

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»

На правах рукописи



Шарыкин Михаил Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЁМНОЙ
ШТАМПОВКИ ПОКОВОК ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ЛОПАСТЬ»**

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Заслуженный работник высшей школы
Российской Федерации
доктор технических наук, профессор
Сосенушкин Евгений Николаевич

Москва 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ.....	13
1.1 Особенности изделия «штамп для объёмной штамповки».....	13
1.2 Анализ применяемых процессов объёмной штамповки.....	14
1.3 Основные причины выхода из строя штампов ГОШ.....	18
1.4 Стойкость штампов.....	23
1.5 Методы повышения стойкости штампов.....	24
1.5.1 Конструкторские мероприятия.....	25
1.5.2 Технологические мероприятия.....	26
1.5.3 Организационные мероприятия.....	32
1.6 Методы оценки стойкости штампов.....	34
1.6.1 Основные методы определения температуры штампов.....	35
1.6.2 Основные методы исследования напряжённо-деформированного состояния штампов.....	42
1.7 Факторы, влияющие на выход штампов из строя и критерии оценки стойкости.....	43
1.7.1 Разрушение адгезионных связей истиранием.....	44
1.7.2 Трещины термомеханической усталости (разгарные трещины)....	45
1.7.3 Смятие поверхности гравюры.....	47
1.7.4 Эмпирические зависимости определения стойкости штампов.....	47
1.8 Обзор программных комплексов для моделирования процессов обработки металлов давлением.....	49
1.9 Выводы по главе 1.....	51
ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ЛОПАСТЬ»	53
2.1 Особенности конструкции деталей типа «лопасть».....	53

2.2 Конструкции детали представителя первого вида и анализ технологии изготовления.....	53
2.3 Конструкции детали представителя второго вида и анализ технологии изготовления.....	61
2.4 Выводы по главе 2.....	67
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОКОВОК ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ЛОПАСТЬ».....	69
3.1 Моделирования технологии ГОШ поковки из алюминиевого сплава.....	69
3.2 Результаты компьютерного моделирования производственного процесса штамповки поковки из алюминиевого сплава.....	69
3.3 Результаты компьютерного моделирования процесса штамповки сдвоенной поковки из алюминиевого сплава.....	76
3.4 Результаты компьютерного моделирования процесса штамповки поковки из алюминиевого сплава в штампе с ограничителем.....	93
3.5 Моделирования технологии ГОШ поковки из стали.....	99
3.6 Результаты компьютерного моделирования производственного процесса штамповки поковки из стали.....	99
3.7 Результаты компьютерного моделирования предлагаемого процесса штамповки поковки из стали.....	104
3.8 Выводы по главе 3.....	109
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА АДГЕЗИОННОГО ИЗНОСА ШТАМПОВОЙ СТАЛИ МАРКИ 5ХНВ.....	111
4.1 Методика проведения экспериментальных исследований стойкости на истирание штамповой стали марки 5ХНВ.....	111
4.2 Оборудование и инструмент экспериментальных исследований процесса износа.....	112

4.3 Результаты экспериментальных исследований процесса износа образцов из штамповой стали 5ХНВ.....	114
4.4 Выводы по главе 4.....	122
ГЛАВА 5. ПЛАНИРОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ СТАЛИ МАРКИ 5ХНВ ПРИ ШТАМПОВКЕ ПОКОВОК ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ЛОПАСТЬ».....	123
5.1 Цель и задачи планирования эксперимента.....	123
5.2 Оцениваемая характеристика.....	124
5.3 Факторы процесса штамповки поковок деталей типа «лопасть» и уровни их варьирования.....	124
5.4 Построение матрицы плана эксперимента.....	125
5.5 Результаты опытов.....	131
5.6 Формализованное описание.....	132
5.7 Выводы по главе 5.....	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	150
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТЫ.....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ПАТЕНТЫ.....	174

ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности, в частности, в машиностроении, среди многочисленной номенклатуры ответственных деталей специального назначения важное место занимают детали типа «лопасть». Они являются неотъемлемой частью конструкции множества машин и агрегатов. Лопастей современных машин, в зависимости от назначения, выполняемой данным устройством задачи и среды, в которой они работают, имеют самую различную конструкцию, и для каждой характерен собственный аэро- или гидродинамический профиль.

Актуальность темы диссертации. Современные тенденции требуют увеличения статической и динамической прочности лопастей и наличия материалов с необходимыми свойствами, а также уровня научных достижений в области аэро- и гидродинамике. Всё это приводит к ужесточению технических требований предъявляемых к деталям, и, как следствие, усложнению технологического процесса.

Лопастей в основном изготавливаются из предварительно отштампованных заготовок. Формообразующие штампы являются сложными и дорогостоящими инструментами, работающими в тяжёлых условиях, что приводит к их быстрому износу. А важнейшим фактором, почти всегда определяющим производительность труда кузнечно-прессовых цехов и себестоимость их продукции, является стойкость штамповой оснастки.

Поэтому возникает необходимость увеличения срока службы, а так же снижения себестоимости формообразующих штампов для штамповки деталей типа «лопасть» путём совершенствования технологического процесса изготовления, как детали, так и инструмента, а также исследование процессов износа штампов и прогнозирования их стойкости. Поэтому тема работы является **актуальной**.

Степень разработанности темы. Значительный прогресс в развитие

методов увеличения стойкости штампового инструмента в процессах горячей объёмной штамповки осуществлялось трудами видных учёных – представителей российских и зарубежных научных школ обработки давлением: Аксенов Л. Б. [2], Бабенко В. А. [4], Бельский Е. И. [6], Васильев Д. И. [9], Власов А. В. [11-13], Губкин С. И. [24], Довнар С. А. [25], Константинов И. Л. [33-34], Лясников А. В. [45], Непершин Р. И. [51], Охрименко Я. М. [55], Петров А. Н. [56, 60-61], Позняк Л. А. [64], Семёнов Е. И. [73, 74], Смирнов С. В. [77], Сосенушкин Е. Н. [78-84], Степанский Л. Г. [87], Сторожев М. В. [88-89], Трахтенберг Б. Ф. [95], Тылкин М. А. [98], Altan T., Borowski J. [114], Gronostajski Z. [117], Lange K., Montero M., Valle G., Shang X. [122], Walters J. и многими другими.

Как показали исследования [8, 17, 32, 50, 55, 74, 88], одним из ключевых параметров, влияющих на стойкость штампового инструмента, являются механические и эксплуатационные свойства штамповой стали, в частности твёрдость рабочей поверхности штампа (гравюры).

Согласно результатам [100], модификация геометрии облойной канавки способна повысить стойкость инструмента до 2 раз.

В работах [9, 60, 74] предложен ряд эмпирических зависимостей определения стойкости штампового инструмента, демонстрирующих удовлетворительную точность для определённых технологических условий.

Данные материалов [3, 11, 12, 38] говорят о том, что применение специализированных программных комплексов для моделирования процессов горячей объёмной штамповки позволяет с допустимой точностью прогнозировать стойкость штамповой оснастки.

Целью работы является повышение износостойкости штампового инструмента, применяемого при штамповке поковок деталей типа «лопасть», путём изменения конструктивно-технологических факторов: усовершенствование технологических процессов; изменения конструкции штампов и формы и размеров заготовок; химико-термическая обработка.

Для реализации сформулированной цели требуется решить следующие задачи:

1. Проведение анализа особенностей изготовления и эксплуатации штампов горячей объёмной штамповки, с целью выявления основных причин их выхода из строя и современных методов повышения стойкости.

2. Усовершенствование технологических процессов изготовления поковок деталей типа «лопасть» способами горячей штамповки путём: сокращения количества технологических переходов; изменения формы, размеров и способа позиционирования заготовки в ручье штампа; внесения изменений в конструкцию штамповой оснастки.

3. Исследование возможности применения конструкторско-технологических мероприятий повышения износостойкости инструмента для ГОШ поковок типа «лопасть», а так же установление степени влияния технологических параметров: температуры штамповки (в интервалах горячей штамповки); формы и размеров заготовки; технологии штамповки; количества переходов и ХТО на стойкость штампов.

4. Разработка математических моделей на основе метода конечно-элементного моделирования процессов объёмной штамповки поковок детали типа «лопасть» и определение зависимости износостойкости штампов от НДС металла заготовки, силовых и температурных параметров технологических процессов, марки и твердости штамповой стали.

5. Поставить, провести и обработать результаты экспериментальных исследований объёмного износа образцов из штамповых сталей с применением машины трения.

6. Посредством многофакторного планирования экспериментов построить математические модели для оценки параметров стойкости штампов горячей объёмной штамповки по критерию истирания.

Объекты исследования диссертационной работы являются штампы горячей объёмной штамповки для изготовления поковок деталей типа

«лопасть», изготавливаемых из инструментальной штамповой стали марки 5ХНВ ГОСТ 5950-2000 [23].

Предмет исследования – технология горячей объёмной штамповки поковок детали типа «лопасть» и ее влияние на объемный износ штамповой оснастки из инструментальной штамповой стали марки 5ХНВ.

Научная новизна работы:

- компьютерные модели вариантов процесса формообразования поковок деталей типа «лопасть», позволяющих обосновать температурно-силовые режимы технологического процесса с помощью варьирования технологических факторов, непосредственно влияющих на работоспособность штампов, связанную с механизмом абразивного износа;
- выявленный характер изменения и максимальные значения энергосиловых параметров для новых вариантов технологии горячего деформирования сдвоенных поковок свидетельствуют о том, что кузнечно-штамповочное оборудование не нуждается в замене, т.к. технологические силы не превышают номинальных значений и может быть использовано с большей производительностью;
- закономерности, отражающие влияние изменения объема и способа установки и позиционирования исходной заготовки в штампе, а также внесенных изменений в конструкцию самого штампа на величину износа его рабочих поверхностей;
- математические модели многокритериальной оптимизации, устанавливающие степень влияния технологических параметров процесса горячей объёмной штамповки (температуры и объёма заготовки, твёрдости гравюры штампа, теплового напора, напряженно-деформированного состояния штампового и деформируемого металлов) на интенсивность истирания наиболее уязвимых конструктивных элементов штампа, которая зависит от площади активного контакта растекающегося металла с элементами рабочих поверхностей штампа при изготовлении поковок типа

«лопасть».

Теоретическая и практическая значимость работы:

- компьютерные модели и уравнения регрессии рассматриваемых вариантов технологических процессов ГОШ поковок с тонким полотном;
- новые варианты технологий ГОШ поковок деталей типа «лопасть», обеспечивающие повышение износостойкости штампового инструмента: до 62 % – для поковок из алюминиевого сплава АК4-1 и до 23 % – при штамповке поковок из жаропрочной стали 13X11H2B2MФ-Ш;
- новые конструктивные решения, обеспечивающие перераспределение потоков металла при заполнении рабочих полостей штамповой оснастки, что позволяет снизить расход металла на изготовление поковок деталей типа «лопасть» из АК4-1 на 12 %, а также повысить производительность за счёт штамповки сдвоенных поковок. Рационализация формы, размеров и способа расположения в ручье штампа заготовки при штамповке поковок из 13X11H2B2MФ-Ш позволяет повысить КИМ на 15 %;
- результаты эксперимента по объемному износу образцов из штамповой стали 5ХНВ показали, что по сравнению с термообработкой на твёрдость 41 HRC, дополнительное сульфидирование увеличило износостойкость в среднем на 25%, а проведение азотирования на твёрдость 62 HRC – на 67%.

Методы исследования согласованы со спецификой решаемых задач и особенностями получаемых поковок. Оценка твердости элементов штампов проводилась с использованием твердомера Роквелл ТК-2М; для построения компьютерных 3D моделей инструмента и заготовок использовалась программная среда Solid Works; анализ напряжённо-деформированного состояния и температурных полей в материале инструмента и заготовок методом конечных элементов с применением специализированного программного комплекса DEFORM-2D/3D, предназначенного для

симуляции процессов обработки металлов давлением; данные, полученные экспериментально, обрабатывались методами математической статистики и теории планирования экспериментов; постановка и проведение экспериментов на объемный износ образцов осуществлялись с использованием стандартной испытательной машины трения «Шкода-Савин».

Положения, выносимые на защиту:

1. Выявленная зависимость износостойкости гравюры штампов для штамповки поковок деталей типа «лопасть» от изменений геометрических параметров заготовок и гравюры штампа, влияния циклически изменяющегося температурного поля заготовки на НДС, а также конструктивных параметров рабочих элементов штампов.

2. Новые варианты технологических процессов горячего деформирования тонкопалотных поковок и полученные результаты компьютерного моделирования, включающие: оценку износостойкости гравюры штампа по модели Арчарда и степени заполнения ручья металлом; анализ напряженно-деформированного состояния и силовых характеристик процесса формоизменения поковок, а также изменяющихся во времени температурных полей металла поковок и штампового инструмента.

3. Математические модели в виде уравнений регрессии, построенные в соответствии со стандартными методами математической статистики и теории математического планирования экспериментов, позволяющие определить величину износа штампового инструмента после однократной штамповки для предложенных вариантов технологических процессов ГОШ и промышленной реализации новых технологий.

Степень достоверности результатов исследований и обоснованность выводов подтверждаются применением проверенных верифицированных исходных данных и корректных начальных и граничных условий при численном моделировании и применением проверенных методов

математической статистики и многофакторного планирования экспериментов, подтвердивших свою надежность в практических исследованиях. Теоретические положения основаны на общепринятых гипотезах.

Физические эксперименты выполнены на сертифицированном испытательном оборудовании с применением поверенных средств измерений, что обеспечило высокую точность экспериментальных данных. Полученные результаты демонстрируют удовлетворительную сходимость с данными аналитических расчетов и численного моделирования.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 2.5.7 «Технологии и машины обработки давлением» подтверждается следующими аспектами: разработкой и анализом технологических вариантов горячей объёмной штамповки поковок с тонким полотном типа «лопасть»; проведением комплексной оценки износостойкости штампового инструмента на основе математического и компьютерного моделирования, что соответствует следующим направлениям исследований: 1 «Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки» и 6 «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости штампового инструмента».

Апробация работы. Основные результаты исследования доложены и обсуждены на 3-х всероссийских и международной конференциях:

1. «Актуальные проблемы науки и техники», Ростов-на-Дону, 15–17 марта 2023 года.
2. XV международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении», Москва, 1–3 ноября 2023 года.
3. «Актуальные проблемы науки и техники», Ростов-на-Дону, 19–21 марта 2024 года.

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, из них 5 – в

журналах, рекомендованных Перечнем ВАК для опубликования основных результатов диссертаций, получено 3 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Работа изложена на 175 страницах машинописного текста, включает: введение, 5 глав, заключение, 118 рисунков, 33 таблицы, список литературы из 124 источников и приложение.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

1.1 Особенности изделия «штамп для объёмной штамповки»

Согласно ГОСТ 15830-84 [18] штамп для обработки металлов давлением (ОМД) – это технологическая оснастка, посредством которой заготовка приобретает форму и (или) размеры, соответствующие поверхности или контуру рабочих элементов штампа. Под рабочими элементами понимается основная деталь или узел штампа, выполняющая разделительные или формоизменяющие операции [18]. Основными деталями штампа, непосредственно воздействующими на деформируемый материал, являются пуансон и матрица или верхняя и нижняя части штампа [111].

Штампы для объёмной штамповки – специализированный инструмент, предназначенный для крупносерийного и массового производства поковок, как правило, одного наименования. В условиях мелкосерийного производства с применением групповых методов деформирования используют переналаживаемые штампы. Их классифицируют по: назначению, применяемому оборудованию, количеству ручьёв, конструктивному исполнению и т.д. [4, 18, 55, 111].

По назначению штампы делятся на основные (для оформления поковок, обрезки облоя и др.) и отделочные (для правки и калибровки) [4, 18, 55, 111].

По видам оборудования штампы классифицируют как, устанавливаемые на: универсальном (молотах, горизонтально-ковочных машинах (ГКМ), кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП), винтовых и гидравлических прессах) и специальном (горизонтально-гибочных, электровысадочных, ротационно-ковочных и др.) [4].

Конструктивное исполнение штампов варьируется по: наличию

выталкивателей, количеству плоскостей разъёма (1 или несколько), типу (монолитный (рисунок 1.1), со вставками и сборный) и способу штамповки (открытые – для штамповки с облоем и закрытые – для безоблойной штамповки) [4, 53].



Рис. 1.1. Вставки штампа КГШП для изготовления поковки детали «шатун»

Независимо от типа, по количеству ручьёв штампы подразделяются на одноручьевые (для простых поковок или предварительно подготовленных на других видах оборудования) и многоручьевые (для поковок сложной формы) [4, 55].

Штампы для объёмной штамповки работают в экстремальных условиях. Хотя конкретные рабочие условия варьируются в зависимости от типа штампа, можно выделить общие закономерности. Ключевые различия обусловлены: спецификой деформационных процессов металла; конструктивными особенностями (цельноблочное или сборное исполнение); характером динамических нагрузок [4, 55].

1.2 Анализ применяемых процессов объёмной штамповки

Согласно классификации процессов деформирования по С. И. Губкину следует различать деформацию с полным упрочнением (холодную), с неполным упрочнением (неполную холодную), с неполной

рекристаллизацией (неполную горячую) и с полной рекристаллизацией (горячую) [24].

Технология холодной объёмной штамповки (ХОШ) обеспечивает получение деталей с высокой точностью геометрических параметров и низкой шероховатостью поверхности. Важным технологическим преимуществом ХОШ является упрочнение материала заготовки. Благодаря этому в некоторых случаях возможно использование менее дорогих низкоуглеродистых сталей вместо легированных без ухудшения механических свойств готовых изделий. При этом способе получения поковок коэффициент использования материала (КИМ) увеличивается на 10-30% [82]. Однако нагрузки на инструмент при холодной штамповке в ряде случаев достигают 2000-2500 МПа, поэтому увеличивается число переходов при изготовлении поковок [85]. Это связано с необходимостью введения дополнительных отжигов заготовки и её смазки между переходами [82]. Кроме того, не все марки материалов и особенно труднодеформируемых сталей и сплавов пригодны для холодного объёмного деформирования.

Одной из перспективных технологий производства поковок для изготовления деталей современных машин, изделий и инструмента является деформация с неполной рекристаллизацией.

Процессы деформирования, занимающие промежуточное положение между холодной и горячей обработкой, называют по-разному: полугорячая штамповка, неполная горячая деформация, тёплая деформация, штамповка с подогревом [43, 63]. В научно-технической литературе наиболее распространён термин «полугорячая штамповка», поэтому в данной работе далее также будет использоваться этот термин.

Под термином «полугорячая штамповка» (ПГОШ) понимают условия, близкие к условиям неполной горячей деформации [15, 43, 82]. Данный метод характеризуется уменьшением сопротивления материала деформации при одновременном улучшении его пластических свойств (рисунок 1.2).

