.
                F3=0.
        END IF
        RP=RP2*SG2
        CALL PROB1 (N2,H,V2,F1,RG2,RP)
END IF
FS=F2+F3
FF=FS+F1
WRITE(3,14) I,RR,H,ZH,ZL,FF
14 FORMAT(3X,I4,1X,1P5E10.3)
        FP(I,1)=FF
        FP(I,2)=S
END DO
20 CONTINUE

```

```

DO I=1,N2
  RG2(I,1)=0.5*RG2(I,1)
END DO
WRITE(3,3) FF,D0,H0,RR,S
WRITE(3,4) ((RG2(I,J),J=1,3),I=1,N2)
WRITE(3,5)
WRITE(3,6) ((FP(I,J),J=1,2),I=1,N)
10 CLOSE (2)
CLOSE (3)
STOP
1 FORMAT(//3X,'Штамповка поковки кольца '//
* 3X,'D1,D2,D3=',3F7.2/3X,'H1,H2,H3=',3F7.2/3X,'Ao=',
* F4.2,2X,'fpr=',F4.2,2X,'dS=',F4.2/)
2 FORMAT(3X,'V1,V2=',2F7.2,2X,'C=',1P4E10.3//)
3 FORMAT(//3X,'Pmax=',1PE10.3,2X,'D0=',1PE10.3,2X,'H0=',1PE10.3,
*2X,'RR=',1PE10.3,2X,'S=',1PE10.3//3X,
*'Напряжение текучести и давление по радиусу перемычки'//8X,
*'R',8X,'SG',8X,'p'/)
4 FORMAT(3X,1P3E10.3)
5 FORMAT(//9X,'F',9X,'S'/)
6 FORMAT(3X,1P2E11.3)
END

```

```

SUBROUTINE PROB1 (N2,H,V,F1,RG2,RP)

```

```

DIMENSION RG2(100,3)

```

```

COMMON C(4),fpr,Pi,RP0,XC0

```

```

COMMON/C1/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

```

C

C Напряжение текучести, давление и сила при сжатии перемычки

C

```

EPS=V/H
CALL SIGM (EPS,SG)
DO J=1,N2
  RG2(J,2)=SG
  RG2(J,3)=SG+RP+fpr*(D1-RG2(J,1))/H
END DO
F1=0.001*PI*D1*D1*(SG*(1.+fpr*D1/(3.*H))+RP)/4
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE SIGM (EPS,SGS)
COMMON C(4),fpr,Pi,RP0,XC0

```

C

C Напряжение текучести SGS в зависимости от

C скорости деформации EPS и температуры T

C

```
A=C(2)
```

```
SGS=C(1)*EPS**A
```

```
RETURN
```

```
END
```

```

SUBROUTINE PRES1 (GAM,RR,RL1,V,Q1,SG1)
COMMON C(4),fpr,Pi,RP0,XC0
COMMON/C1/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

```

C

C Среднее давление Q1 и напряжение текучести SG1

C при заполнении угла радиуса RR в полости штампа

C

```
Z0=RR/COS(GAM)
```

```
IF (RL1.LE.Z0) THEN
```

```

X1=0.25*(D2*D2-D1*D1)
X2=RL1*(D2-RL1)
Q1=RP0*X2/X1
EPS=RP0*V/RL1
ELSE
X0=RP0*XC0*(XC0+(D2-2.*RL1)/RR)
XD=D2/RR
XL=RL1/RR
X1=XL*(XD-XL)
X2=(RP0-C(3)*LOG(XC0))*(XL-XC0)*(XD-XL+XC0)
X3=XL*LOG(XL)
X4=XC0*LOG(XC0)
X5=0.5*(XC0*XC0-XL*XL)
X3=C(3)*((XD-2.*XL)*(X3-X4+XC0-XL)+XL*X3-XC0*X4+X5)
Q0=(X0+X2+X3)/X1
X1=0.25*(D2*D2-D1*D1)
X2=RL1*(D2-RL1)
Q1=Q0*X2/X1
EPS=0.5*Q0*V/RR
END IF
CALL SIGM (EPS,SG1)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE PRES2 (H,AA,ZL,V,Q2,RP1,RP2,SG2,SG3)
COMMON C(4),fpr,Pi,RP0,XC0
COMMON/C1/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

```

C

C Давления Q2,RP1,RP2 и напряжения текучести SG2,SG3

C при пластическом течении в средней части полости

C штампа и в облой

C

ho=H+H3-H1

IF (ZL.EQ.0.) THEN

 RP1=0.

ELSE

 RP1=2.*fpr*ZL/ho

END IF

X1=AA/ho

X2=D2/ho

RP2=C(4)*LOG(2.*X1)

X3=X1*(X2-X1)

X4=0.5*(X2-0.5)

X5=(1.+C(4)*0.69315)*(X1-0.5)*(X2-X1-0.5)

X6=X2*(X1*(LOG(X1)-1.)+0.8466)

X7=X1*X1*(LOG(X1)-0.5)+0.2983

X6=C(4)*(X6-X7)

Q2=(X4+X5+X6)/X3

EPS=0.5*Q2*V/ho

CALL SIGM (EPS,SG3)

EPS=V/H

CALL SIGM (EPS,SG2)

RETURN

END

SUBROUTINE PRES3 (H,ZL,V,Q4,SG4)

COMMON C(4),fpr,Pi,RP0,XC0

COMMON/C1/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

C

C Среднее давление Q4, напряжение текучести SG4 в облое

C

$h_0 = H + H_3 - H_1$

$D_0 = D_2 + 2 \cdot ZL$

IF (D₀.GT.D₃) THEN

 D=D₃

ELSE

 D=D₀

END IF

$X_1 = D^{**3} - D_2^{**3}$

$X_2 = D^{**2} - D_2^{**2}$

$Q_4 = 1. + f_{pr} \cdot (D - 0.6667 \cdot X_1 / X_2) / h_0$

$EPS = Q_4 \cdot V / h_0$

CALL SIGM (EPS,SG₄)

RETURN

END

SUBROUTINE RLPR1 (DS,H,Q1,RR,ZL,RL,N,del)

COMMON C(4),fpr,Pi,RP0,XC0

COMMON/C1/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

C

C Длина границы контакта RL, радиус заполнения

C угла венца RR и длина облоя ZL при заданном

C безразмерном давлении Q1 в жесткой зоне венца

C Метод Ньютона, N итераций с шагом del

C

R0=RR

DO I=1,N

 X0=RR

 CALL FUNC(Q1,X0,F0,RL)

 X1=X0+del

```

CALL FUNC(Q1,X1,F1,RL)
RR=X0-del*F0/(F1-F0)
IF (RR.LT.0.5) THEN
    RR=0.5
    GO TO 3
END IF
END DO
3 CONTINUE
ZH=H-H1+H3
X1=D2+2.*ZL
IF (X1.GT.D3) X1=D3
X2=D1*(R0*R0-RR*RR)
X3=0.66667*(R0**3-RR**3)
ZL=ZL+(0.25*X1*X1*DS/X1-(X2+X3)/X1)/ZH
IF (RR.LT.0.2) RR=0.2
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE FUNC(Q,RR,F,RL)
COMMON C(4),fpr,Pi,RP0,XC0
COMMON/C1/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

```

C

C Функция $F=Q-Q1(RR)$, Q - заданное безразмерное

C давление на жесткую область в полости штампа

C

```

RL=0.5*(D2-D1)-RR
X0=RP0*XC0*(XC0+(D2-2.*RL)/RR)
XD=D2/RR
XL=RL/RR
X1=XL*(XD-XL)

```

```

X2=(RP0-C(3)*LOG(XC0))*(XL-XC0)*(XD-XL+XC0)
X3=XL*LOG(XL)
X4=XC0*LOG(XC0)
X5=0.5*(XC0*XC0-XL*XL)
X3=C(3)*((XD-2.*XL)*(X3-X4+XC0-XL)+XL*X3-XC0*X4+X5)
Q0=(X0+X2+X3)/X1
X1=0.25*(D2*D2-D1*D1)
X2=RL*(D2-RL)
F=Q-Q0*X2/X1
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE SLAB (A,CL)

```

```

COMMON/C1/ D0,D1,D2,D3,H0,H1,H2,H3

```

C

C Размеры заготовки D0,H0 по условию контакта

C с дном и стенкой полости штампа при свободном

C заполнении полости при перемещении штампа H2-H1

C CL- длина контакта плоского торца заготовки с

C дном полости штампа

C

```

C=(D1*D1)/(D2*D2)

```

```

B=(H2-H1)/D2

```

```

D0=0.5*(D1+D2)/D2

```

```

X=A/(D0*D0)

```

```

I=0

```

```

1 CONTINUE

```

```

Z1=X/(X-B)

```

```

Z2=LOG(Z1)

```

```

FX=X*(1.-C*Z2)-A

```

```

Z0=ABS(FX)
IF (Z0.GT.1.E-04) THEN
  DF=1.-C*(1.+Z2-Z1)
  X1=X-FX/DF
  I=I+1
  X=X1
  IF (I.EQ.5) THEN
    WRITE(*,2) I,X1,FX
    PAUSE 'SLAB'
    RETURN
  END IF
  GO TO 1
END IF
H0=D2*X
D0=D2*SQRT(A/X)
H=H0-(H2-H1)
Z0=LOG(H0/H)
DA=D1*SQRT(1.+Z0)
CL=0.5*(D2-DA)
RETURN
2 FORMAT(3X,'I,X,F=',I2,1P2E10.3)
3 FORMAT(3X,'I,D0,H0,DA,D2,CL=',I2,1P5E10.3)
END

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В.

Данные замеров величины коэрцитивной силы штампов ГОШ

1.1 Нижний штамп для поковки «вилка». Материал поковки – 40ХН2МА.
Материал штампа – 5ХНВ.

- Замер 1 (таблица В1). Штамп на стадии механической обработки (рисунок В1).

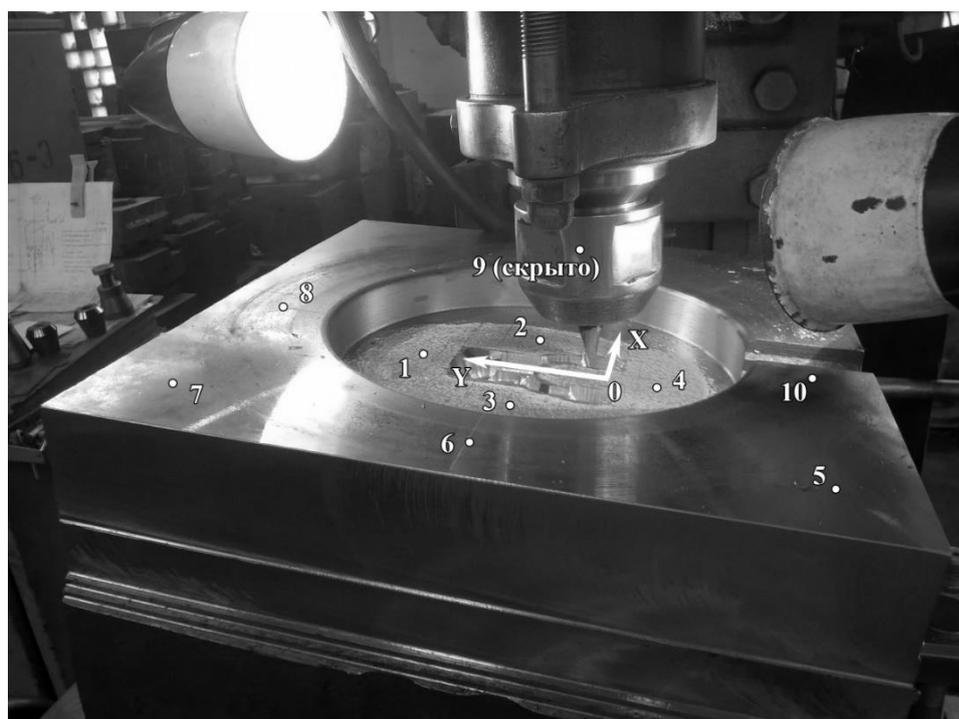


Рисунок В1 – Нижний штамп для поковки «вилка», замер 1

Таблица В1 – Нижний штамп для поковки «вилка», замер 1

№ точки	Результаты измерений H_c , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	798	924	861
2	584	823	704
3	748	646	697
4	798	–	798
5	874	1067	971
6	1008	979	994
7	1214	1272	1243
8	1214	1214	1214
9	1096	1067	1082
10	–	1214	1214
Среднее значение по всем точкам			978

- Замер 2 (таблица В2). Штамп после переточки (рисунок В2). Нарботка с предыдущего замера – 1530 поковок.

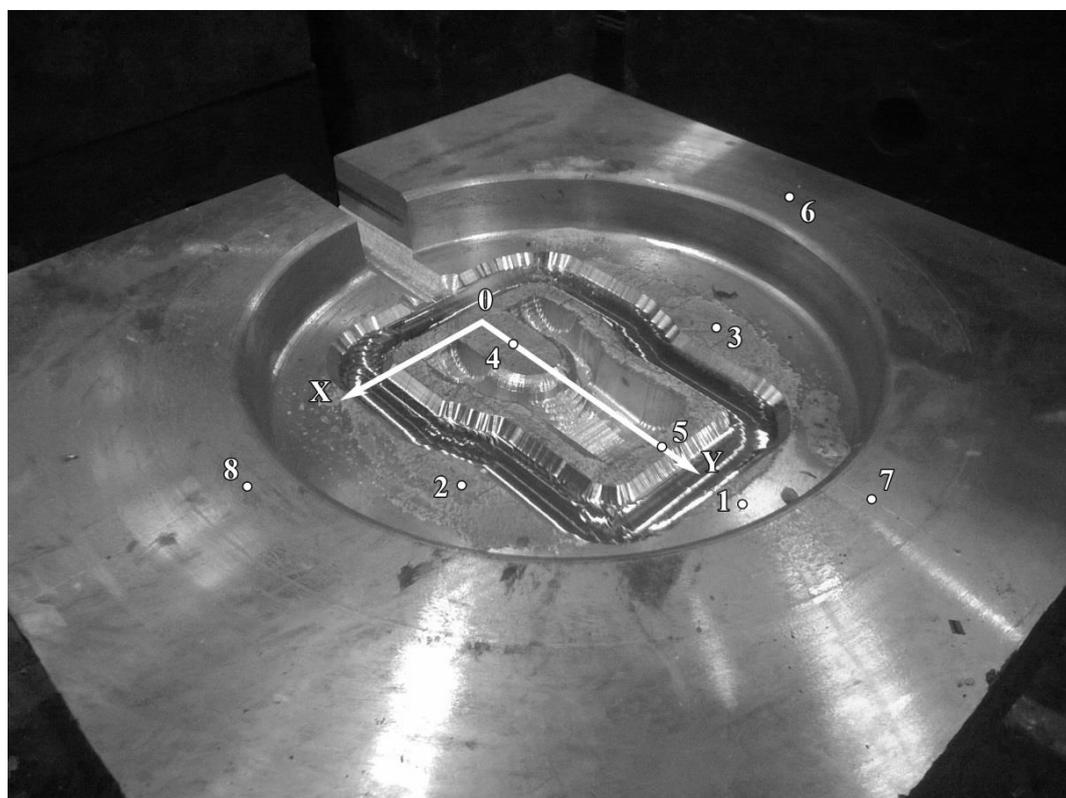


Рисунок В2 – Нижний штамп для поковки «вилка», замер 2

Таблица В2 – Нижний штамп для поковки «вилка», замер 2

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1067	–	1067	332
2	1008	950	979	273
3	1096	979	1038	295
4	950	1008	979	273
5	899	–	899	202
6	1302	1272	1287	332
7	1214	1492	1353	324
8	1184	1243	1214	314
Среднее значение по всем точкам			1102	293

- Замер 3 (таблица В3). Штамп вышел из строя из-за чрезмерной деформации гравюры (рисунок В3). После предыдущего замера отштамповано 1963 поковки.



Рисунок В3 – Нижний штамп для поковки «вилка», замер 3

Таблица В3 – Нижний штамп для поковки «вилка», замер 3

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Твёрдость, НВ
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	181	–	181	310
2	–	439	439	293
3	–	276	276	325
4	460	524	492	300
5	371	–	371	328
6	292	–	292	332
7	874	849	862	338
8	924	1096	1010	319
9	1184	1038	1111	381
10	1184	1096	1140	372
11	1008	979	994	451
12	1243	1067	1155	406
Среднее значение по всем точкам			694	346

1.2 Верхний штамп для поковки «вилка». Материал поковки – 40ХН2МА.

Материал штампа – 5ХНВ.

- Замер 1 (таблица В4). Штамп на стадии мехобработки (рисунок В4).

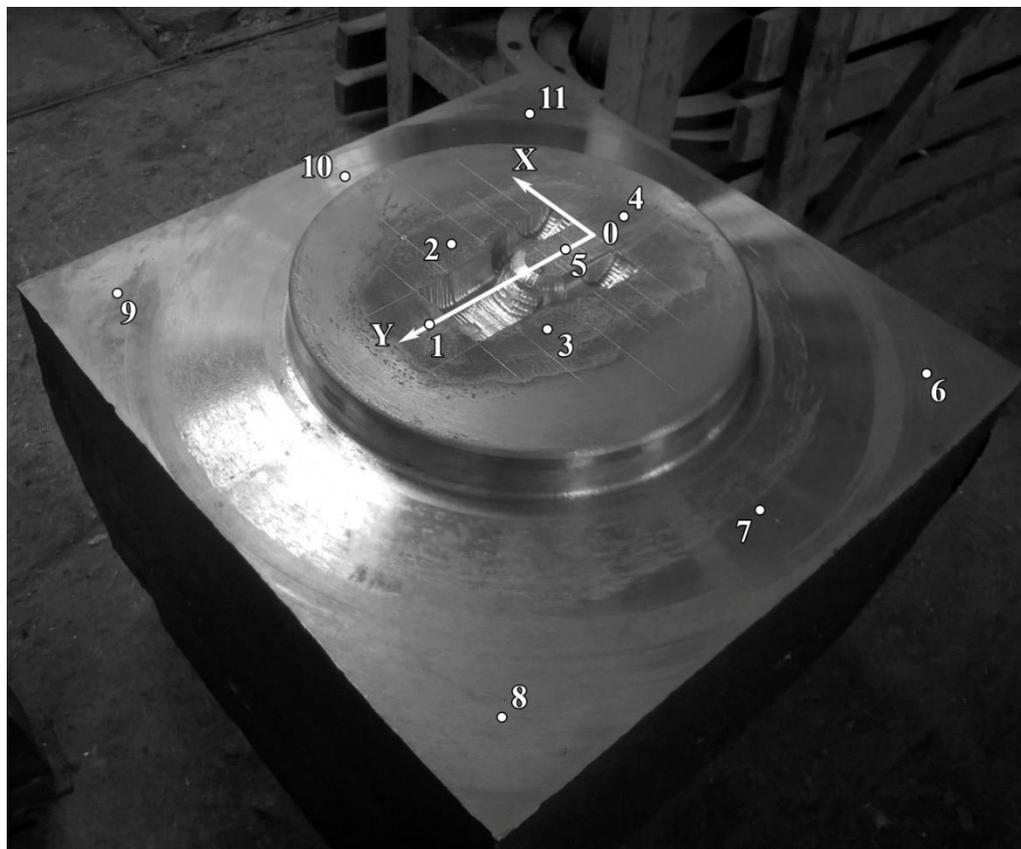


Рисунок В4 – Верхний штамп для поковки «вилка», замер 1

Таблица В4 – Верхний штамп для поковки «вилка», замер 1

№ точки	Результаты измерений Н _c , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1214	1184	1199
2	1272	1096	1184
3	1214	1272	1243
4	1096	1126	1111
5	–	522	522
6	1302	1214	1258
7	1360	1360	1360
8	1214	1214	1214
9	1038	1155	1097
10	1360	1272	1316
	1302	1331	1317
Среднее значение по всем точкам			1165

- Замер 2 (таблица В5). Штамп после переточки (рисунок В5). Нарботка с предыдущего замера – 1530 поковок.

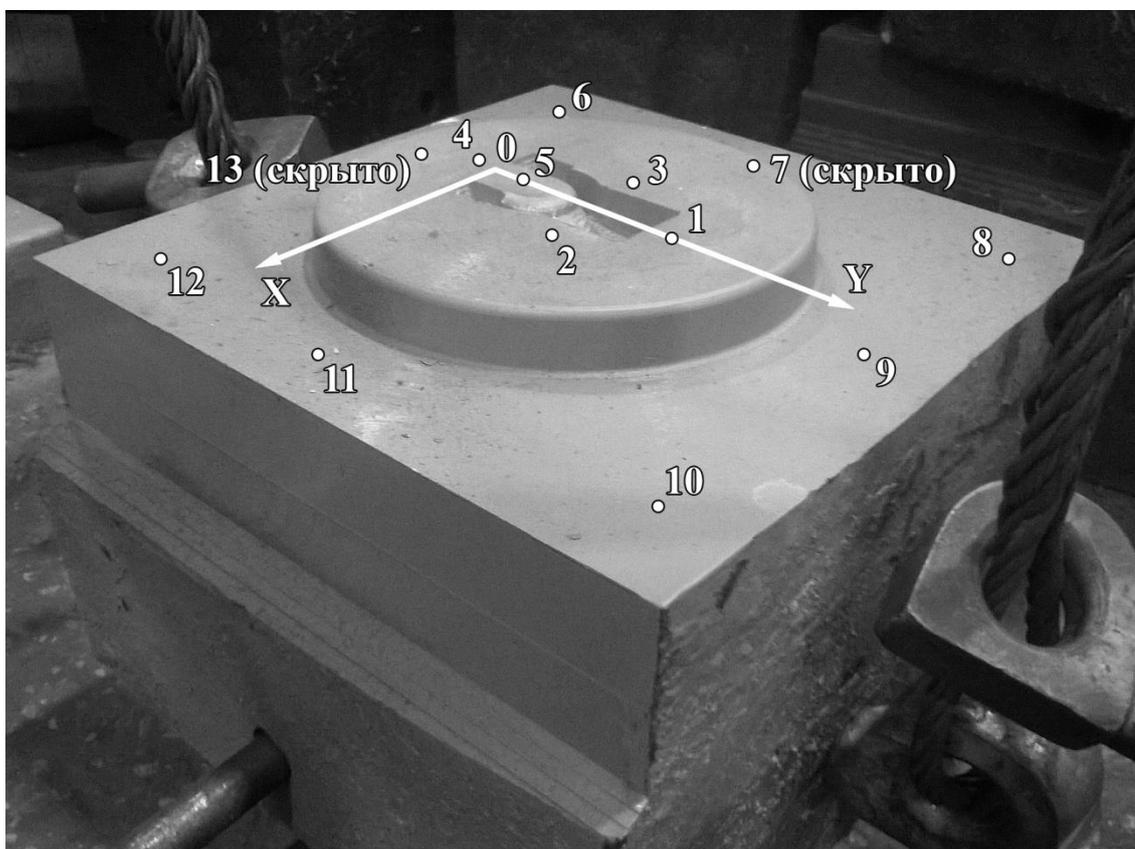


Рисунок В5 – Верхний штамп для поковки «вилка», замер 2

Таблица В5 – Верхний штамп для поковки «вилка», замер 2

№ точки	Результаты измерений Н _c , А/м			Твёрдость, НВ
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	460	481	471	219
2	371	324	348	–
3	403	387	395	–
4	292	418	355	224
5	584	584	584	244
6	522	605	564	–
7	584	605	595	–
8	308	605	457	–
9	564	481	523	–
10	460	481	471	–
11	605	501	553	–
12	564	501	533	–
13	387	501	444	–
Среднее значение по всем точкам			484	229

- Замер 3 (таблица В6). Штамп вышел из строя из-за чрезмерной деформации гравюры (рисунок В6). После предыдущего замера отштамповано 1963 поковки.



Рисунок В6 – Верхний штамп для поковки «вилка», замер 3

Таблица В6 – Верхний штамп для поковки «вилка», замер 3

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Твёрдость, НВ
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	925	481	703	308
2	950	874	912	335
3	823	1038	931	298
4	501	626	564	286
5	722	798	760	298
6	672	646	659	300
7	874	1008	941	356
8	748	748	748	365
9	950	1038	994	351
10	924	899	912	356
Среднее значение по всем точкам			812	325

1.3 Нижний штамп для поковки «вилка». Материал поковки – 40ХН2МА.

Материал штампа – 5ХНМ.

- Замер 1 (таблица В7). Штамп после штамповки 2500 поковок (рисунок В7).

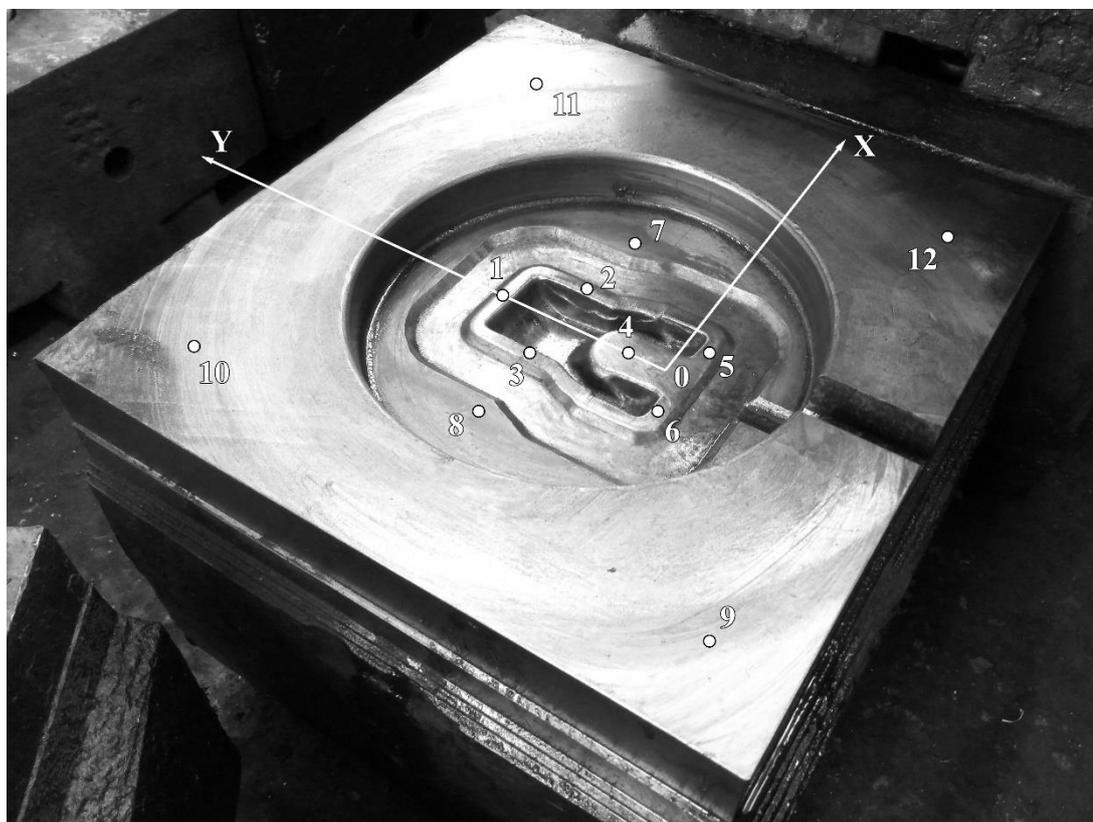


Рисунок В7 – Нижний штамп для поковки «вилка», замер 1

Таблица В7 – Нижний штамп для поковки «вилка», замер 1

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	874	–	874
2	–	439	439
3	–	722	722
4	786	979	882
5	460	–	460
6	460	–	460
7	1243	1126	1185
8	1331	1243	1287
9	1525	1393	1459
10	1331	1525	1428
11	1558	1492	1525
12	1426	1126	1276
Среднее значение по всем точкам			1000

- Замер 2 (таблица В8). Штамп на восстановлении (механическая обработка, рисунок В8).



Рисунок В8 – Нижний штамп для поковки «вилка», замер 2

Таблица В8 – Нижний штамп для поковки «вилка», замер 2

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	928	–	928
2	1096	748	922
3	1038	–	1038
4	1008	–	1008
5	1067	1008	1038
6	1008	950	979
7	1184	1072	1128
8	1360	1426	1393
9	1393	1360	1377
10	950	823	887
Среднее значение по всем точкам			1070

1.4 Верхний штамп для поковки «вилка». Материал поковки – 40ХН2МА.
Материал штампа – 5ХНМ.

- Замер 1 (таблица В9). Штамп после штамповки 2500 поковок (рисунок В9).

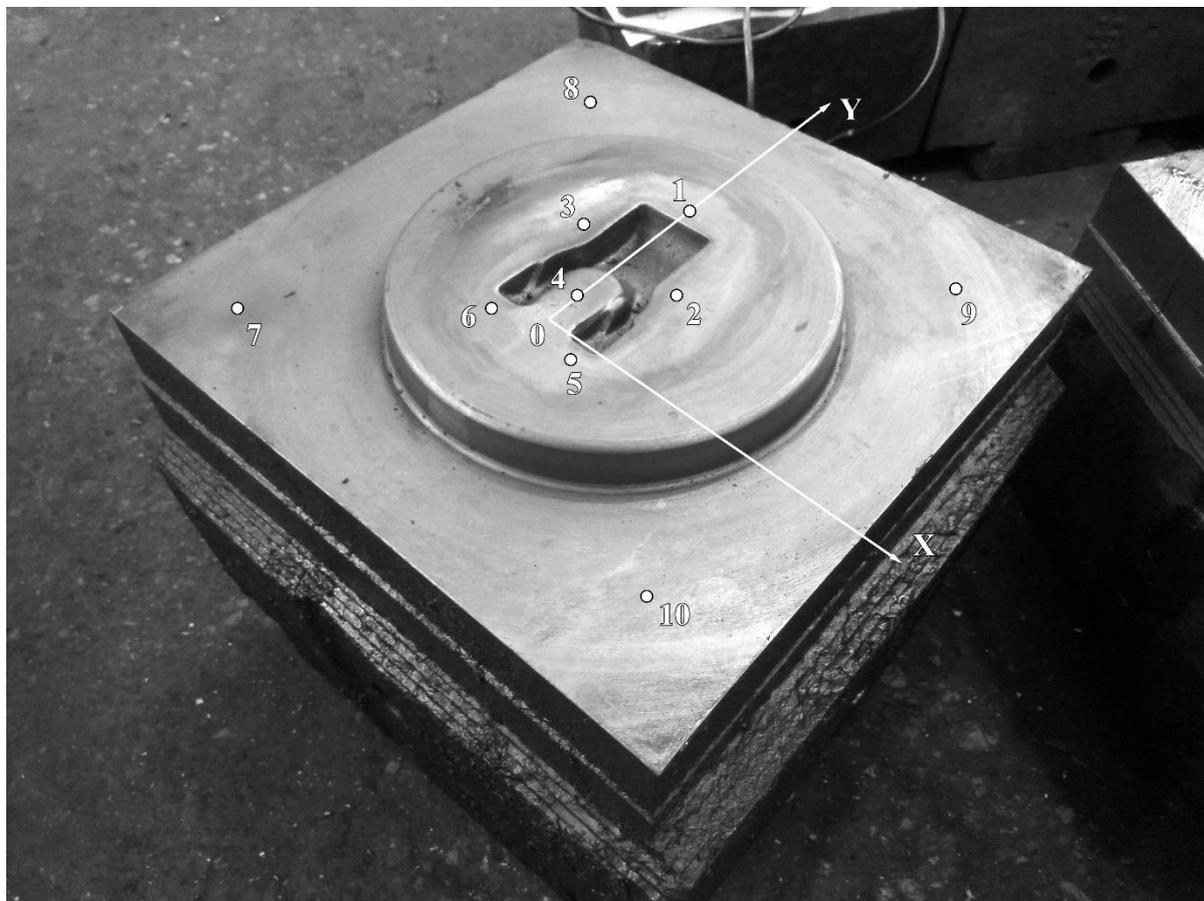


Рисунок В9 – Верхний штамп для поковки «вилка», замер 1

Таблица В9 – Верхний штамп для поковки «вилка», замер 1

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1096	950	1023
2	1126	1214	1170
3	975	1038	1006
4	1067	1008	1038
5	1459	1214	1337
6	1360	1272	1316
7	1272	1243	1258
8	1243	1141	1192
9	1243	1214	1229
10	1302	1272	1287
Среднее значение по всем точкам			1185

- Замер 2 (таблица В10). Штамп на восстановлении (механическая обработка, рисунок В10).