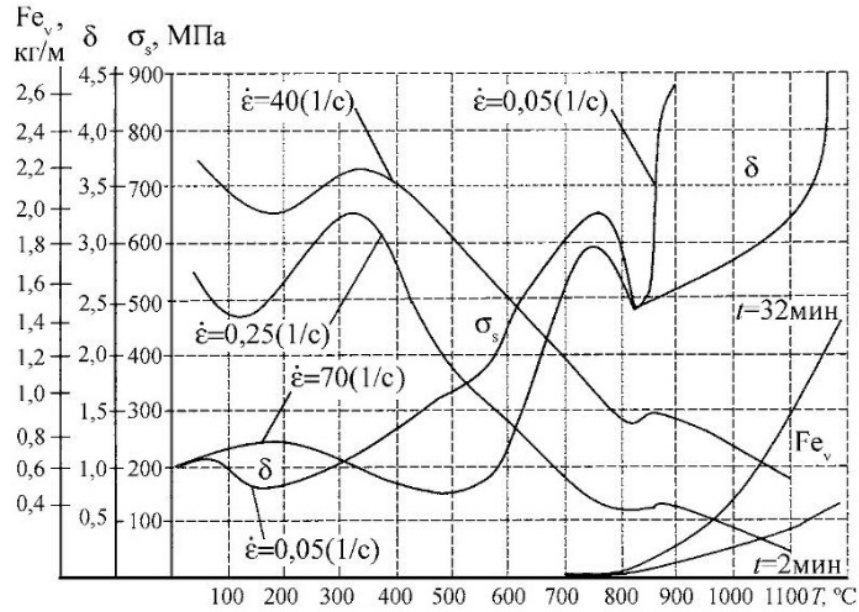


Рис. 1.2. Влияние температуры пластической деформации на комплекс свойств (σ_s, δ) стали 15 и потери металла в окалину $Fe_v(t)$ – время нагрева) [82]

Также применение полугорячей штамповки приводит к снижению энергетических затрат и экономии металла в технологиях объемного деформирования, заготовки можно обрабатывать без специальных покрытий (фосфатирования и др.), что существенно упрощает реализацию процесса в производственных условиях (рисунок 1.3) [43].

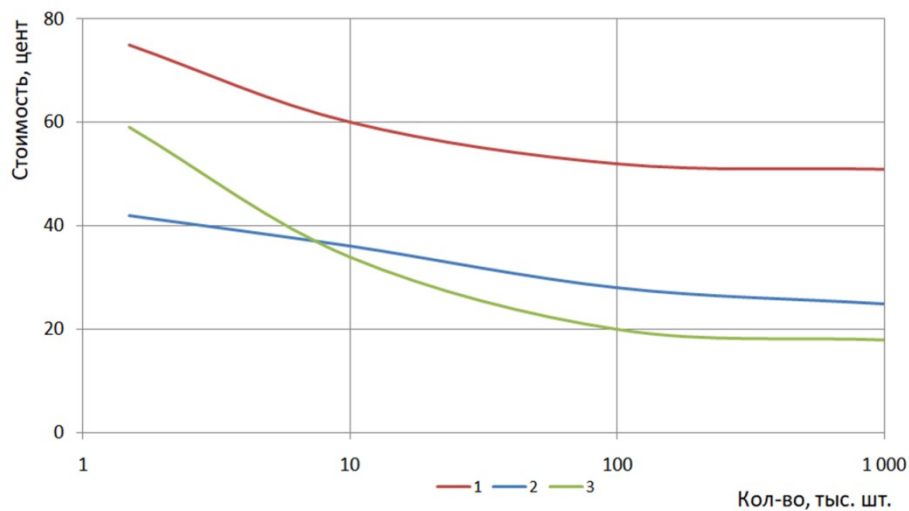


Рис. 1.3. Зависимость затрат при изготовлении заготовок колец подшипников от величины месячной партии: 1 – обработка резанием, 2 – холодная объёмная штамповка, 3 – полугорячая объёмная штамповка [43]

Температурный диапазон ПГОШ ограничивается сверху значениями 780-850°C [82]. В данном интервале на заготовке отсутствует активное поверхностное окисление с образованием окалина, а силы деформирования снижаются в 1,5-4 раза по сравнению с холодной штамповкой. Выбор конкретных температурных параметров для ПГОШ зависит от: марки стали, допустимых нагрузок на инструмент и скорости деформирования [38, 63, 82, 124]. Возрастание σ_s при увеличении скорости обусловлено скоростным упрочнением (процессы упрочнения опережают процессы возврата и рекристаллизации) [63, 82, 118].

В последние десятилетия в промышленно развитых странах (США, Германии, Японии, Китае и т.п.) наблюдается рост внимания исследователей к внедрению ПГОШ сталей и сплавов [43, 54, 82, 85, 123]. Однако, она пока не нашла массового применения в производственной практике.

Наибольшее распространение получили технологические процессы (ТП) производства, включающие операции горячего деформирования [82].

Технология горячей объемной штамповки (ГОШ) характеризуется значительно меньшими энергозатратами на тонну продукции по сравнению с холодной обработкой. Однако в отдельных случаях себестоимость изделий может возрасти из-за необходимости высокотемпературного нагрева заготовок (1150-1200°C) [85]. Нагрев применяют с целью снижения удельной силы на штамповый инструмент, а также избежать трещинообразования в поковках. Основными недостатками процессов горячей объемной штамповки являются разупрочнение материала вследствие рекристаллизационных процессов; увеличенные припуски и допуски; наличием интенсивного образования окалина и необходимость последующей механической обработки [82].

Использование различных методов обработки металлов давлением имеет определенные ограничения, обусловленные как техническими характеристиками изготавливаемых деталей, так и технологическими

особенностями самих процессов [82].

Сравнительная характеристика процессов объёмного деформирования по ряду основных параметров приведена в таблице 1.1 [66, 82].

Таблица 1.1

Технологические возможности процессов объёмной штамповки

Параметры процессов	Штамповка		
	Горячая	Полугорячая	Холодная
Достижимая точность размеров, качество	IT 12...16	IT 9...12	IT 7...11
Шероховатость поверхности, R_z , мкм	> 100	< 30	10
Масса поковок, кг	0,005...1500	0,1...50	0,001...30
Используемые стали	Без ограничений	Углеродистые, легированные стали с содержанием легирующих элементов до 10%	Стали углеродистые с содержанием углерода до 0,45% и низколегированные с суммарным содержанием легирующих элементов до 3%
Возможность формоизменения	Без ограничений	По возможности тела вращения	Главным образом тела вращения
Предварительная обработка заготовок	Не требуется	Не требуется	Отжиг, фосфатирование
Промежуточная обработка	Не требуется	Не требуется	Отжиг, фосфатирование
Экономичная партия, тыс. шт. (при массе 1 кг), более	0,5	10	3
Стойкость штампов, тыс. шт.	2...5	10...20	20...60

1.3 Основные причины выхода из строя штампов ГОШ

В процессе деформации штампы подвергаются многократному воздействию значительных нагрузок, которые складывается из большого числа частных воздействий. Они возникают большей частью совместно, но доля их различна в зависимости от ТП. По основным признакам можно разделить нагрузки на механические и термические [4, 5, 7, 55].

У инструмента для горячей обработки возникают дополнительно

тепловые нагрузки, зависящие от температуры обработки, скорости обработки, продолжительности контакта между деталью и инструментом, условий охлаждения инструмента [4, 7, 55]. При температуре заготовки 800-1250°C нагрев поверхности рабочих элементов достигает 400-600°C [53]. Однако, даже в процессе холодной деформации может происходить нагрев поверхности рабочих элементов штампа за счёт теплового эффекта деформации. Выделяемая теплота накапливается в деформируемом теле, приводя к повышению его температуры. Данный эффект особенно значим при высоких скоростях деформации, так как повышение температуры тела может быть весьма значительным и достигать более 400°C [7, 25, 82, 89].

В процессе исследования причин, влияющих на стойкость штампов, установили, что решающее значение имеют вопросы кинетики и механизма износа контактной поверхности [61, 80, 82, 94]. Основными причинами выхода штампов из строя являются смятие, образование трещин, разгар, налипание и свариваемость, и истирание рабочих элементов штампа [4, 5, 55, 61, 88, 117].

Смятие, оплывание и другие деформации отдельных элементов штампа происходит вследствие больших давлений (рисунок 1.4, 1.5), а также местного разогрева штампа из-за контакта с заготовкой (поковкой) до температуры отпуска и выше [5, 55, 79, 81, 88]. Для предотвращения снижения твёрдости рабочих элементов штампа вследствие нагрева необходимо их охлаждать [55].



Рис. 1.4. Деформация кромок, приводящая к увеличению уклона и искажению гравюры штампа для ГОШ



Рис. 1.5. Смятие гравюры штампа для ГОШ вследствие изменения механических характеристик в результате отпуска

Однако многократное изменение температуры штампа в течение каждого цикла штамповки ведет к необратимым изменениям в его поверхностном слое: к образованию разгарных трещин [4, 7, 55]. Иногда они принимают вид регулярной сетки на поверхности гравюры (рисунок 1.6), приводя к быстрому износу штампов [55].



Рис. 1.6. Образование разгарных трещин на гравюре штампа для ГОШ

Также образование поверхностных и внутренних трещин может быть связано с малоцикловой усталостной прочностью деталей штампа, и с неправильной термической обработкой инструмента при его закалке [7, 26, 53, 79, 81, 82], что может привести к разрушению штампа (рисунок 1.7).



Рис. 1.7. Разрушение штампа ГОШ

Эрозия поверхности штампов или его рабочих элементов способствует адгезии деформируемого материала (налипание), а в крайних случаях – схватыванию (сварке), что приводит к искажению формы ручья образованию дефектов на поковках, которые поступают в брак по чистоте поверхности или из-за несоответствия размерам, заданных чертежом [7, 55].

Истирание представляет собой механический износ рабочих элементов инструмента штампуемым металлом, наиболее сильно он происходит в местах интенсивного течения металла [5, 80]. В обрезных штампах истирание приводит к затуплению режущих кромок матрицы и пуансона, и, как следствие – к задирам на поверхности поковки и штампа (рисунок 1.8, 1.9).



Рис. 1.8. Затупление режущих кромок пуансона обрезного штампа



Рис. 1.9. Задиры на поковке и рабочих элементах обрезного штампа

Для штампов ГОШ основными видами разрушения являются: образование трещин, в том числе и разгарных, налипание и свариваемость, смятие и истирание [82]. На рисунке 1.10 приведена классификация основных факторов, влияющих на стойкость рабочих деталей штампа [82], в основе которой лежит схема, предложенная Л. Б. Аксёновым [2] и расширенная Е. Н. Сосенушкиным [82].

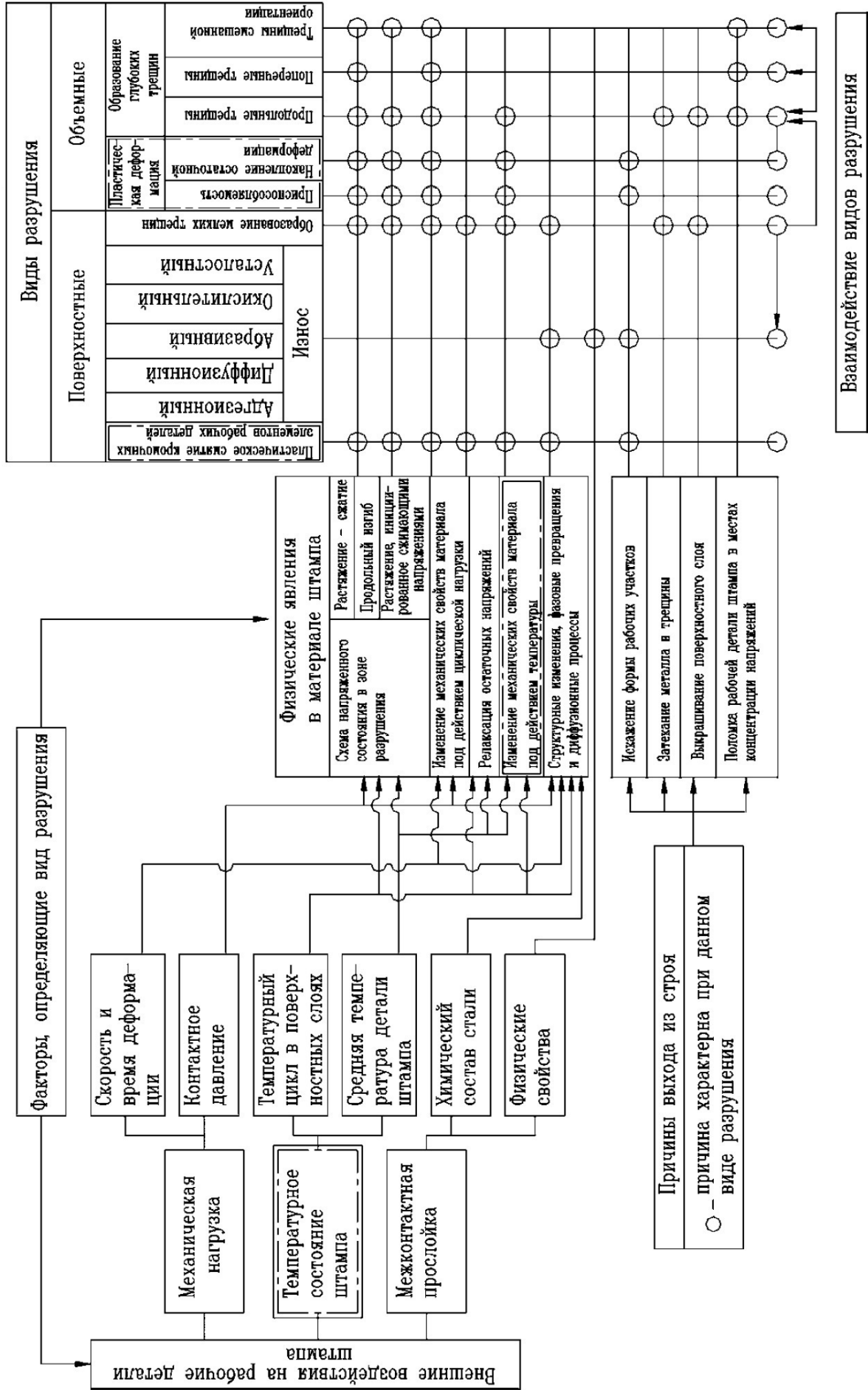


Рис. 1.10. Основные факторы, влияющие на стойкость рабочих деталей штампов

Следует отметить, что между всеми видами разрушения существует тесное взаимодействие и наибольшая доля приходится на комбинированные виды разрушения [62, 82].

Качество поковок, включая точность размеров, шероховатость поверхностей, соосность элементов и многое другое определяется конструкцией штампа и точностью исполнения его рабочих элементов [82].

Штампы являются сложным и дорогим инструментом. Для уменьшения расходов на штампы необходимо стремиться к снижению их стоимости и повышению стойкости. Стойкость инструмента также влияет на сохранение точности и внешнего вида готовой детали [5, 7, 55, 82], увеличение стойкости штампов позволяет повысить производительность труда, сократив потери времени на его замену и переналадку, необходимость в частом контроле состояния инструмента и т.д. [7].

1.4 Стойкость штампов

Показатель стойкости служит ключевым критерием, комплексно оценивающим рациональность конструктивных решений и адекватность выбора материала инструмента для конкретных условий работы [62, 82].

Стойкость штампов определяется количеством отштампованных деталей до полного износа штампа или до замены изношенной матрицы и пуансона. Суммарный ресурс штампа определяется стойкостью нового штампа и стойкостей после ряда возобновлений [36, 88].

В крупносерийном и массовом производстве стойкость штампа играет важную роль, так как чем она больше, тем меньше потребуется изготавливать дублеров и тем ниже будет себестоимость выпускаемой продукции [36].

Стойкость инструмента зависит от многих факторов: характера технологической операции и марки обрабатываемого материала; температурного режима поковки и инструмента; состояние прессы; состава

смазки; протяженности пути трения и др. [5, 36, 43, 61, 62, 82, 95].

Однако стойкость инструмента различна не только при разных методах обработки, разные детали штампа имеют разную стойкость [7, 36, 82, 85, 88]. В штампах ГОШ матрицы во многих случаях изнашиваются быстрее, т.к. более длительное время соприкасаются с нагретой заготовкой, подвергаясь более сильным тепловым нагрузкам [7, 53, 88].

Наибольшая стойкость штампов достигается при его нормальном износе, когда размер поковки постепенно выходят за пределы, установленные чертежом, штамп не имеет трещин и может подвергнуться очередному ремонту, а поковки получаются с достаточно чистой поверхностью. Преждевременный выход из строя возникает при нарушении расчётных условий штамповки [5, 55, 61, 62].

В настоящее время основным материалом, применяемым для штампов, являются штамповые стали регламентированные ГОСТ 5950-2000 [23], форму и размеры которым передают с помощью операцийковки, штамповки, иногда литья в сочетании с операциями резания [4, 53, 55, 85].

Штамповые стали для ГОШ должны обладать: высокой прочностью с ударной вязкостью, разгаростойкостью, износостойкостью, теплопроводностью, приемлемым баллом карбидной неоднородности, достаточной глубиной прокаливания, минимальной деформацией при термообработке, приемлемой пластичностью и обрабатываемостью резанием, и стабильностью данных характеристик в рабочих температурных режимах [1, 2, 4, 31, 43, 44, 53, 55, 63, 64, 74, 82, 83, 94].

1.5 Методы повышения стойкости штампов

Уменьшение расхода материала и повышение стойкости инструмента можно достичь с помощью повышения механических и эксплуатационных характеристик [1].

Мероприятия по повышению стойкости можно классифицировать следующим образом [48, 55, 74, 117 и др.]:

- 1) Конструкторские мероприятия (изменение конструкции, применение дополнительных устройств, изменение материалов);
- 2) Технологические мероприятия (технология изготовления, как штампа, так и поковок на нём, поверхностная пластическая деформация, термическая и химико-термическая обработка, нанесение покрытий);
- 3) Организационные мероприятия (уход, профилактика, обслуживание).

На сегодняшний день для повышения стойкости штамповой оснастки активно применяются следующие мероприятия.

1.5.1 Конструкторские мероприятия

К основным конструкторским мероприятиям можно отнести: применение более качественных штамповых сталей и изменение конструкции самого штампа [48, 55, 74].

Штампы, изготовленные из более качественных высоколегированных штамповых сталей, имеют более высокую стоимость, поэтому вопрос о целесообразности их применения обычно решают после проведения экономического расчета [1, 2, 8, 33, 49, 78].

Чтобы уменьшить расход такой стали, штампы изготавливаются составными: большая масса металла – сам блок изготавливается из дешевой конструкционной стали (марок 45, 45Х и др.). А рабочие элементы выполняются: из вставок (для цельноблочных штампов) или отдельных деталей (для сборных штампов), изготовленных из легированной стали повышенной прочности (марок 5ХНВ, 4Х5МФС и др.) [33].

Рациональное использование штампов включает возможность переделывать их под меньшие размеры после предельного износа [53, 82, 85].

Для поковок, штампуемых в несколько переходов возможно применение изношенных вставок чистового перехода для вставок черного перехода, что позволяет использовать каждую вставку дважды [27, 55, 100].

При организации серийного и крупносерийного выпуска продукции для существенного повышения стойкости рабочих деталей штампов (в 10-15 раз) применяют твёрдосплавные материалы вольфрамокобальтовой группы (ВК) [1, 2, 44, 48, 82, 85].

Определение наиболее эффективного технологического варианта предшествует важнейшей стадии производственной подготовки – проектированию штампа, обеспечивающего реализацию разработанной технологии [82].

Конструктивное решение штампа определяется не только геометрией, габаритами и материалом заготовки, точностью поковок и типом оборудования, но и другие факторы. Один из таких факторов, имеющий существенное значение – соответствие конструкции штампового инструмента объёмам выпуска продукции [4, 7, 43, 82].

Конструкция штамповой оснастки вне зависимости от объемов производства должна отвечать ключевым технико-эксплуатационным требованиям: жесткость и прочность; технологичность форм и размеров деталей; стандартизация основных узлов; быстросменность деталей; соответствие нормам промышленной безопасности и др. [4, 36, 43, 65, 82].

Проектирование рабочих элементов штамповой оснастки требует учета методов повышения их стойкости. Особенности конструирования штампов посвящены работы [4, 5, 28, 31, 43, 61, 82, 85 и др.].

1.5.2 Технологические мероприятия

К основным технологическим мероприятиям можно отнести: ТП изготовления штампов, термическая и химико-термическая обработка, а

также упрочнение поверхностного слоя рабочих элементов штампов [48].

Технология изготовления штампов оказывает большое влияние на их стойкость [31, 63, 88, 94, 101]. Как упоминалось ранее – традиционный метод производства рабочих деталей штампов – обработка резанием, обладающая рядом недостатков: повышенным расходом материала, высокой трудоёмкостью процесса и низкой стойкостью получаемого инструмента [4, 10, 55, 63, 85]. Но современные тенденции демонстрируют переход к более эффективным способам формообразования [31, 82, 85, 88, 102].

Исследование зависимости затрат на производство матриц от объема партии при различных технологических подходах (рисунок 1.11) [100] свидетельствует, что перспективным методом изготовления штамповой оснастки является формирование точных заготовок методами пластической деформации [45, 55, 82, 94, 100].

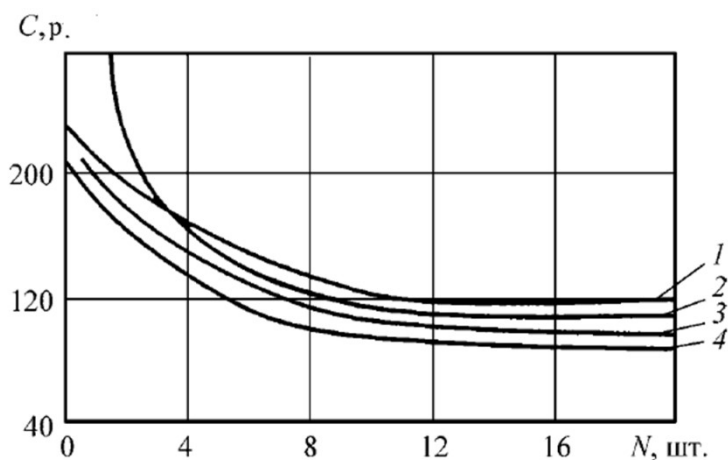


Рис. 1.11. Зависимость себестоимости матриц от величины партии при их изготовлении различными способами: 1 – электроэрозионная обработка; 2 – горячее выдавливание; 3 – электрохимическая и копировально-фрезерная обработка; 4 – холодное выдавливание [100]

Сравнительная оценка себестоимости изготовления различными способами выявила следующие экономически целесообразные варианты: при выпуске до 10 изделий – механическая обработка; при производстве 10-30 единиц – технология полугорячего выдавливания [62, 63, 85].

Изготовление рабочих элементов инструмента методом пластического

деформирования позволяет использовать резерв механических свойств металла за счёт сохранения непрерывности направления волокнистого строения [1, 67, 82]. В тех местах, где волокна перерезаны при обработке, после повторных нагрузок образуются трещины, ведущие к излому [18].

Контролируя процессы пластической деформации при штамповке, достигается трансформация исходной волокнистой структуры заготовки во вторичную макроструктуру с заданной ориентацией волокон относительно функциональных поверхностей готовой детали (рисунок 1.12), что способствует более эффективному использованию ресурса штампованных деталей, позволяя повысить, в частности, их стойкость [2, 31, 75, 88].

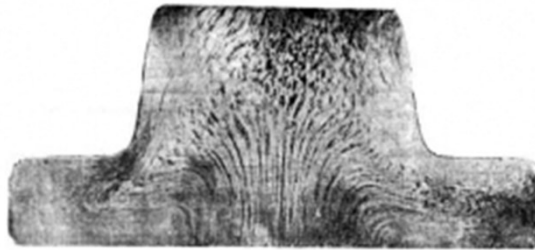


Рис. 1.12. Макроструктура стальной заготовки после горячей штамповки [1].

При выборе размеров заготовки инструмента необходимо учитывать, что для гравирования фигуры нельзя использовать поверхности $H \times B$ (рисунок 1.13) [34, 74], иначе волокна расположатся в направлении движения инструмента, и возникающие силы будут раскалывать штамп. Чтобы выделить поверхность $H \times B$, изготовитель ставит на ней клеймо [34, 74].

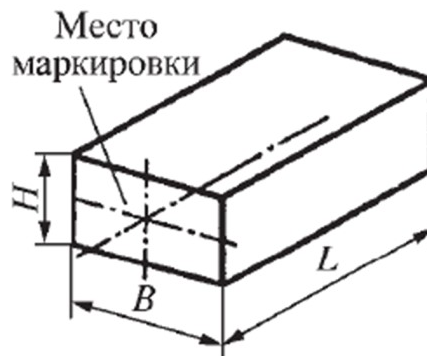


Рис. 1.13. Штамповый кубик [74]

На выбранной плоскости заготовки ручки располагают вдоль волокон

(рисунок 1.14а) и только ручки с глубокими полостями – поперек волокон (рисунок 1.14б) (для поковок удлинённых в плане) [74].

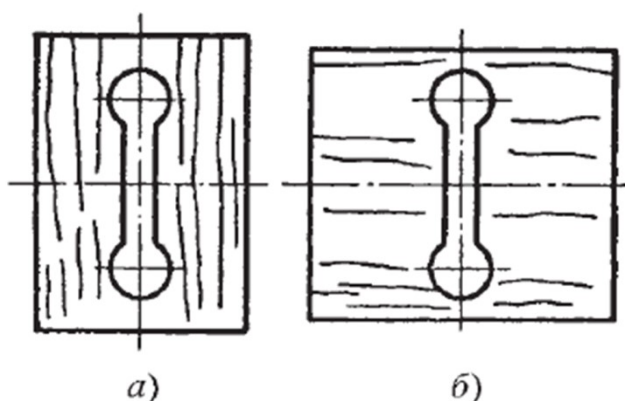


Рис. 1.14. Расположение ручьёв штампа относительно волокон материала [74]

Гравюры во вставках или в мелких штампах могут изготавливаться высокоскоростной штамповкой [5, 63].

Особенностями процесса являются: высокая производительность, точность гравюры и высокое качество поверхности. Стойкость штампов, полученных высокоскоростной штамповкой, значительно превышает стойкость аналогичных штампов, полученных обычной штамповкой. Это объясняется изменениями, происходящими в структуре металла. Но процесс ещё не получил широкого распространения в промышленности [5, 63, 94].

Термическая обработка (ТО) стальных изделий, имеет целью изменение структуры, фазового состава и свойств материалов этих изделий в заданном направлении. Температурное воздействие является самым распространённым способом упрочнения в современной технике [1, 44, 97]. Превышение допустимых значений твердости вызывает разрушение рабочих поверхностей ручьёв, занижение – к смятию [5].

Основные операции термической обработки стальных изделий – это отжиг, нормализация, закалка, отпуск, старение и обработка холодом [1, 5, 44, 47, 97]. Выбор последовательности этих операций определяется габаритами и назначением инструмента. Для обрезаемых, легких и средних штампов и вставок оптимальным является проведение термических операций после завершения механообработки [5], с обязательной защитой

поверхностного слоя от окислительных процессов и обезуглероживания [4]. Средние и полутяжелые штампы требуют термообработки между черновой и чистовой обработкой, а тяжелые штампы обрабатываются термически до начала механических операций [5].

В текущем десятилетии наблюдается повышенный интерес к разработке способов термомеханической обработки (ТМО), позволяющих существенно увеличить стойкость штампов горячего деформирования. Данный метод основан на комбинированном воздействии деформационного и термического факторов для формирования заданной микроструктуры и улучшения механических характеристик материала [1, 5, 44, 54, 94].

ТМО подразделяется на несколько видов, но наибольшее практическое применение нашли высокотемпературная (ВТМО) [88] и низкотемпературная (НТМО) термомеханическая обработка, которую иногда называют полугорячая термомеханическая обработка (ПТМО) [54, 92, 99].

Главным достоинством технологии ТМО является то, что она позволяет одновременно повысить пластичность и прочность материала, что является уникальным явлением [5, 54, 92, 99]. Поскольку металл упрочняется, и устраняются дефекты его кристаллической решетки, у готовых изделий повышается стойкость к эрозии и коррозии, в них нет остаточного напряжения, и увеличивается срок эксплуатации [54, 92, 99].

Для увеличения срока службы штампов применяют поверхностное упрочнение ручьев за счёт химико-термической обработки (ХТО) [1, 36, 55, 88, 94]. ХТО – температурная обработка металлических изделий в химически активных средах для изменения структуры и свойств поверхности металла вследствие диффузионного насыщения её различными химическими элементами [111]. Наиболее распространенными видами ХТО являются: цементация, нитроцементация, азотирование, борирование, цианирование, оксидирование и диффузионная металлизация (хромирование, алитирование). Они применяются для повышения поверхностной твердости,

теплостойкости, окалиностойкости, износостойкости и коррозионной стойкости, усталостной прочности, снижению коэффициента трения и т.д. [1, 17, 35, 36, 37, 44, 46, 48, 55, 76, 86, 88, 90, 94, 111, 114, 121].

Так же одним из перспективных является метод глубокого азотирования, предложенный в работе [32], который позволяет увеличить глубину азотированного слоя с 200 мкм до 2,5 мм, что позволяет значительно (до 4 раз) повысить стойкость инструмента за счёт его переточки.

Задача обеспечения повышения износостойкости, окалиностойкости, коррозионной стойкости, твёрдости и других свойств поверхности материалов деталей и инструмента может быть решена применением способов поверхностного упрочнения [48].

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – обработка деталей давлением, при котором пластически деформируется только их поверхностный слой [48, 90].

Упрочнение инструмента ППД повышает усталостную прочность, твёрдость, контактную выносливость и износостойкость инструмента различной формы и размеров [48, 90, 94]. В результате поверхностного деформирования создаются благоприятные остаточные напряжения, и уменьшается шероховатость [48, 90, 94].

Для увеличения стойкости кузнечных штампов целесообразно применять дробеструйную и гидродробеструйную (для инструмента со сложной геометрией) обработку [48, 88, 90, 94]. Результатом такой обработки является повышение усталостной прочности на 15 – 50% (в зависимости от свойств материала и режимов обработки) [48, 90].

Прессовый инструмент также подвергают электроискровому упрочнению. В результате наблюдается увеличение твёрдости, износостойкости, термической и эрозионной устойчивости, а также снижение ударной вязкости и сопротивления усталости [48, 55, 94].

Лазерная обработка используется для поверхностной закалки

инструмента, формируя особомелкозернистую структуру, с твёрдостью, превышающей на 15 – 30% твёрдость после обычной ТО [1, 94]. Кроме того, лазерная обработка находит применение для реализации процессов науглероживания, азотирования, борирования, легирования и наплавки [94].

Среди современных способов повышения стойкости инструмента особое место занимает нанесение износостойких покрытий. Наибольшую популярность приобрели нитрид- и карбидтитановые покрытия, реже – покрытия из нитрида и карбида молибдена, циркония, ванадия, ниобия и др. [55, 88, 91, 94].

1.5.3 Организационные мероприятия

К основным организационным мероприятиям можно отнести: применение более качественных смазок, правильное охлаждение штампа, удаление окалина (при ГОШ), ремонт и постоянный контроль состояния оборудования и оснастки [48, 117].

Трение играет важную роль в любых процессах, в том числе и при обработке металлов давлением. В большинстве случаев, кроме процессов с активными силами трения, эта роль является негативной [60, 82]. Контактное трение приводит к возникновению неоднородности деформации в металле, незаполнению полости ручья штампа, увеличению силы и работы деформирования, затруднению удаления поволоки из штампа, необходимости больших штамповочных уклонов, снижению стойкости инструмента [5, 34, 35, 43, 55, 56, 60, 82, 85, 94].

Рациональный выбор смазочных материалов в современных условиях осложняется недостатком научно обоснованных методик их подбора и отсутствием фундаментальных теоретических разработок в данной области. Поэтому, как и в случае с материалом штампа, чаще всего выбор смазывающего материала основан на экспериментальных результатах и

производственном опыте [43, 55, 60].

В нормальных условиях горячей штамповки штампы должны иметь температуру 250-400°C, для сохранения прочности штамповой стали и уменьшению перепада температур между заготовкой и штампом. Охлаждение инструмента должно происходить в промежуток между операциями штамповки с помощью разбрызгивающего приспособления [5, 55, 61, 88].

Снижения разгара можно достичь за счёт применения системы внутреннего охлаждения, работающей непрерывно. Такой подход позволяет избежать критической фазы образования разгара (начало охлаждения), а стойкость повышается примерно в 2 раза [55, 88, 115, 116, 122].

Другим способом для уменьшения растягивающих температурных напряжений является равноинтенсивное внешнее охлаждение. Это можно осуществить комбинацией водяного и воздушного охлаждения (автоматизируя их дозировку и подачу). Если времени для охлаждения инструмента недостаточно, то в нём изготавливают два одинаковых ручья, в которых поковки штампуются по очереди [43, 55, 61, 88].

Мероприятия по уходу за штампами также включают регулярную очистку полостей от окалина (при ГОШ) и проведение ремонтных работ. Окалина действует как абразив, ускоряя износ инструмента. Текущий ремонт (включая зачистку) повышает работоспособность штампа, причём восстановленные элементы часто превосходят по стойкости новые. После капитального ремонта штамп проверяют по нормативам, аналогичным для нового инструмента. [5, 34, 88, 94].

Регулярный технический контроль оборудования и оснастки позволяет увеличить эксплуатационный ресурс деформирующего инструмента. Ключевые требования к оборудованию включают: максимальную жесткость и точность подающих устройств, минимальные зазоры (в движущихся частях) и отклонения от параллельности ползуна и подштамповой плиты,

качественная балансировка для уменьшения вибрации и термическая стабильность при любых скоростях в важнейших узлах. [5, 94].

Помимо стандартных паспортов на деформирующий инструмент с фиксацией технологических и эксплуатационных параметров, промышленным предприятиям рекомендуется иметь базы данных по показателям износостойкости. Такой подход позволит оперативно анализировать износостойкость инструментальной оснастки [82, 94].

Инновационным подходом в мониторинге состояния инструмента является применение сенсорных систем, включающих: датчики диагностики; электронные схемы аварийного оповещения; системы контроля подачи заготовок [94]. Среди физических методов неразрушающего контроля наиболее эффективными признаны магнитные технологии, основанные на взаимосвязи магнитных параметров и структурных характеристик исследуемого материала [70, 71, 72], а также облучение изотопами (рентгеновская дифрактометрия) [94].

Правильный выбор штамповой стали, рационализация конструкции и технологии изготовления штампов, хороший уход и своевременный ремонт может увеличить их стойкость на несколько десятков процентов и обеспечивает относительно небольшой расход материала штампа [5, 55, 56, 60, 71, 82, 88, 94].

1.6 Методы оценки стойкости штампов

Методы оценки подразделяются на три основных группы:

1. Аналитические;
2. Численные;
3. Статистические.

Аналитические методы – методы научного исследования, основанные на применении анализа, т.е. разложения целого на составные части и

рассмотрение каждой из них отдельно [86, 93]. При использовании аналитических методов решение задачи удается выразить с помощью формул, что позволяет быстро получить ответ, но аналитические методы применимы лишь к небольшому числу, как правило, не сложных задач [103].

Численные методы, в настоящее время, являются основным инструментом для решения сложных математических моделей и задач. Они сводят решение задачи к выполнению конечного числа арифметических действий и дают результат в виде числового значения с погрешностью, приемлемой для данной задачи. Однако при вычислениях вручную они могли использоваться лишь для решения не слишком трудоемких задач [103].

Статистические методы – научные методы описания и изучения массовых явлений, допускающих количественное (численное) выражение. Статистические методы включают в себя и экспериментальное, и теоретическое начала. Статистика исходит, прежде всего, из опыта [68].

Всё вышеперечисленное в той или иной степени применяется при оценке стойкости штамповой оснастки.

Общий подход к оценке стойкости инструмента предполагает анализ двух ключевых параметров: распределения температур в инструменте и его напряженно-деформированного состояния.

Ключевыми факторами, определяющими стойкость штампа, выступают температурные режимы штамповки и работы материала инструмента [6].

1.6.1 Основные методы определения температуры штампов

Определение температурных напряжений в инструменте требует предварительного решения задачи по определению температурных полей в наиболее нагруженных зонах штампа [82].

Наибольший научный интерес представляет анализ воздействия термомеханических напряжений на НДС в двух критических точках: в

квазистатическом режиме штамповки на завершающей стадии деформации, когда параметры достигают пиковых значений и в начальной фазе охлаждения без нагрузки, где только термические напряжения [82].

Известны несколько методов для определения с некоторой точностью температурного состояния штампа.

При экспериментальных исследованиях температурного режима штампов на физических моделях используются два основных метода: установка термопар внутри инструмента и применение контактных термопар, фиксируемых на поверхности [6, 95].

Первый метод обеспечивает фиксацию температурных значений в конкретных точках инструмента и их изменений во времени. Данная методика отличается трудоемкостью и ограниченной применимостью в промышленных условиях, к тому же она не обеспечивает должной точности определения температур на контактной поверхности, т.к. закрепить термопары на гравюре затруднительно [6, 95].

Контактные термопары фиксируют температурные показатели поверхности гравюры штампа лишь спустя 2-5 секунд после извлечения поковки. Вследствие чего, данный способ не обеспечивает комплексного представления о распределении температур в теле инструмента [6, 95].

Существуют также косвенные методы определения температуры, базирующиеся на анализе изменений микроструктуры или твердости инструментального материала. Однако исходные показатели твердости могут быть установлены лишь по контрольным образцам, а на конечные значения влияют многочисленные факторы. Вследствие этого, полученные средние температурные значения пригодны лишь для ориентировочной оценки рабочих условий штампа [6, 95, 98].

Экспериментальные методы на физических моделях позволяют оценить стойкость только для конкретного случая, а полученная информация не может быть использована для условий, существенно отличающихся от

опытных. Аналитическое определение температурного поля позволяет оценить вопрос в его многогранных связях и выгодно отличается универсальностью [6, 95].

Температурный расчет штампа требует решения, по крайней мере, системы уравнений, описывающих три основных механизма теплопередачи: радиацию, конвекцию и теплопроводность. В уравнениях необходимо учитывать: временную и температурную динамику тепловых процессов, теплофизические характеристики материалов, геометрические параметры контактирующих тел, термическое сопротивление граничного слоя и т.д. [6, 8, 81, 82, 95].

Хотя теоретически проблема разрешима, но возникают существенные погрешности расчетов из-за: отклонения режимов, неопределённости пограничного слоя, неточность констант и др. [6, 8, 82, 95].

Учитывая эти обстоятельства, современные расчетные подходы опираются на ряд упрощений и допущений [6, 8, 82, 95]:

- 1) Передачей тепла за счёт конвекции и радиации (~2% от всего тепла) можно пренебречь.
- 2) Условия контакта на поверхности – не зависят от давления.
- 3) Теплофизические свойства деформируемого металла и штамповой стали постоянны.