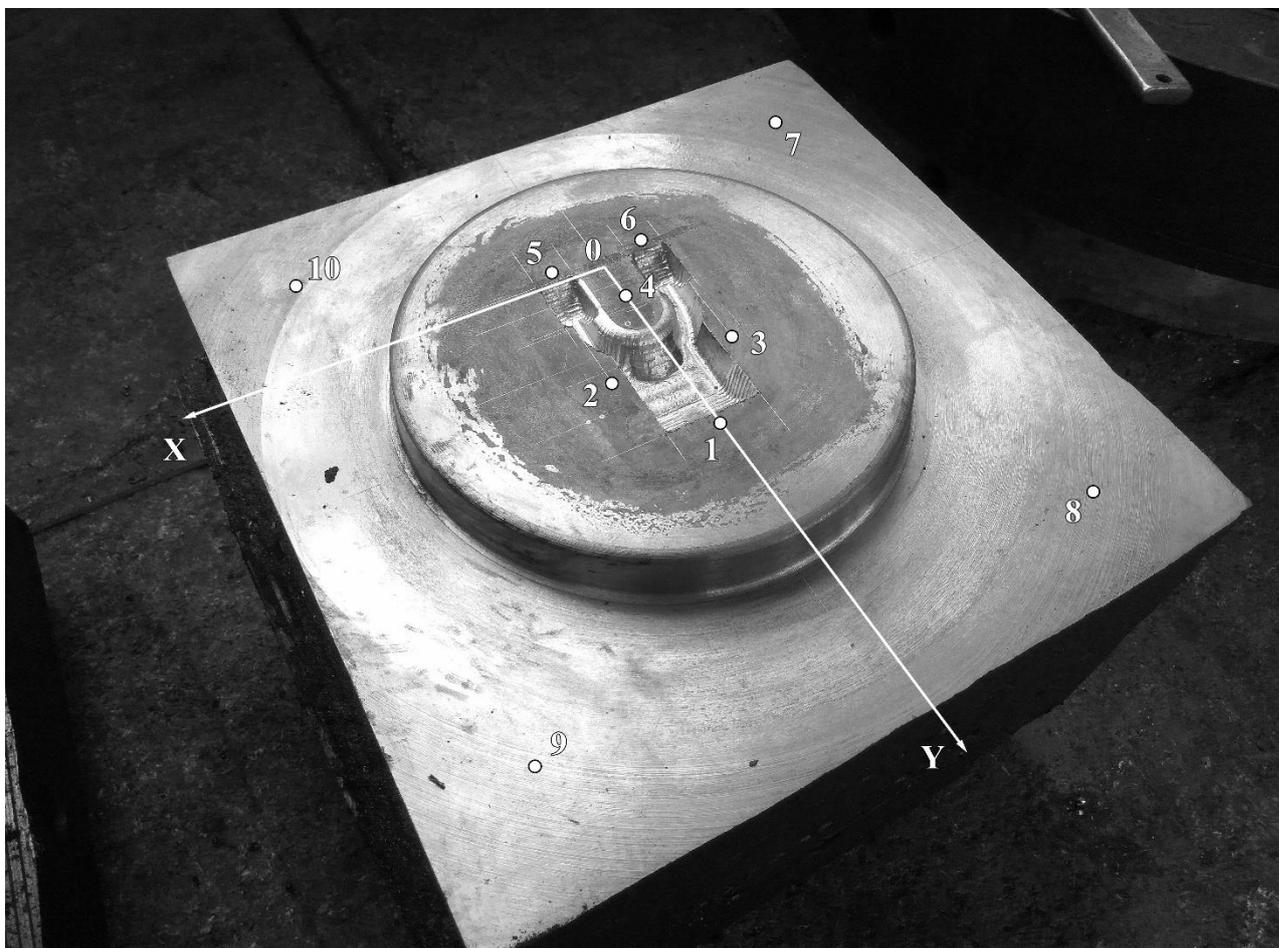


Рисунок В10 – Верхний штамп для поковки «вилка», замер 2

Таблица В10 – Верхний штамп для поковки «вилка», замер 2

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1272	1243	1258
2	1214	1155	1185
3	1214	1243	1229
4	874	748	811
5	1126	1067	1097
6	1214	1126	1170
7	1184	979	1082
8	1067	1067	1067
9	1155	1067	1111
10	1096	1155	1126
Среднее значение по всем точкам			1113

2.1 Верхний штамп для поковки «корпус». Материал поковки – 12Х2НВФА. Материал штампа – 5ХНВ.

- Замер 1 (таблица В11). Штамп после термообработки и окончательной механической обработки (рисунок В11).

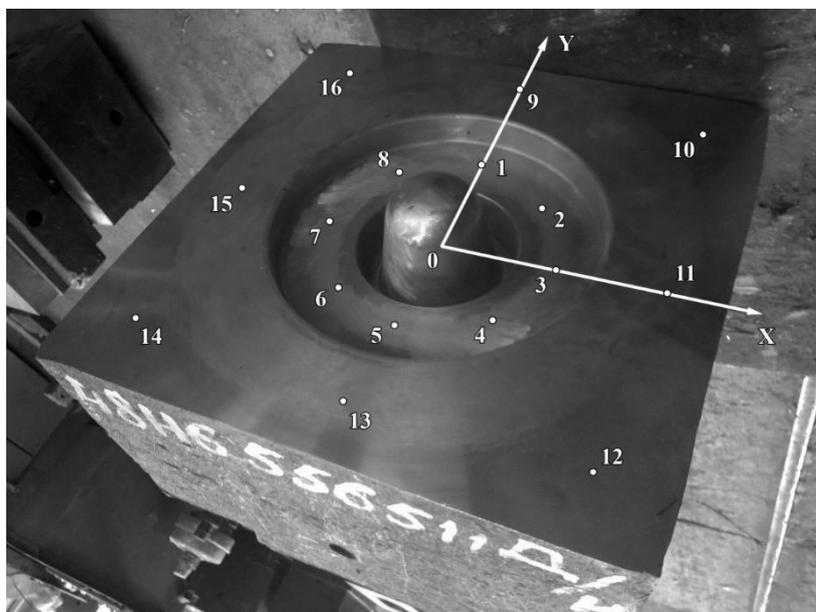


Рисунок В11 – Верхний штамп для поковки «корпус», замер 1

Таблица В11 – Верхний штамп для поковки «корпус», замер 1

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1591	1459	1525
2	1558	1384	1471
3	1558	1657	1608
4	1657	1624	1641
5	1558	1302	1430
6	1756	1822	1789
7	1723	1789	1756
8	1855	1360	1608
9	1437	1624	1531
10	1591	1624	1608
11	1459	1393	1426
12	1459	1624	1542
13	1214	1272	1243
14	1657	1525	1591
15	1525	1331	1428
16	1756	1756	1756
Среднее значение по всем точкам			1559

- Замер 2 (таблица В12). После калибровки 307 поковок (рисунок В12).

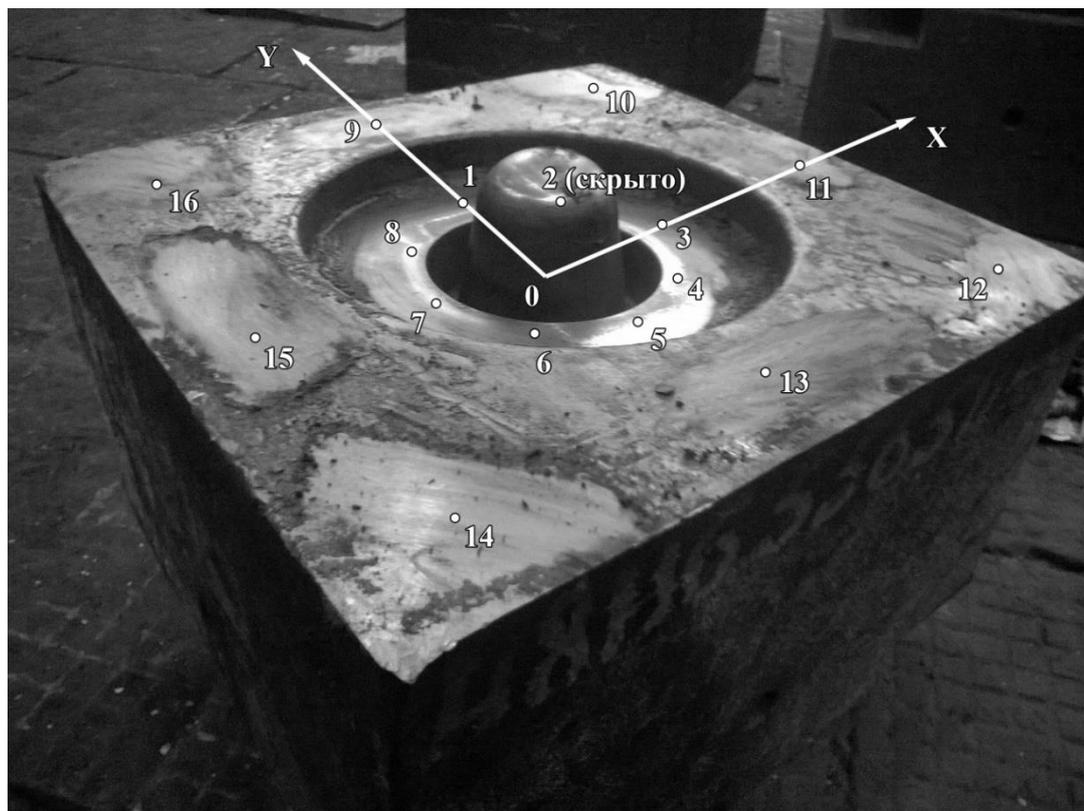


Рисунок В12 – Верхний штамп для поковки «корпус», замер 2

Таблица В12 – Верхний штамп для поковки «корпус», замер 2

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1067	1067	1067	312
2	1426	1459	1443	328
3	1492	1214	1353	336
4	1492	1214	1353	345
5	1184	1126	1155	305
6	1214	1393	1304	340
7	1525	1591	1558	346
8	1459	1393	1426	331
9	1331	1525	1428	329
10	1426	1243	1335	360
11	1302	1393	1348	304
12	1426	1426	1426	345
13	1126	1155	1141	301
14	1272	1243	1258	351
15	1426	1243	1335	321
16	1360	1459	1410	340
Среднее значение по всем точкам			1334	331

2.2 Нижний штамп для поковки «корпус». Материал поковки – 12Х2НВФА. Материал штампа – 5ХНВ. Старый штамп со значительной (неизвестной) наработкой по штамповке (таблица В13, рисунок В13).

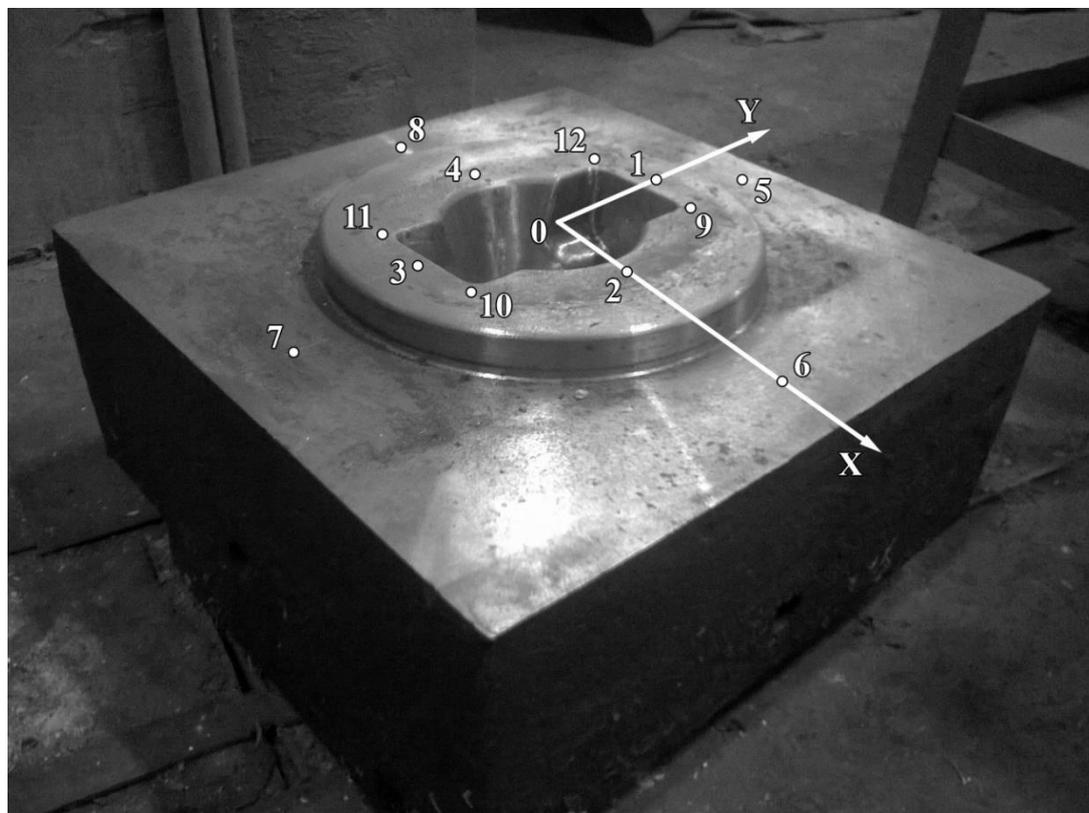


Рисунок В13 – Нижний штамп для поковки «корпус»

Таблица В13 – Нижний штамп для поковки «корпус»

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
1	1126	849	988	343	
2	584	646	615	314	
3	697	605	651	284	
4	564	798	681	359	
5	584	773	679	387	
6	646	672	659	317	
7	979	722	851	368	
8	1008	1096	1052	364	
9	722		722	360	Замер под углом
10	672		672	323	Замер под углом
11	626		626	304	Замер под углом
12	924		924	384	Замер под углом
	Среднее значение по всем точкам		760	342	

2.3 Нижний штамп для поковки «корпус». Материал поковки – 12Х2НВФА. Материал штампа – 5ХНМ.

- Замер 1 (таблица В14). Штамп до механической обработки (рисунок В14).

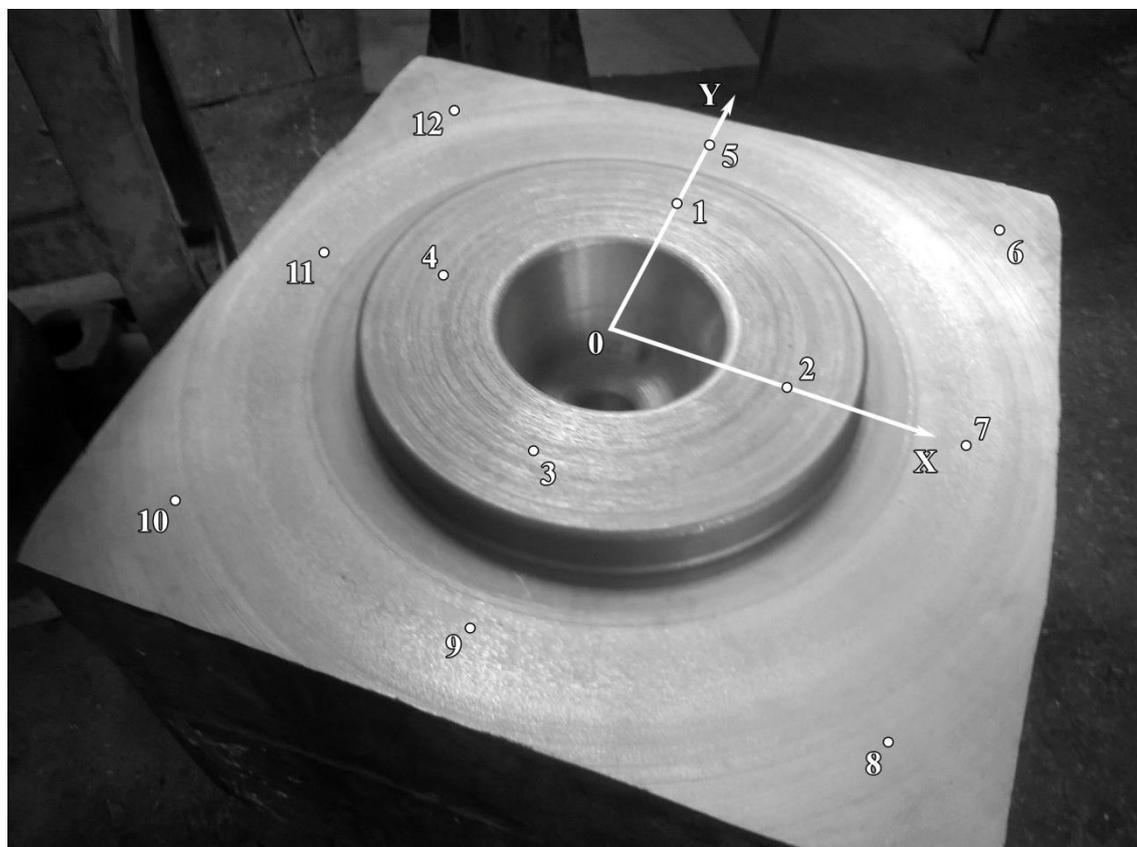


Рисунок В14 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 1

Таблица В14 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 1

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	197	339	268
2	626	176	401
3	418	481	450
4	460	418	439
5	564	355	460
6	626	504	565
7	899	207	553
8	1360	1214	1287
9	218	1214	716
10	371	697	534
11	874	522	698
12	418	459	439
Среднее значение по всем точкам			567

- Замер 2 (таблица В15). Штамп после мехобработки и термообработки (рисунок В15).

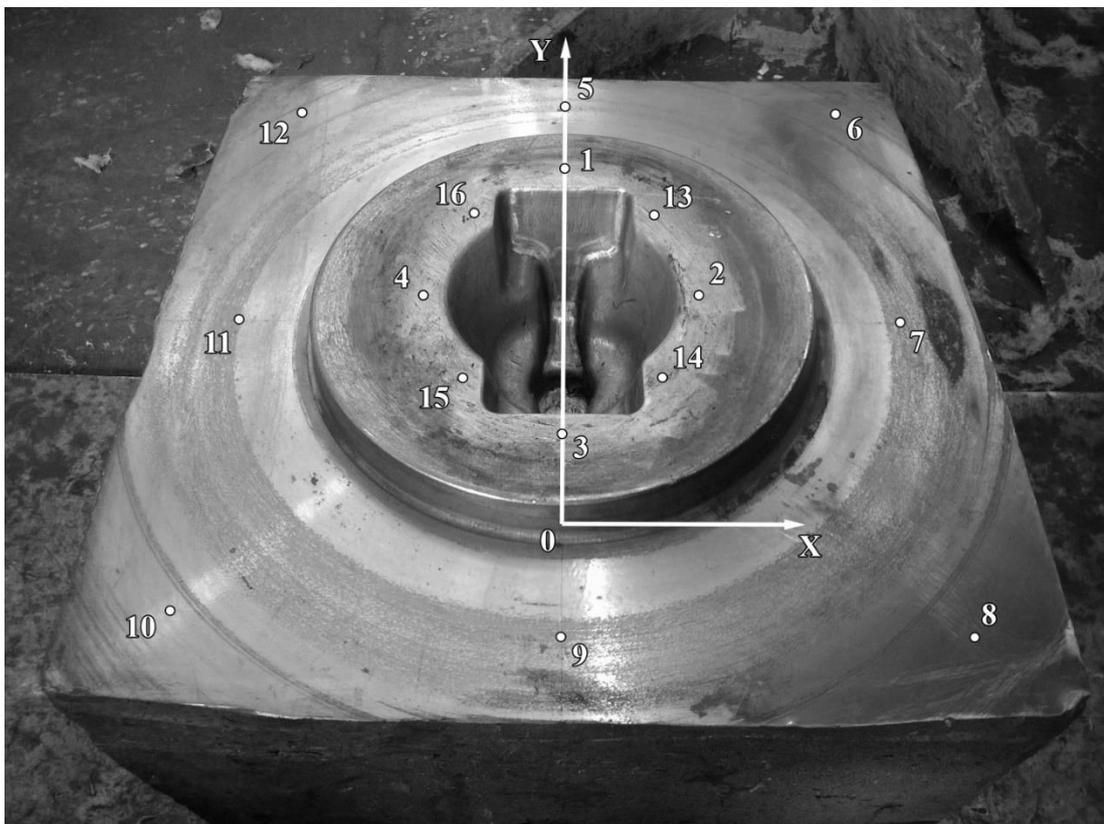


Рисунок В15 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 2

Таблица В15 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 1

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	979	646	813
2	773	979	876
3	773	672	723
4	773	829	801
5	584	605	595
6	564	522	543
7	672	722	697
8	798	798	798
9	710	646	678
10	748	773	761
11	722	748	735
12	584	798	691
13	672	564	618
14	829	722	776
15	773	773	773
16	564	626	595
Среднее значение по всем точкам			717

- Замер 3 (таблица В16). Штамп после калибровки 307 поковок (рисунок В16).



Рисунок В16 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 3

Таблица В16 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 3

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее
1	874	722	798
2	684	773	729
3	522	564	543
4	672	899	786
5	626	605	616
6	697	584	641
7	646	672	659
8	646	522	584
9	522	626	574
10	697	722	710
11	798	722	760
12	748	626	687
13	874	874	874
14	543	849	696
15	798	773	786
16	849	874	862
Среднее значение по всем точкам			706

- Замер 4 (таблица В17). Штамп после штамповки и калибровки 150 поковок (рисунок В17).

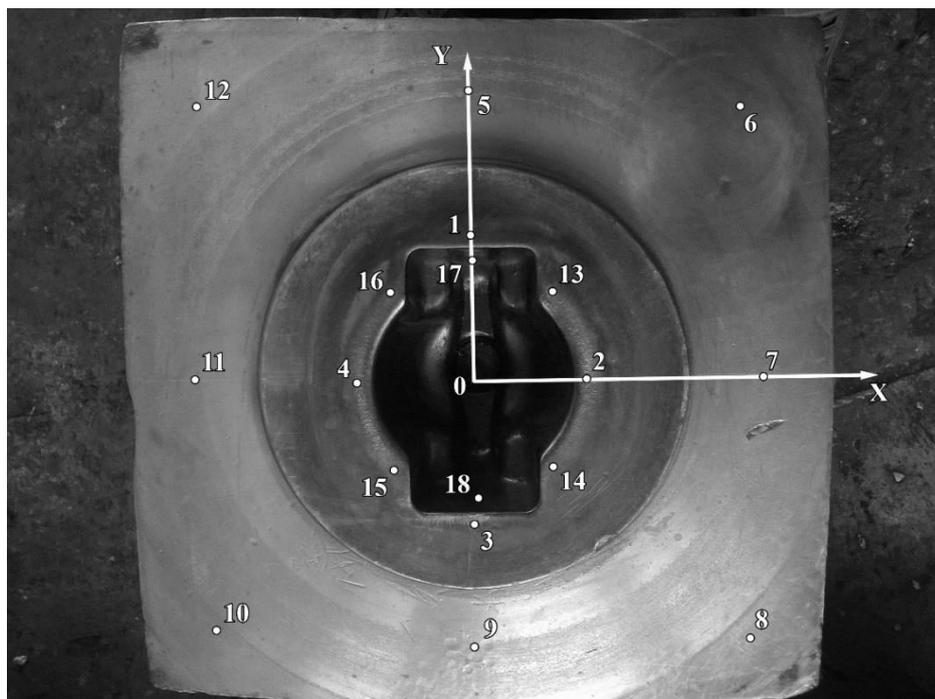


Рисунок В17 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 4

Таблица В17 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 4

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Твёрдость, НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
1	1038	823	931	282	
2	798	950	874	257	
3	1096	798	947	266	
4	773	979	876	253	
5	950	874	912	270	
6	1008	979	994	246	
7	823	798	811	286	
8	823	823	823	270	
9	773	773	773	244	
10	874	924	899	241	
11	798	874	836	262	
12	874	1008	941	286	
13	748	697	723	262	
14	849	722	786	255	
15	874	924	899	255	
16	748	874	811	254	
17	823	773	798	219	ОУ => ОZ
18	697	773	735	212	ОУ => ОZ
Среднее значение по всем точкам			854	257	

- Замер 5 (таблица В18). Штамп после восстановления (рисунок В18).

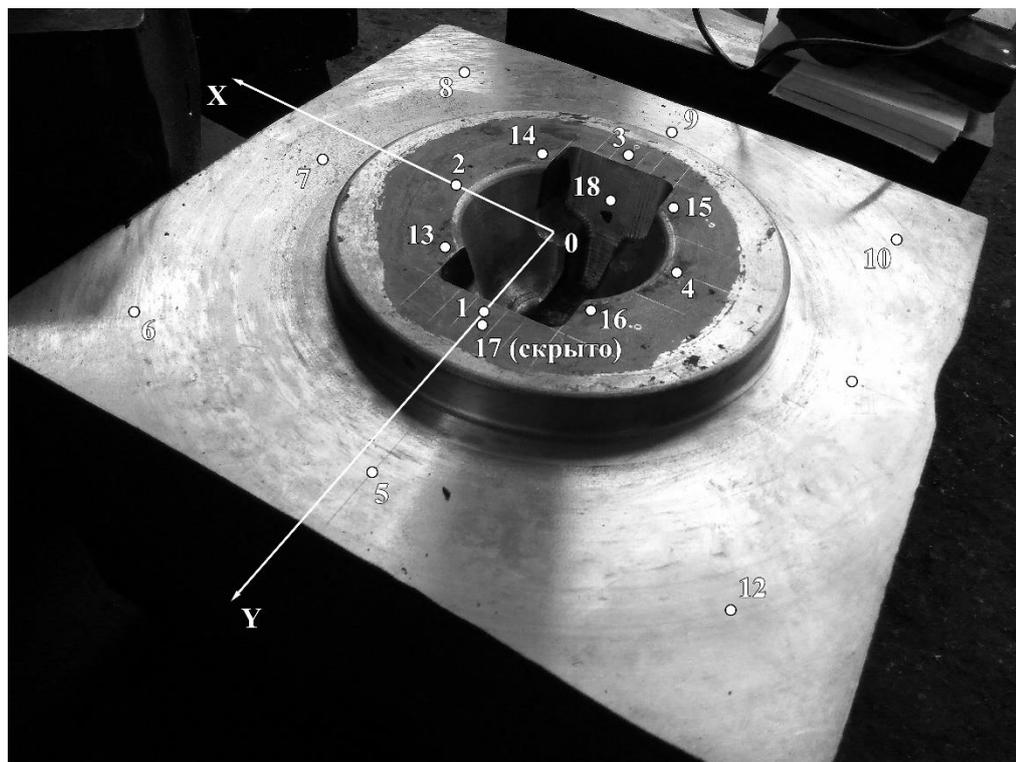


Рисунок В18 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 5

Таблица В18 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 5

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	874	748	811	
2	511.5	748	630	
3	773	722	748	
4	722	823	773	
5	798	773	786	
6	798	773	786	
7	722	722	722	
8	626	697	662	
9	672	697	685	
10	773	722	748	
11	773	798	786	
12	823	748	786	
13	849	626	738	
14	722	722	722	
15	697	646	672	
16	773	646	710	
17	626	672	649	ОУ => ОZ
18	449.5	697	573	ОУ => ОZ
Среднее значение по всем точкам			721	

2.4 Нижний штамп для поковки «корпус». Материал поковки – 12Х2НВФА. Материал штампа – 5ХНМ.

- Замер 1 (таблица В19). Штамп после термообработки, до окончательной механической обработки, покрыт коркой твёрдых окислов (рисунок В19). Температура штампа при замере приблизительно 70 °С.

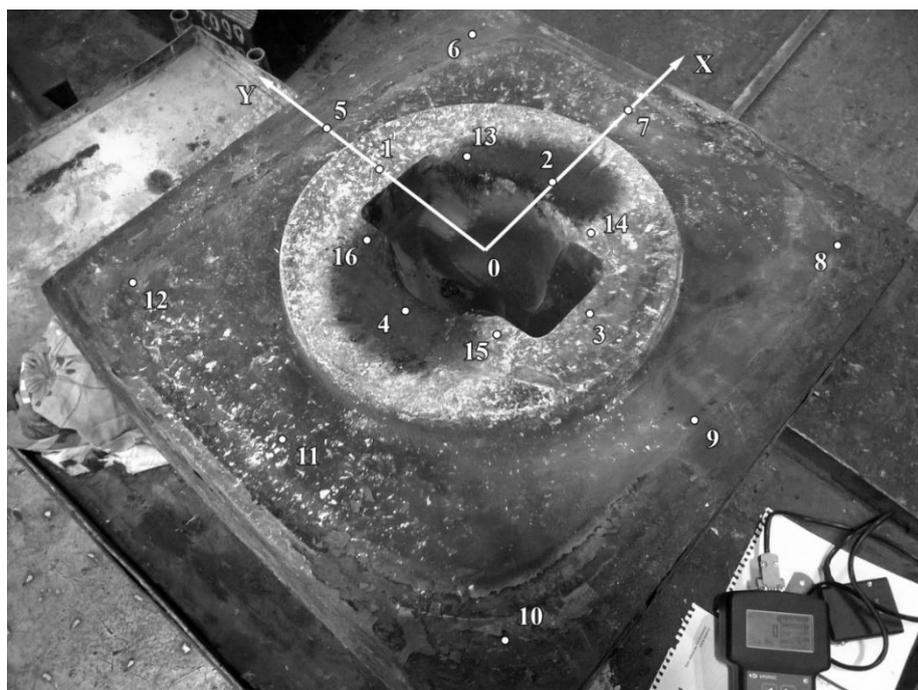


Рисунок В19 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 1

Таблица В19 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 1

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1008	979	994
2	924	418	671
3	1393	1008	1201
4	823	501	662
5	773	722	748
6	773	697	735
7	899	1008	954
8	979	950	965
9	584	626	605
10	626	748	687
11	823	823	823
12	722	798	760
13	626	626	626
14	899	773	836
15	1214	697	956
16	697	950	824
Среднее значение по всем точкам			815

- Замер 2 (таблица В20). Штамп после черновой механической обработки (рисунок В20).

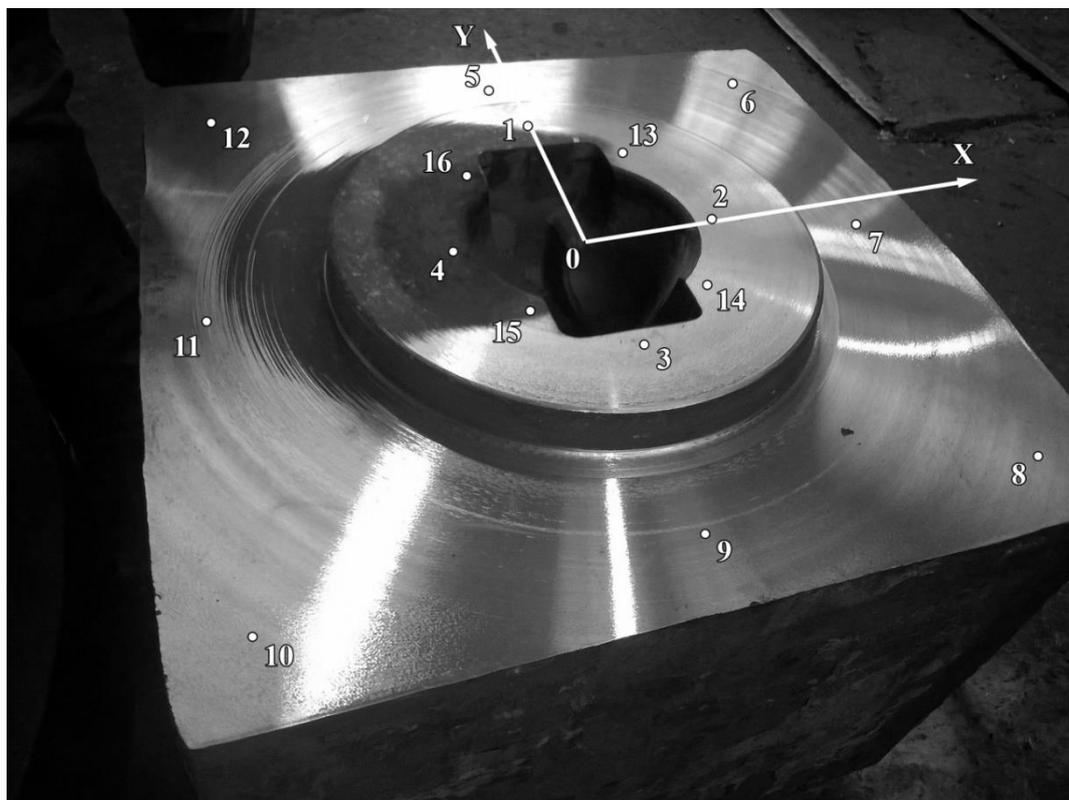


Рисунок В20 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 2

Таблица В20 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 2

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1272	1492	1382
2	1657	1591	1624
3	1624	1591	1608
4	899	748	824
5	1302	1272	1287
6	1155	1067	1111
7	1184	1096	1140
8	1393	1360	1377
9	1426	1302	1364
10	1126	1184	1155
11	1155	1214	1185
12	1184	1067	1126
13	1690	1393	1542
14	1624	1657	1641
15	1558	1558	1558
16	798	1272	1035
Среднее значение по всем точкам			1310

- Замер 3 (таблица В21). Штамп после чистовой механической обработки (рисунок В21).