Влияние этих факторов учитывается путём замены эквивалентными в теплотехническом отношении системами [6].

Исходя из этого, любой аналитический метод предполагает решение системы уравнений, включающей в качестве ключевого элемента трехмерное дифференциальное уравнение теплопроводности [82]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T, \quad (1.1)$$

где a – коэффициент теплопроводности; ∇^2 – оператор Лапласа в декартовой системе координат; t – время; T – температура.

Многочисленные исследования теплового взаимодействия заготовки и инструмента предлагали различные подходы к упрощению граничных условий. При решении уравнения (1.1) были получены разнообразные соотношения для оценки температурного состояния инструмента.

В работах [6, 95] предлагалось решать задачу нахождения температурного поля в штампе и заготовке, как задачу о соприкосновении двух полуограниченных равномерно нагретых стержней с различной исходной температурой. Граничные условия на боковых поверхностях принимались адиабатическими [6, 95]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (1.2)$$

Уравнение (1.2) при решении имеет вид [6, 95]:

$$\begin{cases} \theta_{\text{заг}} = \frac{T_{\text{заг}}(x, \tau) - T_{\text{шт}}^0}{T_{\text{заг}}^0 - T_{\text{шт}}^0} = \frac{k_\varepsilon}{1 + k_\varepsilon} \left(1 + \frac{1}{k_\varepsilon} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{\text{заг}}\tau}} \right) \right), \text{ при } x \geq 0; \\ \theta_{\text{шт}} = \frac{T_{\text{шт}}(x, \tau) - T_{\text{шт}}^0}{T_{\text{заг}}^0 - T_{\text{шт}}^0} = \frac{k_\varepsilon}{1 + k_\varepsilon} \operatorname{erfc} \left(\frac{|x|}{2\sqrt{a_{\text{шт}}\tau}} \right), \text{ при } x \leq 0, \end{cases} \quad (1.3)$$

где τ – время соприкосновения тел; $\theta_{\text{заг}}$ и $\theta_{\text{шт}}$ – относительная температура заготовки и штампа соответственно; $T_{\text{заг}}$ и $T_{\text{шт}}$ – температуры тел в точках на расстоянии x от поверхности соприкосновения в момент времени τ ; $T_{\text{заг}}^0$ и $T_{\text{шт}}^0$ – исходная температура тел; $a_{\text{заг}}$ и $a_{\text{шт}}$ – коэффициенты теплопроводности тел; k_ε – отношение тепловых активностей; $\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – функция ошибок Гаусса; $\operatorname{erfc} x = 1 - \operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ – дополнительная функция ошибок.

В ходе решения уравнения (1.3) получили следующую зависимость [6, 95]:

$$T_{\text{к}} = 0,54T_{\text{заг}}^0 + 0,46T_{\text{шт}}^0, \quad (1.4)$$

где $T_{\text{к}}$ – температура контакта.

Однако, данные полученные с применением этой зависимости, несколько завышены. Погрешность расчёта связана с тем, что не учтены

следующие факторы [6, 95]: термическое сопротивление контактного слоя, влияние криволинейности поверхности соприкосновения и соотношение объёмов и поверхностей заготовки и штампа.

Влияние пограничного слоя на температуру поверхности и распределение температур по глубине штампа могут быть учтены при замене материала штампа толщиной x' на некотором участке другим материалом с эквивалентными теплофизическими параметрами [6, 95].

Расчёт температуры поверхности штампа по формуле (1.4) с учётом влияния пограничного слоя даёт результаты, хорошо совпадающие с экспериментальными данными, полученными для стенок гравюры штампа. Но данный метод применим только для нахождения температур на плоской поверхности штампа, т.к. не учитывается конфигурация штампа [6, 95].

Также в работах [6, 95] рассматривалось решение задачи о распределении температуры в системе заготовка – пограничный слой – штамп с учётом неидеального контакта и представлено в виде [6, 95]:

$$\theta = \frac{b_{шт}}{b_{заг} + b_{шт}} \left[\begin{array}{l} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{шт}\tau}} \right) - \exp \left(\frac{k_1 x}{\sqrt{a_{шт}}} + k_1 \sqrt{\tau} \right)^2 \cdot \\ \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{шт}\tau}} + k_1 \sqrt{\tau} \right) \end{array} \right], \quad (1.5)$$

где $k_1 = \alpha_k \left(\frac{1}{b_1} + \frac{1}{b_2} \right) = k_2 \alpha_k$; $\alpha_k = \frac{\lambda_c}{\delta}$ – коэффициент теплопроводности прослойки; δ – толщина прослойки; $b_{заг}$ и $b_{шт}$ – коэффициенты аккумуляции тепла заготовкой и штампом.

Относительная температура поверхности штампа определяется [95]:

$$\theta(0, \tau) = \frac{b_{шт}}{b_{заг} + b_{шт}} (1 - \exp(k^2) \cdot \operatorname{erfc}(k)), \quad (1.6)$$

Решение уравнения (1.6) для поверхности штампа даёт значения довольно близко соотносящиеся с реальными. Однако методика имеет тот же недостаток, что и предыдущая – она не учитывает конфигурацию гравюры и не позволяет оценить температуру отдельных участков.

Для определения температур штампа Б. Ф. Трахтенберг предложил применение метода мгновенных источников, который ранее применялся для решения ряда инженерных задач в области теплофизических расчётов при сварке, обработке резанием, литье и т.п. [6, 95].

Для расчётов принимают, что коэффициенты теплопроводности, удельные теплоёмкости и плотности тел постоянны, а их конкретные значения задаются в пределах фактического изменения в рассматриваемых температурных границах. Такое упрощение значительно облегчит решение и вызовет сравнительно небольшую погрешность около 2 – 5% [95].

Для выполнения расчетов помимо уравнения (1.1) требуется задание граничных условий, включающих: начальное распределение температуры в теле и условия теплообмена на его границах [95].

Тогда температура в точке с координатами (x, y, z) в момент времени τ в бесконечном теплопроводящем полупространстве с адиабатической границей для случая, когда источник находится на этой границе, описывается уравнением [6, 95]:

$$T(R, \tau) = \frac{Q}{c\rho(4\pi\alpha\tau)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{4\alpha\tau}\right), \quad (1.7)$$

где $R^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$.

Основные положения и упрощения, которые позволяют использовать метод мгновенных источников для расчётов температурного поля штампов подробно описана в работе [95].

Трудность применения этой методики заключается в неопределённости тепловой мощности некоторых источников и теплофизических свойств контактирующих поверхностей. Чтобы избежать этого, требуется дальнейшая корректировка расчётов [6]. Всё это является трудоёмким процессом, а ввиду невысокой точности зачастую – нецелесообразным.

Получение точного решения нестационарной температурной задачи для штампа любым из перечисленных методов без значительных упрощений

и схематизации представляет значительные сложности. В связи с этим преимущественно применяют численные подходы [82].

В настоящее время наиболее распространёнными численными методами, применяемыми при решении дифференциальных уравнений, являются: метод конечных разностей и метод конечных элементов.

Метод конечных разностей для решения дифференциальных уравнений основан на замене дифференциальных операторов их приближенными значениями в отдельных точках еще называется методом сеток [37].

Метод конечных разностей позволил разработать компьютерные алгоритмы для температурного состояния инструмента, а также системы «инструмент – заготовка» [31, 51, 82]. Данные методики учитывают влияние: начальных температур заготовки и инструмента, степени деформации и скорости движения инструмента на температурно-напряженное состояние системы «инструмент – заготовка» [82]. Однако для использования данного метода необходимо написать программу для каждого отдельного случая.

Метод конечных элементов (МКЭ) применим для решения всех физических задач, описываемых дифференциальными уравнениями [14, 82].

Моделирование теплопередачи при горячей деформации объемных тел основывается на нестационарных задачах теории поля [29, 69]. Тепловое распределение в объеме V характеризуется квазигармоническим дифференциальным уравнением теплопроводности, содержащим временную производную [29, 69, 82]:

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1.8)$$

где T – температура; K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} – коэффициенты теплопроводности материала тела V в направлениях x, y, z ; Q – источник тепла; ρ – плотность; c – удельная теплоёмкость; t – время.

Ключевые преимущества МКЭ по сравнению с другими методами: точное моделирование сложной геометрии штампа; возможность локального

увеличения плотности сетки; использование различных свойств материалов; задание комбинированных граничных условий; учет влияния температурного фактора на свойства материала и универсальность применения. Практические исследования МКЭ свидетельствуют о приемлемой точности получаемых результатов [82].

Однако основным фактором, влияющим на точность расчетов, является корректность задания граничных условий [82].

1.6.2 Основные методы исследования напряжённно-деформированного состояния штампов

Напряжённное состояние штампов определяется: контактными нормальными (σ_k) и касательными (τ_k), остаточными (σ_0) и тепловыми (σ_T) напряжениями [9, 79, 81].

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) штампа возможно: аналитическими расчетами, экспериментальными измерениями и численным моделированием. Однако аналитические подходы применимы только для инструментов простой геометрии и, до недавнего времени, преобладали экспериментальные методы [9].

Экспериментальные методы можно разделить на несколько групп, применяемые при измерении [9]:

- 1) упругих и малых упругопластических деформаций;
- 2) значительных упругопластических деформаций;
- 3) остаточных напряжений и деформаций;
- 4) деформаций и напряжений, вызванных неравномерными температурными полями.

Для измерения упругих и незначительных упругопластических деформаций применяют различные типы тензометров: механические, пневматические, акустические, оптические, и др., а также метод лаков [9].

Наиболее удобным является метод проволочной тензометрии. Он отличается высокой практичностью, поскольку обеспечивает фиксацию быстротекущих процессов и измерение деформаций в труднодоступных зонах и т.д. [9].

Для измерения значительных упругопластических деформаций наибольшее распространение получил метод делительной сетки. Существует несколько разновидностей этого метода, но все они сводятся к нанесению на поверхность штампа делительной сетки (светочувствительным раствором, травлением, накатыванием, напылением и др.) и анализом её изменения [9].

Иногда для определения значительных пластических деформаций применяют методы микротвёрдости, деформации вспомогательного тела, травления деформированной поверхности, карбидный анализ и др. [9].

При измерении остаточных напряжений используют механические и рентгеноструктурные методы, а также поляризационно-оптический [9, 67].

Помимо определения температурных полей в штампе, МКЭ можно также применять при решении задач НДС штампа. Определение напряжений является важной частью решения задач теории упругости [29, 69, 82].

Методика расчета НДС штамповых элементов по МКЭ производится при условиях подробно описанных в работах [29, 69, 82].

Несмотря на то, что МКЭ имеет ряд весомых преимуществ перед другими методами как для определения температурных полей, так и для определения НДС штампа, проводить расчёты по этой методике вручную весьма трудоёмкий процесс. Поэтому в настоящее время для решения этих задач используется компьютерное моделирование, базирующееся на МКЭ.

1.7 Факторы, влияющие на выход штампов из строя и критерии оценки стойкости

Зная распределение температурных полей в штампе и его НДС можно

определить наиболее нагруженные места инструмента и качественно оценить степень его износа. Для количественной оценки необходимо воспользоваться дополнительными методами, которые позволяют определить стойкость инструмента по одному из критериев износа.

1.7.1 Разрушение адгезионных связей истиранием

Л. Б. Аксёновым для нахождения значения истирания гравюры горячего штампа была предложена следующая зависимость [2]:

$$\delta \approx AF \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (p_i v_i + p_{i+1} v_{i+1}) \Delta t_{i,i+1}, \quad (1.9)$$

где A – постоянный коэффициент; F – единица площади; p_i, v_i – контактные напряжения и относительная скорость перемещения деформируемого металла на i -й стадии формообразования поковки; $\Delta t_{i,i+1}$ – интервал времени между двумя соседними стадиями.

В свою очередь, Л. Г. Степанским была предложена зависимость определяющая объём материала инструмента, удаляемый с площадки скользящего контакта после изготовления N поковок [87]:

$$Q = NHL\delta \frac{\sigma_{s2}^2}{\sigma_{s1}^2 + \sigma_{s2}^2}, \quad (1.10)$$

где H – средний путь скольжения под нагрузкой инструмента по обрабатываемому материалу при изготовлении одной поковки; L – текущий размер площадки скользящего контакта в направлении перпендикулярном направлению скольжения; δ – средняя толщина слоя, в котором происходит разрушение адгезионных металлических связей (АМС); σ_{s1}, σ_{s1} – напряжения текучести материала инструмента в приконтактном слое и обрабатываемого материала в температурно-скоростных условиях деформирования приповерхностного слоя.

При условии, что: $\sigma_1/\sigma_2 = \sigma_{s1}/\sigma_{s2}$; контактные давления значительно

превышают предельную величину, приводящую к полному пластическому смятию микронеровностей обрабатываемого материала, и соответственно вероятность образования АМС = 1; $\delta \approx 2,5 \cdot 10^{-8}$ м [87].

В работе [64] для оценки износостойкости сталей типа 4Х5МФС, 4Х4ВМФС, 5Х3В3МФС предлагается использовать зависимость (1.11):

$$P = 55728 - 344,455\sigma_{0,2}^T - 402,787\psi^T - 80,159T_{\Pi} + 0,476\sigma_{0,2}^T\psi^T + 0,469\sigma_{0,2}^T T_{\Pi} + 0,57\psi^T T_{\Pi}, \quad (1.11)$$

где P – износ по массе, мг; $\sigma_{0,2}^T, \psi^T$ – предел текучести и относительное сужение сталей типа 4Х5МФС, 4Х4ВМФС при 600°C; T_{Π} – теплостойкость.

1.7.2 Трещины термомеханической усталости (разгарные трещины)

В этой же работе представлены уравнения регрессии для определения термомеханической усталости, а именно связывающие сопротивление зарождению (N_T) и распространению трещины ($N_{\text{Ж}}$) для сталей 4Х5МФС, 4Х4ВМФС и др. эксперименты проводились на специальной установке при температуре испытания 600°C и частоте нагружения 80 об/мин [64]:

$$\begin{aligned} N_{\text{Ж}} &= -4998 - 4,9\sigma_{0,2}^T + 42,2\psi^T + 8,3T_{\Pi}, \\ N_T &= -10530 + 103,1\sigma_{0,2}^T + 16,4\psi^T + 4,2T_{\Pi}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

При оценке долговечности инструмента в условиях термоусталости Л. Г. Степанский предлагает принять следующие предположения [87]:

- 1) к разгарным трещинам приводят циклически действующие растягивающие температурные напряжения;
- 2) средние растягивающие напряжения за термоцикл можно считать незначимыми и исключить из рассмотрения;
- 3) прочностные характеристики материала инструмента (предел прочности и модуль упругости) в контактной зоне соответствуют усредненной температуре термоцикла для данного слоя;
- 4) интенсивность относительных деформаций равна тем окружающим

относительным деформациям, которые возникают на краю круглого отверстия радиусом R в пластине, нагретой до температуры T_0 , если в отверстии вставлен диск того же материала, нагретый до более высокой температуры T_k , тогда радиальное перемещение края отверстия, вызванное температурным расширением $U_r = \zeta_T(T_k - T_0)R$, где ζ_T – линейный коэффициент температурного расширения материала инструмента в приконтактном слое (для инструментальных сталей $\zeta_T = (15 \div 25)10^{-6}$ 1/град).

Тогда среднее число поковок отштампованных до термоусталостного разрушения оценивается как [87]:

$$N = \left[3,5 \frac{\sigma_B}{\zeta_T(T_k - T_0)E} \right]^{8,3}. \quad (1.13)$$

С. А. Довнар в своей работе [25] считает, что поведение многих металлов при термоциклировании хорошо описывает зависимость:

$$\varepsilon_p N^{0,5} = c, \quad (1.14)$$

где c – эмпирическая константа материала; N – число теплосмен до разрушения металла ($N^{0,5} \leq 10^5$); ε_p – амплитуда деформации за цикл.

Следует отметить, что уравнение (1.14) справедливо для случая симметричного циклического нагружения с нулевым средним напряжением в цикле. В общем случае при эксплуатации штампов эти условия не выполняются [77].

Для определения числа циклов N , при котором достигается прогнозируемый уровень разрушения от трещин разгара С. В. Смирнов, Р. Е. Лаповок и В. П. Швейкин в [77] предлагают определять из решения функционала повреждаемости ω феноменологической теории разрушения:

$$\sum_i^N \left[\int_{\Delta_i}^{\Delta_{i+1}} \frac{\alpha(\Delta - \Delta_i)^{\alpha-1}}{\Delta_p^\alpha} d\Delta \right] = [\omega], \quad (1.15)$$

где i – число рабочих циклов штамповки ($i = 1, \dots, N$); $(\Delta - \Delta_i)$ – степень деформации сдвига материальной частицы за рабочий цикл штамповки; Δ_p –

пластичность материала штампа; α – показатель интенсивности накопления повреждаемости ($\alpha = 1/\gamma$); $[\omega]$ – предельное значение повреждаемости, которое выбирается в зависимости от того, какой уровень дефектности предполагается прогнозировать.

1.7.3 Смятие поверхности гравюры

Для определения среднего числа рабочих циклов до отказа инструмента по причине предельного пластического смятия кромок Л. Г. Степанский разработал следующую формулу [87]:

$$N = \frac{[e]}{e_k}, \quad (1.16)$$

где $[e]$ – предельная величина накопленных пластических деформаций в поверхностном слое кромочного элемента ($[e] = 1 \div 2$); e_k – оценка накопленных пластических деформаций в кромочной зоне за одно нагружение. При обработке поковок из сталей, титановых, жаропрочных и медных сплавов на молотах и механических горячештамповочных прессах определяется по формуле [87]:

$$e_k = \left\{ (t - t_p) \dot{\varepsilon}_i e_{i0} sh \left[\frac{\sqrt{3} \sigma_{s2} (T_k - T_p)^s}{2,2 \sigma_T (1 - 2\mu)} \right] \right\}^{0,5}, \quad (1.17)$$

где T_p – температура начала интенсивного разупрочнения металла, которая сопровождается повышением до конечной температуры T_k ; t – время контакта под нагрузкой кромки инструмента; t_p – время нагрева кромки до T_p ; $\dot{\varepsilon}_i$ – среднеинтегральная интенсивность скоростей деформаций; e_i – среднеинтегральная интенсивность накопленных деформаций; σ_{s2} – напряжение текучести обрабатываемого металла вблизи кромочного элемента инструмента; σ_T – предел текучести материала инструмента в исходном состоянии; μ – коэффициент трения [87].

1.7.4 Эмпирические зависимости определения стойкости штампов

Помимо определения стойкости штампа по одному из критериев износа существуют также эмпирические зависимости, полученные в результате статистической обработки данных по стойкости штампового инструмента различных машиностроительных предприятий.

Например, в работах [60, 74] упоминается следующая эмпирическая зависимость для определения стойкости штампа C шт. до возобновления:

$$C = \frac{A}{G^m}, \quad (1.18)$$

где A и m – коэффициенты, принимаемые в зависимости от группы поковки; G – масса поковки, кг.

На основе статистической обработки данных предприятий по стойкости штампов из стали 5ХНМ при штамповке поковок из углеродистых и низколегированных сталей Г. П. Тетериным предложена эмпирическая формула (1.19) [60].

$$C = \frac{10^5}{21,22 \left(b_3/h_3 \right) - 2,283 \left(b_3/h_3 \right)^2 + 0,2301gS + 0,097g^2 - 94,08 \left(h_3/H_{II} \right) - 14,71}, \quad (1.19)$$

где C – стойкость штампа, шт.; g – масса поковки, кг; S – критерий сложности формы поковки; b_3 и h_3 – ширина и высота облойного мостика соответственно, мм; H_{II} – максимальная высота поковки, мм.

Так же для прогнозирования стойкости штампов кривошипных прессов при штамповке поковок массой от 2,8 до 4,5 кг на штампе из 4Х5МФС А. Н. Петровым выведена эмпирическая формула, которая имеет вид [60]:

$$C = m^{-0,0536} (19369,5 - 49750\mu + 57500\mu\eta), \quad (1.20)$$

где C – стойкость штампа, шт.; m – масса поковки, кг; μ – коэффициент

трения; η – форма поковки.

Д. И. Васильев, М. А. Тылкин и Г. П. Тетерин в своей работе [9] для расчёта стойкости штампа круглых в плане поковок предлагают воспользоваться следующим уравнением:

$$\lg C_0 = 4,155 - 0,56 \lg g - 0,388 \lg S_{\Pi} - 0,0682 l_1/h + 1,464 h/H_{\Pi} + \\ + 0,0169(h/H_{\Pi}) \lg g + 0,0473(l_1/h) \lg S_{\Pi} - 0,143 \lg g \lg S_{\Pi}, \quad (1.21)$$

где g – масса поковки, кг; S_{Π} – критерий сложности формы поковки; l_1 и h – ширина и высота облойного мостика; H_{Π} – высота поковки.

Все вышеперечисленные методы нашли свое применение, как в научной, так и в производственной сфере. Однако их применение может быть ограничено из-за того, что: они учитывают не все факторы, оказывающие влияние на исследуемый параметр; обладают сравнительно невысокой точностью; достаточно сложно определить некоторые параметры, входящие в состав уравнения; имеют ограничения на область применения и др.

Поэтому для получения наиболее точной и быстрой оценки стойкости штампов на предприятиях рекомендуется разбить поковки на группы (по конфигурации) и, на основе статистических данных, разработать математические модели, учитывающие ключевые факторы влияния, позволяя, при внедрении новой поковки схожей конфигурации, достаточно точно оценить будущую стойкость штампа.

При прогнозировании стойкости штампов для поковок с конфигурацией неподходящих не под одну группу рекомендуется использовать компьютерное моделирование в специализированном программном комплексе, основывающемся на методе конечных элементов.

1.8 Обзор программных комплексов для моделирования процессов обработки металлов давлением

При разработке новой или совершенствовании существующей

технологии, внедрении новых материалов и решении других технических задач, как правило, используется компьютерное моделирование [77].

Анализ публикаций по численному моделированию ОМД показывает преобладающее использование коммерческого программного обеспечения, базирующегося на МКЭ [11, 12, 13, 75].

Наибольшей популярностью среди программного обеспечения, основанного на МКЭ и используемого в обработке металлов давлением, пользуются: DEFORM [11, 75, 112, 120], QForm [3, 12, 13, 38, 46], FORGE [113] и Simufact.forming [28].

Анализ, представленный в исследовании [76], продемонстрировал предпочтения ученых в выборе программного обеспечения для моделирования ОМД на основе данных электронных библиотек и реферативных баз (рисунок 1.15-1.17).

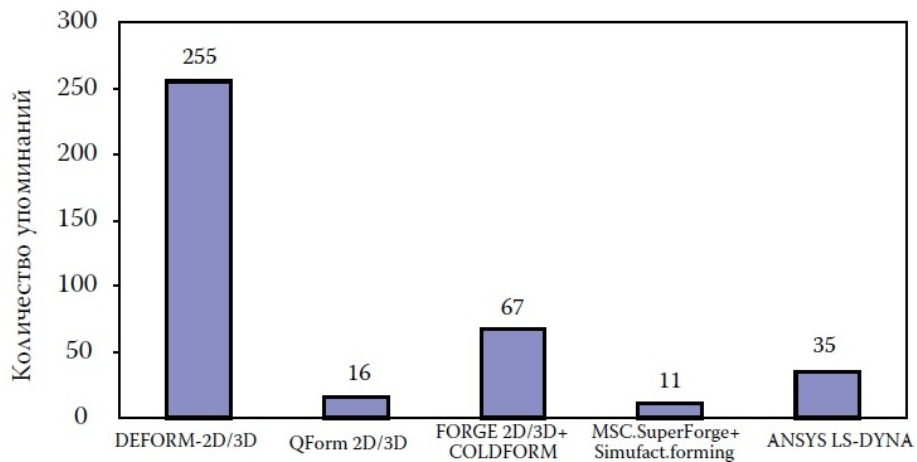


Рис. 1.15. Результаты запросов в eLIBRARY [76]

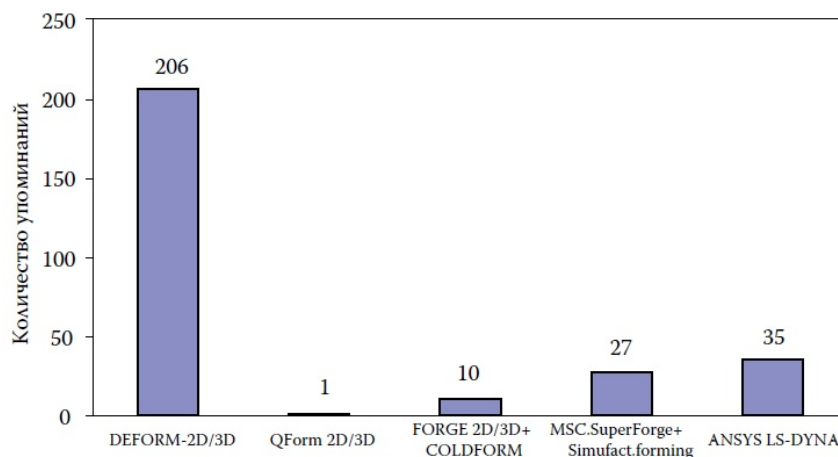


Рис. 1.16. Результаты запросов в ScienceDirect [76]

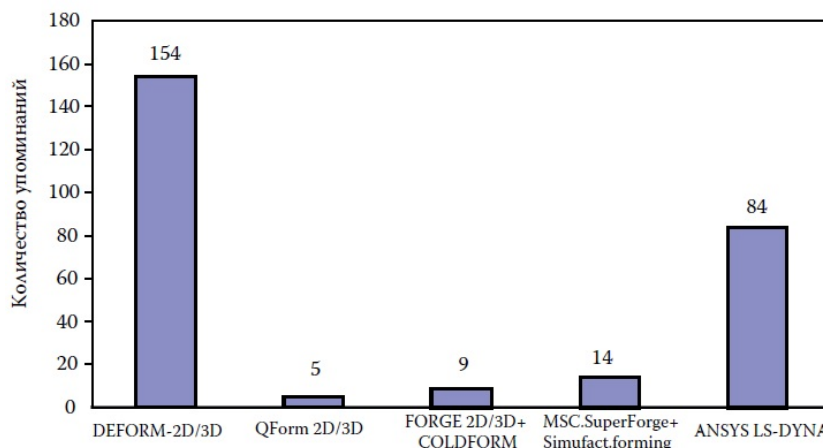


Рис. 1.17. Результаты запросов в Web of Knowledge [76]

Согласно анализу публикаций, результаты, полученные с использованием комплекса DEFORM, встречаются значительно чаще, чем данные других аналогичных программ. Программный комплекс DEFORM создан американской корпорацией SFTC – признанным лидером в сфере компьютерного моделирования процессов ОМД [30]. Ключевое преимущество системы в возможности виртуальной отработки и оптимизации технологических процессов, что заменяет дорогостоящие производственные эксперименты, сокращает сроки разработки, повышает качество продукции и снижает себестоимость [30].

DEFORM нашел широкое применение на промышленных предприятиях, в научно-исследовательских центрах и в технических вузах по всему миру, являясь самым востребованным инструментом моделирования обработки металлов давлением [11, 30, 76].

Однако в России на большинстве предприятий для оценки характеристик процесса ОМД и, в частности, стойкости штампового инструмента по-прежнему используются или устаревшие и неточные методики, или преобладают дорогостоящие методы натурального эксперимента.

1.9 Выводы по главе 1

1. Анализ литературных источников показал, что формообразующие штампы являются сложными и дорогостоящими инструментами, работающими в тяжёлых условиях, что приводит к их быстрому износу.

2. Технология ГОШ является самой распространённой технологией получения поковок не только машиностроения, но и других отраслей промышленности. Однако в практике для данного процесса отсутствуют полноценные методики анализа воздействия конструктивных особенностей заготовок и штампов, а также технологических режимов обработки на эксплуатационные и качественные показатели как поковок, так и штампового инструмента.

3. Наибольшее влияние на стойкость штампов оказывает его напряжённо-деформированное состояние и распределение температурных полей. Существует множество методик позволяющие их рассчитать, однако большинство из них относятся только к определённым видам поковок, имеет низкую точность или высокую сложность расчётов. Поэтому наибольший интерес представляет определение взаимосвязей между стойкостью штампового инструмента и режимами технологического процесса для поковок определённой группы или типа.

4. Проектирование столь сложных поковок, в большинстве случаев, требуют компьютерного моделирования процессов пластического деформирования металлов. Поэтому для численного моделирования процесса штамповки поковок деталей типа «лопасть» был выбран программный комплекс DEFORM-2D/3D, позволяющий оценить большинство характеристик технологического процесса и штамповой оснастки.

ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ЛОПАСТЬ»

2.1 Особенности конструкции деталей типа «лопасть»

Распространенными поковками, изготавливаемыми методами горячей объёмной штамповки и объединяемыми в общую группу, являются поковки, имеющие относительно тонкое полотно по сравнению с размерами в плане, к ним также относятся лопасти различного назначения.

В данной работе будут рассмотрены два вида поволоков деталей типа «лопасть», каждый из которых будет отличаться друг от друга по конструкции, материалу, технологическому процессу изготовления и оборудованию на котором они изготавливаются.

Конструкцию лопасти можно разделить на две части: профильную и хвостовик. В свою очередь профильная часть делится на профиль постоянного и переменного сечений. Хвостовые соединения по конструкции весьма разнообразны и применяются исходя из условий обеспечения необходимой прочности с учётом освоения технологий их изготовления на предприятии.

2.2 Конструкции детали представителя первого вида и анализ технологии изготовления

В качестве детали представителя первого вида была взята поковка лопасти из алюминиевого сплава АК4-1 (рисунок 2.1), штампуемая в несколько переходов на кривошипном прессе LLK-2000 номинальной силой 20 МН (рисунок 2.2).

Согласно ГОСТ 4784-97 химический состав алюминиевого сплава АК4-1 должен соответствовать требованиям, указанным в таблице 2.1 [20], а

механические и физические свойства требованиям, указанным в таблицах 2.2-2.4 [19, 73].

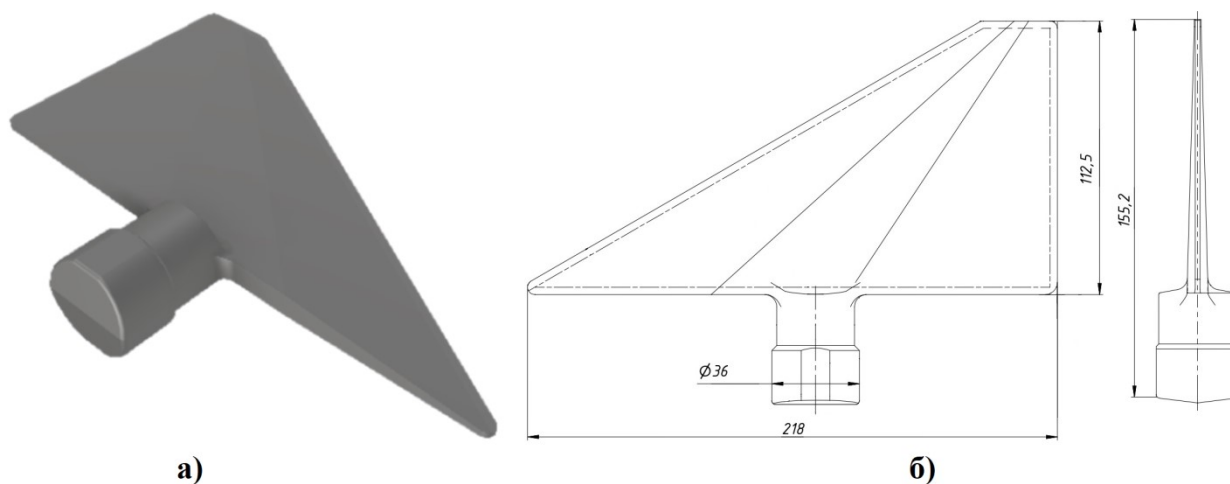


Рис. 2.1. 3D модель (а) и эскиз (б) поковки детали типа «лопасть» из АК4-1

Таблица 2.1

Химический состав в % алюминиевого сплава АК4-1

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Прочие элементы	
										Каждый	Сумма
93,05-95,28	Не более 0,35	0,8-1,4	1,9-2,7	Не более 0,2	1,2-1,8	Не более 0,1	Не более 0,3	0,02-0,1	0,8-1,4	0,05	0,1

Таблица 2.2

Механические свойства алюминиевого сплава АК4-1 при $T = 20^{\circ}\text{C}$

Состояние поставки, режимы обработки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ
Пруток, без термической обработки	365	275	6	109-117

Таблица 2.3

Механические свойства алюминиевого сплава АК4-1 при повышенных температурах

T , $^{\circ}\text{C}$	100	200	300	400	500
σ_B , МПа	320	240	130	40	20
$\sigma_{0,2}$, МПа	240	180	80	25	10
δ , %	15	20	38	70	120

Таблица 2.4

Физические свойства алюминиевого сплава АК4-1

Плотность, ρ	2800, кг/м ³
Температура плавления, $T_{пл}$	650, °С
Коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^6$	20,8 1/°С
Модуль упругости, $E \cdot 10^{-5}$	0,72, МПа



Рис. 2.2. Кривошипный пресс LLK-2000 [119]

Схема штамповки, форма, размеры и способ укладки заготовки в штамп в значительной степени зависят от геометрических размеров и разнице в поперечных сечениях поковки. В нашем случае тонкополотная поковка из алюминиевого сплава АК4-1 обладает значительными перепадами толщин в поперечном сечении, при проектировании технологического процесса горячей штамповки необходимо учитывать, что при смыкании штампа полость ручья представляет собой сужающийся к периферии канал, что создаёт проблему не качественного заполнения металлом наиболее удаленных участков поковки.

Производственный процесс изготовления поковки детали типа «лопасть» из алюминиевого сплава АК4-1 упрощённо представлен в таблице 2.5 в столбце «Производственный процесс», а поковки после каждого перехода штамповки на рисунке 2.3.



Рис. 2.3. Поковки после различных переходов штамповки по производственному техпроцессу

Изготовление повок по обсуждаемому техпроцессу сопровождается наличием различных проблем, как технических, так и экономических.

Как уже было сказано ранее, главной проблемой при изготовлении данных деталей являются незаполнение наиболее удаленных участков поковки и большое количество технологических переходов, а так же большое количество металла уходящего в отход в виде облоя.

В ходе анализа технологического процесса предприятия, было предложено внести в техпроцесс некоторые корректировки, а именно: использовать более подходящие смазочные материалы (например, МС-23 производства ООО «Коллоидно-графитовые препараты» г. Воскресенск), которые позволяют достичь фактора трения $m \leq 0,2$ и обеспечить заполнения металлом гравюры штампа [110]; за счёт внесения изменений в конструкцию штампа: сократить количество переходов, что так же в значительной степени увеличит стойкость обрезающего штампа, и коэффициент

использования материала (КИМ), изменив размеры заготовки. Предлагаемые изменения сведены в таблицу 2.5 в столбец «Предлагаемый процесс».

Таблица 2.5

Анализ технологического процесса получения поковки детали типа «лопасть» из алюминиевого сплава АК4-1 (составлено автором)

№ п/п	Производственный техпроцесс	№ п/п	Предлагаемый техпроцесс	
			Штамповка сдвоенной поковки	Штамповка с ограничителем
1	Контроль (проверка материала на соответствие документации);	1	Контроль (проверка материала на соответствие документации);	Контроль (проверка материала на соответствие документации);
2	Отрезка заготовок ($\varnothing 70 \times 72^{+2}$ мм);	2	Отрезка заготовок ($50 \times 50 \times 170^{+2}$ мм);	Отрезка заготовок ($50 \times 50 \times 75^{+2}$ мм);
3	Нагрев до температуры 470 °С;	3	Нагрев до температуры 470 °С;	Нагрев до температуры 470 °С;
4	Осадка до высоты 32 мм;	4	Штамповка сдвоенной поковки до высоты прямого участка полотна 2 мм;	Штамповка до высоты прямого участка полотна 2 мм;
5	Нагрев;	5	Обрезка облоя;	Обрезка облоя;
6	Первый переход штамповки до высоты прямого участка полотна 18 мм;	6	Правка;	Правка;
7	Обрезка облоя;	7	Термическая обработка;	Термическая обработка;
8	Нагрев;	8	Травление;	Травление;
9	Второй переход штамповки до высоты прямого участка полотна 6 мм;	9	Маркировка;	Маркировка;
10	Обрезка облоя;	10	Контроль (проверка на соответствие размеров и свойств поковки чертежу).	Контроль (проверка на соответствие размеров и свойств поковки чертежу).
11	Нагрев;			
12	Третий переход штамповки до высоты прямого участка полотна 3 мм;			
13	Обрезка облоя;			
14	Нагрев;			
15	Четвёртый переход штамповки до высоты прямого участка полотна 2 мм;			

	мм;			
16	Обрезка облоя;			
17	Правка;			
18	Термическая обработка;			
19	Травление;			
20	Маркировка;			
21	Контроль (проверка на соответствие размеров и свойств поковки чертежу).			

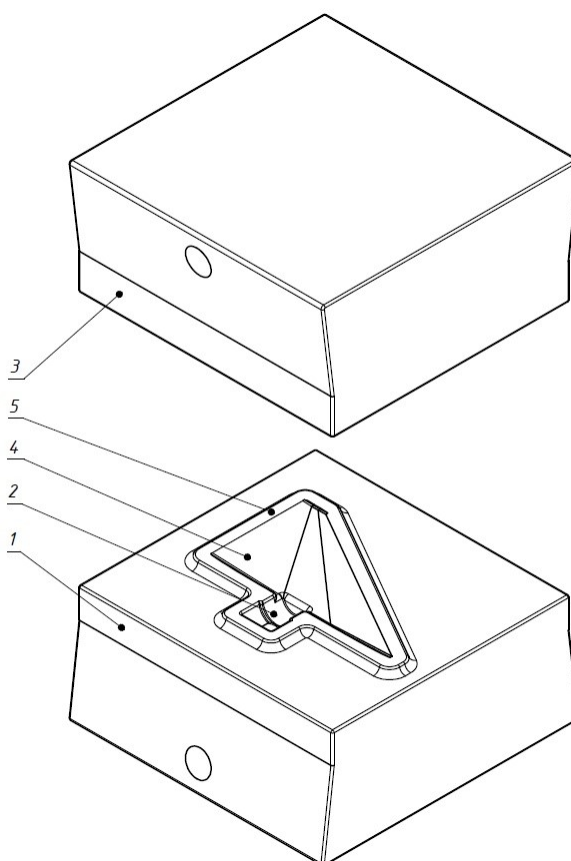


Рис. 2.4. 3D модель штамповых вставок для штамповки алюминиевой поковки по производственному технологическому процессу: 1 и 3 – нижняя и верхняя штамповая вставка соответственно; 2 и 4 – элемент гравюры штампа, отвечающий за формирования хвостовика и полотна поковки соответственно; 5 – облойный мостик (составлено автором)

В работах [57-59] уже рассматривались несколько вариантов штамповки повок с тонким полотном, но в данном случае они не применимы. Поэтому для усовершенствования технологического процесса предлагается использовать две различные схемы штамповки, для реализации

которых в первую очередь необходимо внести изменения в конструкцию штампа, а также использовать заготовку квадратного сечения для удобства и надёжности её укладки позиционирования в штампе.