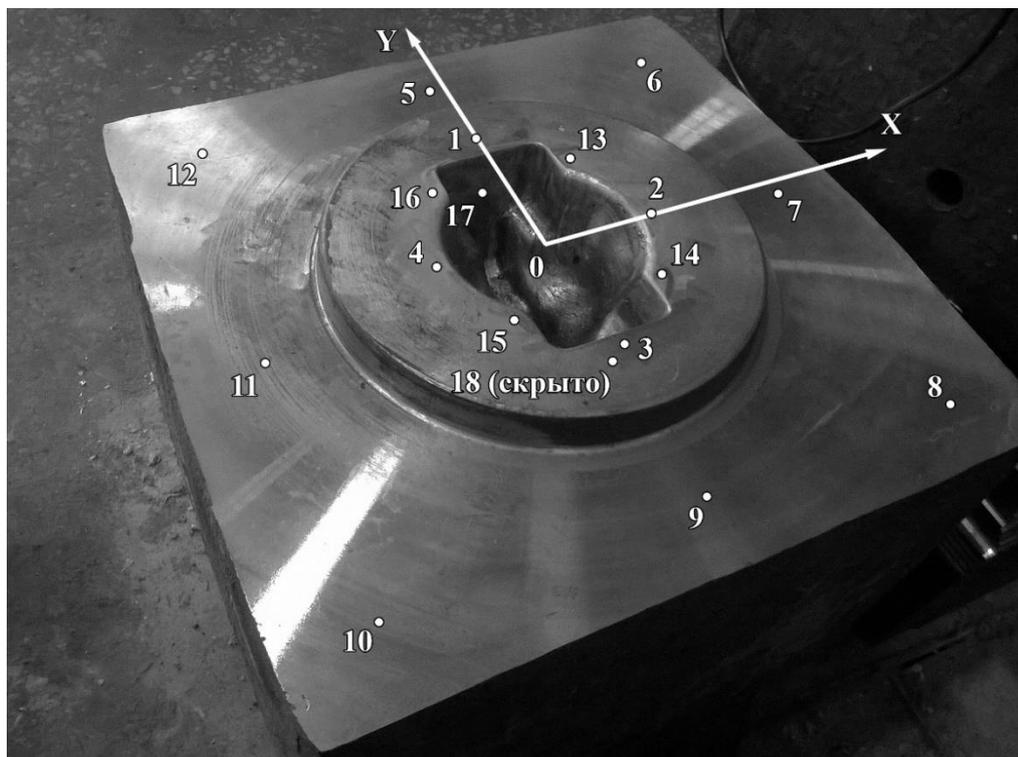


Рисунок В21 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 3

Таблица В21 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 3

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Примечания
	В направлении OX	В направлении OY	Среднее значение	
1	1789	1542	1665	
2	1657	1657	1657	
3	1657	1757	1707	
4	1426	1624	1525	
5	1459	1492	1476	
6	1393	1360	1377	
7	1624	1624	1624	
8	1459	1525	1492	
9	1591	1525	1558	
10	1393	1393	1393	
11	1155	1214	1184	
12	1360	1302	1331	
13	1888	1736	1812	
14	1756	1756	1756	
15	1657	1591	1624	
16	1789	1492	1641	
17	1492	1492	1492	OY => OZ
18	1624	1382	1503	OY => OZ
Среднее значение по всем точкам			1545	

- Замер 4 (таблица В22). Штамп после штамповки и калибровки 342 поковок (рисунок В22).

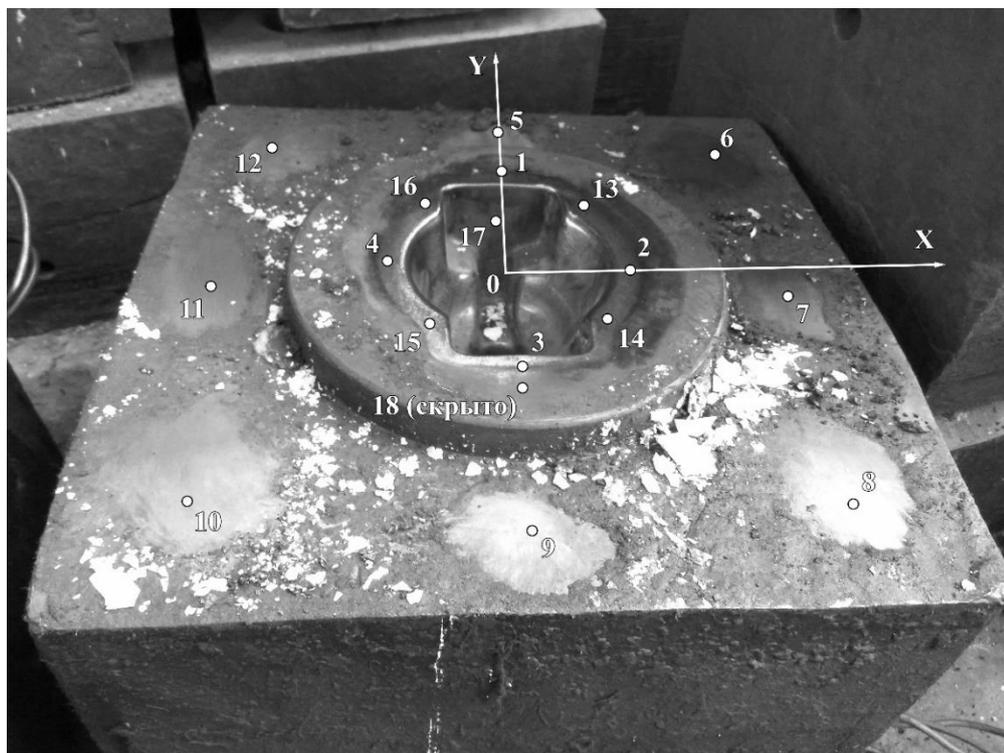


Рисунок В22 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 4

Таблица В22 – Нижний штамп для поковки «корпус», замер 4

№ точки	Результаты измерений H_c , А/м			Примечания
	В направлении OX	В направлении OY	Среднее значение	
1	1956	1723	1840	
2	1822	1855	1839	
3	1690	1426	1558	
4	1492	1789	1641	
5	1456	1426	1441	
6	1723	1624	1674	
7	1723	1558	1641	
8	1591	1690	1641	
9	1591	1591	1591	
10	1302	1558	1430	
11	1331	1459	1395	
12	1459	1393	1426	
13	1855	1690	1773	
14	1657	1657	1657	
15	1657	1492	1575	
16	1558	1591	1575	
17	1302	1331	1317	OY => OZ
18	1492	1558	1525	OY => OZ
Среднее значение по всем точкам			1585	

2.5 Верхний штамп для поковки «корпус». Материал поковки – 12Х2НВФА. Материал штампа – 5ХНВ.

- Замер 1 (таблица В23). После штамповки и калибровки 150 поковок (рисунок В23).

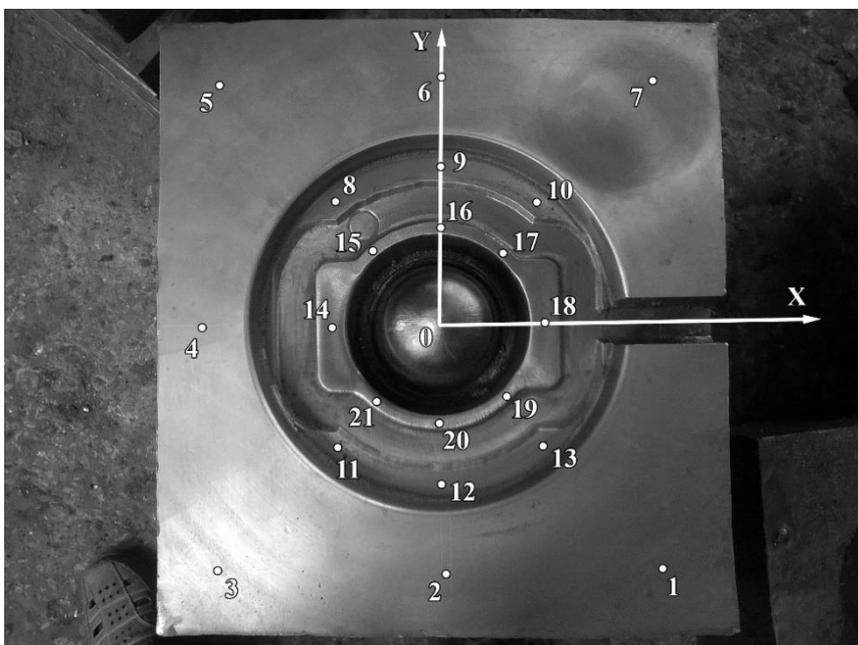


Рисунок В23 – Верхний штамп для поковки «корпус», замер 1

Таблица В23 – Верхний штамп для поковки «корпус», замер 1

№ точки	Результаты измерений Н _c , А/м			Твёрдость, НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
1	1272	1331	1302	342	
2	1243	1331	1287	389	
3	1243	1331	1287	336	
4	1184	1459	1322	377	
5	1393	1331	1362	347	
6	1302	1360	1331	384	
7	1302	1426	1364	333	
8		1067	1067	326	Замер под углом
9	1184	–	1184	298	
10		849	849	337	Замер под углом
11		1008	1008	317	Замер под углом
12	1008	–	1008	298	
13		950	950	325	Замер под углом
14	–	626	626	234	
15		460	460	272	Замер под углом
16	626	–	626	266	
17		564	564	265	Замер под углом
18	–	874	874	325	
19		481	481	321	Замер под углом
20	481	–	481	310	
21		543	543	305	Замер под углом
Среднее значение по всем точкам			951	319	

- Замер 2 (таблица В24). Штамп после восстановления (рисунок В24).

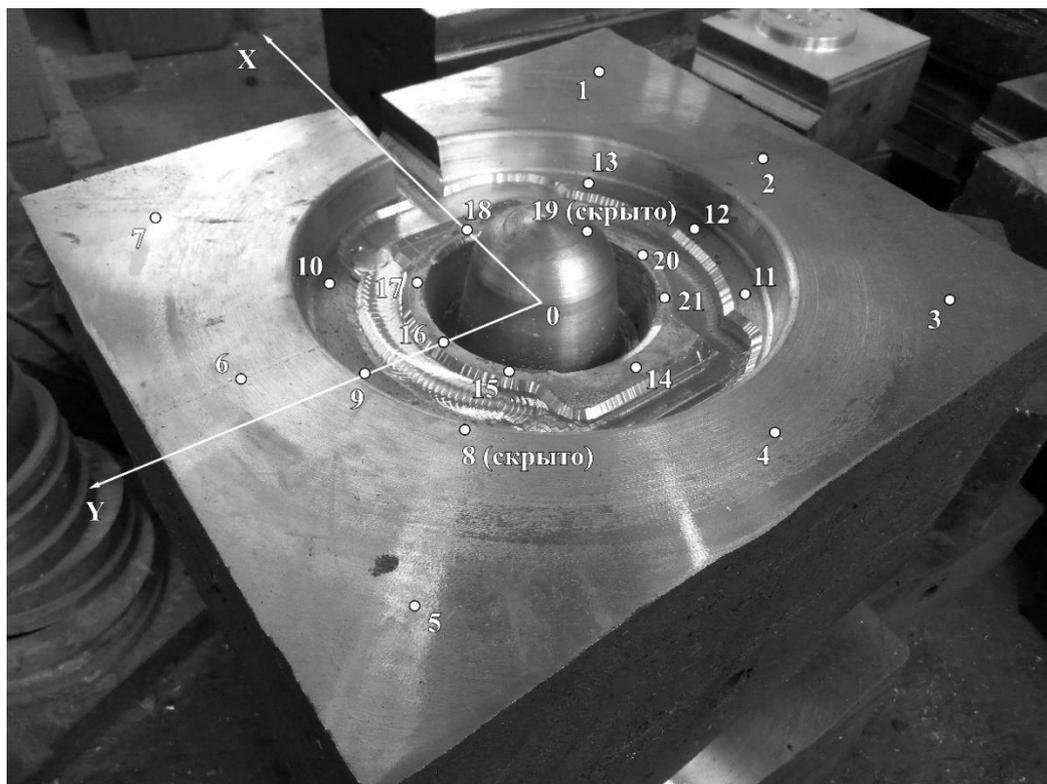


Рисунок В24 – Верхний штамп для поковки «корпус», замер 2

Таблица В24 – Верхний штамп для поковки «корпус», замер 2

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1214	1155	1185	
2	1155	1155	1155	
3	1155	1155	1155	
4	1126	1184	1155	
5	1243	1243	1243	
6	1126	1096	1111	
7	1243	1214	1229	
8	979		979	Замер под углом
9	1067	-	1067	
10	1038		1038	Замер под углом
11	823		823	Замер под углом
12	748	-	748	
13	748		748	Замер под углом
14	-	823	823	
15	823		823	Замер под углом
16	798	-	798	
17	849		849	Замер под углом
18	-	823	823	
19	1038		1038	Замер под углом
20	798	-	798	
21	849		849	Замер под углом
Среднее значение по всем точкам			973	

3.1 Нижний штамп для поковки «бугель». Материал поковки – 30ХГСА.

Материал штампа – 5ХНМ.

- Замер 1 (таблица В25). Штамп после мехобработки до термической обработки (рисунок В25).



Рисунок В25 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 1

Таблица В25 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 1

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	722	955	839	
2	403	637	520	
3	501	874	688	
4	218	522	370	
5	155	564	360	
6	292	672	482	
7	439	324	382	
8	135	460	298	
9	646	481	564	
10	416	672	544	
11	192	339	265	
12	1038	140	589	
13	339	–	339	
14	522		522	Замер под углом
15	371	–	371	

Окончание таблицы В25

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
16	–	133	133	
17		218	218	Замер под углом
18		387	387	Замер под углом
19		103	103	Замер под углом
20		85	85	Замер под углом
21	229	–	229	
22		723	723	Замер под углом
23		646	646	Замер под углом
24		311	311	Замер под углом
25		355	355	Замер под углом
26	–	308	308	
27	379	–	379	
28		403	403	Замер под углом
29	–	605	605	
30	–	924	924	
Среднее значение по всем точкам			431	

- Замер 2 (таблица В26). Штамп после термообработки, покрыт коркой твёрдых окислов (рисунок В26).

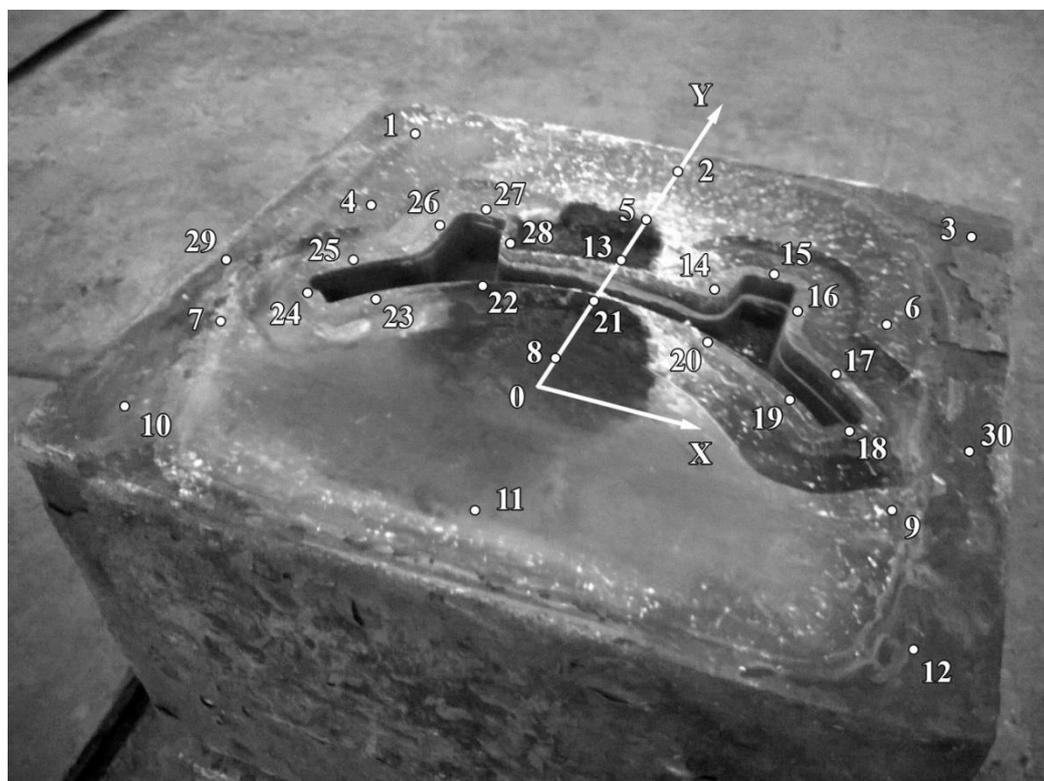


Рисунок В26 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 2

Таблица В26 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 2

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1360	1426	1393	
2	1393	1492	1443	
3	798	587	693	
4	1302	1243	1273	
5	1096	1243	1170	
6	1459	1360	1410	
7	1360	748	1054	
8	564	584	574	
9	1155	620	888	
10	646	543	595	
11	1624	1624	1624	
12	773	849	811	
13	1038	–	1038	
14	1426		1426	Замер под углом
15	1492	–	1492	
16	–	1558	1558	
17	1525		1525	Замер под углом
18	1243		1243	Замер под углом
19	1360		1360	Замер под углом
20	1756		1756	Замер под углом
21	568	–	568	
22	1331		1331	Замер под углом
23	1184		1184	Замер под углом
24	1155		1155	Замер под углом
25	1450		1450	Замер под углом
26	–	1184	1184	
27	1331	–	1331	
28	1591		1591	Замер под углом
29	–	484	484	
30	–	927	927	
Среднее значение по всем точкам			1184	

- Замер 3 (таблица В27). Штамп после калибровки 90 поковок (рисунок В27).
Температура штампа при замере приблизительно 50 °С.

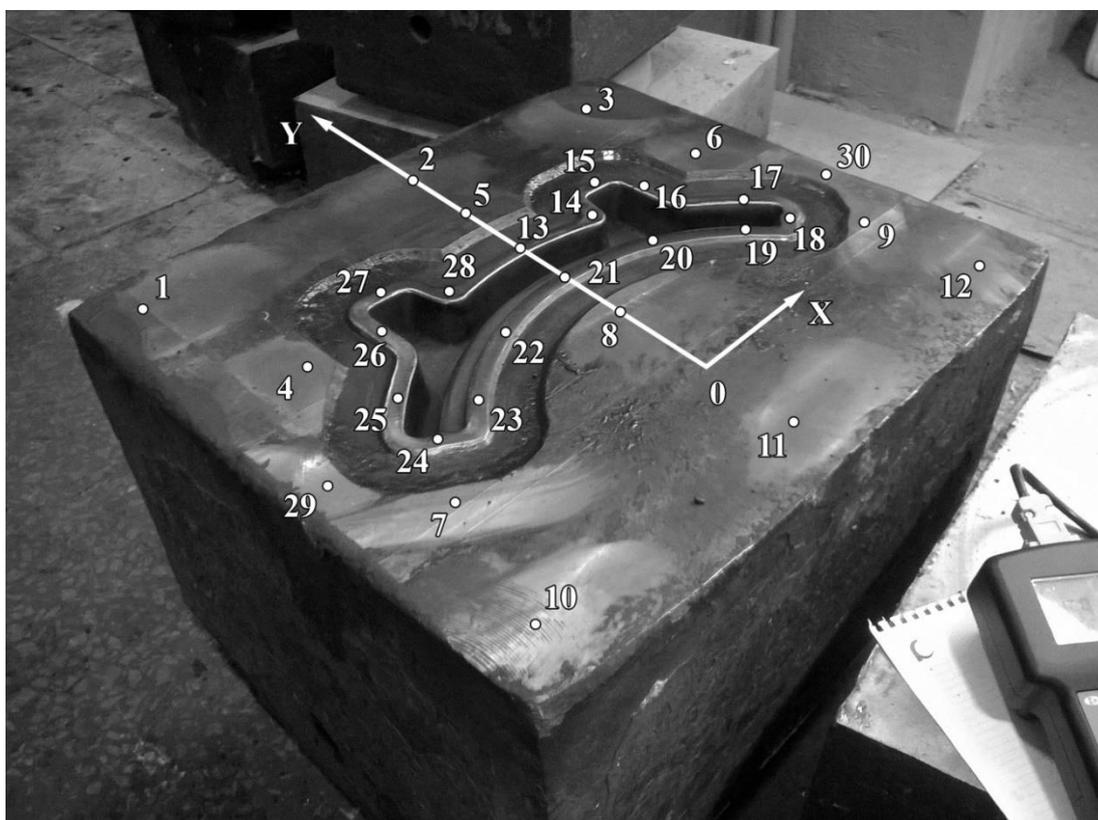


Рисунок В27 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 3

Таблица В27 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 3

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Твёрдость, НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
1	1038	1126	1082	402	
2	1393	1272	1333	324	
3	1393	1459	1426	378	
4	1459	1492	1476	427	
5	1096	1096	1096	389	
6	1492	1558	1525	469	
7	1558	1492	1525	393	
8	1591	1591	1591	434	
9	1558	1525	1542	417	
10	1272	1243	1258	405	
11	1492	1558	1525	412	
12	1393	1331	1362	432	
13	1459	–	1459	343	
14	1459		1459	364	Замер под углом

Окончание таблицы В27

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Твёрдость, НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
15	1393	–	1393	384	
16	–	1756	1756	374	
17	1558		1558	373	Замер под углом
18	1492		1492	351	Замер под углом
19	1558		1558	360	Замер под углом
20	1789		1789	351	Замер под углом
21	1525	–	1525	345	
22	1243		1243	342	Замер под углом
23	1426		1426	349	Замер под углом
24	1591		1591	336	Замер под углом
25	1459		1459	360	Замер под углом
26	–	1723	1723	371	
27	1624	–	1624	343	
28	1591		1591	28	
29	–	1302	1302	372	
30	–	1558	1558	395	
Среднее значение по всем точкам			1475	377	

- Замер 4 (таблица В28). Штамп после калибровки 718 поковок (рисунок В28).

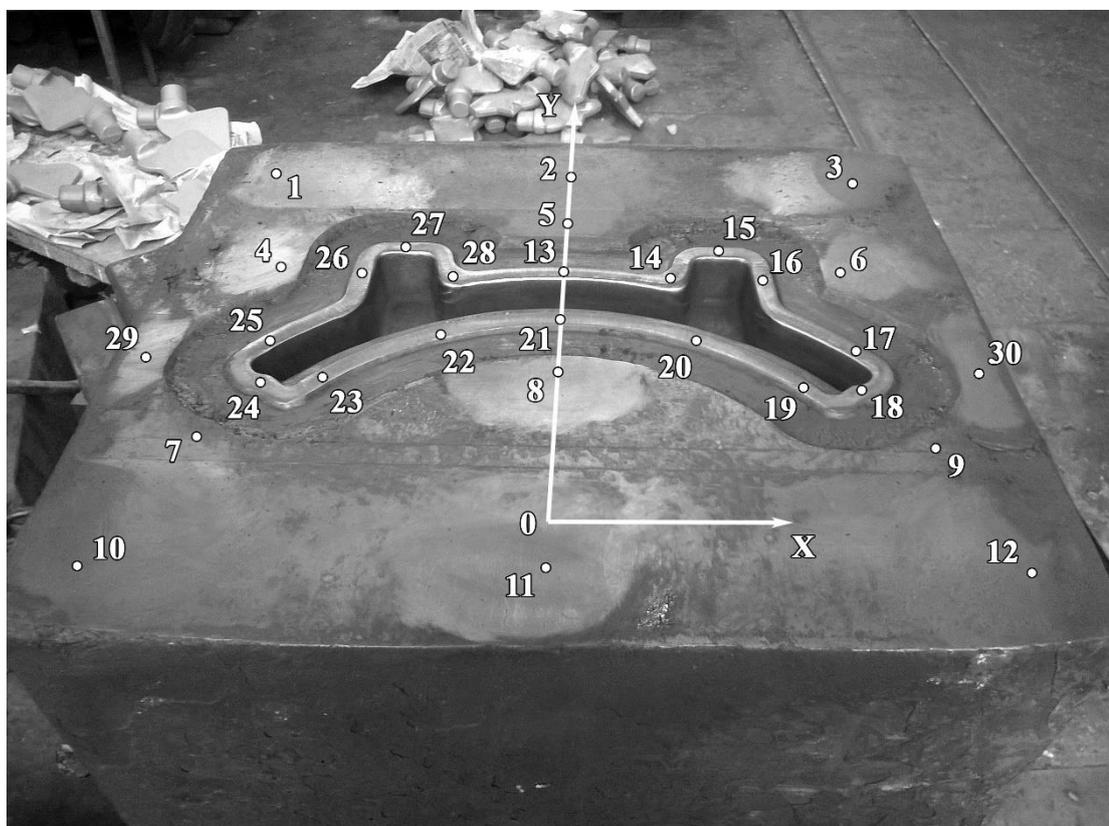


Рисунок В28 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 4

Таблица В28 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 4

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
1	1459	1525	1492	347	
2	1393	1184	1289	283	
3	1008	1067	1038	335	
4	1723	1558	1641	475	
5	1723	1723	1723	389	
6	1690	1723	1707	446	
7	1723	1525	1624	375	
8	1723	1624	1674	444	
9	1690	1657	1674	415	
10	1302	1243	1273	351	
11	1690	1558	1624	398	
12	1525	1657	1591	420	
13	924	–	924	308	
14	1038		1038	270	Замер под углом
15	1525	–	1525	375	
16	–	950	950	384	
17	1184		1184	359	Замер под углом
18	1558		1558	347	Замер под углом
19	1426		1426	330	Замер под углом
20	1360		1360	282	Замер под углом
21	1302	–	1302	311	
22	1331		1331	314	Замер под углом
23	1214		1214	331	Замер под углом
24	1558		1558	317	Замер под углом
25	1426		1426	350	Замер под углом
26	–	1558	1558	361	
27	1272	–	1272	366	
28	1067		1067	310	Замер под углом
29	–	1525	1525	319	
30	–	1657	1657	388	
Среднее значение по всем точкам			1407	357	

- Замер 5 (таблица В29). Штамп после калибровки 300 поковок (рисунок В29).



Рисунок В29 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 5

Таблица В29 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 5

№ точки	Результаты измерений H_c , А/м			Примечания
	В направлении OX	В направлении OY	Среднее значение	
1	1459	1624	1542	
2	1331	1360	1346	
3	899	950	925	
4	1624	1723	1674	
5	1657	1492	1575	
6	1690	1690	1690	
7	1525	1426	1476	
8	1657	1723	1690	
9	1657	1756	1707	
10	1272	1426	1349	
11	1525	1789	1657	
12	1657	1624	1641	
13	823	–	823	
14	1184		1184	Замер под углом
15	1426	–	1426	
16	–	1525	1525	
17	823		823	Замер под углом

Продолжение таблицы В29

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
18	1302		1302	Замер под углом
19	1272		1272	Замер под углом
20	1008		1008	Замер под углом
21	1214	–	1214	
22	1302		1302	Замер под углом
23	1155		1155	Замер под углом
24	1184		1184	Замер под углом
25	1302		1302	Замер под углом
26	–	1459	1459	
27	1393	–	1393	
28	1243		1243	Замер под углом
29	–	1525	1525	
30	–	1558	1558	
Среднее значение по всем точкам			1366	

3.2 Нижний штамп для поковки «бугель». Материал поковки – 30ХГСА. Материал штампа – 5ХНВ. Штамп треснул в ходе термообработки (таблица В30, рисунок В30). Нарботка штампа значительная, точное число поковок неизвестно.

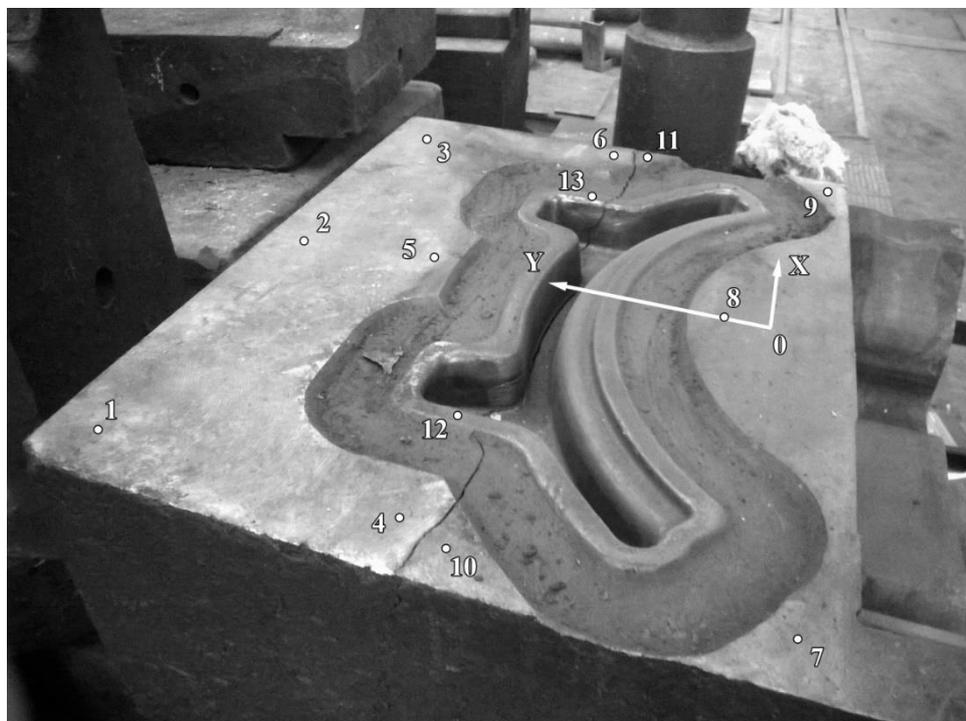


Рисунок В30 – Нижний штамп для поковки «бугель»

Таблица В30 – Нижний штамп для поковки «бугель»

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	849	924	887	343
2	1126	874	1000	361
3	1155	1126	1141	366
4	1067	1096	1082	339
5	1067	950	1009	363
6	1113	1184	1149	370
7	849	564	707	366
8	1184	1126	1155	365
9	1126	1126	1126	399
10	1008	1184	1096	344
11	1155	1155	1155	353
12	–	1008	1008	346
13	–	836	836	302
Среднее значение по всем точкам			1027	355

3.3 Нижний штамп для поковки «бугель». Материал поковки – 30ХГСА.

Материал штампа – 5ХНМ.

- Замер 1 (таблица В31). Штамп после термообработки, покрыт коркой твёрдых окислов (рисунок В31).