В первом варианте предлагается использовать штамповку сдвоенной поковки [104, 106], которая позволит использовать излишки металла, неизбежно уходящие в облой в зоне гипотенузы треугольника полотна в производственном технологическом процессе, для штамповки второй поковки, что существенно повысит КИМ. Ввиду отсутствия необходимости дробления деформации число переходов штамповки уменьшится до одного. Данная конструкция также позволит увеличить производительность процесса в несколько раз. Разработано несколько вариантов конструкции гравюры штампа для штамповки сдвоенной поковки. 3D модели предлагаемых штамповых вставок представлены на рисунке 2.5.

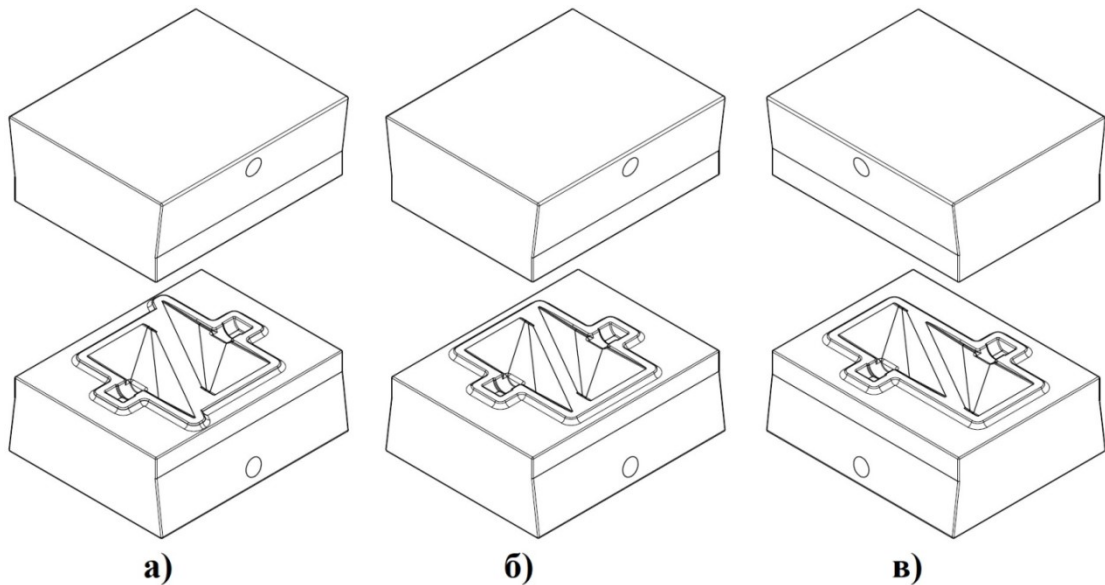


Рис. 2.5. 3D модели штамповых вставок для штамповки сдвоенной поковки из алюминия: а – оси хвостовиков поволоков совпадает с осью заготовки располагаемой в штампе; б – оси хвостовиков поволоков смещены друг относительно друга, крайние точки боковых поверхностей лежат на одной линии; в – оси хвостовиков поволоков смещены друг относительно друга, верхняя часть первой поковки лежит на одной линии с нижней частью второй поковки (составлено автором)

Во втором варианте предлагается ввести дополнительные поверхности, которые будут препятствовать чрезмерному выходу металла в облой [107]. Таким образом, мы получим штамп с ограничителем, который облегчит заполнение полости штампа металлом за счёт перераспределения течения в местах наибольшего расхода металла, но без потери остальных преимуществ открытой штамповки. К тому же разработанный вариант конструкции штампа позволит металлу заполнять наиболее отдалённые участки гравюры и достичь снижения процента металла уходящего в облой. Число переходов штамповки, как и в предыдущем варианте, уменьшится до одного, что также повышает производительность процесса в несколько раз. 3D модель штамповых вставок с ограничителем для штамповки алюминиевой поковки представлена на рисунке 2.6.

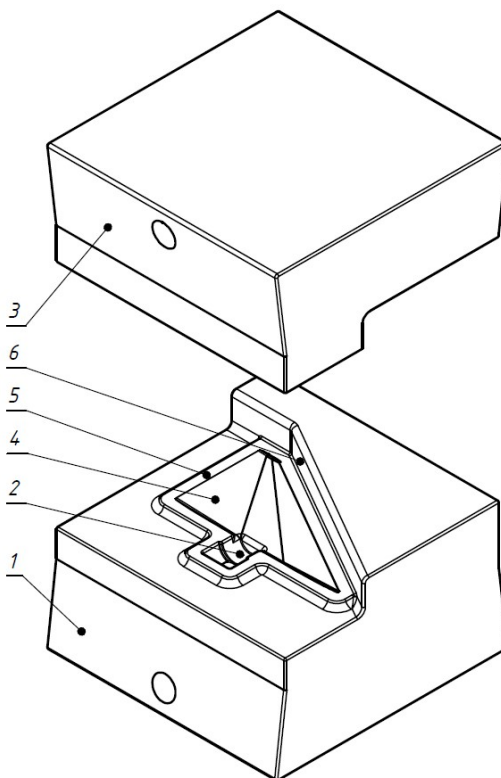


Рис. 2.6. 3D модель штамповых вставок с ограничителем для штамповки алюминиевой поковки: 1 и 3 – нижняя и верхняя штамповая вставка соответственно; 2 и 4 – элемент гравюры штампа, отвечающий за формирования хвостовика и полотна поковки соответственно; 5 – облойный мостик; 6 – вертикальная стенка (ограничитель) (составлено автором)

По значению коэффициента использования материала можно определить, насколько рационально использован материал. Определяется он по формуле:

$$\text{КИМ} = \frac{V_{\text{пок}}}{V_{\text{заг}}} \cdot 100\%; \quad (2.1)$$

Объём поковки определяли по построенной в программном комплексе SolidWorks 3D модели, и составил: $V_{\text{пок}} = 107998,8 \text{ мм}^3$. Тогда $\text{КИМ}_{\text{произв.}}$ определяем как:

$$\text{КИМ}_{\text{произв.}} = \frac{107998,8}{3,14 \cdot 35^2 \cdot 72} \cdot 100\% = 39\%; \quad (2.2)$$

При использовании технологии штамповки двоянной поковки КИМ составил:

$$\text{КИМ}_{\text{сдвоен.}} = \frac{2 \cdot 107998,8}{50 \cdot 50 \cdot 170} \cdot 100\% \approx 51\%, \quad (2.3)$$

А при использовании варианта штампа с ограничителем КИМ будет равен:

$$\text{КИМ}_{\text{огранич.}} = \frac{107998,8}{50 \cdot 50 \cdot 75} \cdot 100\% \approx 58\%; \quad (2.4)$$

Таким образом, коэффициент использования материала для предлагаемых вариантов составит 51% и 58%. По сравнению с заводской технологией КИМ повысился на 12% и 19% соответственно. Следовательно, любая из предлагаемых технологий, в плане расхода металла на поковки, будет экономически выгоднее.

2.3 Конструкции детали представителя второго вида и анализ технологии изготовления

В качестве детали представителя второго вида была взята поковка детали типа «лопасть» из хромоникелевой жаропрочной высоколегированной стали марки 13X11H2B2MФ-Ш (рисунок 2.7), штампуемая за несколько

переходов на паровоздушном штамповочном молоте (ПШМ) (таблица 2.10) [49].

Согласно ГОСТ 5632-2014 химический состав стали 13X11H2B2MФ-Ш должен соответствовать требованиям, указанным в таблице 2.6 [21], а механические и физические свойства требованиям, указанным в таблицах 2.7-2.9 [22, 73].

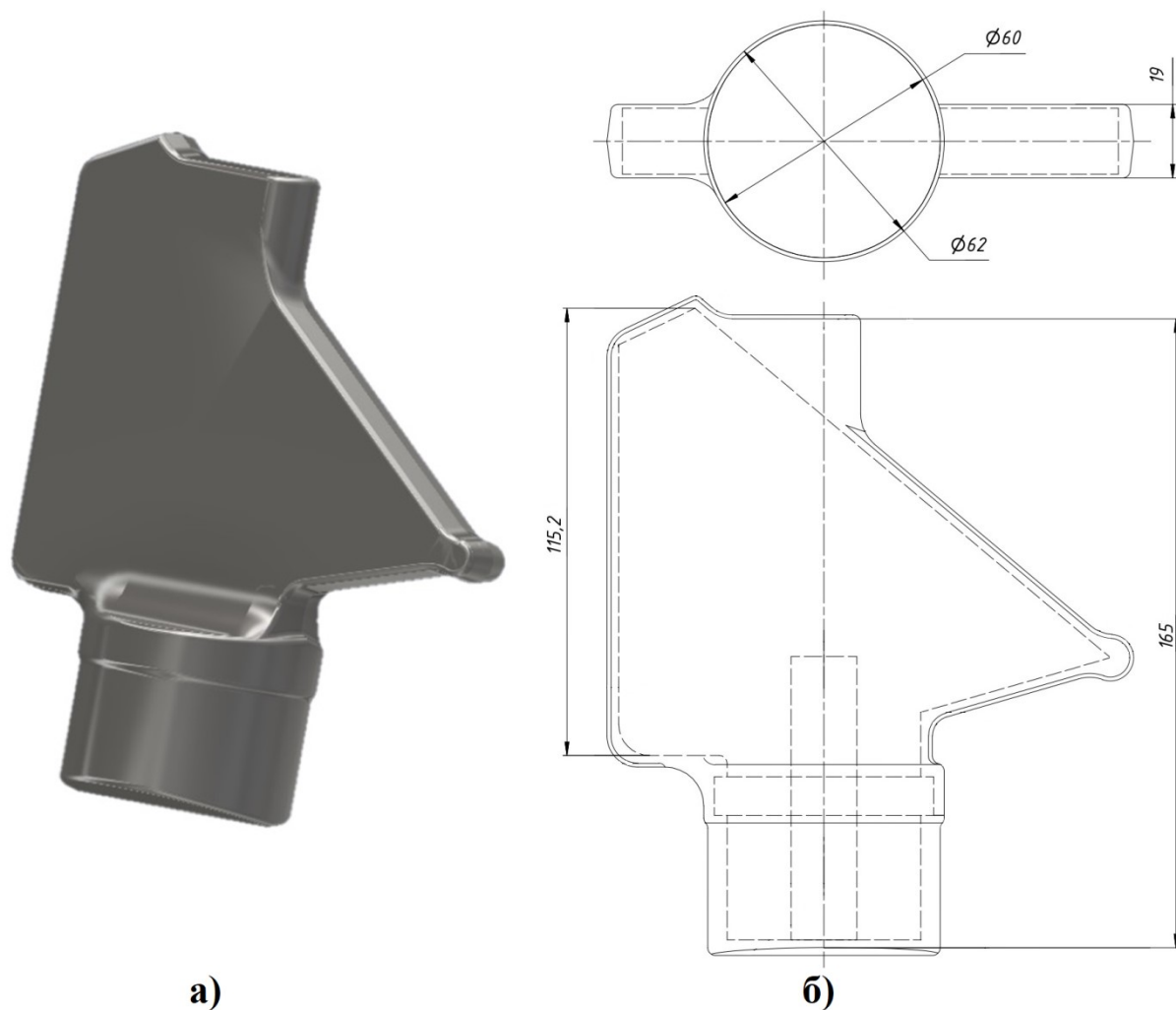


Рис. 2.7. 3D модель (а) и эскиз (б) поковки детали типа «лопасть» из 13X11H2B2MФ-Ш

Таблица 2.6

Химический состав в % стали марки 13X11H2B2MФ-Ш

Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	S	P
									Не более	
~83	0,1-0,16	До 0,6	До 0,6	1,5-1,8	10,5-12	0,35-0,5	1,6-2	0,18-0,3	0,03	0,03

Таблица 2.7

Механические свойства стали марки 13X11H2B2MФ-Ш при $T = 20^{\circ}\text{C}$

Состояние поставки, режимы обработки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ
Прутки, закалённый и отпущенный	880	735	15	Не более 269

Таблица 2.8

Механические свойства стали марки 13X11H2B2MФ-Ш при повышенных температурах

T , $^{\circ}\text{C}$	900	1000	1100	1200
σ_B , МПа	137	72	42	27
$\sigma_{0,2}$, МПа	110	40	29	22
δ , %	64	58	61	55

Таблица 2.9

Физические свойства стали марки 13X11H2B2MФ-Ш

Плотность, ρ	7800, $\text{кг}/\text{м}^3$
Температура плавления, $T_{пл}$	1520, $^{\circ}\text{C}$
Коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^6$	11, $1/^{\circ}\text{C}$
Модуль упругости, $E \cdot 10^{-5}$	2, МПа

Таблица 2.10

Паровоздушный штамповочный молот МВ2145 и его технические характеристики [49]

	Параметр	Значение
	Номинальная масса падающих частей, кг	3150
	Энергия удара, не менее, кДж	80
	Число ударов в минуту	72
	Наименьшая высота штампа без хвостиков, мм	340
	Размер бабы молота спереди назад, мм	750
	Размер бабы молота слева направо, мм	790
	Расход сжатого воздуха, $\text{м}^3/\text{мин}$	30
	Ход бабы молота, мм	1250
	Габаритные размеры молота, мм	3400x1800x5340
	Масса молота с шаботом, кг	88000
	Масса шабота, кг	63000

Производственный процесс изготовления поковки детали типа «лопасть» из стали марки 13X11H2B2MФ-III упрощённо представлен в таблице 2.11 в столбце «Производственный процесс». 3D модель производственного штампа представлена на рисунке 2.8.

Таблица 2.11

Анализ технологического процесса получения поковки детали типа «лопасть» из стали марки 13X11H2B2MФ-III

№ п/п	Производственный техпроцесс	№ п/п	Предлагаемый техпроцесс
1	Контроль (проверка материала на соответствие документации);	1	Контроль (проверка материала на соответствие документации);
2	Отрезка заготовок ($\varnothing 60 \times 170^{+2}$ мм);	2	Отрезка заготовок ($\varnothing 60 \times 140^{+2}$ мм);
3	Нагрев до температуры 1180 °С;	3	Нагрев до температуры 1180 °С;
4	Осадка до высоты ~160 мм;	4	Осадка до высоты ~100 мм;
5	Протяжка на квадратное сечение по размеру $50 \pm 3 \times 50 \pm 3$ мм;	5	Штамповка в окончательном ручье;
6	Штамповка в окончательном ручье;	6	Обрезка облоя;
7	Обрезка облоя;	7	Калибровка;
8	Калибровка;	8	Обрезка облоя;
9	Обрезка облоя;	9	Правка;
10	Правка;	10	Термическая обработка;
11	Термическая обработка;	11	Травление;
12	Травление;	12	Маркировка;
13	Маркировка;	13	Контроль (проверка на соответствие размеров и свойств поковки чертежу).
14	Контроль (проверка на соответствие размеров и свойств поковки чертежу).		

Согласно производственному технологическому процессу, заготовка штампуется в три перехода: предварительная осадка с малой степенью деформации для удаления окалины с поверхности заготовки, протяжка на квадратное поперечное сечение и штамповка в окончательном ручье с диагональным расположением заготовки в штампе (рисунок 2.9а). Помимо этого, в ходе исследования, было установлено, что объём заготовки в базовой технологии чрезмерно завышен [108].

В ходе анализа технологического процесса предприятия, было выявлена возможность технологических изменений, направленных на: повышение КИМ, сокращение количества технологических переходов штамповки, а также упрощение позиционирования заготовки в штампе. Предлагаемые изменения представлены в таблице 2.11 в столбце «Предлагаемый процесс».

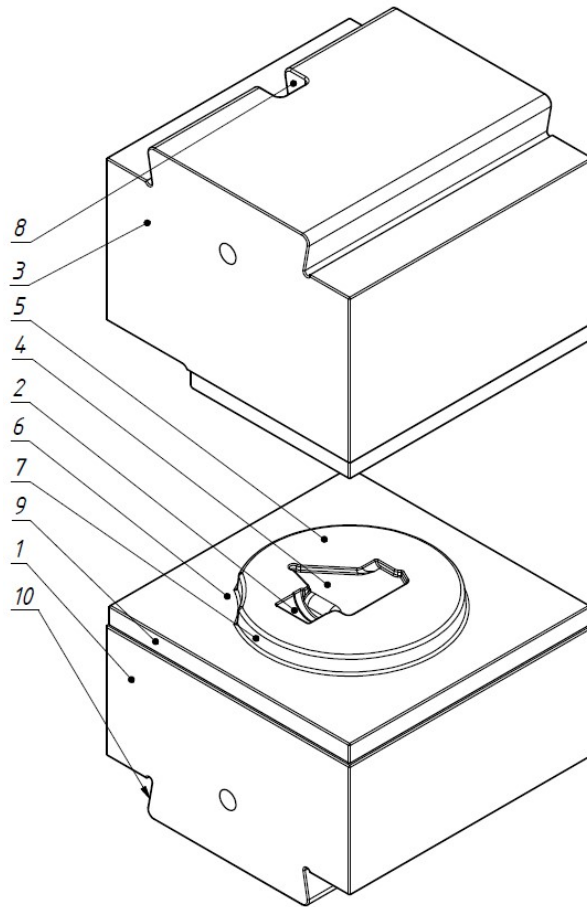


Рис. 2.8. 3D модель производственного штампа для штамповки стальной поковки: 1 и 3 – нижняя и верхняя половины штампа соответственно; 2 и 4 – элемент гравюры штампа, отвечающий за формирования хвостовика и полотна поковки соответственно; 5 – облойный мостик; 6 – площадка для осадки; 7 – замок; 8 – шпоночный паз; 9 – контрольный угол, необходимый для правильного позиционирования половин штампов друг относительно друга при установке на молот (составлено автором)

В предлагаемой технологии исключена операция протяжки заготовки на квадратное поперечное сечение, значительно увеличена степень

деформации на операции осадки и использовано продольно-осевое расположение заготовки при установке в штамп (рисунок 2.9б), что позволит сократить количество переходов, увеличить производительности труда, сократив количество ударов, а также повысить надежность центрирования при установке заготовки в штампе. Это всё позволит облегчить работу кузнецу-штамповщику и повысить экономическую эффективность производства данных поковок [108].