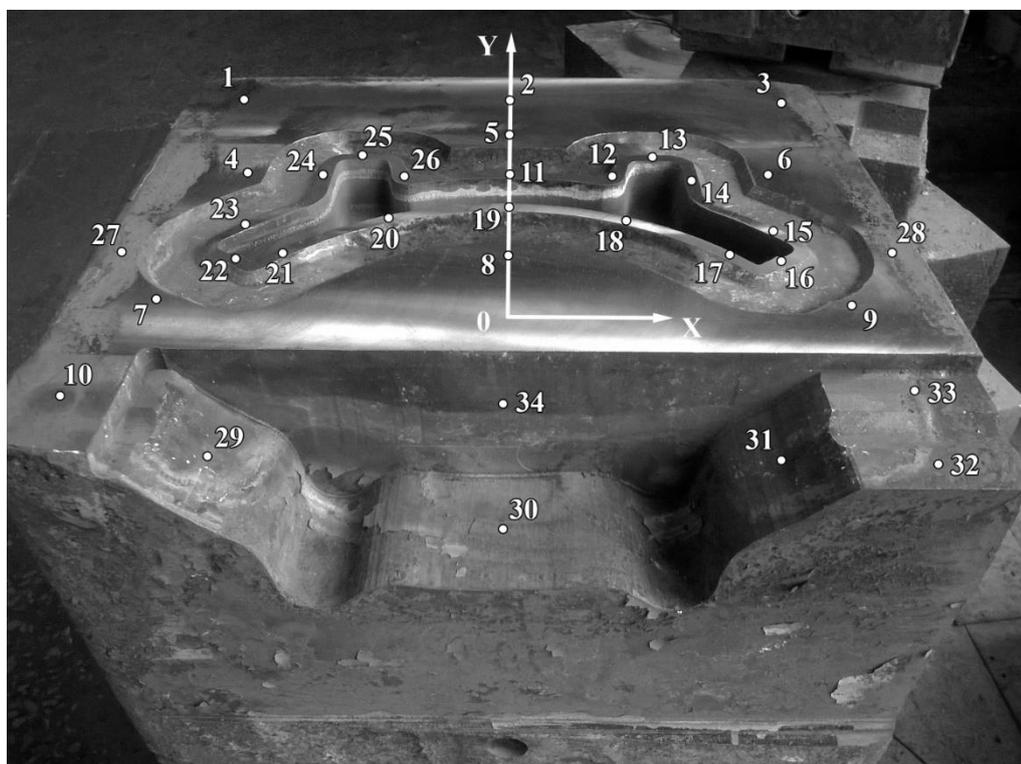


Рисунок В31 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 1

Таблица В31 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 1

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1591	1459	1525	
2	1888	1888	1888	
3	1096	1558	1327	
4	1624	1624	1624	
5	1956	1822	1889	
6	1822	1822	1822	
7	1272	1126	1199	
8	1008	950	979	
9	1393	1302	1348	
10	672	773	723	
11	2202	–	2202	
12	2237		2237	Замер под углом
13	2448	–	2448	
14	–	2448	2448	
15	2378		2378	Замер под углом

Окончание таблицы В31

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
16	1888		1888	Замер под углом
17	2026		2026	Замер под углом
18	2237		2237	Замер под углом
19	2132	–	2132	
20	2167		2167	Замер под углом
21	2026		2026	Замер под углом
22	1789		1789	Замер под углом
23	1888		1888	Замер под углом
24	–	2343	2343	
25	2413	–	2413	
26	1789		1789	Замер под углом
27	–	672	672	
28	–	979	979	
29	924	924	924	
30	584	584	584	
31	626	605	616	
32	924	950	937	
33	1067	–	1067	
34	823	1096	960	ОУ=>ОZ
Среднее значение по всем точкам			1632	

- Замер 2 (таблица В32). Штмп после чистовой обработки (рисунок В32).

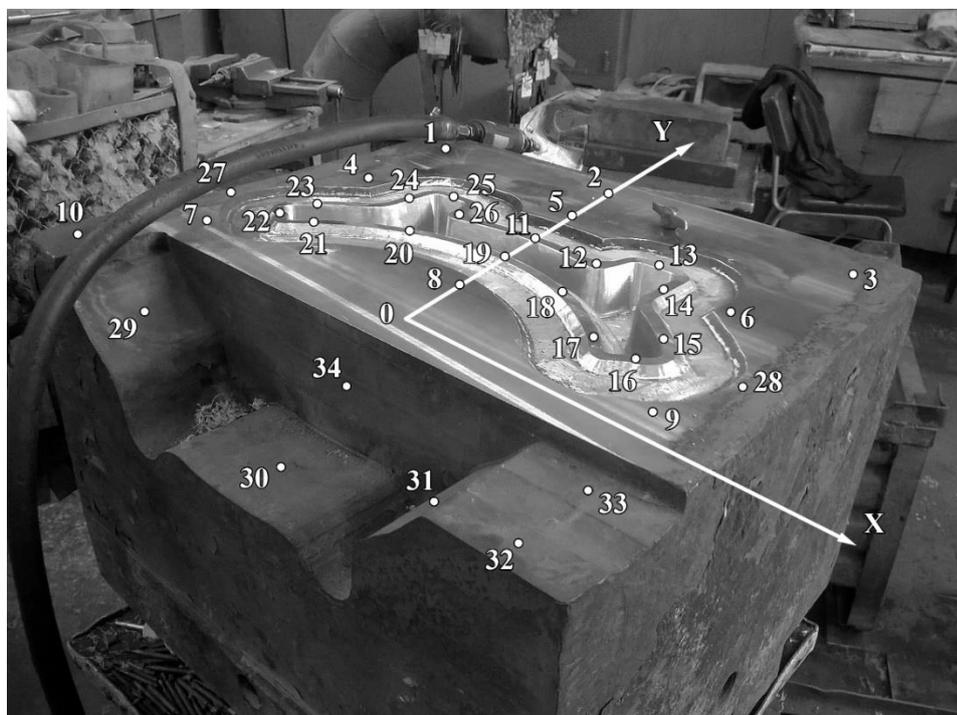


Рисунок В32 – Нижний штмп для поковки «бугель», замер 2

Таблица В32 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 2

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
1	1459	1492	1476	336	
2	1789	1888	1839	419	
3	1591	1558	1575	346	
4	1459	1426	1443	350	
5	1756	–	1756	454	
6	1786	1756	1771	365	
7	1426	1393	1410	356	
8	1756	1657	1707	394	
9	1360	1426	1393	243	
10	874	1067	971	366	
11	2202	–	2202	422	
12	2168		2168	441	Замер под углом
13	2308	–	2308	473	
14	–	2448	2448	480	
15	2016		2016	451	Замер под углом
16	1855		1855	333	Замер под углом
17	1888		1888	373	Замер под углом
18	–		–	469	Замер под углом
19	–	–	–	444	
20	–		–	466	Замер под углом
21	–		–	409	Замер под углом
22	–		–	368	Замер под углом
23	–		–	400	Замер под углом
24	–	2413	2413	459	
25	2090	–	2090	482	
26	1991		1991	440	Замер под углом
27	–	1008	1008	302	
28	–	1331	1331	342	
29	–	823	823	291	
30	839	1008	924	345	
31	798	775	787	361	
32	–	1020	1020	340	
33	1184	–	1184	345	
34	1272	874	1073	370	ОУ=>ОZ
Среднее значение по всем точкам			1602	389	

- Замер 3 (таблица В33). Штамп после гибки и штамповки 718 поковок (рисунок В33).

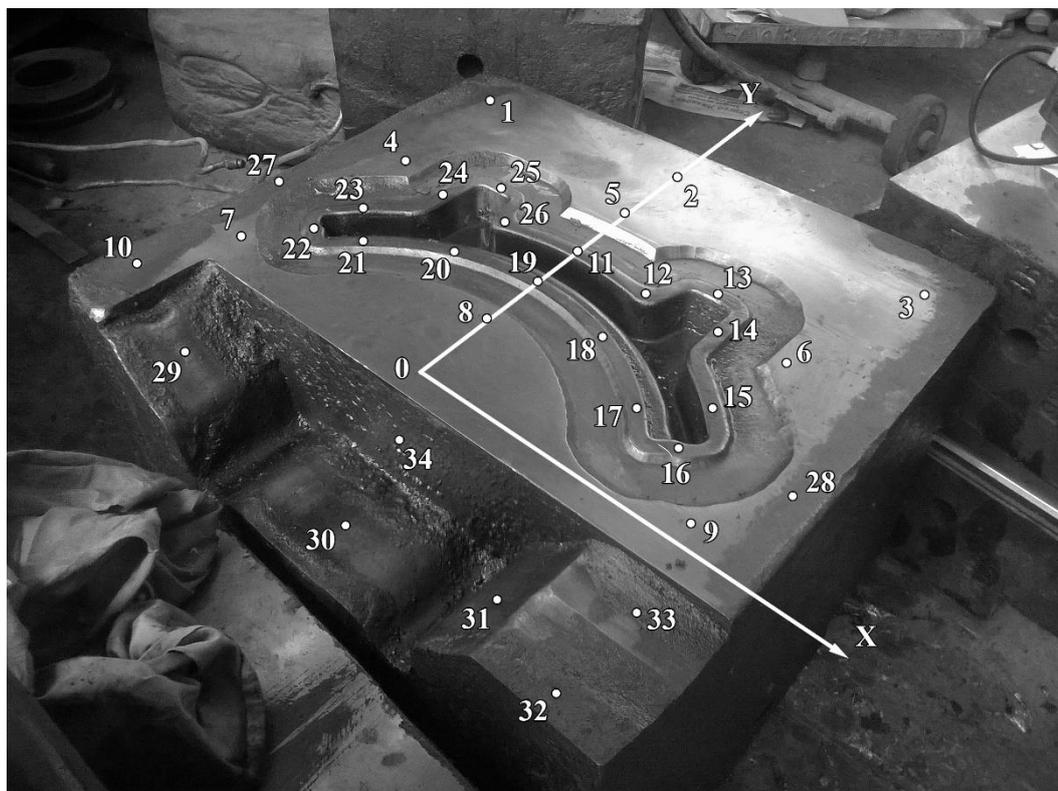


Рисунок В33 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 3

Таблица В33 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 3

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
1	1756	1492	1624	344	
2	1723	1756	1740	368	
3	1657	1525	1591	379	
4	1624	1690	1657	361	
5	1888	1822	1855	468	
6	1690	1789	1740	406	
7	1302	1525	1414	365	
8	1591	1624	1608	413	
9	1558	1723	1641	300	
10	1126	1155	1141	356	
11	1155	–	1155	311	
12	1331		1331	329	Замер под углом
13	1624	–	1624	353	
14	–	1243	1243	360	
15	1624		1624	347	Замер под углом
16	1789		1789	372	Замер под углом

Окончание таблицы В33

№ точки	Результаты измерений Н _c , А/м			Твёрдость. НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
17	1723		1723	350	Замер под углом
18	1756		1756	326	Замер под углом
19	1525	–	1525	332	
20	1690		1690	305	Замер под углом
21	1558		1558	346	Замер под углом
22	1393		1393	312	Замер под углом
23	1492		1492	324	Замер под углом
24	–	1723	1723	346	
25	1991	–	1991	372	
26	1525		1525	340	Замер под углом
27	–	916	916	329	
28	–	1302	1302	328	
29	1243	1008	1126	354	
30	1360	1331	1346	314	
31	1088	664	876	361	
32	1243	1155	1199	389	
33	1184	–	1184	339	
34	1624	1789	1707	379	ОУ => ОZ
Среднее значение по всем точкам			1478	352	

- Замер 4 (таблица В34). Штамп после гибки и штамповки 300 поковок (рисунок В34).

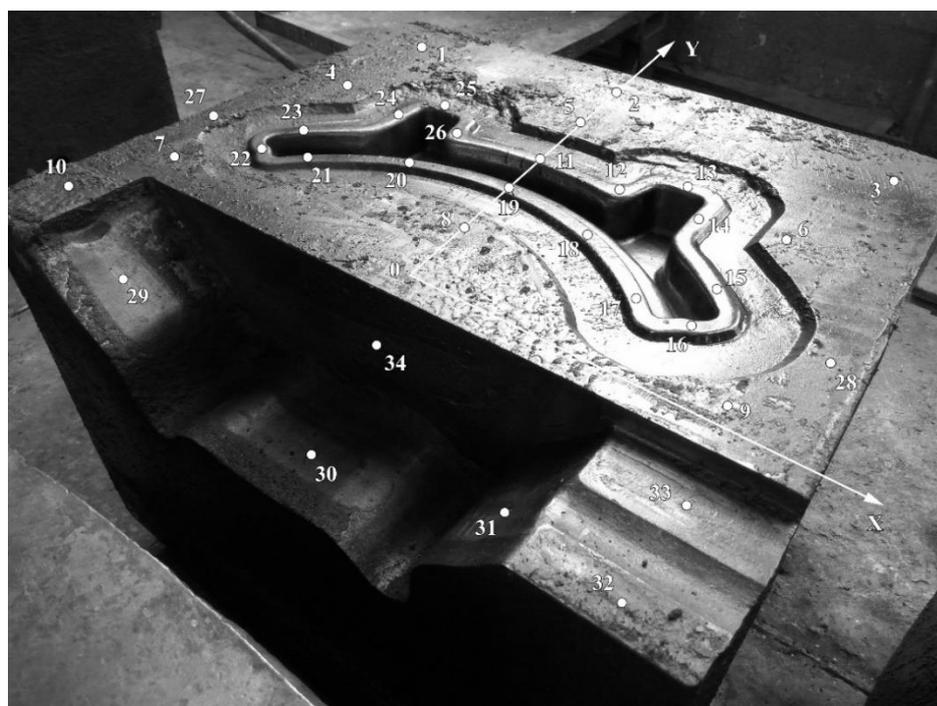


Рисунок В34 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 4

Таблица В34 – Нижний штамп для поковки «бугель», замер 4

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1459	1459	1459	
2	1459	1393	1426	
3	1331	1459	1395	
4	1525	1624	1575	
5	1657	1690	1674	
6	1591	1723	1657	
7	1360	1393	1377	
8	1690	1533	1611	
9	1360	1426	1393	
10	1008	798	903	
11	1028	–	1028	
12	899		899	Замер под углом
13	1360	–	1360	
14	–	1096	1096	
15	1272		1272	Замер под углом
16	1393		1393	Замер под углом
17	1525		1525	Замер под углом
18	1360		1360	Замер под углом
19	924	–	924	
20	1360		1360	Замер под углом
21	1008		1008	Замер под углом
22	1459		1459	Замер под углом
23	1067		1067	Замер под углом
24	–	1302	1302	
25	1272	–	1272	
26	1243		1243	Замер под углом
27	–	924	924	
28	–	1184	1184	
29	1067	899	983	
30	979	899	939	
31	1067	672	870	
32	1038	924	981	
33	1038	–	1038	
34	1067	1184	1126	ОУ => ОZ
Среднее значение			1247	

4.1 Нижний штамп для поковки «корпус кардана». Материал поковки – 40ХН2МА-СШ. Материал штампа – 5ХНВ.

- Замер 1 (таблица В135). Штамп после термообработки (рисунок В35).

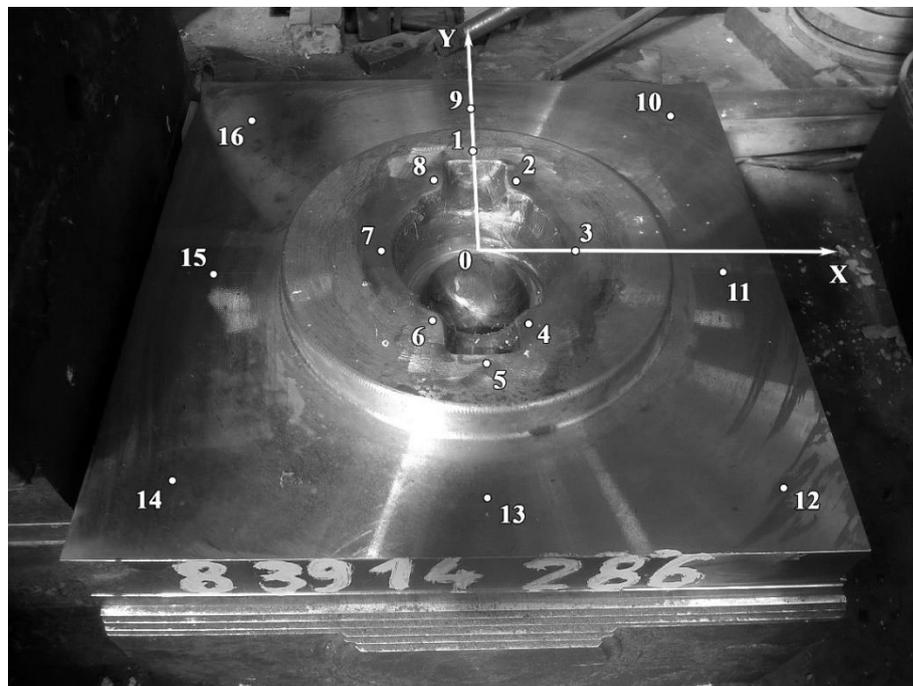


Рисунок В35 – Нижний штамп для поковки «корпус кардана», замер 1

Таблица В35 – Нижний штамп для поковки «корпус кардана», замер 1

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1096	1214	1155	315
2	1214	1038	1126	371
3	1096	1184	1140	330
4	1360	1096	1228	358
5	1272	1302	1287	371
6	1184	1214	1199	423
7	1038	1155	1097	354
8	1243	1214	1229	386
9	1126	1302	1214	356
10	1272	1302	1287	386
11	1272	1243	1258	330
12	1272	1302	1287	393
13	1243	1214	1229	349
14	1214	1302	1258	381
15	1243	1155	1199	346
16	1302	1302	1302	380
Среднее значение по всем точкам			1218	364

- Замер 2 (таблица В36). Штамп после штамповки 248 поковок (рисунок В36).

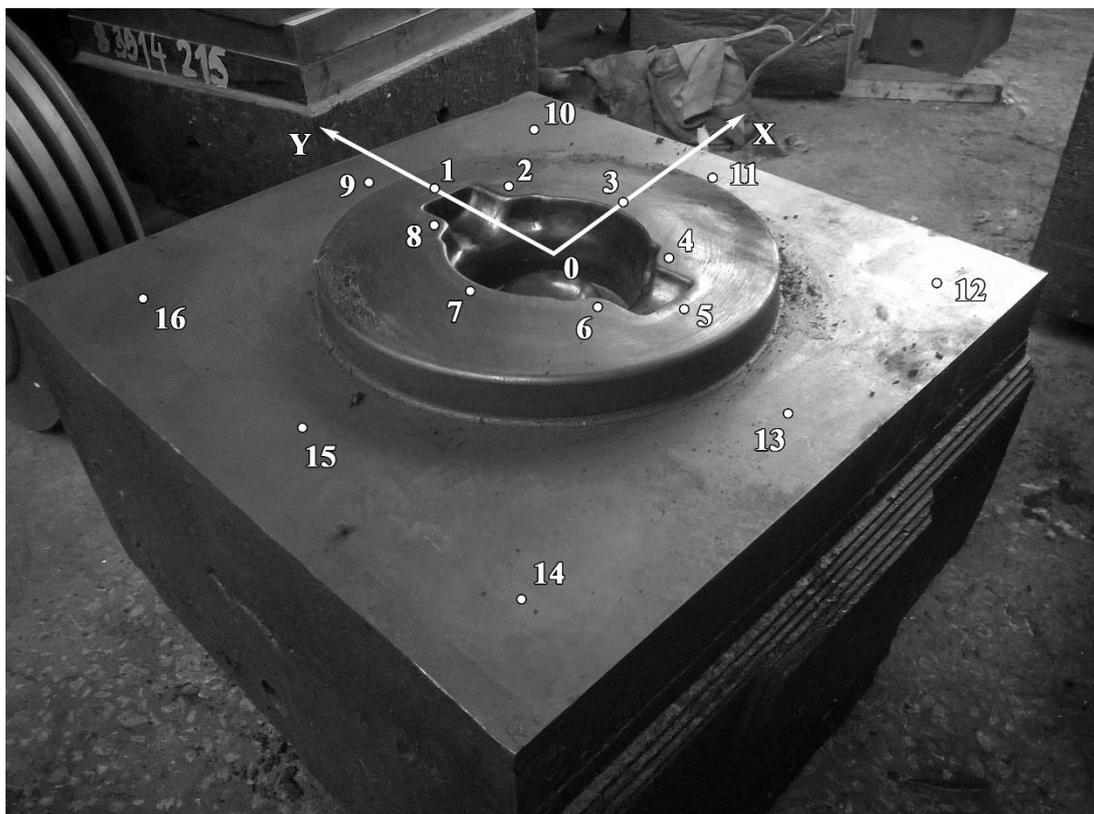


Рисунок В36 – Нижний штамп для поковки «корпус кардана», замер 2

Таблица В36 – Нижний штамп для поковки «корпус кардана», замер 2

№ точки	Результаты измерений Н _c , А/м			Твёрдость НВ
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1272	1155	1214	359
2	1126	1184	1155	349
3	1243	1272	1258	323
4	1214	1214	1214	338
5	1360	1302	1331	373
6	1184	1038	1111	367
7	1067	1184	1126	319
8	1302	1067	1185	349
9	1360	1302	1331	402
10	1302	1331	1317	399
11	1302	1272	1287	356
12	1331	1331	1331	395
13	1126	1008	1067	351
14	1126	1155	1141	384
15	1184	1008	1096	391
16	1360	1302	1331	386
Среднее значение по всем точкам			1218	365

4.2 Верхний штамп для поковки «корпус кардана». Материал поковки – 40ХН2МА-СШ. Материал штампа – 5ХНМ.

- Замер 1 (таблица В37). Штамп после термообработки (рисунок В37).

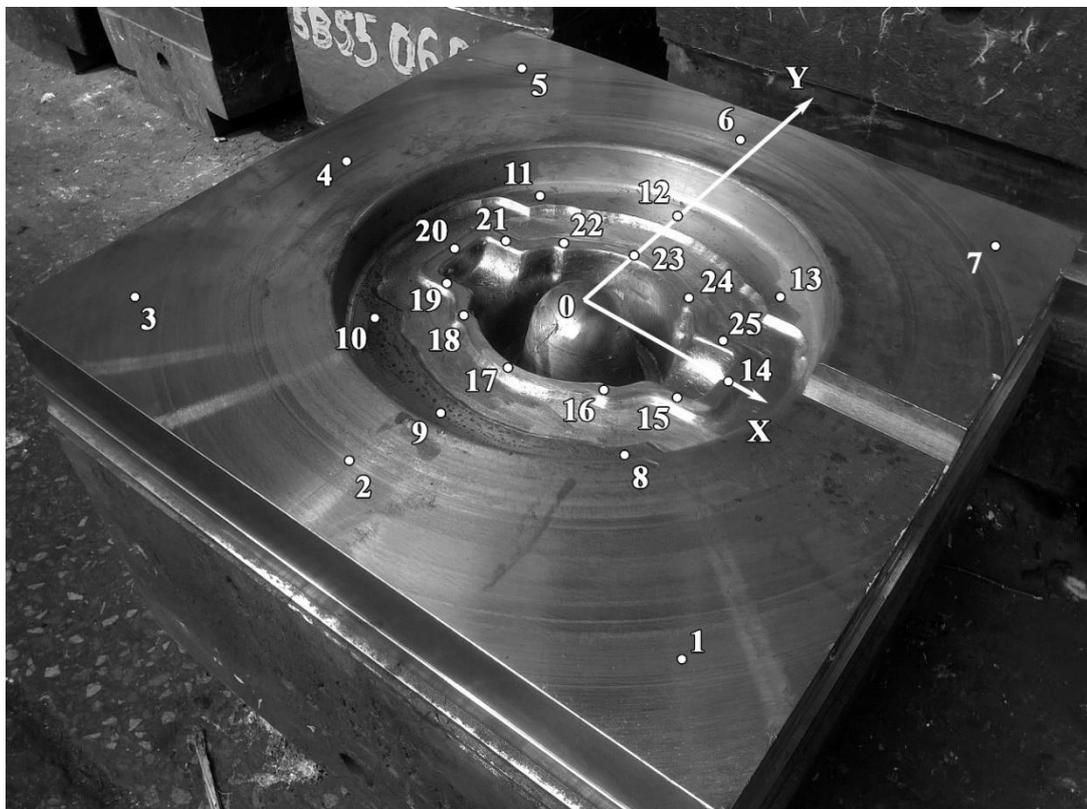


Рисунок В37 – Верхний штамп для поковки «корпус кардана», замер 1

Таблица В37 – Верхний штамп для поковки «корпус кардана», замер 1

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
1	1331	1272	1302	371	
2	1243	1302	1273	356	
3	1272	1243	1258	352	
4	1525	1426	1476	336	
5	1459	1558	1509	315	
6	1331	1393	1362	310	
7	1331	1492	1412	307	
8	1067		1067	321	Замер под углом
9	1126	–	1126	289	
10	1096		1096	302	Замер под углом
11	1126		1126	283	Замер под углом
12	1243	–	1243	282	
13	1272		1272	308	Замер под углом

Окончание таблицы В37

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
14	–	1096	1096	331	
15	849	–	849	319	
16	672		672	333	Замер под углом
17	899	–	899	336	
18	773		773	321	Замер под углом
19	823	–	823	312	
20	–	1008	1008	315	
21	1038	–	1038	326	
22	1126		1126	319	Замер под углом
23	1184	–	1184	321	
24	1184		1184	317	Замер под углом
25	1126	–	1126	319	
Среднее значение по всем точкам			1132	320	

- Замер 2 (таблица В38). Штамп после штамповки 248 поковок (рисунок В38).



Рисунок В38 – Верхний штамп для поковки «корпус кардана», замер 2

Таблица В38 – Верхний штамп для поковки «корпус кардана», замер 2

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ	Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение		
1	1184	1038	1111	380	
2	1243	1331	1287	370	
3	1272	1214	1243	359	
4	1492	1258	1375	338	
5	1608	1525	1566	337	
6	1492	1302	1397	323	
7	1426	1158	1292	335	
8	1096		1096	315	Замер под углом
9	1214	–	1214	342	
10	1096		1096	317	Замер под углом
11	1184		1184	281	Замер под углом
12	1096	–	1096	308	
13	1243		1243	298	Замер под углом
14	–	1126	1126	318	
15	661	–	661	326	
16	748		748	307	Замер под углом
17	1067	–	1067	368	
18	849		849	324	Замер под углом
19	748	–	748	354	
20	–	889	889	332	
21	722	–	722	319	
22	950		950	289	Замер под углом
23	1155	–	1155	342	
24	1008		1008	314	Замер под углом
25	1067	–	1067	319	
Среднее значение по всем точкам			1171	332	

5.1 Верхний штамп для поковки «корпус руля». Материал поковки – 13X11H2B2MФ-Ш. Материал штампа – 5ХНВ.

- Замер 1 (таблица В39). Штамп после термообработки (рисунок В39).

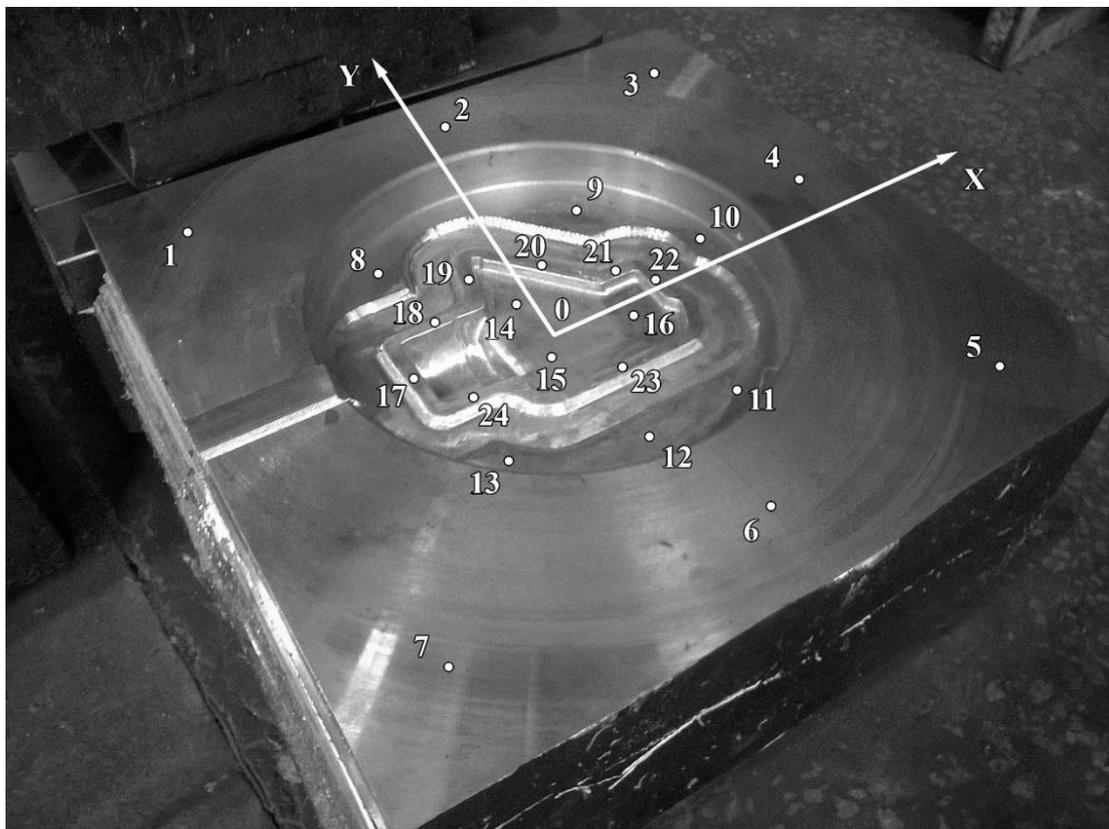


Рисунок В39 – Верхний штамп для поковки «корпус руля», замер 1

Таблица В39 – Верхний штамп для поковки «корпус руля», замер 1

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1492	1426	1459	
2	1558	1492	1525	
3	1723	1657	1690	
4	–	–	–	
5	1723	1723	1723	
6	1492	1492	1492	
7	1591	1624	1608	
8	1360		1360	Замер под углом
9	1525	1591	1558	
10	–	1214	1214	
11	1393		1393	Замер под углом
12	1591	1591	1591	
13	1360		1360	Замер под углом

Окончание таблицы В39

№ точки	Результаты измерений H_c , А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
14	1492	1657	1575	
15	1723	1459	1591	
16	1591	1624	1608	
17	–	1822	1822	
18	1426	–	1426	
19	1525		1525	Замер под углом
20	1393		1393	Замер под углом
21	1690	–	1690	
22	–	1459	1459	
23	1525	–	1525	
24	1789	–	1789	
Среднее значение по всем точкам			1538	

- Замер 2 (таблица В40). Штамп после штамповки и калибровки 1001 поковок (рисунок В40).

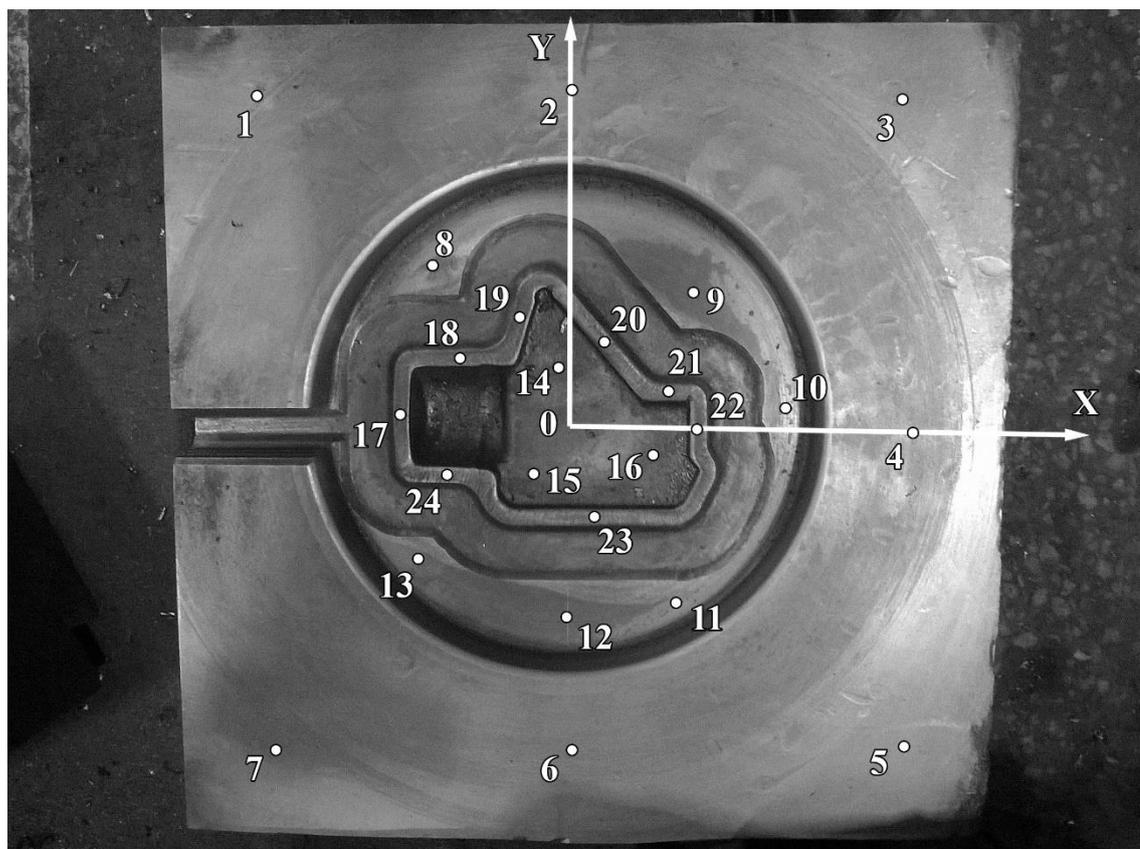


Рисунок В40 – Верхний штамп для поковки «корпус руля», замер 2

Таблица В40 – Верхний штамп для поковки «корпус руля», замер 2

№ точки	Результаты измерений Н _c , А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1492	1591	1542	
2	1558	1591	1575	
3	1657	1723	1690	
4	1657	1459	1558	
5	1690	1756	1723	
6	1525	1558	1542	
7	1591	1591	1591	
8	1360		1360	Замер под углом
9	1525	1657	1591	
10	–	1360	1360	
11	1426		1426	Замер под углом
12	1657	1426	1542	
13	1331		1331	Замер под углом
14	1243	1243	1243	
15	1331	1331	1331	
16	1155	950	1053	
17	–	849	849	
18	924	–	924	
19	1008		1008	Замер под углом
20	823		823	Замер под углом
21	1067	–	1067	
22	–	899	899	
23	1126	–	1126	
24	1214	–	1214	
Среднее значение по всем точкам			1296	

- Замер 3 (таблица В41). Штамп после штамповки и калибровки 1020 поковок (рисунок В41).

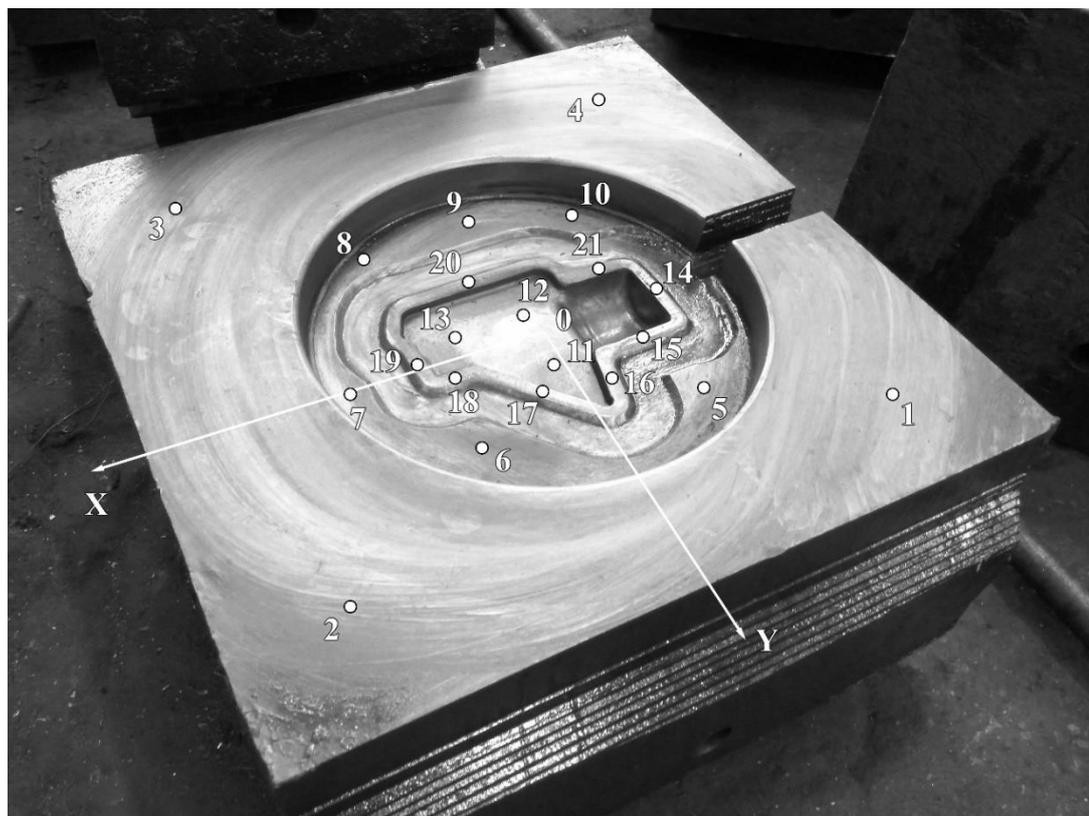


Рисунок В41 – Верхний штамп для поковки «корпус руля», замер 3

Таблица В41 – Верхний штамп для поковки «корпус руля», замер 3

№ точки	Результаты измерений Н, А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1657	1657	1657	
2	1822	1756	1789	
3	1243	1272	1258	
4	1214	1184	1199	
5	1243		1243	Замер под углом
6	1492	1155	1324	
7	–	1038	1038	
8	1331		1331	Замер под углом
9	1302	1272	1287	
10	1214		1214	Замер под углом
11	672	674	673	
12	1243	1302	1273	
13	979	984	982	
14	–	1184	1184	
15	1038	–	1038	
16	1067		1067	Замер под углом
17	924		924	Замер под углом

Окончание таблицы В41

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
18	1096	–	1096	
19	–	1096	1096	
20	1084	–	1084	
21	1155	–	1155	
Среднее значение по всем точкам			1186	

- Замер 4 (таблица В42). Штамп на этапе восстановления (рисунок В42).

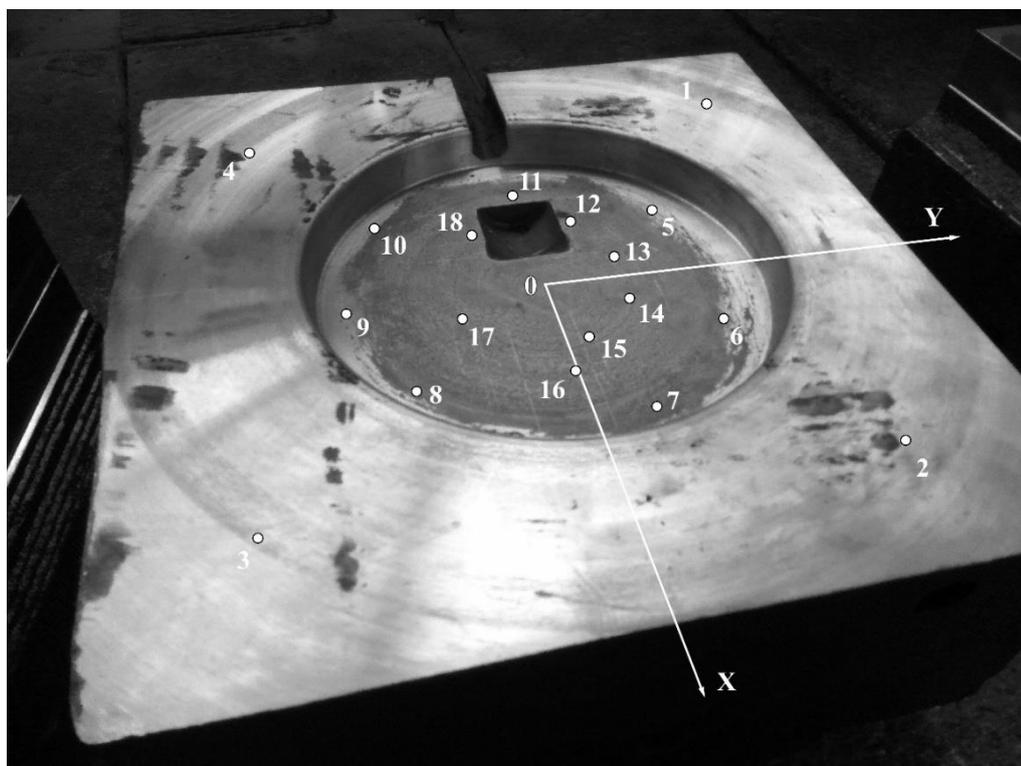


Рисунок В42 – Верхний штамп для поковки «корпус руля», замер 4

Таблица В42 – Верхний штамп для поковки «корпус руля», замер 4

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1756	1756	1756	
2	1789	1657	1723	
3	1624	1624	1624	
4	1525	1591	1558	
5	1155		1155	Замер под углом
6	1360	1459	1410	
7	–	1052	1052	
8	1272		1272	Замер под углом

Окончание таблицы В42

№ точки	Результаты измерений Н _c , А/м			Примечания
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
9	1272	1302	1287	
10	1302		1302	Замер под углом
11	–	1426	1426	
12	849	–	849	
13	1096		1096	Замер под углом
14	1008		1008	Замер под углом
15	1184	–	1184	
16	–	1184	1184	
17	1591	–	1591	
18	1558	–	1558	
Среднее значение по всем точкам			1335	

5.2 Нижний штамп для поковки «корпус руля». Материал поковки – 13Х11Н2В2МФ-Ш. Материал штампа – 5ХНМ.

- Замер 1 (таблица В43). Штамп после термообработки (рисунок В43).

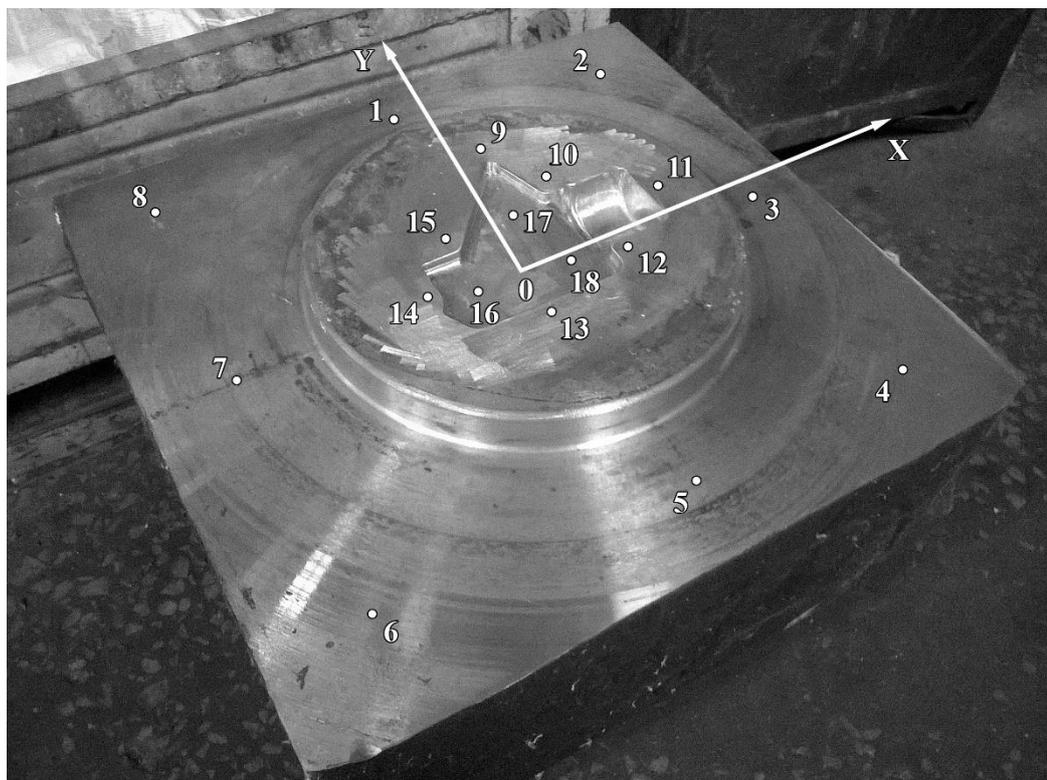


Рисунок В43 – Нижний штамп для поковки «корпус руля», замер 1

Таблица В43 – Нижний штамп для поковки «корпус руля», замер 1

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1111	1096	1104
2	1331	1360	1346
3	1243	1126	1185
4	1214	1331	1273
5	1184	1272	1228
6	1393	1426	1410
7	1360	1360	1360
8	1426	1272	1349
9	1272	1272	1272
10	1492	1331	1412
11	1492	1492	1492
12	1459	1272	1366
13	1393	1331	1362
14	1426	1525	1476
15	1258	1426	1342
16	1184	1243	1214
17	1243	1272	1258
18	1214	1492	1353
Среднее значение по всем точкам			1322

- Замер 2 (таблица В44). Штамп после штамповки 1001 поковок (рисунок В44).

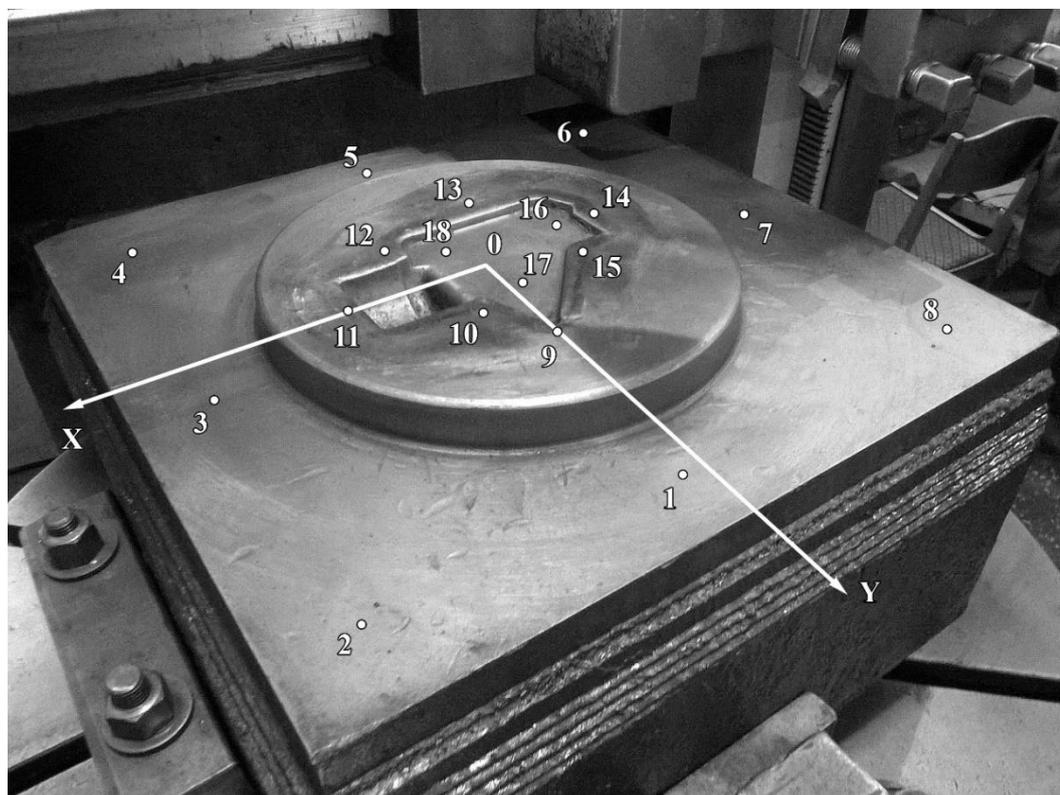


Рисунок В44 – Нижний штамп для поковки «корпус руля», замер 2

Таблица В44 – Нижний штамп для поковки «корпус руля», замер 2

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1426	1214	1320
2	1302	1067	1185
3	1214	1096	1155
4	1459	1591	1525
5	1214	1272	1243
6	–	–	–
7	1243	1393	1318
8	1331	1360	1346
9	1360	1393	1377
10	1426	1111	1269
11	1008	1393	1201
12	1214	1067	1141
13	1214	1184	1199
14	1009	1067	1038
15	1111	1126	1119
16	1426	1272	1349
17	1009	1243	1126
18	1096	1214	1155
Среднее значение по всем точкам			1239

- Замер 3 (таблица В45). Штамп после штамповки и калибровки 1020 поковок (рисунок В45).

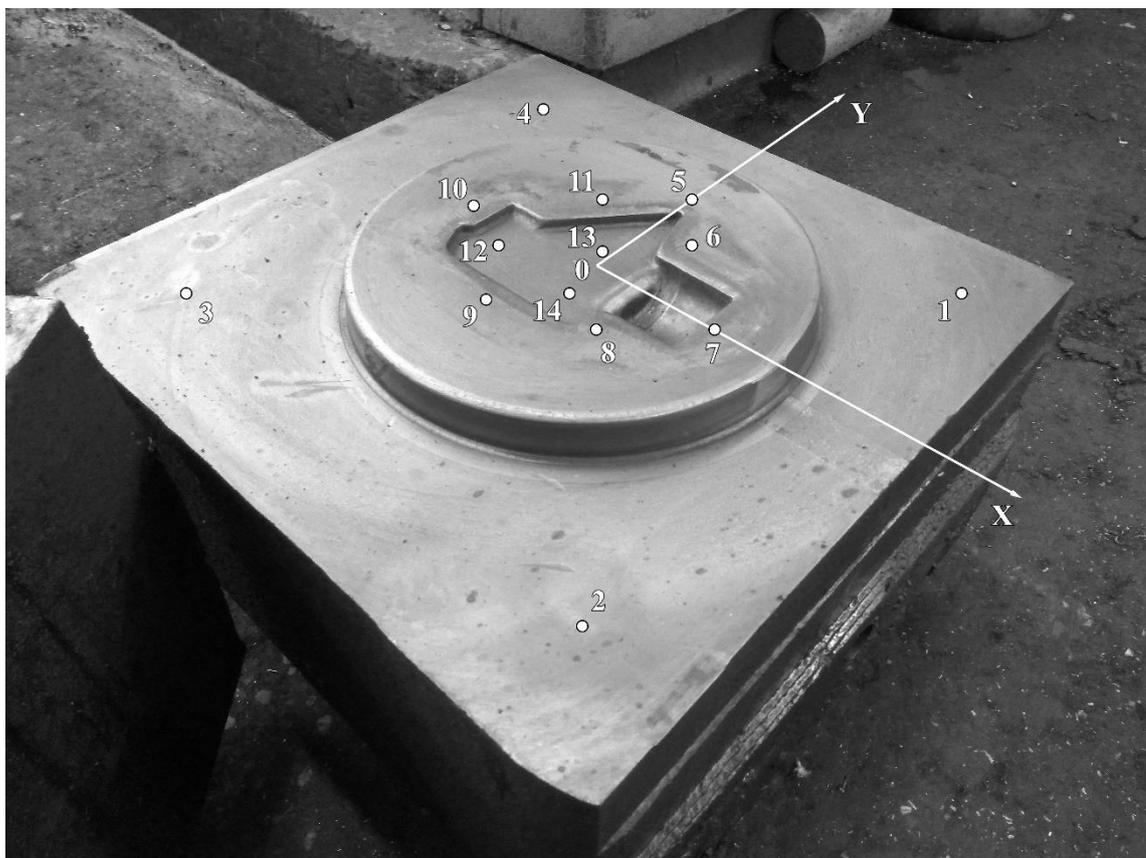


Рисунок В45 – Нижний штамп для поковки «корпус руля», замер 3

Таблица В45 – Нижний штамп для поковки «корпус руля», замер 3

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м			Твёрдость, НВ
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1360	1126	1243	259
2	1272	1331	1302	293
3	1393	1272	1333	293
4	1272	1302	1287	304
5	1272	1214	1243	291
6	1426	1302	1364	295
7	1096	1459	1278	304
8	1393	1214	1304	284
9	1155	1331	1243	276
10	1038	1155	1097	282
11	1067	1126	1097	289
12	1243	1393	1318	297
13	1067	1126	1097	289
14	1067	1126	1097	296
Среднее значение по всем точкам			1236	289

- Замер 4 (таблица В46). Штамп на этапе восстановления (рисунки В46, В47).

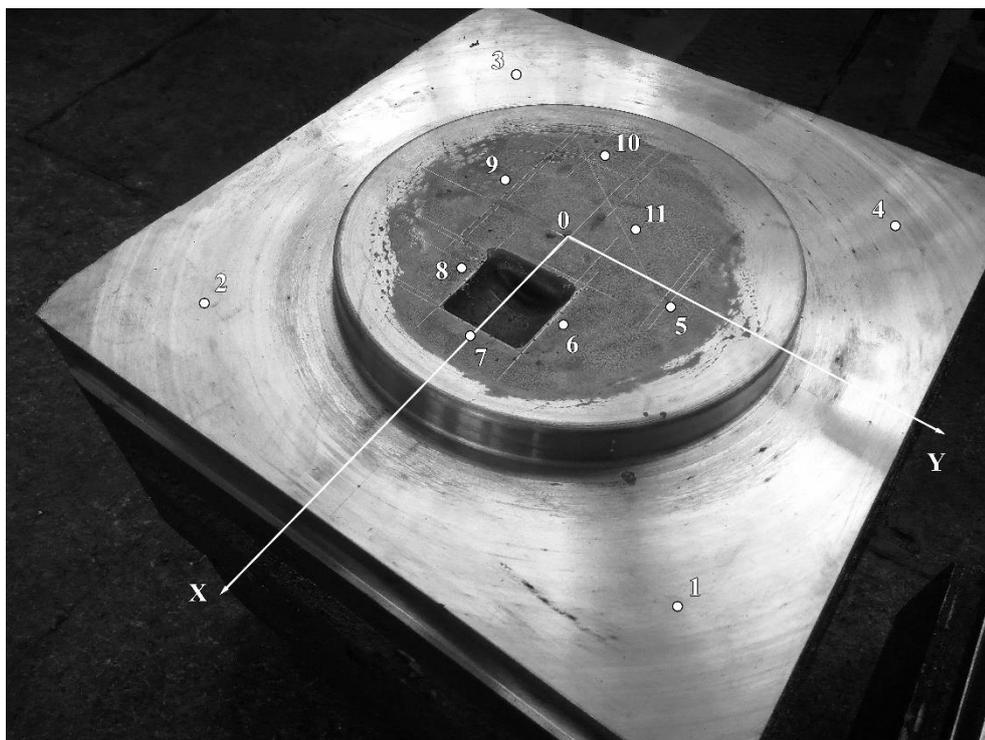


Рисунок В46 – Нижний штамп для поковки «корпус руля», замер 4

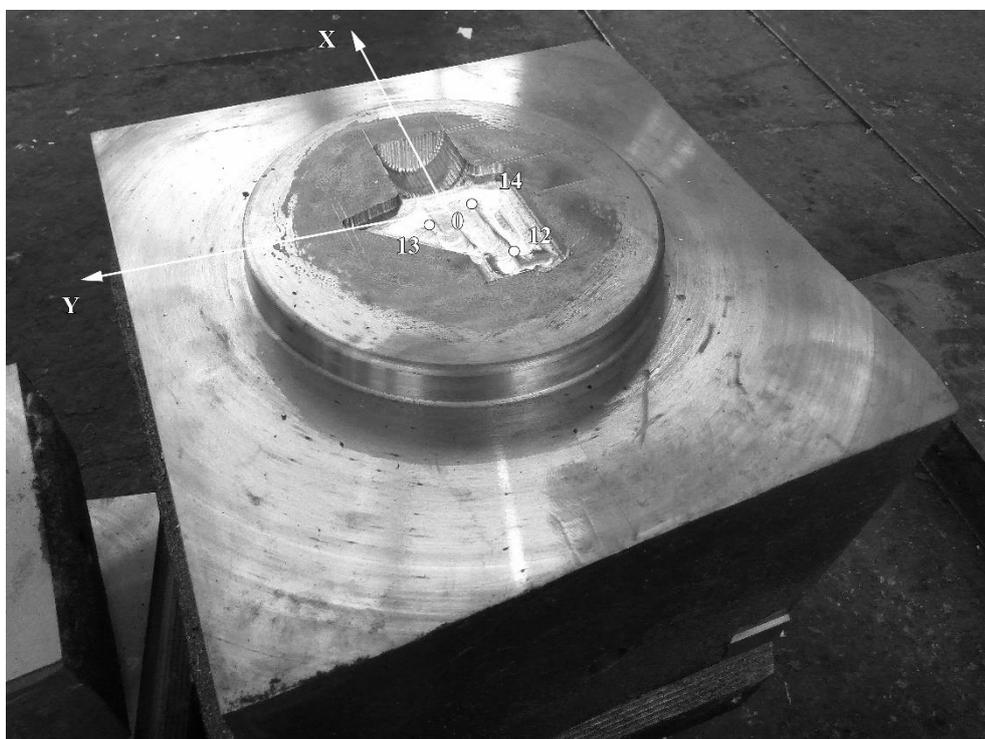


Рисунок В47 – Нижний штамп для поковки «корпус руля», дополнительный замер

Таблица В46 – Нижний штамп для поковки «корпус руля», замер 5

№ точки	Результаты измерений Н _c , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1302	1492	1397
2	1243	1184	1214
3	1426	1331	1379
4	1360	1302	1331
5	950	979	965
6	1067	899	983
7	1426	1459	1443
8	1184	1272	1228
9	1155	1272	1214
10	1155	1214	1185
11	1184	1038	1111
12	1214	1331	1273
13	1126	1214	1170
14	1155	1067	1111
Среднее значение по всем точкам			1214

6.1 Нижний штамп для поковки «корпус газогенератора». Материал поковки – 12Х2НВФА. Материал штампа – 5ХНМ.

- Замер 1 (таблица В47). Штамп после штамповки 451 поковок (рисунок В48).

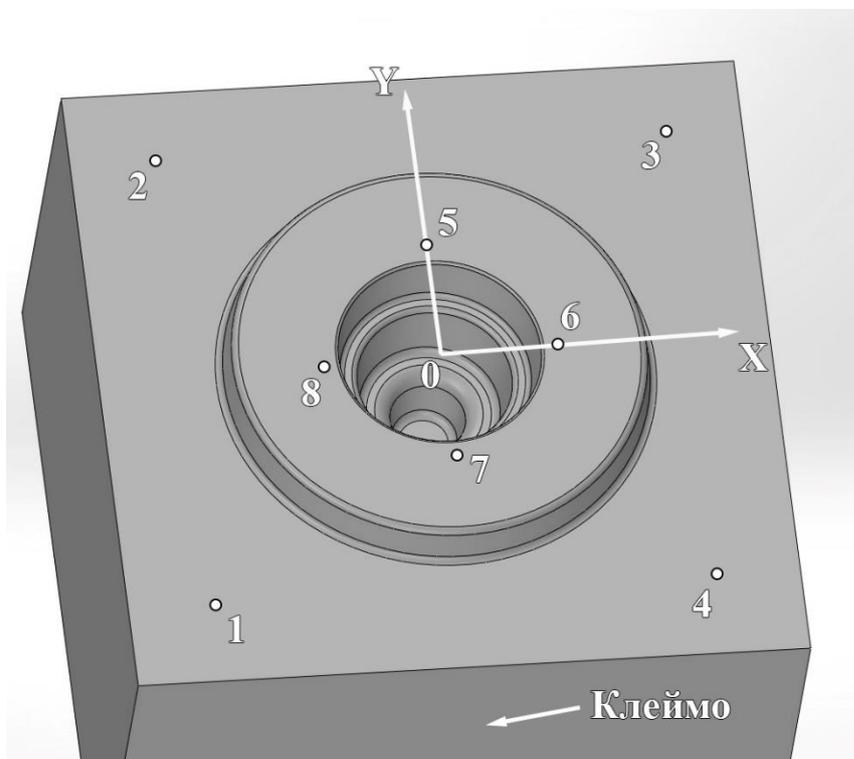


Рисунок В48 – Нижний штамп для поковки «корпус газогенератора», замер 1

Таблица В47 – Нижний штамп для поковки «корпус газогенератора», замер 1

№ точки	Результаты измерений H_c , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1393	1214	1304
2	1096	1393	1245
3	1272	1155	1214
4	1331	1393	1362
5	1184	1214	1199
6	1126	1302	1214
7	1492	1155	1324
8	1126	1272	1199
Среднее значение по всем точкам			1257

2) Замер 2 (таблица В48). Штамп после штамповки 181 поковок (рисунок В49).

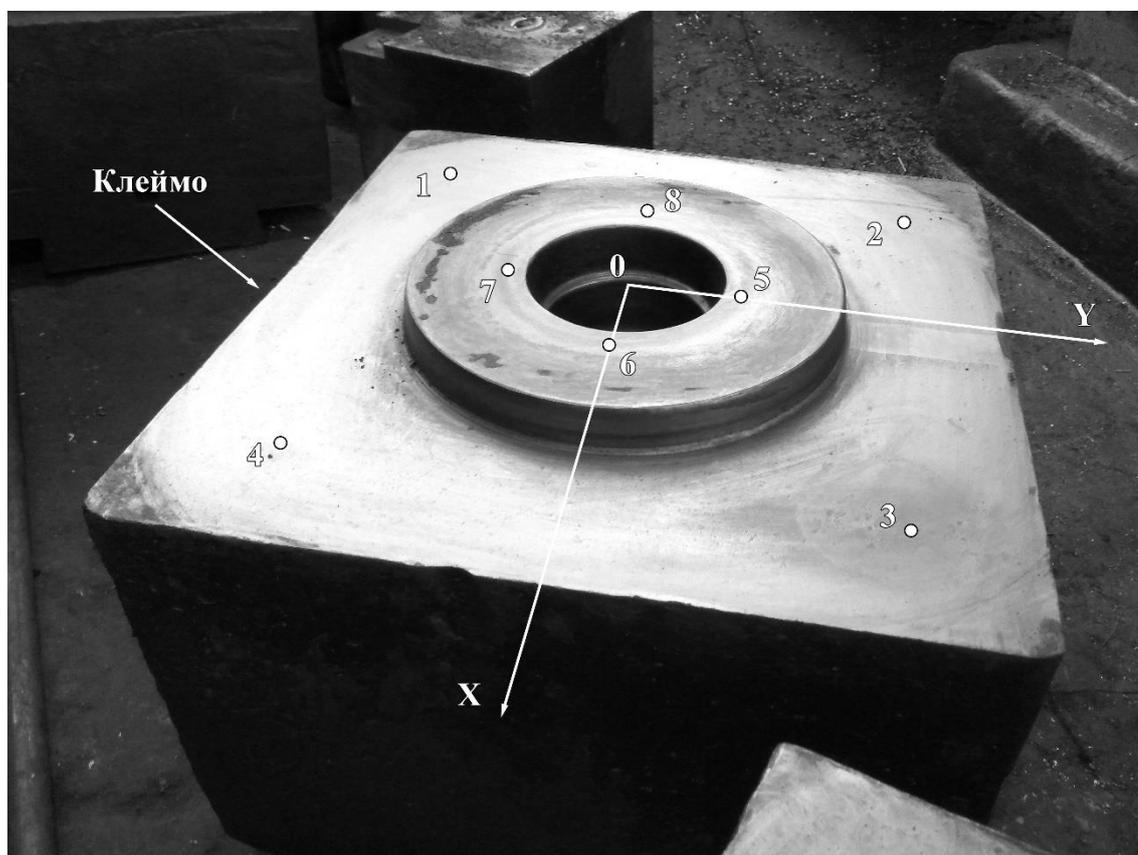


Рисунок В49 – Нижний штамп для поковки «корпус газогенератора», замер 2

Таблица В48 – Нижний штамп для поковки «корпус газогенератора», замер 2

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м			Твёрдость, НВ
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1067	1067	1067	419
2	1126	1331	1229	466
3	1126	1038	1082	400
4	1067	1214	1141	432
5	1272	1067	1170	365
6	1096	1302	1199	359
7	1459	1096	1278	377
8	1243	1525	1384	365
Среднее значение по всем точкам			1194	398

6.2 Верхний штамп для поковки «корпус газогенератора». Материал поковки – 12Х2НВФА. Материал штампа – 5ХНМ.

- Замер 1 (таблица В49). Штамп после штамповки 451 поковок (рисунок В50).