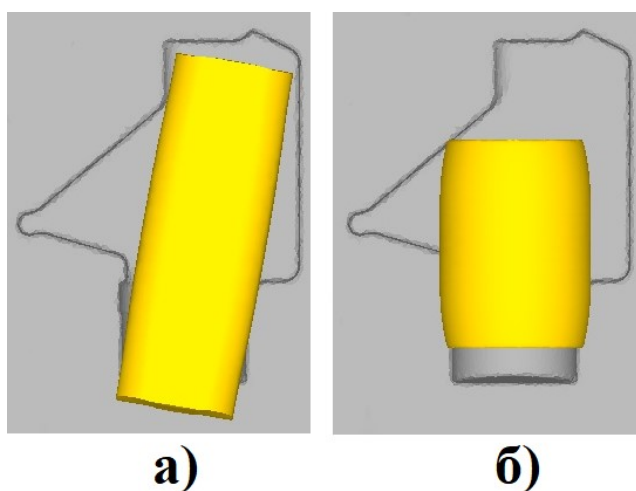


Рис. 2.9. Позиционирование заготовки в штампе при штамповке стальной поковки по: а) – производственной; б) – предлагаемой технологии

Как и в предыдущем случае, объём поковки определяли по 3D модели, построенной в программном комплексе SolidWorks, и он равен: $V_{\text{пок}} = 334149,8 \text{ мм}^3$, тогда $\text{КИМ}_{\text{произв.}}$ определяем как:

$$\text{КИМ}_{\text{произв.}} = \frac{334149,8}{3,14 \cdot 30^2 \cdot 170} \cdot 100\% = 70\%; \quad (2.5)$$

При использовании предлагаемой технологии штамповки КИМ составит:

$$\text{КИМ}_{\text{предл.}} = \frac{334149,8}{3,14 \cdot 30^2 \cdot 140} \cdot 100\% \approx 85\%, \quad (2.3)$$

Отсюда видно, что коэффициент использования материала для предлагаемого варианта по сравнению с заводской технологией повысился на 15%. Следовательно, предлагаемая технология, в плане расхода металла на поковки, будет экономически выгоднее.

2.4 Выводы по главе 2

1. В ходе анализа производственного технологического процесса штамповки алюминиевой поковки было выявлено, что для улучшения технико-экономических показателей производства необходимо: использовать более подходящие смазочные материалы, обеспечивающие снижение фактора трения $\mu \leq 0,2$ и заполнение металлом гравюры штампа; сократить количество переходов, что в значительной степени увеличит стойкость обрезаемого штампа и повысит производительность труда; повысить коэффициент использования материала, изменив форму и размеры заготовки. Расчётный коэффициент использования материала в производственной технологии составляет всего 39%.

2. Для поковки из алюминия были предложены две новые технологии и новые конструкции штампов соответственно. В первом варианте предлагается использовать технологию штамповки сдвоенной поковки, которая позволит использовать излишки металла, неизбежно уходящие в облой в зоне наклонной стороны полотна поковки в производственном технологическом процессе, для второй поковки, что повысит коэффициент использования материала на 12%. Ввиду отсутствия необходимости дробления деформации число переходов штамповки уменьшится до одного. Данная конструкция также позволит увеличить производительность процесса в несколько раз. Во втором варианте предлагается ввести дополнительные поверхности, которые будут препятствовать чрезмерному выходу металла в облой. Данная конструкция также позволит металлу заполнять наиболее отдалённые участки гравюры и достичь снижения процента металла уходящего в облой на 19%. Как и в предыдущем варианте, число переходов штамповки уменьшится до одного, а производительность процесса повышается.

3. Анализ производственного технологического процесса

штамповки стальной поковки показал, что для улучшения технико-экономических показателей производства необходимо: повысить коэффициент использования материала, уменьшить количество технологических переходов, а также повысить устойчивость заготовки при штамповке. Расчётный коэффициент использования материала в производственной технологии составляет 70%.

4. Для стальной поковки было предложено внести в технологический процесс следующие корректировки: исключить операцию протяжки заготовки на квадратное поперечное сечение; значительно увеличить степень деформации на операции осадки и использовать продольно-осевое расположение заготовки при установке в штамп. Всё это позволит сократить количество переходов, увеличить производительность труда, сократив количество ударов, а также повысить надёжность позиционирования при установке заготовки в штампе. Это будет способствовать облегчению работы кузнеца-штамповщика и повысит экономическую эффективность производства данных поковок. Расчётный коэффициент использования материала в предлагаемой технологии составляет 85%.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОКОВОК ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ЛОПАСТЬ»

3.1 Моделирования технологии ГОШ поковки из алюминиевого сплава

Для анализа параметров технологического процесса штамповки, на основе рассмотренных в главе 2 технологий, проведём компьютерное моделирование процесса горячей объёмной штамповки поковки детали типа «лопасть» (рисунок 2.1) из алюминиевого деформируемого сплав АК4-1 на кривошипном прессе LLK-2000 номинальной силой 20 МН в программном комплексе DEFORM-2D/3D. Это позволит реализовать виртуальный эксперимент, и оценить параметры исследуемой технологии, проанализировать напряженно-деформированное состояние материала, сил деформирования и степень износа ручья [105, 109].

Штамп выполнен из теплостойкой инструментальной стали марки 5ХНВ, выдерживающей ударные нагрузки. Температурный интервал штамповки заготовок из алюминиевого сплав АК4-1 – 470-350°C.

Виртуальные эксперименты проводились при следующих параметрах: температура заготовки, устанавливаемой в штамп – 470°C; температура штампа – 300°C; твердость штампа по шкале Бринелля – 372 *НВ*; фактор трения $m = 0,2$ с учетом применяемой технологической смазки. После каждого перехода штамповки производился подогрев заготовки до температуры 470°C.

3.2 Результаты компьютерного моделирования производственного процесса штамповки поковки из алюминиевого сплава

В производственной технологии после каждого формоизменяющего промежуточного перехода предусмотрены операции обрезки обля и нагрев

для восстановления температуры горячей обработки. Следовательно потери не только металла, но и затраты электроэнергии на каждый нагрев и дополнительные переходы на этапах формообразования и обрезки, приводят к уменьшению производительности в разы.

Последовательность изменения геометрии заготовки иллюстрируется на рисунке 3.1.

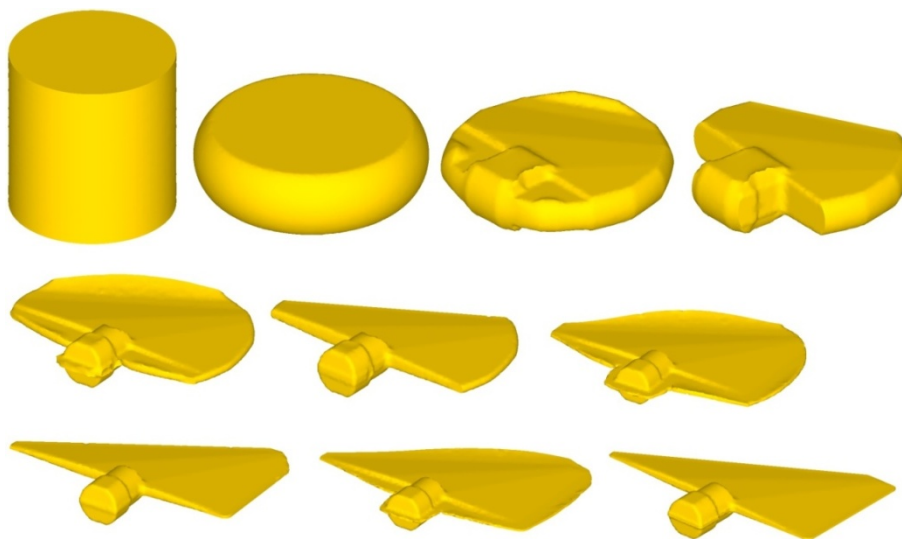


Рис. 3.1. Изменение геометрии заготовки по переходам производственного процесса горячей объёмной штамповки поковки

Температура поковки (рисунок 3.2) в зоне облоя превышает температурный интервал штамповки на 10°C , поэтому рекомендуется температуру заготовки, устанавливаемой в штамп принимать 460°C .

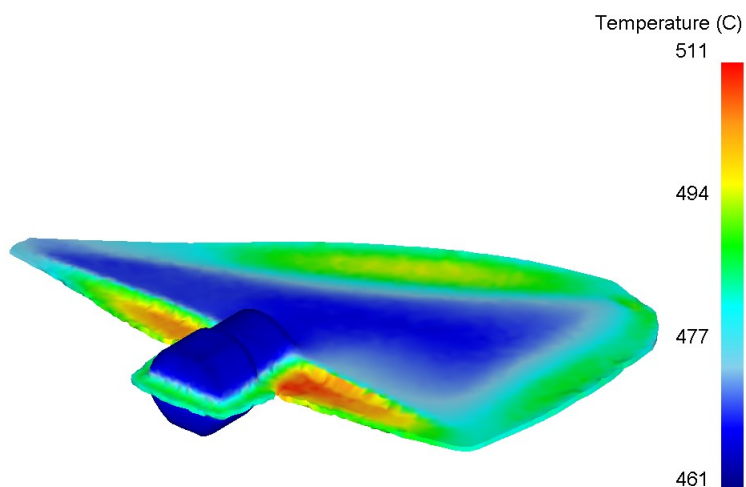


Рис. 3.2. Температура алюминиевой поковки после последнего перехода штамповки производственного процесса

На рисунке 3.3 представлено распределение интенсивности напряжений, в литературе также встречаются термины: эффективные напряжения и эквивалентные напряжения. Для определения этой характеристики DEFORM использует напряжения по Мизесу. Максимальное значение напряжений достигает 71,1 МПа, что не превышает значения предела прочности материала и, как следствие, не приводит к возникновению трещин в поковке.

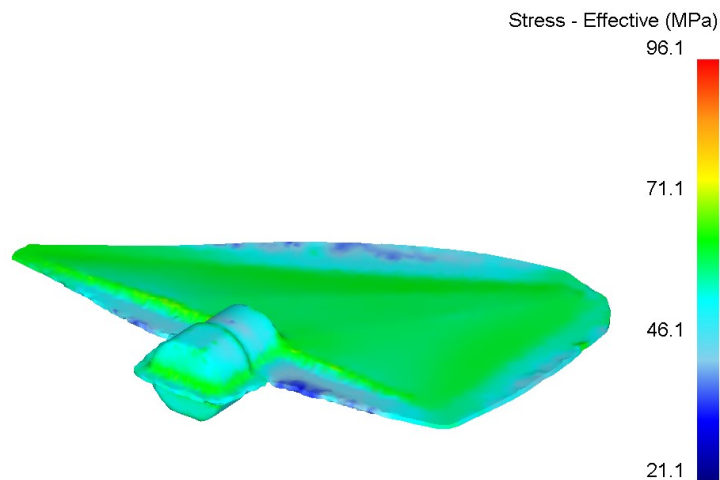


Рис. 3.3. Интенсивность напряжений алюминиевой поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

На рисунке 3.4 представлены средние напряжения, определяющиеся как: усредненное по величине напряжение из суммы действующих напряжений в каждом элементе тела.

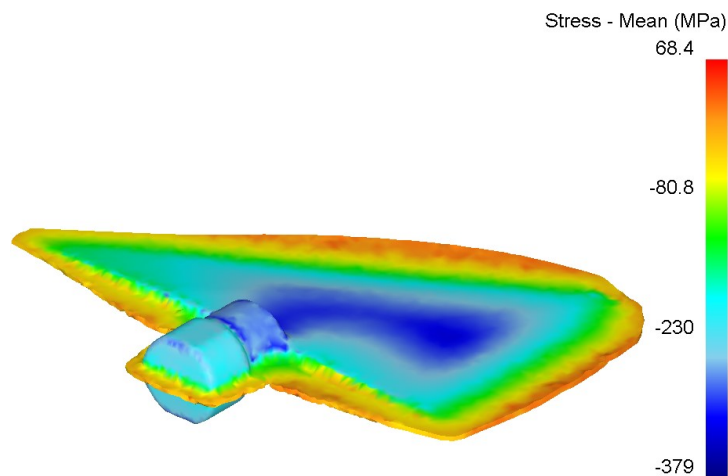


Рис. 3.4. Средние напряжения алюминиевой поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

Из рисунка 3.4 видно, что напряжения, возникающие в теле поковки – сжимающие, с максимальным значением 379 МПа, что способствует повышению механических свойств поковки. Напряжения в поковки уменьшаются от центра к краю с минимальным значением 143 МПа.

Интенсивность деформаций (эффективные, эквивалентные или накопленные деформации) изображена на рисунке 3.5 и определяет накопленную степень деформации.

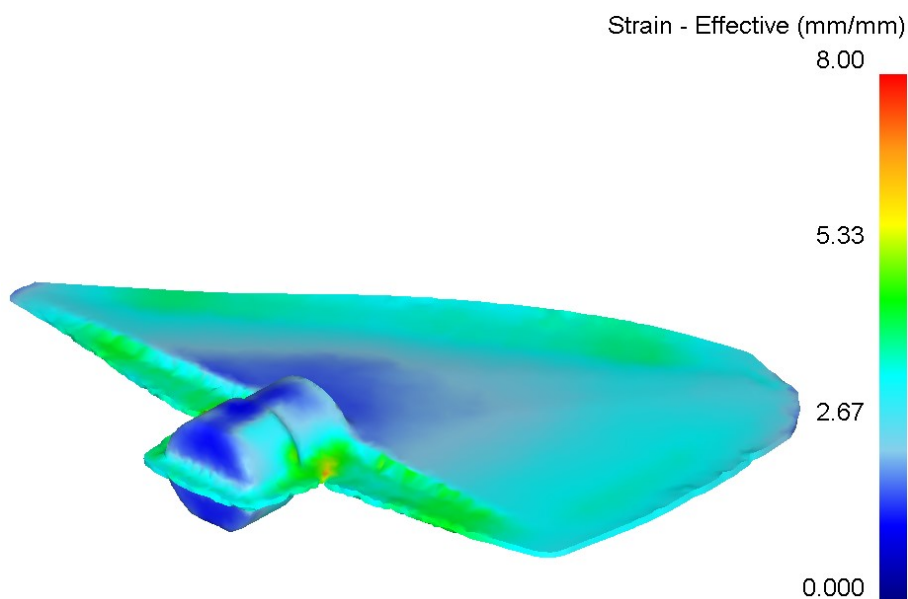


Рис. 3.5. Интенсивность деформаций алюминиевой поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

Накопленные деформации характеризуют прочность заготовки после обработки, однако при больших накопленных деформациях в поковке могут возникать дефекты. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о возникающей неравномерности механических свойств будущего изделия: в месте перехода хвостовика и профильной части лопасти (опасное сечение) они будут ниже. Это может привести к преждевременному выходу из строя готового изделия. Дефект по недоштамповке отсутствует.

Максимальное значение силы деформирования в производственном процессе (рисунок 3.6) составляет 4,29 МН, что не превышает мощности оборудования.

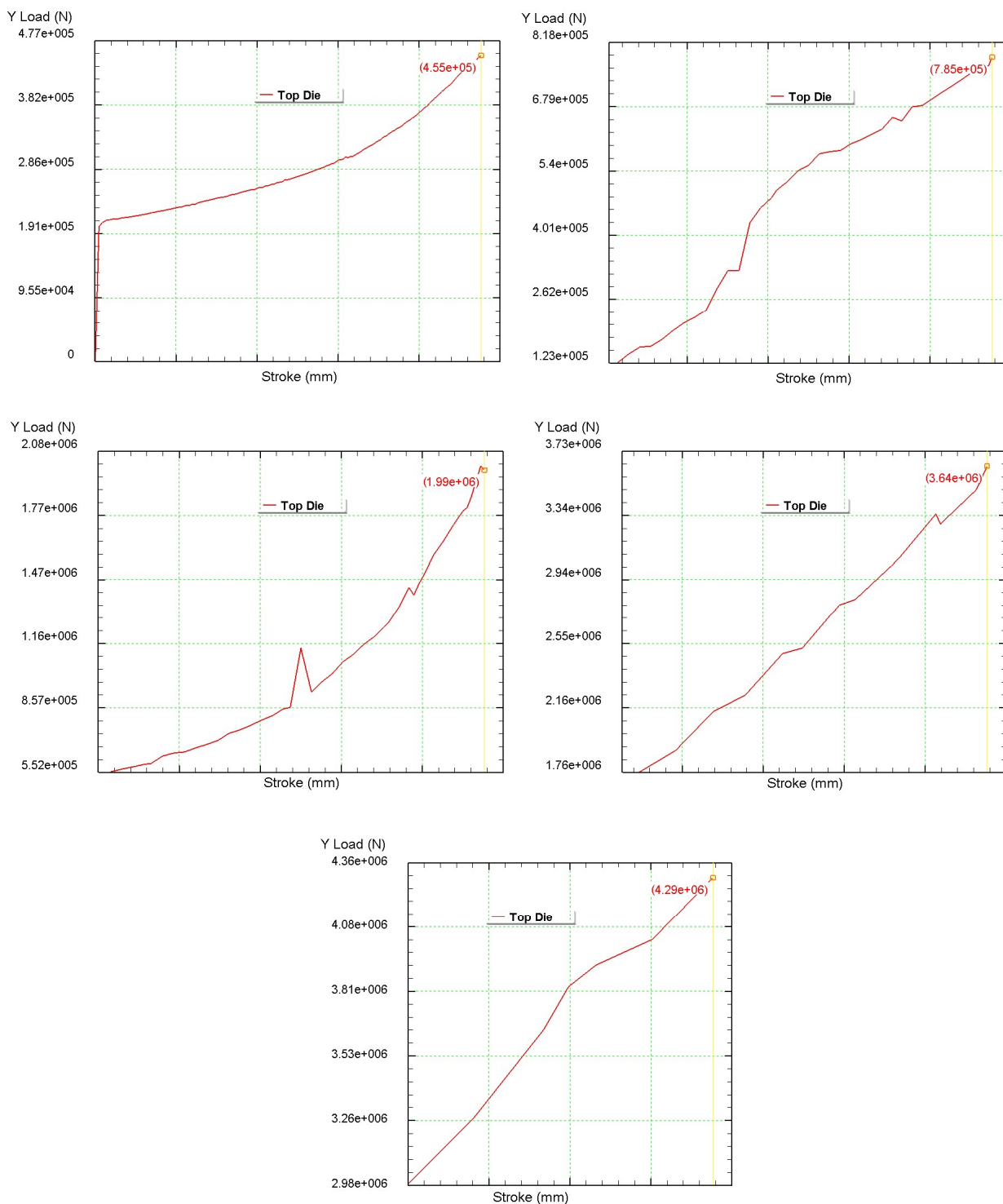


Рис. 3.6. Графики сила-перемещение при штамповке алюминиевой поковки по производственному процессу

Исследование и оценку истирания инструмента в процессе ГОШ поковки типа «лопасть» для всех вариантов штамповки будем проводить по модели Арчарда (3.1) в зонах наибольшего износа. Значения коэффициентов в модели принимали исходя из рекомендаций разработчиков программы

DEFORM-2D/3D.

$$W = \int K \frac{p^a v^b}{H^c} dt, \quad (3.1)$$

где p – контактное давление; v – скорость скольжения; H – твёрдость материала инструмента; t – время; a, b, c, K – экспериментально определяемые коэффициенты.

Для обоих вариантов были приняты значения $a = 1$; $b = 1$; $c = 2$ и коэффициента $K = 0,00001$.

В процессе штамповки штамп нагревается от контакта с горячей заготовкой, за одну штамповку температура штампа (рисунок 3.7, 3.9) в среднем увеличилась на 10°C , а температура отдельных участков на 19°C .