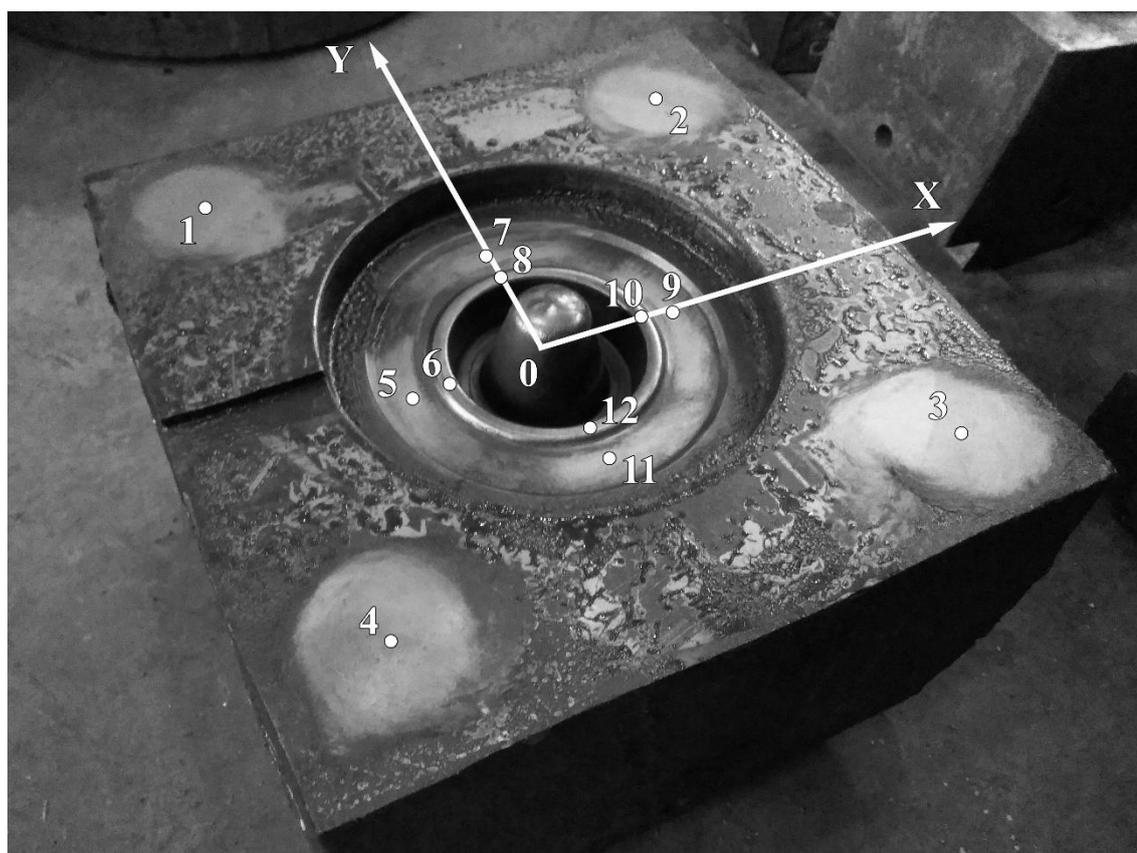


Рисунок В50 – Верхний штамп для поковки «корпус газогенератора», замер 1

Таблица В49 – Верхний штамп для поковки «корпус газогенератора», замер 1

№ точки	Результаты измерений Нс, А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1360	1331	1346
2	1184	1272	1228
3	1393	1302	1348
4	1243	1393	1318
5	–	1302	1302
6	–	1126	1126
7	1492	–	1492
8	697	–	697
9	–	1331	1331
10	–	672	672
11	1126	–	1126
12	924	–	924
Среднее значение по всем точкам			1159

- Замер 2 (таблица В50). Штамп после штамповки 181 поковок (рисунок В51).

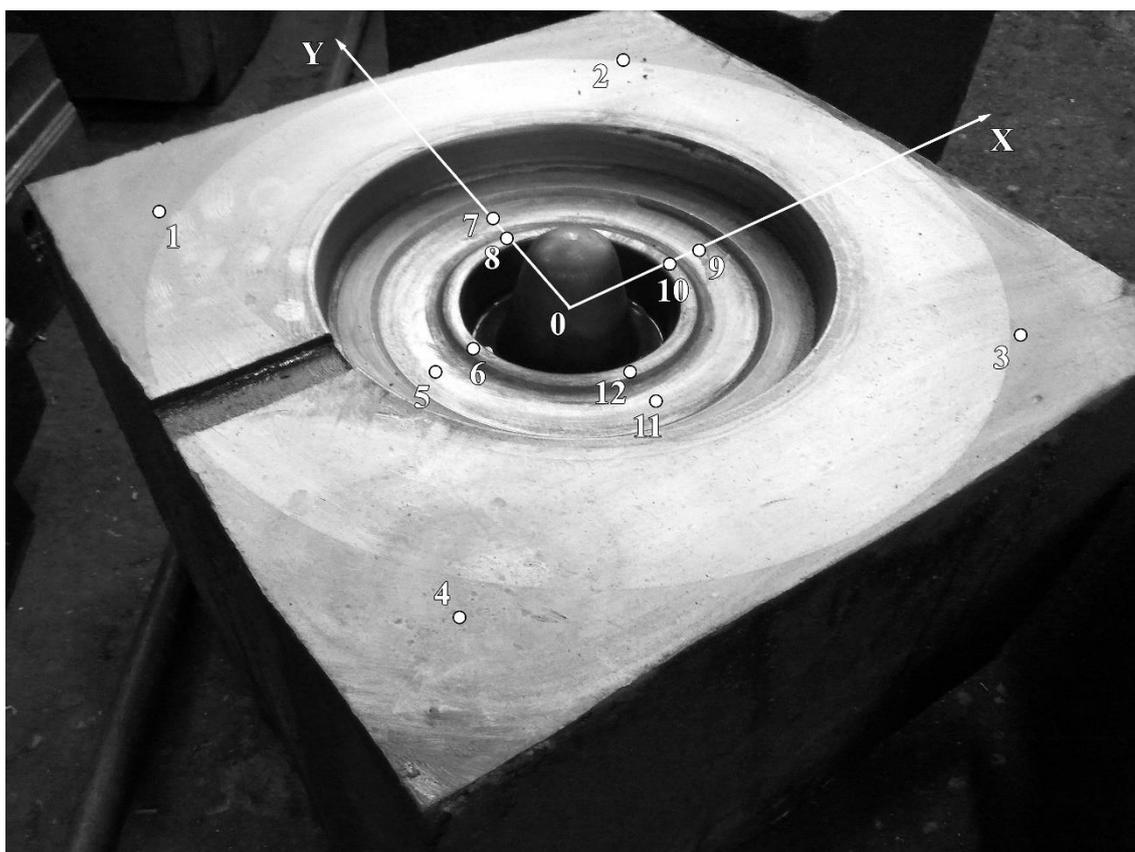


Рисунок В51 – Верхний штамп для поковки «корпус газогенератора», замер 2

Таблица В50 – Верхний штамп для поковки «корпус газогенератора», замер 2

№ точки	Результаты измерений Н _c , А/м			Твёрдость, НВ
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение	
1	1302	1331	1317	395
2	1155	1302	1229	405
3	1184	1243	1214	409
4	1155	1184	1170	413
5	–	1243	1243	309
6	–	1067	1067	297
7	1302	–	1302	364
8	543	–	543	290
9	–	1096	1096	315
10	–	584	584	312
11	979	–	979	329
12	849	–	849	290
Среднее значение по всем точкам			1049	344

7.1 Верхний штамп для поковки «проушина». Материал поковки – 30ХГСА. Материал штампа – 5ХНВ. Штамп на этапе восстановления (таблица В51, рисунок В52).

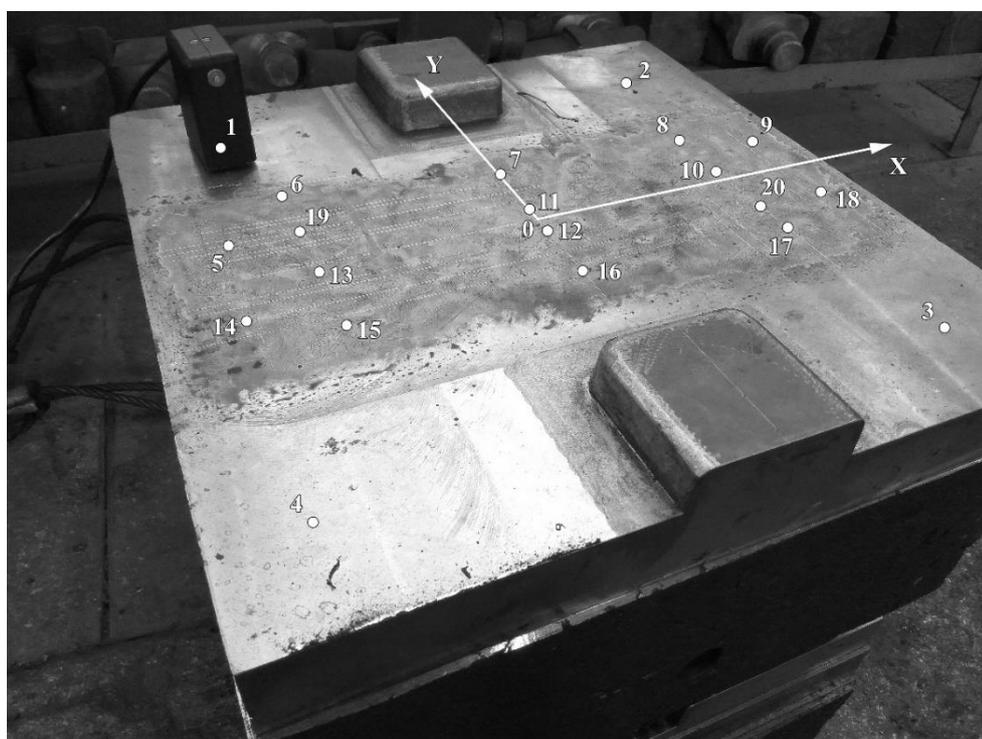


Рисунок В52 – Верхний штамп для поковки «проушина»

Таблица В51 – Верхний штамп для поковки «проушина»

№ точки	Результаты измерений Н _с , А/м		
	В направлении ОХ	В направлении ОУ	Среднее значение
1	1096	1126	1111
2	722	924	823
3	1096	1155	1126
4	1038	1096	1067
5	874	899	887
6	1067	1008	1038
7	899	950	925
8	924	874	899
9	773	849	811
10	798	773	786
11	874	950	912
12	849	950	900
13	950	874	912
14	924	874	899
15	849	874	862
16	899	924	912
17	950	722	836
18	979	924	952
19	1009	1008	1008
20	899	773	836
Среднее значение по всем точкам			925

ПРИЛОЖЕНИЕ Г.

Код программы для определения стойкости штампов ГОШ по точкам замера

```
PROGRAM METOD1
REAL, DIMENSION(:,:), ALLOCATABLE :: HC
REAL, DIMENSION(2,2) :: fk
REAL, DIMENSION(4) :: HB
REAL fkr,X1,X2,fkrmin
INTEGER N,Nr,NT,N1,err0,err1,HBk,Nmin,fkm
```

C

C Расчёт стойкости штампа по величине коэрцитивной силы.

C

C Используются данные для двух замеров коэрцитивной силы:

C перед эксплуатацией штампа и после штамповки партии поковок.

C Значения температуры T и напряжений Sigma для расчёта предельной

C величины коэрцитивной силы по функции fk (см. далее) задаются исходя

C из расчёта напряженно-деформированного состояния штампа

C численно-аналитическими методами (требуется стороннее приложение).

C Производится расчёт скорости изменения коэрцитивной силы в точках

C между двумя замерами. После чего рассчитывается теоретическое число

C поковок (от первого замера), после которого материал штампа переходит

C в предельное состояние.

C Также производится расчёт твёрдости гравюры штампа в точках замеров

C по полученным моделям для сталей 5ХНВ и 5ХНМ. На основе полученных

C значений твёрдости рассчитывается стойкость штампа по критерию

C разупрочнения гравюры.

C Входные данные: NT - количество точек, в которых производились замеры;

C N1 - количество поковок, отштампованных до второго замера коэрцитивной

C силы; fk - массив с коэффициентами линейной аппроксимации предельной

С поверхности вида $H_{sk}=(ak1 * T+bk1)*(ak2 * \text{Sigma}+bk2)$; f_{km} - "0" для
С расчёта по всей предельной поверхности f_k , "1" для расчёта по
С минимальному значению функции f_k для заданного температурно-
С напряженного состояния гравюры штампа (подходит для f_k , полученной
С со штампа, отработавшего свой ресурс); H_{Bk} - предельное
С значение твёрдости гравюры по Бринеллю; HC - матрица исходных данных
С из NT строк и 4 столбцов. 1 столбец - коэрцитивная сила в точке
С до эксплуатации штампа, А/м; 2 - коэрцитивная сила в точке
С после штамповки партии N1 поковок, А/м; 3 - температура в точке замера,
С град.С; 4 - напряжение в точке замера, МПа.

С

С Ограничение: расчёт производится при условии снижения величины
С коэрцитивной силы при эксплуатации штампа. Рост коэрцитивной силы
С не влияет на результат.

С

С Чтение исходных данных.

С

```
OPEN(2,FILE='M1INP.DAT',STATUS='OLD')
```

```
OPEN(3,FILE='M1OUT.DAT',STATUS='UNKNOWN')
```

```
READ(2,*) NT
```

```
READ(2,*) N1
```

```
IF (NT.LT.1.OR.N1.LT.1) THEN
```

```
    WRITE(3,1)
```

```
    GO TO 50
```

```
END IF
```

```
READ(2,*)  $f_k, f_{km}$ 
```

```
READ(2,*)  $H_{Bk}$ 
```

```
ALLOCATE (HC(4,NT))
```

```
READ(2,*) HC
```

С

C Начало записи выходного файла.

C

WRITE(3,2) NT

WRITE(3,3) N1

WRITE(3,4)

WRITE(3,5) HC

WRITE(3,6)

WRITE(3,7) fk

WRITE(3,8) HBk

C

C При $f_{km} \neq 0$: расчёт минимального значения коэрцитивной силы по

C функции f_k в точках замеров.

C

IF (fkm.NE.0) THEN

 fkrmin=(fk(1,1)*HC(3,1)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(4,1)+fk(2,2))

 Nmin=1

 DO i=2,NT

 fkr=(fk(1,1)*HC(3,i)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(4,i)+fk(2,2))

 IF (fkr.LT.fkrmin) THEN

 fkrmin=fkr

 Nmin=i

 END IF

 END DO

 WRITE(3,9) fkrmin,Nmin

END IF

C

C Расчёт разности между значениями коэрцитивной силы для точки в

C предельном состоянии и до эксплуатации. Расчёт скорости изменения

C коэрцитивной силы в точке. Расчёт стойкости по начальной величине

C коэрцитивной силы и скорости её изменения, поиск минимального

C значения.

C

err0=0

err1=0

N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.

WRITE(3,10)

DO i=1,NT

IF (fkm.EQ.0) THEN

fkr=(fk(1,1)*HC(3,i)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(4,i)+fk(2,2))

X1=fkr-HC(1,i)

ELSE

X1=fkrmin-HC(1,i)

END IF

X2=(HC(2,i)-HC(1,i))/N1

HB(1)=0.0754*HC(1,i)+259.3 ! Твердость для замера 1 по 5XHB

HB(2)=0.0754*HC(2,i)+259.3 ! Твердость для замера 2 по 5XHB

HB(3)=0.095*HC(1,i)+219.1 ! Твердость для замера 1 по 5XHM

HB(4)=0.095*HC(2,i)+219.1 ! Твердость для замера 2 по 5XHM

WRITE(3,11) i,X1,X2,HB

IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнуто предельное значение коэрцитивной силы.

WRITE(3,12)

GO TO 30

END IF

IF (X2.EQ.0) THEN

err0=err0+1 ! Скорость изменения коэрцитивной силы в точке равна 0.

ELSE

IF (X2.GT.0) THEN

err1=err1+1 ! Зафиксирован рост коэрцитивной силы.

ELSE

Nr=X1/X2

```

                IF (Nr.LT.N) THEN
                    N=Nr
                END IF
            END IF
        END IF
    END DO
C
C   Вывод результатов расчёта стойкости по коэрцитивной силе.
C
WRITE(3,13) err0,NT
WRITE(3,14) err1,NT
IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
    WRITE(3,15)
ELSE
    WRITE(3,16) N
END IF
30 CONTINUE
C
C   Расчёт стойкости по разупрочнению гравюры при использовании
C   в качестве инструментального материала стали 5ХНВ.
C
err0=0
err1=0
N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.
DO i=1,NT
    HB(1)=0.0754*HC(1,i)+259.3 ! Твердость для замера 1 по 5ХНВ
    HB(2)=0.0754*HC(2,i)+259.3 ! Твердость для замера 2 по 5ХНВ
    X1=HBk-HB(1)
    X2=(HB(2)-HB(1))/N1
    IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнута минимальная твёрдость.

```

```

WRITE(3,17)
GO TO 40
END IF
IF (X2.EQ.0) THEN
    err0=err0+1 ! Изменения твёрдости в точке не происходит.
ELSE
    IF (X2.GT.0) THEN
        err1=err1+1 ! Зафиксирован рост твёрдости.
    ELSE
        Nr=X1/X2
        IF (Nr.LT.N) THEN
            N=Nr
        END IF
    END IF
END IF
END IF
END DO
C
C Вывод результатов расчёта стойкости по разупрочнению гравюры
C для 5XHB.
C
WRITE(3,18)
WRITE(3,19) err0,NT
WRITE(3,20) err1,NT
IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
    WRITE(3,21)
ELSE
    WRITE(3,22) N
END IF
40 CONTINUE
C

```

С Расчёт стойкости по разупрочнению гравюры при использовании
С в качестве инструментального материала стали 5ХНМ.

С

err0=0

err1=0

N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.

DO i=1,NT

HB(3)=0.095*HC(1,i)+219.1 ! Твердость для замера 1 по 5ХНМ

HB(4)=0.095*HC(2,i)+219.1 ! Твердость для замера 2 по 5ХНМ

X1=HBk-HB(3)

X2=(HB(4)-HB(3))/N1

IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнута минимальная твёрдость.

WRITE(3,17)

GO TO 50

END IF

IF (X2.EQ.0) THEN

err0=err0+1 ! Изменения твёрдости в точке не происходит.

ELSE

IF (X2.GT.0) THEN

err1=err1+1 ! Зафиксирован рост твёрдости.

ELSE

Nr=X1/X2

IF (Nr.LT.N) THEN

N=Nr

END IF

END IF

END IF

END DO

С

С Вывод результатов расчёта стойкости по разупрочнению гравюры

C для 5XHM.

C

WRITE(3,23)

WRITE(3,19) err0,NT

WRITE(3,20) err1,NT

IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN

WRITE(3,21)

ELSE

WRITE(3,22) N

END IF

50 CONTINUE

C

CLOSE (2)

CLOSE (3)

STOP

1 FORMAT('Ошибка при задании исходных '
*'данных')

2 FORMAT('Число замеров =',I3)

3 FORMAT('Поковок между замерами =',I5/)

4 FORMAT('Hc0, A/м',3X,'Hc1, A/м',3X,
*'Т, град.С',3X,'Sigma, МПа')

5 FORMAT(F8.1,3X,F8.1,4X,F8.1,5X,F8.1)

6 FORMAT('/Уравнение предельной пов-ти:')

7 FORMAT('Hck=(,F12.5,' * Т +',F12.5,) * (,
*F12.5,' * Sigma +',F12.5,))

8 FORMAT('Предельная твёрдость: ',I3,' HB')

9 FORMAT('/Мин.пред.коэрц. сила Hck= ',F5.1,
*' А/м в точке ',I3)

10 FORMAT(/2X,'N',6X,'Hck-Hc0',5X,'Скорость',
*5X,'HB0(5XHB)',5X,'HB1(5XHB)',

```

*5X,'HB0(5XHM)',5X,'HB1(5XHM)')
11 FORMAT(I3,5X,F8.1,5X,F8.3,9X,F5.1,9X,F5.1,9X,F5.1,9X,F5.1)
12 FORMAT(/'Достигнуто предельное '
*'значение коэрцитивной силы!')
13 FORMAT(/'Величина коэрцитивной силы'
*' не изменяется в ',I6,' точках из ',I6)
14 FORMAT('Рост коэрцитивной силы в ',
*I6,' точках из ',I6)
15 FORMAT('!!! Ошибка вычисления стойкости'
*' штампа !!!')
16 FORMAT('Стойкость штампа по ',
*'коэрцитивной силе:',I10,' поковок')
17 FORMAT(/'Достигнуто минимальная '
*'твёрдость!')
18 FORMAT(//'Расчёт для 5ХНВ.')
19 FORMAT('Твёрдость не изменяется '
*'в ',I6,' точках из ',I6)
20 FORMAT('Рост твёрдости в ',
*I6,' точках из ',I6)
21 FORMAT('!!! Ошибка вычисления стойкости'
*' штампа !!!')
22 FORMAT('Стойкость штампа по ',
*'разупрочнению гравюры:',I10,
*' поковок')
23 FORMAT(//'Расчёт для 5ХНМ.')
END

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д.

Код программы для определения стойкости штампов ГОШ по точкам замера с усреднением скорости изменения коэрцитивной силы

```
PROGRAM METHOD2
REAL, DIMENSION(:,:), ALLOCATABLE :: HC
REAL, DIMENSION(2,2) :: fk
REAL, DIMENSION(4) :: fv
REAL, DIMENSION(2) :: HB
REAL fkr, fkrmin, r2, X1, X2
INTEGER N, Nr, NT, N1, err0, err1, HBk, Nmin, fkm, bm
C
C  Расчёт стойкости штампа по величине коэрцитивной силы.
C
C  Используются данные для двух замеров коэрцитивной силы:
C  перед эксплуатацией штампа и после штамповки партии поковок.
C  Производится расчёт скорости изменения коэрцитивной силы в точках
C  между двумя замерами. Величина скорости от числа поковок
C  аппроксимируется по методу Брандона функцией вида
C   $\Delta H_c = a v_1 * T + b v_1 * \text{Sigma} + c v_1 * T * \text{Sigma} + d v_1$ . Значения температуры T и
C  напряжений Sigma задаются исходя из расчёта
C  напряженно-деформированного состояния штампа
C  численно-аналитическими методами (требуется стороннее приложение).
C  После чего рассчитывается теоретическое число поковок (от первого замера),
C  после которого материал штампа переходит в предельное состояние.
C  Также производится расчёт твёрдости гравюры штампа в точках замеров
C  по полученным моделям для сталей 5ХНВ и 5ХНМ. На основе полученных
C  значений твёрдости рассчитывается стойкость штампа по критерию
C  разупрочнения гравюры.
```

С Входные данные: NT - количество точек, в которых производились замеры;
 С N1 - количество поковок, отштампованных до второго замера коэрцитивной
 С силы; fk - массив с коэффициентами линейной аппроксимации предельной
 С поверхности вида $H_{sk}=(ak1*T+bk1)*(ak2*Sigma+bk2)$; fkm - "0" для
 С расчёта по всей предельной поверхности fk, "1" для расчёта по
 С минимальному значению функции fk для заданного температурно-
 С напряженного состояния гравюры штампа (подходит для fk, полученной
 С со штампа, отработавшего свой ресурс); HBk - предельное
 С значение твёрдости гравюры по Бринеллю; bm - "0" для полного расчёта
 С методом Брандона, "1" для автоматического выбора расчёта методом
 С Брандона или методом наименьших квадратов; HC - матрица исходных
 С данных из NT строк и 4 столбцов. 1 столбец - коэрцитивная сила в точке
 С до эксплуатации штампа, А/м; 2 - коэрцитивная сила в точке
 С после штамповки партии N1 поковок, А/м; 3 - температура в точке замера,
 С град.С; 4 - напряжение в точке замера, МПа.
 С
 С Ограничение: расчёт производится при условии снижения величины
 С коэрцитивной силы при эксплуатации штампа. Рост коэрцитивной силы
 С не влияет на результат.
 С
 С Чтение исходных данных.
 С

```

OPEN(2,FILE='M2INP.DAT',STATUS='OLD')
OPEN(3,FILE='M2OUT.DAT',STATUS='UNKNOWN')
READ(2,*) NT
READ(2,*) N1
IF (NT.LT.1.OR.N1.LT.1) THEN
  WRITE(3,1)
  GO TO 50
END IF
  
```

READ(2,*) fk,fkm

READ(2,*) HBk

READ(2,*) bm

ALLOCATE (HC(4,NT))

READ(2,*) HC

C

C Начало записи выходного файла.

C

WRITE(3,2) NT

WRITE(3,3) N1

WRITE(3,4)

WRITE(3,5) HC

WRITE(3,6)

WRITE(3,7) fk

WRITE(3,8) HBk

C

C При fkm!=0: расчёт минимального значения коэрцитивной силы по

C функции fk в точках замеров.

C

IF (fkm.NE.0) THEN

 fkrmin=(fk(1,1)*HC(3,1)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(4,1)+fk(2,2))

 Nmin=1

 DO i=2,NT

 fkr=(fk(1,1)*HC(3,i)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(4,i)+fk(2,2))

 IF (fkr.LT.fkrmin) THEN

 fkrmin=fkr

 Nmin=i

 END IF

 END DO

 WRITE(3,9) fkrmin,Nmin

END IF

C

C Расчёт разности между значениями коэрцитивной силы для точки в
C предельном состоянии и до эксплуатации. Расчёт скорости изменения
C коэрцитивной силы в точке. Аппроксимация скорости изменения
C коэрцитивной силы по методу Брандона.

C

CALL BRANDON(HC,NT,N1,bm,fv,r2)

WRITE(3,10)

WRITE(3,11) fv,r2

C

C Расчёт стойкости по начальной величине коэрцитивной силы
C и скорости её изменения, поиск минимального значения.

C

err0=0

err1=0

N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.

DO i=1,NT

IF (fkm.EQ.0) THEN

fkr=(fk(1,1)*HC(3,i)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(4,i)+fk(2,2))

X1=fkr-HC(1,i)

ELSE

X1=fkrmin-HC(1,i)

END IF

X2=fv(1)*HC(3,i)+fv(2)*HC(4,i)+fv(3)*HC(3,i)*HC(4,i)+fv(4)

IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнуто предельное значение коэрцитивной силы.

WRITE(3,12)

GO TO 30

END IF

IF (X2.EQ.0) THEN

err0=err0+1 ! Скорость изменения коэрцитивной силы в точке равна 0.

ELSE

IF (X2.GT.0) THEN

err1=err1+1 ! Зафиксирован рост коэрцитивной силы.

ELSE

Nr=X1/X2

IF (Nr.LT.N) THEN

N=Nr

END IF

END IF

END IF

END DO

C

C Вывод результатов расчёта стойкости по коэрцитивной силе.

C

WRITE(3,13) err0,NT

WRITE(3,14) err1,NT

IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN

WRITE(3,15)

ELSE

WRITE(3,16) N

END IF

30 CONTINUE

C

C Расчёт стойкости по разупрочнению гравюры при использовании

C в качестве инструментального материала стали 5ХНВ.

C

err0=0

err1=0

N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.

```

WRITE(3,17)
WRITE(3,18)
DO i=1,NT
  HB(1)=0.0754*HC(1,i)+259.3 ! Твердость для замера 1 по 5ХНВ
  HB(2)=0.0754*HC(2,i)+259.3 ! Твердость для замера 2 по 5ХНВ
  WRITE(3,19) i,HB
  X1=HBk-HB(1)
  X2=(HB(2)-HB(1))/N1
  IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнута минимальная твёрдость.
    WRITE(3,20)
    GO TO 40
  END IF
  IF (X2.EQ.0) THEN
    err0=err0+1 ! Изменения твёрдости в точке не происходит.
  ELSE
    IF (X2.GT.0) THEN
      err1=err1+1 ! Зафиксирован рост твёрдости.
    ELSE
      Nr=X1/X2
      IF (Nr.LT.N) THEN
        N=Nr
      END IF
    END IF
  END IF
END IF
END DO
C
C Вывод результатов расчёта стойкости по разупрочнению гравюры
C для 5ХНВ.
C
WRITE(3,21) err0,NT

```

```

WRITE(3,22) err1,NT
IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
    WRITE(3,23)
ELSE
    WRITE(3,24) N
END IF
40 CONTINUE
С
С  Расчёт стойкости по разупрочнению гравюры при использовании
С  в качестве инструментального материала стали 5ХНМ.
С
err0=0
err1=0
N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.
WRITE(3,25)
WRITE(3,18)
DO i=1,NT
    HB(1)=0.095*HC(1,i)+219.1 ! Твердость для замера 1 по 5ХНМ
    HB(2)=0.095*HC(2,i)+219.1 ! Твердость для замера 2 по 5ХНМ
    WRITE(3,19) i,HB
    X1=HBk-HB(1)
    X2=(HB(2)-HB(1))/N1
    IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнута минимальная твёрдость.
        WRITE(3,20)
        GO TO 50
    END IF
    IF (X2.EQ.0) THEN
        err0=err0+1 ! Изменения твёрдости в точке не происходит.
    ELSE
        IF (X2.GT.0) THEN

```

```

err1=err1+1 ! Зафиксирован рост твёрдости.
ELSE
    Nr=X1/X2
    IF (Nr.LT.N) THEN
        N=Nr
    END IF
END IF
END IF
END DO
C
C Вывод результатов расчёта стойкости по разупрочнению гравюры
C для 5XHM.
C
WRITE(3,21) err0,NT
WRITE(3,22) err1,NT
IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
    WRITE(3,23)
ELSE
    WRITE(3,24) N
END IF
50 CONTINUE
C
CLOSE (2)
CLOSE (3)
STOP
1 FORMAT('Ошибка при задании исходных '
    *'данных')
2 FORMAT('Число замеров =',I3)
3 FORMAT('Поковок между замерами =',I5/)
4 FORMAT('Hc0, A/м',3X,'Hc1, A/м',3X,

```

*Т, град.С',3X,'Sigma, МПа')

5 FORMAT(F8.1,3X,F8.1,4X,F8.1,5X,F8.1)

6 FORMAT('/Уравнение предельной пов-ти:')

7 FORMAT('Hc=(,F12.5,' * Т +',F12.5,) * ('
 *F12.5,' * Sigma +',F12.5,))

8 FORMAT('Предельная твёрдость: ',I3,' HB')

9 FORMAT('/Мин.пред.коэрц. сила Hск= ',F5.1,
 *' А/м в точке ',I3)

10 FORMAT('/Уравнение скорости'
 *' изменения коэрцитивной силы:')

11 FORMAT('delHc= ',F12.7,' * Т +',F12.7,
 *' * Sigma + ',F12.7,' * Т*Sigma +',F15.7,', R2=',F8.3)

12 FORMAT('/Достигнуто предельное '
 *'значение коэрцитивной силы!')

13 FORMAT('/Величина коэрцитивной силы'
 *' не изменяется в ',I6,' точках из ',I6)

14 FORMAT('Рост коэрцитивной силы в ',
 *I6,' точках из ',I6)

15 FORMAT('!!! Ошибка вычисления стойкости'
 *' штампа !!!')

16 FORMAT('Стойкость штампа по ',
 *'коэрцитивной силе:',I10,' поковок')

17 FORMAT('/Расчёт для 5ХНВ.')

18 FORMAT(2X,'N',11X,'HB0',11X,'HB1')

19 FORMAT(I3,9X,F5.1,9X,F5.1)

20 FORMAT('/Достигнуто минимальная '
 *'твёрдость!')

21 FORMAT('Твёрдость не изменяется '
 *'в ',I6,' точках из ',I6)

22 FORMAT('Рост твёрдости в ',

```

      *I6,' точках из ',I6)
23  FORMAT('!!! Ошибка вычисления стойкости'
      *' штампа !!!')
24  FORMAT('Стойкость штампа по ',
      *'разупрочнению гравюры:',I10,
      *' поковок')
25  FORMAT(//'Расчёт для 5ХНМ.')
      END

```

```

C   Подпрограмма для расчёта методом Брандона коэффициентов функции
C   скорости изменения коэрцитивной силы вида
C    $\Delta H_c = a v_1 * T + b v_1 * \Sigma + c v_1 * T * \Sigma + d v_1$ .
C

```

```

SUBROUTINE BRANDON(HC,NT,N1,bm,f,r2)
REAL :: HC(4,NT)
REAL, DIMENSION(:,:), ALLOCATABLE :: XY
REAL, DIMENSION(4) :: f
INTEGER NT,N1,bm
REAL a1,a2,a3,b1,b2,b3,r21,r22,r23,r2m,r2,sum1,sum2,sumy
REAL delHc,Ymed

```

```

C
C   Задание временного массива XY из двух столбцов, запись в него скорости
C   изменения коэрцитивной силы и температуры в отдельных точках
C

```

```

ALLOCATE (XY(2,NT))
DO i=1,NT
      XY(1,i)=(HC(2,i)-HC(1,i))/N1
      XY(2,i)=HC(3,i)
END DO
CALL MNQ(XY,NT,a1,b1,r21) ! Линейная аппроксимация  $\Delta H_c = f(T)$ 

```

```

DO i=1,NT
    XY(2,i)=HC(4,i) ! Передача 4 столбца исходных данных (напряжений) во
временный массив
END DO
CALL MNQ(XY,NT,a2,b2,r22) ! Линейная аппроксимация delHc=f(Sigma)
C
C  Выбор функции с лучшей аппроксимацией.
C  Перезапись массива XY для второго шага.
C
IF (r21.GE.r22) THEN
    DO i=1,NT
        delHc=a1*HC(3,i)+b1
        IF (delHc.EQ.0) THEN
            WRITE(3,26)
            STOP 'Error'
        END IF
        XY(1,i)=XY(1,i)/delHc
    END DO
ELSE
    DO i=1,NT
        delHc=a2*HC(4,i)+b2
        IF (delHc.EQ.0) THEN
            WRITE(3,26)
            STOP 'Error'
        END IF
        XY(1,i)=XY(1,i)/delHc
        XY(2,i)=HC(3,i)
    END DO
END IF
C

```

C Второй шаг расчёта по алгоритму Брандона.

C Расчёт коэффициентов уравнения скорости.

C

```
CALL MNQ(XY,NT,a3,b3,r23)
```

C

```
IF (r21.GE.r22) THEN
```

```
  f(1)=a1*b3
```

```
  f(2)=a3*b1
```

```
  f(3)=a1*a3
```

```
  f(4)=b1*b3
```

```
ELSE
```

```
  f(1)=a3*b2
```

```
  f(2)=a2*b3
```

```
  f(3)=a3*a2
```

```
  f(4)=b3*b2
```

```
END IF
```

C

C Расчёт коэффициента детерминации r2.

C

```
sum1=0
```

```
sum2=0
```

```
sumy=0
```

```
DO i=1,NT
```

```
  XY(1,i)=(HC(2,i)-HC(1,i))/N1
```

```
  sumy=sumy+XY(1,i)
```

```
END DO
```

```
Ymed=sumy/NT
```

```
DO i=1,NT
```

```
  delHC=f(1)*HC(3,i)+f(2)*HC(4,i)+f(3)*HC(3,i)*HC(4,i)+f(4)
```

```
  sum1=sum1+(XY(1,i)-delHC)**2
```

```

    sum2=sum2+(XY(1,i)-Ymed)**2
END DO
IF (sum2.EQ.0) THEN
    r2m=1
    WRITE(3,27)
ELSE
    r2m=1-sum1/sum2
END IF
IF (bm.EQ.0) THEN
    r2=r2m ! Полный расчёт методом Брандона
ELSE !Автоматический выбор лучшего метода аппроксимации
    IF (r2m.GT.r21.AND.r2m.GT.r22) THEN
        r2=r2m
    ELSE
        IF (r21.GE.r22) THEN
            f(1)=a1
            f(2)=0
            f(3)=0
            f(4)=b1
            r2=r21
        ELSE
            f(1)=0
            f(2)=a2
            f(3)=0
            f(4)=b2
            r2=r22
        END IF
    END IF
END IF
RETURN

```

```

26 FORMAT(/'Ошибка расчёта по '
      *'методу Брандона!')
27 FORMAT(/'Ошибка расчёта коэффициента '
      *'детерминации R2!')
END

```

С Подпрограмма расчёта методом наименьших квадратов коэффициентов
С а и b линейной функции $Y=a*X+b$, а также коэффициента детерминации
С r2 для оценки точности аппроксимации.

С

```

SUBROUTINE MNQ(XY,NT,a,b,r2)

```

```

REAL :: XY(2,NT)

```

```

INTEGER NT

```

```

REAL a,b,r2,sumxy,sumx,sumy,sumx2,Ymed,Ymod,sum1,sum2,X

```

С

С Расчёт коэффициентов а и b.

С

```

sumxy=0

```

```

sumx=0

```

```

sumy=0

```

```

sumx2=0

```

```

DO i=1,NT

```

```

    sumxy=sumxy+XY(1,i)*XY(2,i)

```

```

    sumx=sumx+XY(2,i)

```

```

    sumy=sumy+XY(1,i)

```

```

    sumx2=sumx2+XY(2,i)*XY(2,i)

```

```

END DO

```

```

X=NT*sumx2-sumx*sumx

```

```

IF (X.NE.0) THEN

```

```

    a=(NT*sumxy-sumx*sumy)/X

```

$b=(\text{sumy}-a*\text{sumx})/NT$

C

C Расчёт коэффициента детерминации r2.

C

sum1=0

sum2=0

Ymed=sumy/NT

DO i=1,NT

Ymod=a*XY(2,i)+b

sum1=sum1+(XY(1,i)-Ymod)**2

sum2=sum2+(XY(1,i)-Ymed)**2

END DO

IF (sum2.EQ.0) THEN

r2=1

WRITE(3,28)

ELSE

r2=1-sum1/sum2

END IF

ELSE

a=0

b=1

r2=0

WRITE(3,29)

END IF

RETURN

28 FORMAT(/'Ошибка расчёта коэффициента'
*' детерминации R2!')

29 FORMAT(/'Ошибка при аппроксимации '
*'линейной функцией!')

END

ПРИЛОЖЕНИЕ Е.

Код программы для определения стойкости штампов ГОШ по точкам замера с известной скоростью изменения коэрцитивной силы.

```
PROGRAM METHOD3
REAL, DIMENSION(:,,:), ALLOCATABLE :: HC
REAL, DIMENSION(4) :: fv
REAL, DIMENSION(2,2) :: fk
REAL fkr,X1,X2,X3,HB,fkmin
INTEGER N,Nr,NT,err0,err1,HBk,Nmin,fkm
C
C  Расчёт стойкости штампа по величине коэрцитивной силы.
C
C  Используются данные для одного замера коэрцитивной силы.
C  Скорость изменения коэрцитивной силы задаётся функцией вида
C   $\Delta H_c = a v_1 * T + b v_1 * \text{Sigma} + c v_1 * T * \text{Sigma} + d v_1$ , где  $a v_1, b v_1, c v_1, d v_1$  -
C  известные коэффициенты. Значения температуры T и напряжений
C  Sigma задаются исходя из расчёта напряженно-деформированного
C  состояния штампа численно-аналитическими методами (требуется стороннее
C  приложение).
C  Также производится расчёт твёрдости гравюры штампа в точках замеров
C  по полученным моделям для сталей 5ХНВ и 5ХНМ. На основе полученных
C  значений твёрдости рассчитывается стойкость штампа по критерию
C  разупрочнения гравюры.
C  Входные данные: NT - количество точек, в которых производились
C  замеры; fv - массив с коэффициентами функции  $\Delta H_c$ ;
C  fk - массив с коэффициентами линейной аппроксимации предельной
C  поверхности вида  $H_{ck} = (a k_1 * T + b k_1) * (a k_2 * \text{Sigma} + b k_2)$ ; fkm - "0" для
C  расчёта по всей предельной поверхности fk, "1" для расчёта по
```

С минимальному значению функции f_k для заданного температурно-
 С напряженного состояния гравюры штампа (подходит для f_k , полученной
 С со штампа, отработавшего свой ресурс); HB_k - предельное
 С значение твёрдости гравюры по Бринеллю; HC - матрица
 С исходных данных из NT строк и 3 столбцов. 1 столбец - величина
 С коэрцитивной силы в точке, А/м; 2 - температура в точке замера,
 С град.С; 3 - напряжение в точке замера, МПа
 С
 С Ограничение: расчёт производится при условии снижения величины
 С коэрцитивной силы при эксплуатации штампа. Рост коэрцитивной силы
 С не влияет на результат.
 С
 С Чтение исходных данных.
 С

```

OPEN(2,FILE='M3INP.DAT',STATUS='OLD')
OPEN(3,FILE='M3OUT.DAT',STATUS='UNKNOWN')
READ(2,*) NT
IF (NT.LT.1) THEN
  WRITE(3,1)
  GO TO 50
END IF
ALLOCATE (HC(3,NT))
READ(2,*) fv
READ(2,*) fk,fkm
READ(2,*) HBk
READ(2,*) HC
  
```

С
 С Начало записи выходного файла.
 С

```
WRITE(3,2) NT
```

```

WRITE(3,3)
WRITE(3,4) HC
WRITE(3,5)
WRITE(3,6) fk
WRITE(3,7) HBk
WRITE(3,8)
WRITE(3,9) fv

```

C

C При $f_{km} \neq 0$: расчёт минимального значения коэрцитивной силы по
C функции f_k в точках замеров.

C

```

IF (fkm.NE.0) THEN
    fkrmin=(fk(1,1)*HC(2,1)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(3,1)+fk(2,2))
    Nmin=1
    DO i=2,NT
        fkr=(fk(1,1)*HC(2,i)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(3,i)+fk(2,2))
        IF (fkr.LT.fkrmin) THEN
            fkrmin=fkr
            Nmin=i
        END IF
    END DO
    WRITE(3,10) fkrmin,Nmin
END IF

```

C

C Расчёт стойкости по начальной величине коэрцитивной силы
C и скорости её изменения, поиск минимального значения.

C

```
err0=0
```

```
err1=0
```

N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.

```

DO i=1,NT
  IF (fkm.EQ.0) THEN
    fkr=(fk(1,1)*HC(2,i)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(3,i)+fk(2,2))
    X1=fkr-HC(1,i)
  ELSE
    X1=fkrmin-HC(1,i)
  END IF
  X2=fv(1)*HC(2,i)+fv(2)*HC(3,i)+fv(3)*HC(2,i)*HC(3,i)+fv(4)
  IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнуто предельное значение коэрцитивной силы.
    WRITE(3,11)
    GO TO 30
  END IF
  IF (X2.EQ.0) THEN
    err0=err0+1 ! Скорость изменения коэрцитивной силы в точке равна 0.
  ELSE
    IF (X2.GT.0) THEN
      err1=err1+1 ! Зафиксирован рост коэрцитивной силы.
    ELSE
      Nr=X1/X2
      IF (Nr.LT.N) THEN
        N=Nr
      END IF
    END IF
  END IF
END IF
END DO
C
C Вывод результатов расчёта стойкости по коэрцитивной силе.
C
WRITE(3,12) err0,NT
WRITE(3,13) err1,NT

```

```

IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
    WRITE(3,14)
ELSE
    WRITE(3,15) N
END IF
30 CONTINUE
С
С  Расчёт стойкости по разупрочнению гравюры при использовании
С  в качестве инструментального материала стали 5ХНВ.
С
err0=0
err1=0
N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.
WRITE(3,16)
WRITE(3,17)
DO i=1,NT
    HB=0.0754*HC(1,i)+259.3 ! Твердость по 5ХНВ
    X1=HBk-HB
    X3=fv(1)*HC(2,i)+fv(2)*HC(3,i)+fv(3)*HC(2,i)*HC(3,i)+fv(4)
    X2=0.0754*X3
    WRITE(3,18) i,HB,X2
    IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнута минимальная твёрдость.
        WRITE(3,19)
        GO TO 40
    END IF
    IF (X2.EQ.0) THEN
        err0=err0+1 ! Изменения твёрдости в точке не происходит.
    ELSE
        IF (X2.GT.0) THEN
            err1=err1+1 ! Зафиксирован рост твёрдости.

```

```

        ELSE
            Nr=X1/X2
            IF (Nr.LT.N) THEN
                N=Nr
            END IF
        END IF
    END IF
END DO
C
C  Вывод результатов расчёта стойкости по разупрочнению гравюры
C  для 5XHB.
C
WRITE(3,20) err0,NT
WRITE(3,21) err1,NT
IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
    WRITE(3,22)
ELSE
    WRITE(3,23) N
END IF
40 CONTINUE
C
C  Расчёт стойкости по разупрочнению гравюры при использовании
C  в качестве инструментального материала стали 5XHM.
C
err0=0
err1=0
N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.
WRITE(3,24)
WRITE(3,17)
DO i=1,NT

```

$HB=0.095*HC(1,i)+219.1$! Твердость по 5XHM

$X1=HBk-HB$

$X3=fv(1)*HC(2,i)+fv(2)*HC(3,i)+fv(3)*HC(2,i)*HC(3,i)+fv(4)$

$X2=0.095*X3$

WRITE(3,18) i,HB,X2

IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнута минимальная твёрдость.

WRITE(3,19)

GO TO 50

END IF

IF (X2.EQ.0) THEN

err0=err0+1 ! Изменения твёрдости в точке не происходит.

ELSE

IF (X2.GT.0) THEN

err1=err1+1 ! Зафиксирован рост твёрдости.

ELSE

$Nr=X1/X2$

IF (Nr.LT.N) THEN

$N=Nr$

END IF

END IF

END IF

END DO

C

C Вывод результатов расчёта стойкости по разупрочнению гравюры

C для 5XHM.

C

WRITE(3,20) err0,NT

WRITE(3,21) err1,NT

IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN

WRITE(3,22)

```

ELSE
    WRITE(3,23) N
END IF
50 CONTINUE
C
CLOSE (2)
CLOSE (3)
STOP
1 FORMAT('Ошибка при задании исходных '
    *'данных')
2 FORMAT('Число замеров =' ,I3/)
3 FORMAT(1X,'Hc, A/м',3X,
    *'T, град.С',3X,'Sigma, МПа')
4 FORMAT(F8.1,4X,F8.1,5X,F8.1)
5 FORMAT('/Уравнение предельной пов-ти:')
6 FORMAT('Hc=(,F12.5,' * T +',F12.5,) * (,
    *F12.5,' * Sig +',F12.5,')')
7 FORMAT('Предельная твёрдость: ',I3,' HB')
8 FORMAT('/Уравнение скорости'
    *' изменения коэрцитивной силы')
9 FORMAT('delHc= ',F12.7,' * T +',F12.7,
    *' * Sigma + ',F12.7,' * T*Sigma +',F12.7)
10 FORMAT('/Мин.пред.коэрц. сила Hск= ',F5.1,
    *' A/м в точке ',I3)
11 FORMAT('/Достигнуто предельное '
    *'значение коэрцитивной силы!')
12 FORMAT('/Величина коэрцитивной силы'
    *' не изменяется в ',I6,' точках из ',I6)
13 FORMAT('Рост коэрцитивной силы в ',
    *I6,' точках из ',I6)

```

```

14 FORMAT('!!! Ошибка вычисления стойкости'
    *' штампа !!!')
15 FORMAT('Стойкость штампа по ',
    *'коэффициенту трения:',I10,' поковок')
16 FORMAT('//Расчёт для 5ХНВ.')
17 FORMAT(2X,'N',12X,'НВ',7X,'deltaНВ')
18 FORMAT(I3,9X,F5.1,7X,F7.3)
19 FORMAT('/Достигнуто минимальная '
    *'твёрдость!')
20 FORMAT('Твёрдость не изменяется '
    *'в ',I6,' точках из ',I6)
21 FORMAT('Рост твёрдости в ',
    *'I6,' точках из ',I6)
22 FORMAT('!!! Ошибка вычисления стойкости'
    *' штампа !!!')
23 FORMAT('Стойкость штампа по ',
    *'разупрочнению гравюры:',I10,
    *' поковок')
24 FORMAT('//Расчёт для 5ХНМ.')
    END

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.

Код программы для определения стойкости штампов ГОШ с нахождением начальной зависимости коэрцитивной силы от температуры и напряжений, а также зависимости после штамповки партии поковок.

```
PROGRAM METHOD4
REAL, DIMENSION(:,:), ALLOCATABLE :: HC
REAL, DIMENSION(2,2) :: f0,f1,fk
REAL, DIMENSION(4) :: fv
REAL, DIMENSION(2) :: HB
REAL f0r,fvr,fkr,r20,r21
REAL X1,sum1,sum2,sumy,r2,fkrmin
INTEGER N,Nr,NT,N1,err0,err1,HBk,Nmin,fkm,bm
C
C  Расчёт стойкости штампа по величине коэрцитивной силы.
C
C  Используются данные для двух замеров коэрцитивной силы:
C  перед эксплуатацией штампа и после штамповки партии поковок.
C  Для обоих замеров методом Брандона рассчитываются уравнения
C  распределения коэрцитивной силы от температуры T и напряжений Sigma
C  вида  $H_c=(a_1*T+b_1)*(a_2*Sigma+b_2)$ , где  $a_1,b_1,a_2,b_2$  - коэффициенты
C  линейных функций, определяющиеся методом наименьших квадратов.
C  Значения температуры T и напряжений Sigma задаются, исходя из расчёта
C  напряженно-деформированного состояния штампа численно-аналитическими
C  методами (требуется стороннее приложение).
C  При построении уравнений методом Брандона для оценки точности
C  аппроксимации исходных данных линейными функциями используется
C  коэффициент детерминации r2.
C  Скорость изменения коэрцитивной силы от числа поковок задаётся функцией
```

$\Delta H_c = a_v \cdot T + b_v \cdot \sigma + c_v \cdot T \cdot \sigma + d_v$, где a_v, b_v, c_v, d_v - расчётные коэффициенты. Далее производится расчёт по полученным функциям разности значений коэрцитивной силы в предельном состоянии и до эксплуатации штампа, а также скорости изменения коэрцитивной силы в точках замеров.

После чего рассчитывается теоретическое число поковок (от первого замера), после которого материал штампа переходит в предельное состояние.

Также производится расчёт твёрдости гравюры штампа в точках замеров по полученным моделям для сталей 5ХНВ и 5ХНМ. На основе полученных значений твёрдости рассчитывается стойкость штампа по критерию разупрочнения гравюры.

Входные данные: NT - количество точек, в которых производились замеры; N1 - количество поковок, отштампованных до второго замера коэрцитивной силы; fk - массив с коэффициентами линейной аппроксимации предельной поверхности вида $H_{ck} = (a_{k1} \cdot T + b_{k1}) \cdot (a_{k2} \cdot \sigma + b_{k2})$; fkm - "0" для расчёта по всей предельной поверхности fk, "1" для расчёта по минимальному значению функции fk для заданного температурно-напряженного состояния гравюры штампа (подходит для fk, полученной со штампа, отработавшего свой ресурс); HBk - предельное значение твёрдости гравюры по Бринеллю; bm - "0" для полного расчёта методом Брандона, "1" для автоматического выбора расчёта методом Брандона или методом наименьших квадратов; HC - матрица исходных данных из NT строк и 4 столбцов. 1 столбец - коэрцитивная сила в точке до эксплуатации штампа, А/м; 2 - коэрцитивная сила в точке после штамповки партии N1 поковок, А/м; 3 - температура в точке замера, град.С; 4 - напряжение в точке замера, МПа.

Ограничение: расчёт производится при условии снижения величины коэрцитивной силы при эксплуатации штампа. Рост коэрцитивной силы

С не влияет на результат.

С

С Чтение исходных данных.

С

```
OPEN(2,FILE='M4INP.DAT',STATUS='OLD')
```

```
OPEN(3,FILE='M4OUT.DAT',STATUS='UNKNOWN')
```

```
READ(2,*) NT
```

```
READ(2,*) N1
```

```
READ(2,*) fk, fkm
```

```
READ(2,*) HBk
```

```
READ(2,*) bm
```

```
IF (NT.LT.1.OR.N1.LT.1) THEN
```

```
    WRITE(3,1)
```

```
    GO TO 60
```

```
END IF
```

```
ALLOCATE (HC(4,NT))
```

```
READ(2,*) HC
```

С

С Начало записи выходного файла.

С

```
WRITE(3,2) NT
```

```
WRITE(3,3) N1
```

```
WRITE(3,4)
```

```
WRITE(3,5) HC
```

С

С Вызов подпрограмм для расчёта начального распределения коэрцитивной

С силы и распределения коэрцитивной силы после штамповки партии

С поковок. Параметр 0 - расчёт по первому столбцу матрицы HC,

С 1 - по второму столбцу.

С

```
CALL BRANDON(HC,NT,bm,f0,r20,0)
```

```
CALL BRANDON(HC,NT,bm,f1,r21,1)
```

```
C
```

```
C  Расчёт коэффициентов уравнения зависимости скорости изменения
```

```
C  коэрцитивной силы от температуры и напряжений.
```

```
C
```

```
fv(1)=(f1(1,1)*f1(2,2)-f0(1,1)*f0(2,2))/N1
```

```
fv(2)=(f1(2,1)*f1(1,2)-f0(2,1)*f0(1,2))/N1
```

```
fv(3)=(f1(1,1)*f1(1,2)-f0(1,1)*f0(1,2))/N1
```

```
fv(4)=(f1(2,1)*f1(2,2)-f0(2,1)*f0(2,2))/N1
```

```
C
```

```
C  Проверка точности полученного уравнения зависимости скорости
```

```
C  изменения коэрцитивной силы от температуры и напряжений.
```

```
C
```

```
sum1=0
```

```
sum2=0
```

```
sumy=0
```

```
DO i=1,NT
```

```
    sumy=sumy+(HC(2,i)-HC(1,i))/N1
```

```
END DO
```

```
Ymed=sumy/NT
```

```
DO i=1,NT
```

```
    Y=(HC(2,i)-HC(1,i))/N1
```

```
    fvr=fv(1)*HC(3,i)+fv(2)*HC(4,i)+fv(3)*HC(3,i)*HC(4,i)+fv(4)
```

```
    sum1=sum1+(Y-fvr)**2
```

```
    sum2=sum2+(Y-Ymed)**2
```

```
END DO
```

```
IF (sum2.EQ.0) THEN
```

```
    r2=1
```

```
    WRITE(3,6)
```

ELSE

$r2=1-\text{sum}1/\text{sum}2$

END IF

C

C Запись полученных уравнений в выходной файл.

C

WRITE(3,7)

WRITE(3,8) f0,r20

WRITE(3,9)

WRITE(3,8) f1,r21

WRITE(3,10)

WRITE(3,11) fk

WRITE(3,12) HBk

WRITE(3,13)

WRITE(3,14) fv,r2

C

C При $fkm \neq 0$: расчёт минимального значения коэрцитивной силы по

C функции fk в точках замеров.

C

IF (fkm.NE.0) THEN

$fkrmin=(fk(1,1)*HC(3,1)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(4,1)+fk(2,2))$

 Nmin=1

 DO i=2,NT

$fkr=(fk(1,1)*HC(3,i)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(4,i)+fk(2,2))$

 IF (fkr.LT.fkrmin) THEN

 fkrmin=fkr

 END IF

 END DO

 WRITE(3,15) fkrmin,Nmin

END IF

С
С
С
С
С
С
С

Расчёт значений функций f_0 (начальная поверхность), f_k (предельная поверхность, при $f_{km}=0$), f_v (скорость) в точках замеров.
Расчёт стойкости штампа по скорости изменения коэрцитивной силы, поиск минимального значения.

$err0=0$

$err1=0$

$N=2147483647$! Начальное значение N для поиска минимума.

DO $i=1,NT$

$f0r=(f0(1,1)*HC(3,i)+f0(2,1))*(f0(1,2)*HC(4,i)+f0(2,2))$

IF ($f_{km}.EQ.0$) THEN

$fkr=(fk(1,1)*HC(3,i)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(4,i)+fk(2,2))$

$X1=fkr-f0r$

ELSE

$X1=fkrmin-f0r$

END IF

$fvr=fv(1)*HC(3,i)+fv(2)*HC(4,i)+fv(3)*HC(3,i)*HC(4,i)+fv(4)$

IF ($X1.GE.0$) THEN ! Достигнуто предельное значение коэрцитивной силы.

WRITE(3,16)

GO TO 40

END IF

IF ($fvr.EQ.0$) THEN

$err0=err0+1$! Скорость изменения коэрцитивной силы в точке равна 0.

ELSE

IF ($fvr.GT.0$) THEN

$err1=err1+1$! Зафиксирован рост коэрцитивной силы.

ELSE

$Nr=X1/fvr$

```

                IF (Nr.LT.N) THEN
                    N=Nr
                END IF
            END IF
        END IF
    END DO
C
C    Вывод результатов расчёта стойкости по коэрцитивной силе.
C
WRITE(3,17) err0,NT
WRITE(3,18) err1,NT
IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
    WRITE(3,19)
ELSE
    WRITE(3,20) N
END IF
40 CONTINUE
C
C    Расчёт стойкости по разупрочнению гравюры при использовании
C    в качестве инструментального материала стали 5ХНВ.
C
err0=0
err1=0
N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.
WRITE(3,21)
WRITE(3,22)
DO i=1,NT
    HB(1)=0.0754*HC(1,i)+259.3 ! Твердость для замера 1 по 5ХНВ
    HB(2)=0.0754*HC(2,i)+259.3 ! Твердость для замера 2 по 5ХНВ
    WRITE(3,23) i,HB

```

```

X1=HBk-HB(1)
X2=(HB(2)-HB(1))/N1
IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнута минимальная твёрдость.
    WRITE(3,24)
    GO TO 50
END IF
IF (X2.EQ.0) THEN
    err0=err0+1 ! Изменения твёрдости в точке не происходит.
ELSE
    IF (X2.GT.0) THEN
        err1=err1+1 ! Зафиксирован рост твёрдости.
    ELSE
        Nr=X1/X2
        IF (Nr.LT.N) THEN
            N=Nr
        END IF
    END IF
END IF
END DO
C
C Вывод результатов расчёта стойкости по разупрочнению гравюры
C для 5XHB.
C
WRITE(3,25) err0,NT
WRITE(3,26) err1,NT
IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
    WRITE(3,27)
ELSE
    WRITE(3,28) N
END IF

```

50 CONTINUE

C

C Расчёт стойкости по разупрочнению гравюры при использовании

C в качестве инструментального материала стали 5ХНМ.

C

err0=0

err1=0

N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.

WRITE(3,29)

WRITE(3,22)

DO i=1,NT

HB(1)=0.095*HC(1,i)+219.1 ! Твердость для замера 1 по 5ХНМ

HB(2)=0.095*HC(2,i)+219.1 ! Твердость для замера 2 по 5ХНМ

WRITE(3,23) i,HB

X1=HBk-HB(1)

X2=(HB(2)-HB(1))/N1

IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнута минимальная твёрдость.

WRITE(3,24)

GO TO 60

END IF

IF (X2.EQ.0) THEN

err0=err0+1 ! Изменения твёрдости в точке не происходит.

ELSE

IF (X2.GT.0) THEN

err1=err1+1 ! Зафиксирован рост твёрдости.

ELSE

Nr=X1/X2

IF (Nr.LT.N) THEN

N=Nr

END IF

```

        END IF
    END IF
END DO
C
C  Вывод результатов расчёта стойкости по разупрочнению гравюры
C  для 5XHM.
C
WRITE(3,25) err0,NT
WRITE(3,26) err1,NT
IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
    WRITE(3,27)
ELSE
    WRITE(3,28) N
END IF
60 CONTINUE
C
CLOSE (2)
CLOSE (3)
STOP
1 FORMAT('Ошибка при задании исходных '
    *'данных')
2 FORMAT('Число замеров =',I3)
3 FORMAT('Поковок между замерами =',I5/)
4 FORMAT('Hc0, A/м',3X,'Hc1, A/м',3X,
    *'T, град.С',3X,'Sigma, МПа')
5 FORMAT(F8.1,3X,F8.1,4X,F8.1,5X,F8.1)
6 FORMAT('/Ошибка расчёта коэффициента'
    *' детерминации R2!')
7 FORMAT('/Уравнение начальной пов-ти:')
8 FORMAT('Hc=(,F12.5,' * T +',F12.5,) * (,

```

*F12.5,' * Sig +',F12.5,)', R2=',F6.3)

9 FORMAT(/Уравнение пов-ти после экспл.:')

10 FORMAT(/Уравнение предельной пов-ти:')

11 FORMAT('Hc=(,F12.5,' * T +',F12.5,)' * ('
 *F12.5,' * Sig +',F12.5,))

12 FORMAT('Предельная твёрдость: ',I3,' HB')

13 FORMAT(/Уравнение скорости изменения '
 *'коэрцитивной силы:')

14 FORMAT('delHC= ',F12.7,' * T + ',
 *F12.7,' * Sig + ',F12.7,
 *' * T * Sig + ',F12.7,', R2=',F6.3)

15 FORMAT(/'Мин.пред.коэрц. сила Hск= ',F5.1,
 *' А/м в точке ',I3)

16 FORMAT('Достигнуто предельное '
 *'значение коэрцитивной силы!')

17 FORMAT('Величина коэрцитивной силы '
 *'не изменяется в ',I6,' точках из ',I6)

18 FORMAT('Рост коэрцитивной силы в ',
 *I6,' точках из ',I6)

19 FORMAT('!!! Ошибка вычисления стойкости'
 *' штампа !!!')

20 FORMAT('Стойкость штампа по ',
 *'коэрцитивной силе:',I10,' поковок')

21 FORMAT(/'Расчёт для 5ХНВ.')

22 FORMAT(2X,'N',11X,'HB0',11X,'HB1')

23 FORMAT(I3,9X,F5.1,9X,F5.1)

24 FORMAT(/'Достигнуто минимальная '
 *'твёрдость!')

25 FORMAT('Твёрдость не изменяется '
 *'в ',I6,' точках из ',I6)

```

26 FORMAT('Рост твёрдости в ',
      *I6,' точках из ',I6)
27 FORMAT('!!! Ошибка вычисления стойкости'
      *' штампа !!!')
28 FORMAT('Стойкость штампа по ',
      *'разупрочнению гравюры:',I10,
      *' поковок')
29 FORMAT(//'Расчёт для 5ХНМ.')
      END

```

С Подпрограмма для расчёта методом Брандона коэффициентов функции вида

С $H_c = (a_1 * T + b_1) * (a_2 * \text{Sigma} + b_2)$.

С

```

SUBROUTINE BRANDON(HC,NT,bm,f,r2,L1)
REAL :: HC(4,NT)
REAL, DIMENSION(:,:), ALLOCATABLE :: XY
REAL, DIMENSION(2,2) :: f
INTEGER NT,L1,bm
REAL a1,a2,a3,b1,b2,b3,r21,r22,r23,r2,sum1,sum2,sumy
REAL Ymod,Ymed,Hc0mod,r2m

```

С

С Задание временного массива XY из двух столбцов, запись в него данных из
С 1 или 2 столбца исходной матрицы (в зав-ти от значения L1) и 3 столбца
С (температура).

С

```

ALLOCATE (XY(2,NT))
DO i=1,NT
      IF (L1.EQ.0) THEN
            XY(1,i)=HC(1,i)

```

```

ELSE
    XY(1,i)=HC(2,i)
END IF
XY(2,i)=HC(3,i)
END DO
CALL MNQ(XY,NT,a1,b1,r21) ! Линейная аппроксимация Hc=f(T)
DO i=1,NT
    XY(2,i)=HC(4,i) ! Передача 4 столбца исходных данных (напряжения) во
временный массив
END DO
CALL MNQ(XY,NT,a2,b2,r22) ! Линейная аппроксимация Hc=f(Sigma)
C
C  Выбор функции с лучшей аппроксимацией и запись двух коэффициентов
C  вычисляемой функции. Перезапись массива XY для второго шага.
C
IF (r21.GE.r22) THEN
    f(1,1)=a1
    f(2,1)=b1
    DO i=1,NT
        Hc0mod=f(1,1)*HC(3,i)+f(2,1)
        IF (Hc0mod.EQ.0) THEN
            WRITE(3,30)
            STOP 'Error'
        END IF
        IF (L1.EQ.0) THEN
            XY(1,i)=HC(1,i)/Hc0mod
        ELSE
            XY(1,i)=HC(2,i)/Hc0mod
        END IF
    END DO
END DO

```

```

ELSE
  f(1,2)=a2
  f(2,2)=b2
  DO i=1,NT
    Hc0mod=f(1,2)*HC(4,i)+f(2,2)
    IF (Hc0mod.EQ.0) THEN
      WRITE(3,30)
      STOP 'Error'
    END IF
    IF (L1.EQ.0) THEN
      XY(1,i)=HC(1,i)/Hc0mod
    ELSE
      XY(1,i)=HC(2,i)/Hc0mod
    END IF
    XY(2,i)=HC(3,i)
  END DO
END IF

```

C

C Расчёт двух оставшихся коэффициентов вычисляемой функции.

C

```
CALL MNQ(XY,NT,a3,b3,r23)
```

```
IF (r21.GE.r22) THEN
```

```
  f(1,2)=a3
```

```
  f(2,2)=b3
```

```
ELSE
```

```
  f(1,1)=a3
```

```
  f(2,1)=b3
```

```
END IF
```

C

C Расчёт коэффициента детерминации r2.

C

```
sum1=0
sum2=0
sumy=0
DO i=1,NT
  IF (L1.EQ.0) THEN
    XY(1,i)=HC(1,i)
  ELSE
    XY(1,i)=HC(2,i)
  END IF
  sumy=sumy+XY(1,i)
END DO
Ymed=sumy/NT
DO i=1,NT
  Ymod=(f(1,1)*HC(3,i)+f(2,1))*(f(1,2)*HC(4,i)+f(2,2))
  sum1=sum1+(XY(1,i)-Ymod)**2
  sum2=sum2+(XY(1,i)-Ymed)**2
END DO
IF (sum2.EQ.0) THEN
  r2m=1
  WRITE(3,31)
ELSE
  r2m=1-sum1/sum2
END IF
IF (bm.EQ.0) THEN
  r2=r2m ! Полный расчёт методом Брандона
ELSE !Автоматический выбор лучшего метода аппроксимации
  IF (r2m.GT.r21.AND.r2m.GT.r22) THEN
    r2=r2m
  ELSE
```

```

        IF (r21.GE.r22) THEN
            f(1,2)=0
            f(2,2)=1
            r2=r21
        ELSE
            f(1,1)=0
            f(2,1)=1
            r2=r22
        END IF
    END IF
END IF
RETURN
30 FORMAT(/'Ошибка расчёта по '
        *'методу Брандона!')
31 FORMAT(/'Ошибка расчёта коэффициента '
        *'детерминации R2!')
END

```

С Подпрограмма расчёта методом наименьших квадратов коэффициентов
С а и b линейной функции $Y=a*X+b$, а также коэффициента детерминации
С r2 для оценки точности аппроксимации.

С

```

SUBROUTINE MNQ(XY,NT,a,b,r2)

```

```

REAL :: XY(2,NT)

```

```

INTEGER NT

```

```

REAL a,b,r2,sumxy,sumx,sumy,sumx2,Ymed,Ymod,sum1,sum2,X

```

С

С Расчёт коэффициентов а и b.

С

```

sumxy=0

```

```

sumx=0
sumy=0
sumx2=0
DO i=1,NT
    sumxy=sumxy+XY(1,i)*XY(2,i)
    sumx=sumx+XY(2,i)
    sumy=sumy+XY(1,i)
    sumx2=sumx2+XY(2,i)*XY(2,i)
END DO

```

```

X=NT*sumx2-sumx*sumx

```

```

IF (X.NE.0) THEN

```

```

    a=(NT*sumxy-sumx*sumy)/X

```

```

    b=(sumy-a*sumx)/NT

```

C

C Расчёт коэффициента детерминации r².

C

```

sum1=0

```

```

sum2=0

```

```

Ymed=sumy/NT

```

```

DO i=1,NT

```

```

    Ymod=a*XY(2,i)+b

```

```

    sum1=sum1+(XY(1,i)-Ymod)**2

```

```

    sum2=sum2+(XY(1,i)-Ymed)**2

```

```

END DO

```

```

IF (sum2.EQ.0) THEN

```

```

    r2=1

```

```

    WRITE(3,32)

```

```

ELSE

```

```

    r2=1-sum1/sum2

```

```

END IF

```

```
ELSE
  a=0
  b=1
  r2=0
  WRITE(3,33)
END IF
RETURN
32 FORMAT(/'Ошибка расчёта коэффициента'
  *' детерминации R2!')
33 FORMAT(/'Ошибка при аппроксимации '
  *'линейной функцией!')
END
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.

Код программы для определения стойкости штампов ГОШ с нахождением распределения коэрцитивной силы и известной скоростью её изменения.

```
PROGRAM METHOD5
REAL, DIMENSION(:,,:), ALLOCATABLE :: Hc
REAL, DIMENSION(2,2) :: f0,fk
REAL, DIMENSION(4) :: fv
REAL f0r,fvr,fkr,r2
REAL X1,HB,fkrmin
INTEGER N,Nr,NT,err0,err1,HBk,Nmin,fkm,bm
C
C  Расчёт стойкости штампа по величине коэрцитивной силы.
C
C  Используются данные для одного замера коэрцитивной силы.
C  Для замера методом Брандона рассчитывается функция
C  распределения коэрцитивной силы от температуры T и напряжений Sigma
C  вида  $Hc=(a1*T+b1)*(a2*Sigma+b2)$ , где a1,b1,a2,b2 - коэффициенты
C  линейных функций, определяющиеся методом наименьших квадратов.
C  Значения температуры T и напряжений Sigma задаются, исходя из расчёта
C  напряженно-деформированного состояния штампа
C  численно-аналитическими методами (требуется стороннее приложение).
C  При построении функции методом Брандона для оценки точности
C  аппроксимации исходных данных линейными функциями используется
C  коэффициент детерминации r2.
C  Скорость изменения коэрцитивной силы от числа поковок задаётся функцией
C   $delHc=av2*T+bv2*Sigma+cv2*T*Sigma+dv2$ , где av2, bv2, cv2, dv2 -
C  расчётные коэффициенты. Далее производится расчёт по полученным
C  функциям разности значений коэрцитивной силы в предельном
```

С и текущем состояниях штампа, а также скорости изменения
С коэрцитивной силы в точках замеров.
С После чего рассчитывается теоретическое число поковок,
С после которого материал штампа переходит в предельное
С состояние.
С Также производится расчёт твёрдости гравюры штампа в точках замеров
С по полученным моделям для сталей 5ХНВ и 5ХНМ. На основе полученных
С значений твёрдости рассчитывается стойкость штампа по критерию
С разупрочнения гравюры.
С Входные данные: NT - количество точек, в которых производились замеры;
С f_v - массив с коэффициентами функции скорости изменения коэрцитивной
С силы; f_k - массив с коэффициентами линейной аппроксимации предельной
С поверхности вида $H_{sk}=(a_{k1} * T + b_{k1}) * (a_{k2} * \sigma + b_{k2})$; f_{km} - "0" для
С расчёта по всей предельной поверхности f_k , "1" для расчёта по
С минимальному значению функции f_k для заданного температурно-
С напряженного состояния гравюры штампа (подходит для f_k , полученной
С со штампа, отработавшего свой ресурс); H_{Bk} - предельное
С значение твёрдости гравюры по Бринеллю; b_m - "0" для полного расчёта
С методом Брандона, "1" для автоматического выбора расчёта методом
С Брандона или методом наименьших квадратов; HC - матрица исходных
С данных из NT строк и 3 столбцов. 1 столбец - коэрцитивная сила в точке, А/м;
С 2 - температура в точке замера, град.С; 3 - напряжение в точке замера,
С МПа.
С
С Ограничение: расчёт производится при условии снижения величины
С коэрцитивной силы при эксплуатации штампа. Рост коэрцитивной силы
С не влияет на результат.
С
С Чтение исходных данных.
С

```

OPEN(2,FILE='M5INP.DAT',STATUS='OLD')
OPEN(3,FILE='M5OUT.DAT',STATUS='UNKNOWN')
READ(2,*) NT
READ(2,*) fv
READ(2,*) fk,fkm
READ(2,*) HBk
READ(2,*) bm
IF (NT.LT.1) THEN
    WRITE(3,1)
    GO TO 60
END IF
ALLOCATE (HC(3,NT))
READ(2,*) HC

```

C

C Начало записи выходного файла.

C

```
WRITE(3,2) NT
```

```
WRITE(3,3)
```

```
WRITE(3,4) HC
```

C

C Вызов подпрограммы для расчёта распределения коэрцитивной силы.

C

```
CALL BRANDON(HC,NT,bm,f0,r2)
```

C

C Запись полученных уравнений в выходной файл.

C

```
WRITE(3,5)
```

```
WRITE(3,6) f0,r2
```

```
WRITE(3,7)
```

```
WRITE(3,8) fk
```

```

WRITE(3,9) HBk
WRITE(3,10)
WRITE(3,11) fv
С
С При fkm!=0: расчёт минимального значения коэрцитивной силы по
С функции fk в точках замеров.
С
IF (fkm.NE.0) THEN
    fkrmin=(fk(1,1)*HC(2,1)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(3,1)+fk(2,2))
    Nmin=1
    DO i=2,NT
        fkr=(fk(1,1)*HC(2,i)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(3,i)+fk(2,2))
        IF (fkr.LT.fkrmin) THEN
            fkrmin=fkr
        END IF
    END DO
    WRITE(3,12) fkrmin,Nmin
END IF
С
С Расчёт значений функций f0 (начальная поверхность), fk (предельная
С поверхность, при fkm=0), fv (скорость) в точках замеров.
С Расчёт стойкости штампа по скорости изменения коэрцитивной силы,
С поиск минимального значения.
С
err0=0
err1=0
N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.
DO i=1,NT
    f0r=(f0(1,1)*HC(2,i)+f0(2,1))*(f0(1,2)*HC(3,i)+f0(2,2))
    IF (fkm.EQ.0) THEN

```

```

fkr=(fk(1,1)*HC(2,i)+fk(2,1))*(fk(1,2)*HC(3,i)+fk(2,2))
X1=fkr-f0r
ELSE
X1=fkrmin-f0r
END IF
fvr=fv(1)*HC(2,i)+fv(2)*HC(3,i)+fv(3)*HC(2,i)*HC(3,i)+fv(4)
IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнуто предельное значение коэрцитивной силы.
WRITE(3,13)
GO TO 40
END IF
IF (fvr.EQ.0) THEN
err0=err0+1 ! Скорость изменения коэрцитивной силы в точке равна 0.
ELSE
IF (fvr.GT.0) THEN
err1=err1+1 ! Зафиксирован рост коэрцитивной силы.
ELSE
Nr=X1/fvr
IF (Nr.LT.N) THEN
N=Nr
END IF
END IF
END IF
END DO
C
C Вывод результатов расчёта стойкости по коэрцитивной силе.
C
WRITE(3,14) err0,NT
WRITE(3,15) err0,NT
IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
WRITE(3,16)

```

```

ELSE
    WRITE(3,17) N
END IF
40 CONTINUE
С
С  Расчёт стойкости по разупрочнению гравюры при использовании
С  в качестве инструментального материала стали 5ХНВ.
С
err0=0
err1=0
N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.
WRITE(3,18)
WRITE(3,19)
DO i=1,NT
    HB=0.0754*HC(1,i)+259.3 ! Твердость по 5ХНВ
    X1=HBk-HB
    X3=fv(1)*HC(2,i)+fv(2)*HC(3,i)+fv(3)*HC(2,i)*HC(3,i)+fv(4)
    X2=0.0754*X3
    WRITE(3,20) i,HB,X2
    IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнута минимальная твёрдость.
        WRITE(3,21)
        GO TO 50
    END IF
    IF (X2.EQ.0) THEN
        err0=err0+1 ! Изменения твёрдости в точке не происходит.
    ELSE
        IF (X2.GT.0) THEN
            err1=err1+1 ! Зафиксирован рост твёрдости.
        ELSE
            Nr=X1/X2

```

```

                IF (Nr.LT.N) THEN
                    N=Nr
                END IF
            END IF
        END IF
    END DO
C
C   Вывод результатов расчёта стойкости по разупрочнению гравюры
C   для 5XHB.
C
WRITE(3,22) err0,NT
WRITE(3,23) err1,NT
IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
    WRITE(3,24)
ELSE
    WRITE(3,25) N
END IF
50 CONTINUE
C
C   Расчёт стойкости по разупрочнению гравюры при использовании
C   в качестве инструментального материала стали 5XHM.
C
err0=0
err1=0
N=2147483647 ! Начальное значение N для поиска минимума.
WRITE(3,26)
WRITE(3,19)
DO i=1,NT
    HB=0.095*HC(1,i)+219.1 ! Твердость по 5XHM
    X1=HBk-HB

```

```

X3=fv(1)*HC(2,i)+fv(2)*HC(3,i)+fv(3)*HC(2,i)*HC(3,i)+fv(4)
X2=0.095*X3
WRITE(3,20) i,HB,X2
IF (X1.GE.0) THEN ! Достигнута минимальная твёрдость.
    WRITE(3,21)
    GO TO 60
END IF
IF (X2.EQ.0) THEN
    err0=err0+1 ! Изменения твёрдости в точке не происходит.
ELSE
    IF (X2.GT.0) THEN
        err1=err1+1 ! Зафиксирован рост твёрдости.
    ELSE
        Nr=X1/X2
        IF (Nr.LT.N) THEN
            N=Nr
        END IF
    END IF
END IF
END DO
C
C Вывод результатов расчёта стойкости по разупрочнению гравюры
C для 5XHM.
C
WRITE(3,22) err0,NT
WRITE(3,23) err1,NT
IF (err0.EQ.NT.OR.err1.EQ.NT) THEN
    WRITE(3,24)
ELSE
    WRITE(3,25) N

```

```

END IF
60 CONTINUE
С
CLOSE (2)
CLOSE (3)
STOP
1 FORMAT('Ошибка при задании исходных '
*'данных')
2 FORMAT('Число замеров =' ,I3/)
3 FORMAT(1X,'Нс, А/м',3X,
*'Т, град.С',3X,'Sigma, МПа')
4 FORMAT(F8.1,4X,F8.1,5X,F8.1)
5 FORMAT('/Уравнение начальной пов-ти:')
6 FORMAT('Нс=(,F12.5,' * Т +',F12.5,) * (,
*'F12.5,' * Sig +',F12.5,)', R2=',F6.3)
7 FORMAT('/Уравнение предельной пов-ти:')
8 FORMAT('Нск=(,F12.5,' * Т +',F12.5,) * (,
*'F12.5,' * Sig +',F12.5,))
9 FORMAT('Предельная твёрдость: ',I3,' НВ')
10 FORMAT('/Уравнение скорости изменения '
*'коэрцитивной силы:')
11 FORMAT('delHC= ',F12.7,' * Т +',F12.7,
*' * Sig +',F12.7,' * Т * Sig +',F12.7)
12 FORMAT('/Мин.пред.коэрц. сила Нск= ',F5.1,
*' А/м в точке ',I3)
13 FORMAT('Достигнуто предельное '
*'значение коэрцитивной силы!')
14 FORMAT('Величина коэрцитивной силы'
*' не изменяется в ',I6,' точках из ',I6)
15 FORMAT('Рост коэрцитивной силы в ',

```

```

      *I6,' точках из ',I6)
16  FORMAT('!!! Ошибка вычисления стойкости'
      *' штампа !!!')
17  FORMAT('Стойкость штампа по ',
      *'коэффициентной силе:',I10,' поковок')
18  FORMAT('//Расчёт для 5ХНВ.')
19  FORMAT(2X,'N',12X,'НВ',7X,'deltaНВ')
20  FORMAT(I3,9X,F5.1,7X,F7.3)
21  FORMAT('/Достигнуто минимальная '
      *'твёрдость!')
22  FORMAT('Твёрдость не изменяется '
      *'в ',I6,' точках из ',I6)
23  FORMAT('Рост твёрдости в ',
      *'I6,' точках из ',I6)
24  FORMAT('!!! Ошибка вычисления стойкости'
      *' штампа !!!')
25  FORMAT('Стойкость штампа по ',
      *'разупрочнению гравюры:',I10,
      *' поковок')
26  FORMAT('//Расчёт для 5ХНМ.')
      END

```

С Подпрограмма для расчёта методом Брандона коэффициентов функции

С вида $H_c = (a_1 * T + b_1) * (a_2 * \text{Sigma} + b_2)$.

С

```

SUBROUTINE BRANDON(HC,NT,bm,f,r2)
REAL :: HC(3,NT)
REAL, DIMENSION(:,:), ALLOCATABLE :: XY
REAL, DIMENSION(2,2) :: f
INTEGER NT,bm

```

```

REAL a1,a2,a3,b1,b2,b3,r21,r22,r23,r2,sum1,sum2,sumy
REAL Ymod,Ymed,Hc0mod,r2m
C
C   Задание временного массива XY из двух столбцов, запись в него данных из
C   1 столбца (коэрцитивная сила) и 2 столбца (температура) исходной матрицы.
C
ALLOCATE (XY(2,NT))
DO i=1,NT
  XY(1,i)=HC(1,i)
  XY(2,i)=HC(2,i)
END DO
CALL MNQ(XY,NT,a1,b1,r21) ! Линейная аппроксимация Hc=f(T)
DO i=1,NT
  XY(2,i)=HC(3,i) ! Передача 3 столбца исходных данных (напряжения) во
временный массив
END DO
CALL MNQ(XY,NT,a2,b2,r22) ! Линейная аппроксимация Hc=f(Sigma)
C
C   Выбор функции с лучшей аппроксимацией и запись двух коэффициентов
C   вычисляемой функции. Перезапись массива XY для второго шага.
C
IF (r21.GE.r22) THEN
  f(1,1)=a1
  f(2,1)=b1
  DO i=1,NT
    Hc0mod=f(1,1)*HC(2,i)+f(2,1)
    IF (Hc0mod.EQ.0) THEN
      WRITE(3,27)
      STOP 'Error'
    END IF
  END DO

```

```

        XY(1,i)=HC(1,i)/Hc0mod
    END DO
ELSE
    f(1,2)=a2
    f(2,2)=b2
    DO i=1,NT
        Hc0mod=f(1,2)*HC(3,i)+f(2,2)
        IF (Hc0mod.EQ.0) THEN
            WRITE(3,27)
            STOP 'Error'
        END IF
        XY(1,i)=HC(1,i)/Hc0mod
        XY(2,i)=HC(2,i)
    END DO
END IF

```

C

C Расчёт двух оставшихся коэффициентов вычисляемой функции.

C

```
CALL MNQ(XY,NT,a3,b3,r23)
```

```
IF (r21.GE.r22) THEN
```

```
    f(1,2)=a3
```

```
    f(2,2)=b3
```

```
ELSE
```

```
    f(1,1)=a3
```

```
    f(2,1)=b3
```

```
END IF
```

C

C Расчёт коэффициента детерминации r2.

C

```
sum1=0
```

```

sum2=0
sumy=0
DO i=1,NT
  XY(1,i)=HC(1,i)
  sumy=sumy+XY(1,i)
END DO
Ymed=sumy/NT
DO i=1,NT
  Ymod=(f(1,1)*HC(2,i)+f(2,1))*(f(1,2)*HC(3,i)+f(2,2))
  sum1=sum1+(XY(1,i)-Ymod)**2
  sum2=sum2+(XY(1,i)-Ymed)**2
END DO
IF (sum2.EQ.0) THEN
  r2m=1
  WRITE(3,28)
ELSE
  r2m=1-sum1/sum2
END IF
IF (bm.EQ.0) THEN
  r2=r2m ! Полный расчёт методом Брандона
ELSE !Автоматический выбор лучшего метода аппроксимации
  IF (r2m.GT.r21.AND.r2m.GT.r22) THEN
    r2=r2m
  ELSE
    IF (r21.GE.r22) THEN
      f(1,2)=0
      f(2,2)=1
      r2=r21
    ELSE
      f(1,1)=0

```

```

                f(2,1)=1
                r2=r22
            END IF
        END IF
    END IF
RETURN
27 FORMAT(/'Ошибка расчёта по '
        *'методу Брандона!')
28 FORMAT(/'Ошибка расчёта коэффициента '
        *'детерминации R2!')
END

```

С Подпрограмма расчёта методом наименьших квадратов коэффициентов
С а и b линейной функции $Y=a*X+b$, а также коэффициента детерминации
С r2 для оценки точности аппроксимации.

С

```

SUBROUTINE MNQ(XY,NT,a,b,r2)
REAL :: XY(2,NT)
INTEGER NT
REAL a,b,r2,sumxy,sumx,sumy,sumx2,Ymed,Ymod,sum1,sum2,X

```

С

С Расчёт коэффициентов а и b.

С

```

sumxy=0
sumx=0
sumy=0
sumx2=0
DO i=1,NT
    sumxy=sumxy+XY(1,i)*XY(2,i)
    sumx=sumx+XY(2,i)

```

```
sumy=sumy+XY(1,i)
sumx2=sumx2+XY(2,i)*XY(2,i)
```

```
END DO
```

```
X=NT*sumx2-sumx*sumx
```

```
IF (X.NE.0) THEN
```

```
  a=(NT*sumxy-sumx*sumy)/X
```

```
  b=(sumy-a*sumx)/NT
```

```
C
```

```
C  Расчёт коэффициента детерминации r2.
```

```
C
```

```
sum1=0
```

```
sum2=0
```

```
Ymed=sumy/NT
```

```
DO i=1,NT
```

```
  Ymod=a*XY(2,i)+b
```

```
  sum1=sum1+(XY(1,i)-Ymod)**2
```

```
  sum2=sum2+(XY(1,i)-Ymed)**2
```

```
END DO
```

```
IF (sum2.EQ.0) THEN
```

```
  r2=1
```

```
  WRITE(3,29)
```

```
ELSE
```

```
  r2=1-sum1/sum2
```

```
END IF
```

```
ELSE
```

```
  a=0
```

```
  b=1
```

```
  r2=0
```

```
  WRITE(3,30)
```

```
END IF
```

```
RETURN
29 FORMAT(/'Ошибка расчёта коэффициента'
*' детерминации R2!')
30 FORMAT(/'Ошибка при аппроксимации '
*'линейной функцией!')
END
```

ПРИЛОЖЕНИЕ И.

Код программы для расчёта коэффициентов функции предельной коэрцитивной силы

```
PROGRAM BRANDON1
REAL, DIMENSION(:,:), ALLOCATABLE :: HC,XY
REAL, DIMENSION(2,2) :: f
INTEGER NT,bm
REAL a1,a2,a3,b1,b2,b3,r21,r22,r23,r2,Hcmod
REAL sum1,sum2,sumy,Ymod,Ymed,r2m
C
C  Расчёт коэффициентов функции предельной коэрцитивной силы
C  по методу Брандона.
C
C  Для замера коэрцитивной силы методом Брандона рассчитывается
C  функция распределения в зависимости от температуры T и
C  напряжений Sigma вида  $H_{ck}=(a_{k1}*T+b_{k1})*(a_{k2}*Sigma+b_{k2})$ ,
C  где  $a_{k1},b_{k1},a_{k2},b_{k2}$  - коэффициенты линейных функций,
C  определяющиеся методом наименьших квадратов. Значения
C  температуры T и напряжений Sigma задаются исходя из расчёта
C  напряженно-деформированного состояния штампа
C  численно-аналитическими методами (требуется стороннее
C  приложение). При расчёте методом Брандона для оценки точности
C  аппроксимации исходных данных линейными функциями используется
C  коэффициент детерминации r2.
C  Входные данные: bm - "0" для полного расчёта методом Брандона,
C  "1" для автоматического выбора расчёта методом Брандона или
C  методом наименьших квадратов; NT - количество точек, в которых
C  производились замеры; HC - матрица исходных данных из NT строк
```

С и 3 столбцов. 1 столбец - коэрцитивная сила, А/м;
С 2 - температура в точке замера, град.С; 3 - напряжение
С в точке замера, МПа.

С

С Чтение исходных данных.

С

```
OPEN(2,FILE='B1INP.DAT',STATUS='OLD')
OPEN(3,FILE='B1OUT.DAT',STATUS='UNKNOWN')
READ(2,*) bm
READ(2,*) NT
IF (NT.LT.1) THEN
    WRITE(3,1)
    GO TO 20
END IF
ALLOCATE (HC(3,NT))
ALLOCATE (XY(2,NT))
READ(2,*) HC
```

С

С Начало записи выходного файла.

С

```
WRITE(3,2) NT
WRITE(3,3)
WRITE(3,4) HC
```

С

С Расчёт по методу Брандона.

С

```
DO i=1,NT
    XY(1,i)=HC(1,i) ! Передача исходных данных во временный массив
    XY(2,i)=HC(2,i) ! Передача исходных данных во временный массив
END DO
```

```

CALL MNQ(XY,NT,a1,b1,r21) ! Линейная аппроксимация  $H_c=f(T)$ 
DO i=1,NT
    XY(2,i)=HC(3,i) ! Передача 3 столбца исходных данных (напряжений) во
временный массив
END DO
CALL MNQ(XY,NT,a2,b2,r22) ! Линейная аппроксимация  $H_c=f(\text{Sigma})$ 
WRITE(3,5)
WRITE(3,6) a1,b1,r21
WRITE(3,7) a2,b2,r22
C
C  Выбор функции с лучшей аппроксимацией и запись двух коэффициентов
C  вычисляемой функции. Перезапись массива XY для второго шага.
C
IF (r21.GE.r22) THEN
    f(1,1)=a1
    f(2,1)=b1
    DO i=1,NT
        Hcmod=f(1,1)*HC(2,i)+f(2,1)
        IF (Hcmod.EQ.0) THEN
            WRITE(3,8)
            STOP 'Error'
        END IF
        XY(1,i)=HC(1,i)/Hcmod
    END DO
ELSE
    f(1,2)=a2
    f(2,2)=b2
    DO i=1,NT
        Hcmod=f(1,2)*HC(3,i)+f(2,2)
        IF (Hcmod.EQ.0) THEN

```

```

WRITE(3,8)
STOP 'Error'
END IF
XY(1,i)=HC(1,i)/Hcmod
XY(2,i)=HC(2,i)
END DO
END IF
C
C  Расчёт двух оставшихся коэффициентов вычисляемой функции.
C
CALL MNQ(XY,NT,a3,b3,r23)
WRITE(3,9)
IF (r21.GE.r22) THEN
  f(1,2)=a3
  f(2,2)=b3
  WRITE(3,7) a3,b3,r23
ELSE
  f(1,1)=a3
  f(2,1)=b3
  WRITE(3,6) a3,b3,r23
END IF
C
C  Расчёт коэффициента детерминации r2 для полученной функции
C  двух переменных.
C
sum1=0
sum2=0
sumy=0
DO i=1,NT
  sumy=sumy+HC(1,i)

```

```

END DO
Ymed=sumy/NT
DO i=1,NT
  Ymod=(f(1,1)*HC(2,i)+f(2,1))*(f(1,2)*HC(3,i)+f(2,2))
  sum1=sum1+(HC(1,i)-Ymod)**2
  sum2=sum2+(HC(1,i)-Ymed)**2
END DO
IF (sum2.EQ.0) THEN
  r2m=1
  WRITE(3,10)
ELSE
  r2m=1-sum1/sum2
END IF
IF (bm.EQ.0) THEN
  r2=r2m ! Полный расчёт методом Брандона
ELSE !Автоматический выбор лучшего метода аппроксимации
  IF (r2m.GT.r21.AND.r2m.GT.r22) THEN
    r2=r2m
  ELSE
    IF (r21.GE.r22) THEN
      f(1,2)=0
      f(2,2)=1
      r2=r21
    ELSE
      f(1,1)=0
      f(2,1)=1
      r2=r22
    END IF
  END IF
END IF
END IF

```

C

C Запись полученных уравнений в выходной файл.

C

```
WRITE(3,11)
WRITE(3,12) f,r2
20 CONTINUE
CLOSE (2)
CLOSE (3)
STOP
1 FORMAT('Ошибка при задании исходных '
*'данных')
2 FORMAT('Число замеров =',I3/)
3 FORMAT('Нск, А/м',3X,
*'Т, град.С',3X,'Sigma, МПа')
4 FORMAT(F8.1,4X,F8.1,5X,F8.1)
5 FORMAT('/Первый шаг расчёта:')
6 FORMAT('f = ',F12.5,' * Т + ',
*'F12.5,' , R2= ',F6.3)
7 FORMAT('f = ',F12.5,' * Sigma + ',
*'F12.5,' , R2= ',F6.3)
8 FORMAT('/Ошибка расчёта по '
*'методу Брандона!')
9 FORMAT('/Второй шаг расчёта:')
10 FORMAT('/Ошибка расчёта коэффициента '
*'детерминации R2!')
11 FORMAT('/Уравнение предельной '
*'коэрцитивной силы:')
12 FORMAT('Нск=(,F12.5,' * Т +',F12.5,) * (,
*'F12.5,' * Sig +',F12.5,), R2=',F6.3)
END
```

C Подпрограмма расчёта методом наименьших квадратов коэффициентов
C а и b линейной функции $Y=a*X+b$, а также коэффициента детерминации
C r^2 для оценки точности аппроксимации.

C

```
SUBROUTINE MNQ(XY,NT,a,b,r2)
```

```
REAL :: XY(2,NT)
```

```
INTEGER NT
```

```
REAL a,b,r2,sumxy,sumx,sumy,sumx2,Ymed,Ymod,sum1,sum2,X
```

C

C Расчёт коэффициентов а и b.

C

```
sumxy=0
```

```
sumx=0
```

```
sumy=0
```

```
sumx2=0
```

```
DO i=1,NT
```

```
    sumxy=sumxy+XY(1,i)*XY(2,i)
```

```
    sumx=sumx+XY(2,i)
```

```
    sumy=sumy+XY(1,i)
```

```
    sumx2=sumx2+XY(2,i)*XY(2,i)
```

```
END DO
```

```
X=NT*sumx2-sumx*sumx
```

```
IF (X.NE.0) THEN
```

```
    a=(NT*sumxy-sumx*sumy)/X
```

```
    b=(sumy-a*sumx)/NT
```

C

C Расчёт коэффициента детерминации r^2 .

C

```
sum1=0
```

```

sum2=0
Ymed=sumy/NT
DO i=1,NT
    Ymod=a*XY(2,i)+b
    sum1=sum1+(XY(1,i)-Ymod)**2
    sum2=sum2+(XY(1,i)-Ymed)**2
END DO
IF (sum2.EQ.0) THEN
    r2=1
    WRITE(3,13)
ELSE
    r2=1-sum1/sum2
END IF
ELSE
    a=0
    b=1
    r2=0
    WRITE(3,14)
END IF
RETURN
13 FORMAT(/'Ошибка расчёта коэффициента'
*' детерминации R2!')
14 FORMAT(/'Ошибка при аппроксимации '
*'линейной функцией!')
END

```

ПРИЛОЖЕНИЕ К.

Код программы для корректировки коэффициентов уравнения скорости изменения коэрцитивной силы

```
PROGRAM LEARNING1
REAL, DIMENSION(5) :: newAV
REAL, DIMENSION(:,:), ALLOCATABLE :: AV
REAL, DIMENSION(4) :: AVcor
INTEGER N
REAL sum
C
C
C  Корректировка коэффициентов уравнения скорости изменения
C  коэрцитивной силы.
C
C  Программа служит для корректировки уже известных уравнений
C  скорости изменения коэрцитивной силы вида
C   $delHc=av2*T+bv2*Sigma+cv2*T*Sigma+dv2$ , где  $av2$ ,  $bv2$ ,  $cv2$ ,  $dv2$  -
C  коэффициенты, полученные расчётом по методу 2 или 4.
C  Входные данные: newAV - массив, первые 4 элемента которого
C  представляют коэффициенты вновь полученного уравнения изменения
C  скорости коэрцитивной силы; 5 элемент массива - число поковок,
C  которое использовалось при расчёте уравнения.
C  При первом запуске программы в файл STOR1.DAT записываются
C  сведения об исходном уравнении (перед началом работы необходимо
C  прописать "0" в начале файла STOR1.DAT). При последующих
C  запусках программы производится составление нового уравнения
C  на основе входных данных и записанных ранее в файл STOR1.DAT
C  с учётом весового фактора, основанного на числе использованных
```

C при расчётах поковок. После чего происходит перезапись файла
C STOR1.DAT с учётом новых данных и вывод результатов в отдельный
C файл.

C
C Чтение исходных данных.

C
OPEN(2,FILE='L1INP.DAT',STATUS='OLD')
OPEN(3,FILE='L1OUT.DAT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(4,FILE='STOR1.DAT',STATUS='OLD')
READ(2,*) newAV
IF(newAV(5).LE.0) THEN
 WRITE(3,1)
 GO TO 10
END IF
READ(4,*) N
IF (N.LE.0) THEN ! Проверка файла STOR1.DAT
 N=N+1
 REWIND(4)
 WRITE(4,*) N
 WRITE(4,*) newAV
 GO TO 10
END IF
ALLOCATE (AV(5,N))
READ(4,*) AV

C
C Расчёт новых коэффициентов.

C
sum=0
DO i=1,N
 sum=sum+AV(5,i)

```

END DO
sum=sum+newAV(5)
AVcor=0
DO i=1,4
    DO j=1,N
        AVcor(i)=AVcor(i)+AV(i,j)*AV(5,j)
    END DO
    AVcor(i)=(AVcor(i)+newAV(i)*newAV(5))/sum
END DO
C
C  Перезапись файла STOR1.DAT и вывод результатов
C  расчёта. Конец записи.
C
REWIND(4)
N=N+1
WRITE(4,*) N
WRITE(4,2) AV
WRITE(4,2) newAV
C
WRITE(3,3) N
WRITE(3,4) AV
WRITE(3,4) newAV
WRITE(3,5)
WRITE(3,6) AVcor
10 CONTINUE
CLOSE (2)
CLOSE (3)
CLOSE (4)
STOP
1 FORMAT('Ошибка ввода исходных данных!')

```

```
2 FORMAT(4F12.7,F5.0)
3 FORMAT('Проанализировано уравнений:',I3)
4 FORMAT('delHC= ',F12.7,' * T + ',
        *F12.7,' * Sig + ',F12.7,
        *' * T * Sig + ',F12.7,', N=',F5.0)
5 FORMAT('/Результат анализа:')
6 FORMAT('delHC= ',F12.7,' * T + ',
        *F12.7,' * Sig + ',F12.7,
        *' * T * Sig + ',F12.7)
END
```