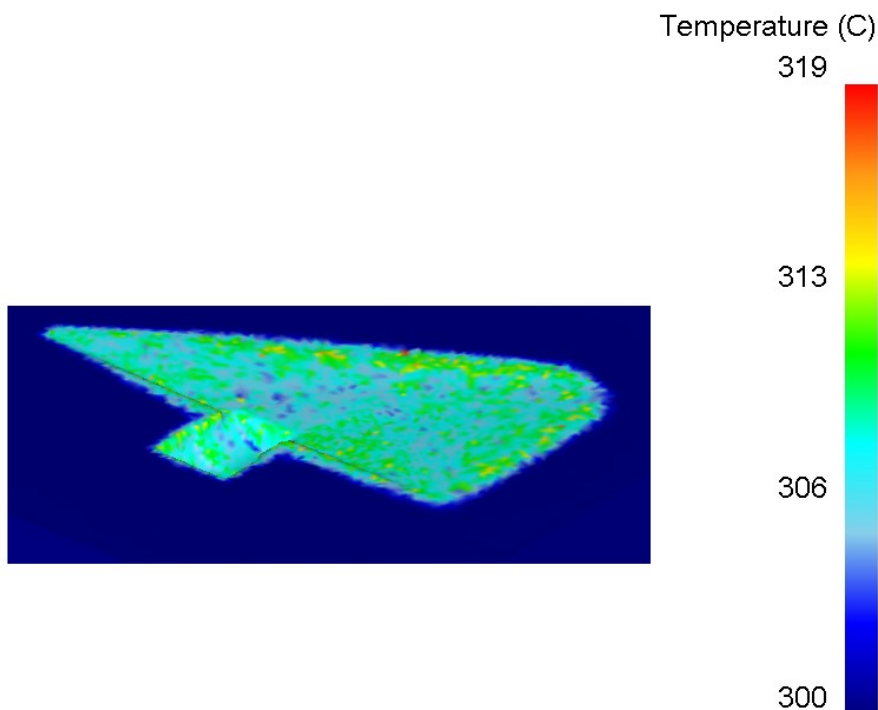


Рис. 3.7. Температура верхней половины штампа при изготовлении алюминиевой поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

После штамповки одной поковки максимальный износ верхней половины штампа (рисунок 3.8) составил $0,044$ мкм, а нижней (рисунок 3.10) $0,0435$ мкм.

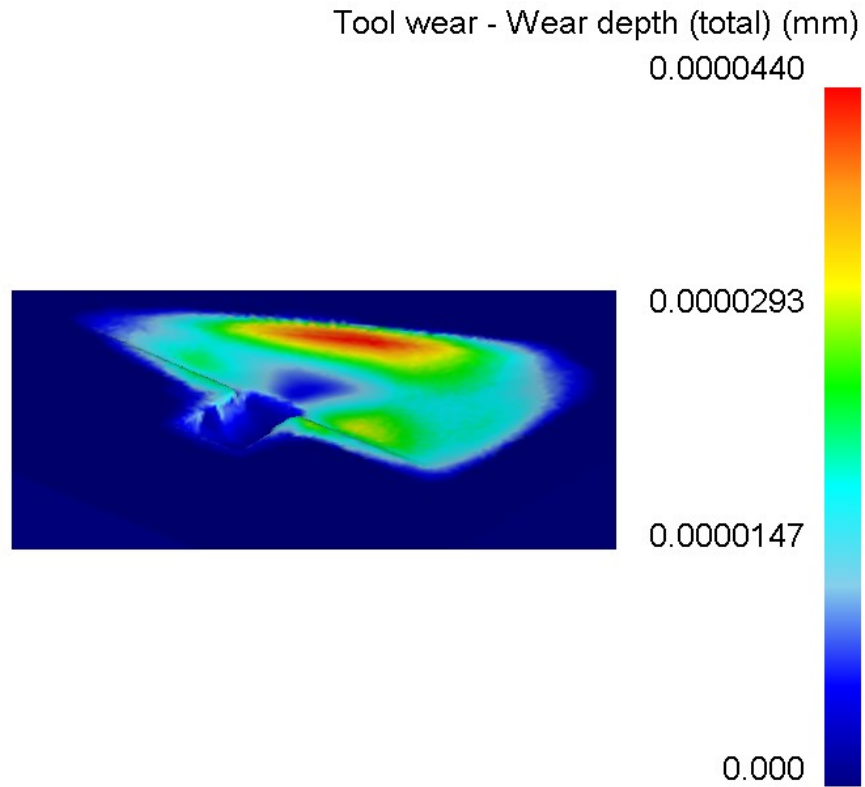


Рис. 3.8. Износ верхней половины штампа алюминиевой поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

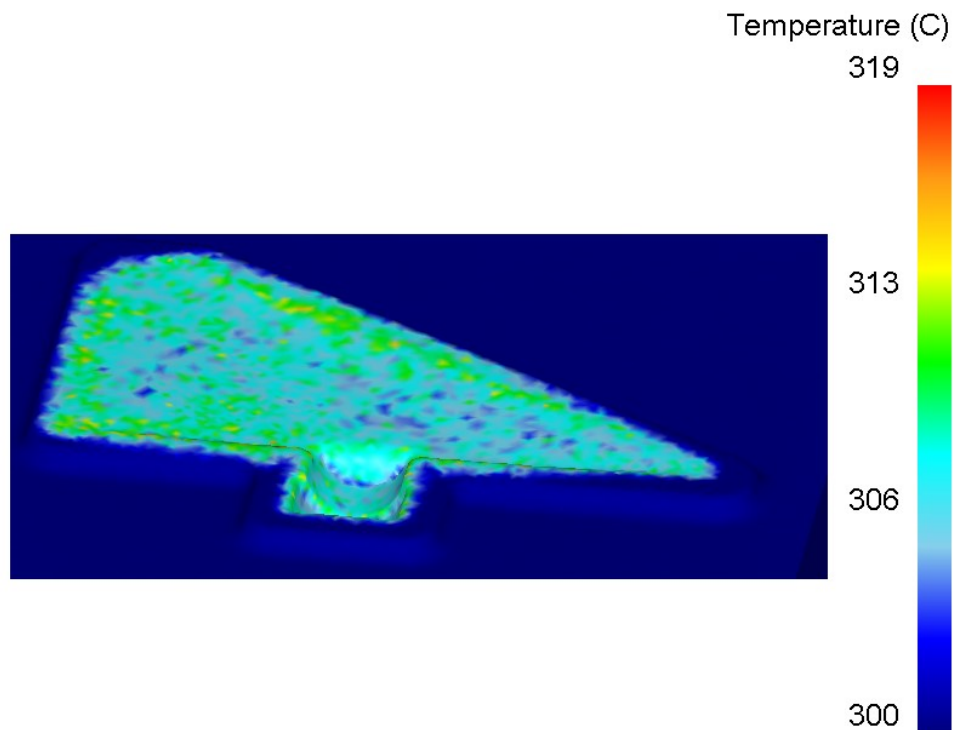


Рис. 3.9. Температура нижней половины штампа алюминиевой поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

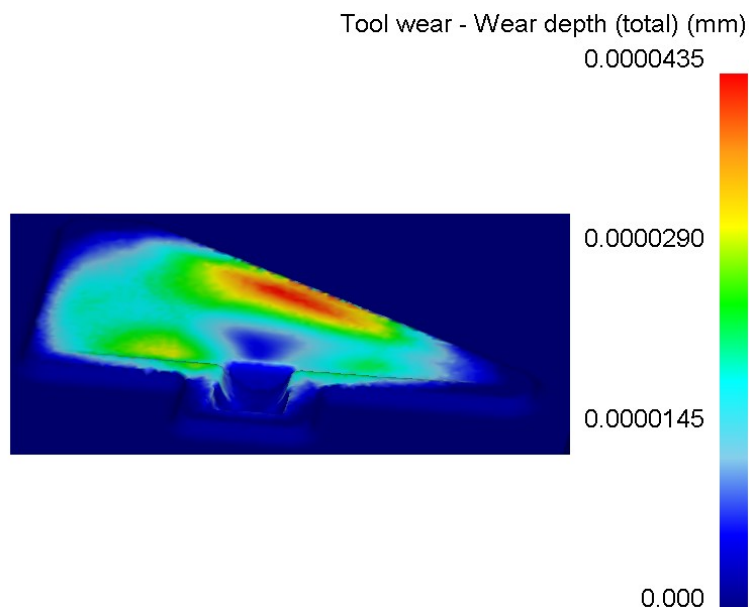


Рис. 3.10. Износ нижней половины штампа алюминиевой поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

Как видно из рисунков 3.8 и 3.10 максимальный износ верхней половины штампа на 1,1% выше вследствие особенности конструкции данного штампа.

3.3 Результаты компьютерного моделирования процесса штамповки сдвоенной поковки из алюминиевого сплава

Как было описано в главе 2, разработано несколько вариантов конструкции гравюры штампа сдвоенной поковки, но для каждого варианта характерно, что технологический процесс горячей объёмной штамповки будет проводиться с заготовкой объемом, достаточным для сдвоенной поковки, за один переход штамповки без промежуточных подогревов и обрезки облоя. Это приводит к более высоким нагрузкам на штамп и более высоким температурам поковки после штамповки (при одинаковой температуре заготовок) по сравнению с производственным процессом, вследствие деформационного нагрева (рисунок 3.12), но более высокой производительности процесса и экономии материала заготовки.

Также конструкция штампа для изготовления сдвоенной поковки позволит компенсировать возникновение сдвигающих сил действующих на штамп и ползун прессы, и будет способствовать уменьшению износа направляющих элементов штампа и прессы, и увеличению геометрической точности поковок.

Для удобства обозначим каждый тип конструкции штампа как: тип А, тип Б и тип В согласно рисунку 2.5 и проведём анализ поковок полученных в каждом из них, а также самих штампов, для принятия решения о наиболее подходящем варианте.

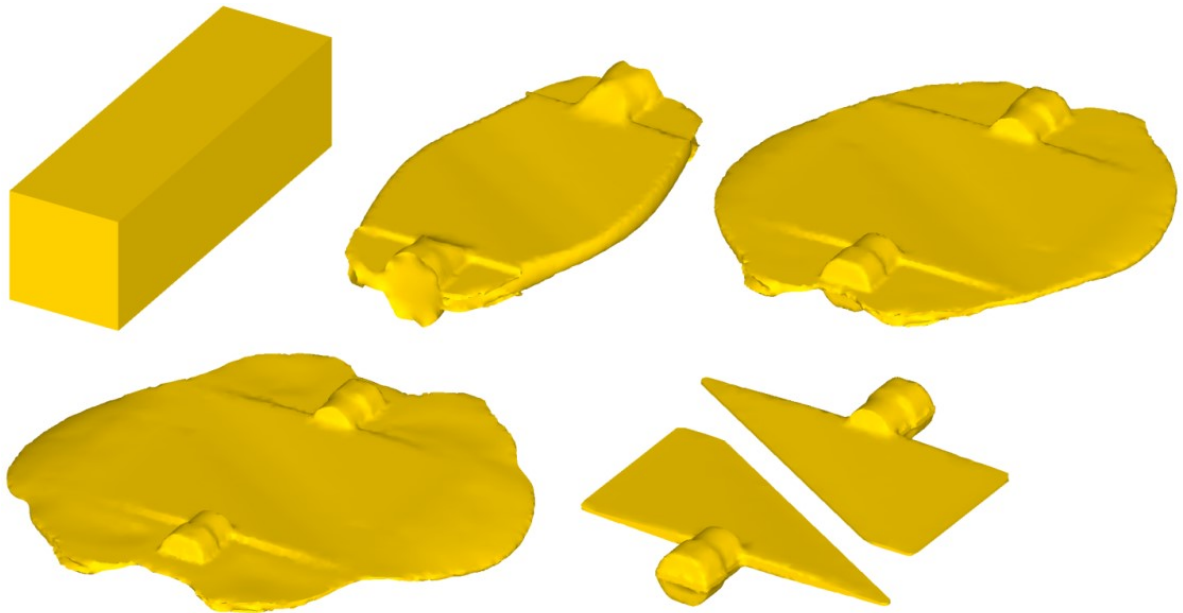


Рис. 3.11. Изменение геометрии заготовки по стадиям деформирования в ходе процесса горячей объёмной штамповки сдвоенной поковки в штампе тип А

Т.к. ось заготовки в штампе тип А совпадает с осью хвостовиков поковок, то волокна в поковках будут повторять контур хвостовиков, и механические свойства таких поковок будут выше. Использование заготовки квадратного сечения не требует предварительной осадки перпендикулярно оси заготовки для обеспечения её устойчивого положение в штампе.

Температура поковки (рисунок 3.12) в штампе тип А в центре и

хвостовике достигает минимального значения в 463°C , а по краям превышает температурный интервал штамповки на 40°C . Для соблюдения температурного интервала штамповки рекомендуется производить нагрев заготовки не более 430°C .

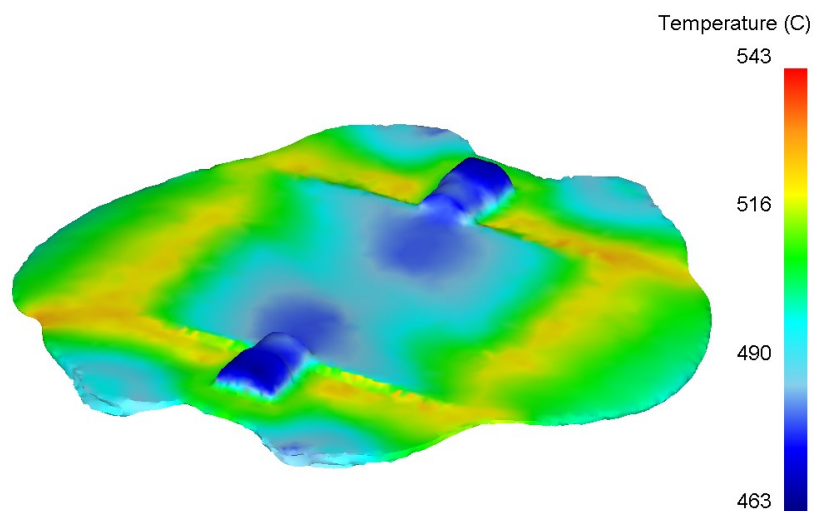


Рис. 3.12. Температура сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип А

Максимальное значение интенсивности напряжений в поковке после штамповки в штампе тип А достигает $67,6$ МПа, что не превышает значения предела прочности материала.

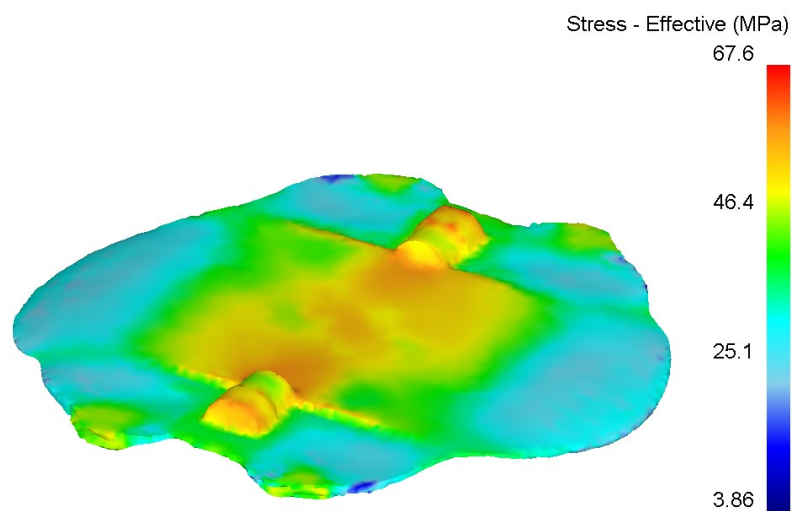


Рис. 3.13. Интенсивность напряжений сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип А

Напряжения, возникающие в поковке после штамповки в штампе тип А – сжимающие (рисунок 3.14). Максимальные значения средних

напряжения поковки после штамповки в штампе тип А достигают 470 МПа, что должно повышать механические свойства поковок. Однако они расположены в области облоя и к самой поковке, по большей части, не относятся. Если рассмотреть величину и распределение напряжений по всей поковке, то напряжения в центре составляют 300 МПа, по краям 120 МПа.

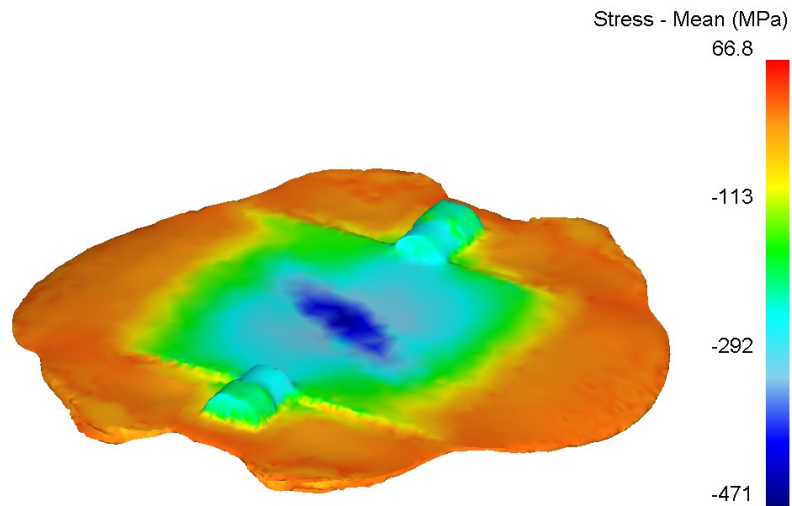


Рис. 3.14. Средние напряжения сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип А

Результаты распределения интенсивности деформаций в поковке после штамповки в штампе тип А (рисунок 3.15) говорит о равномерности механических свойств будущего изделия. Средняя величина накопленных деформаций 2,3 мм/мм. Гравюра штампа полностью заполнена.

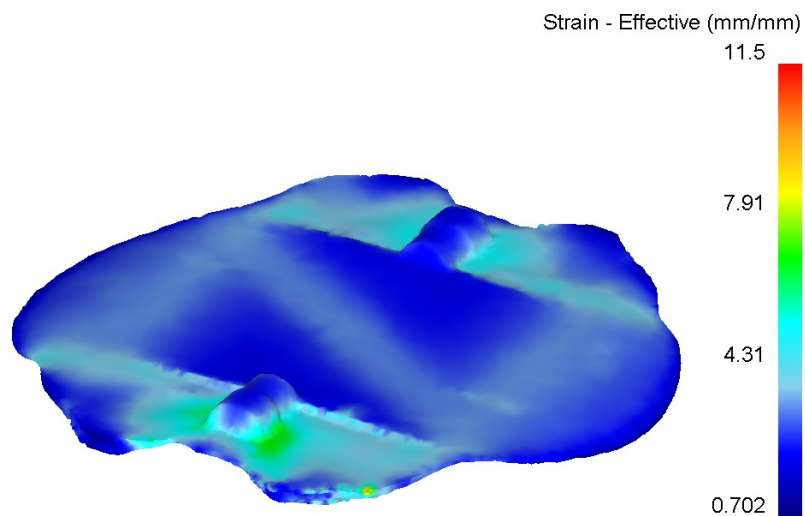


Рис. 3.15. Интенсивность деформаций сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип А

Максимальное значение силы деформирования при штамповке сдвоенной поковки в штампе тип А (рисунок 3.16) составляет 9,25 МН и не превышает мощности оборудования.

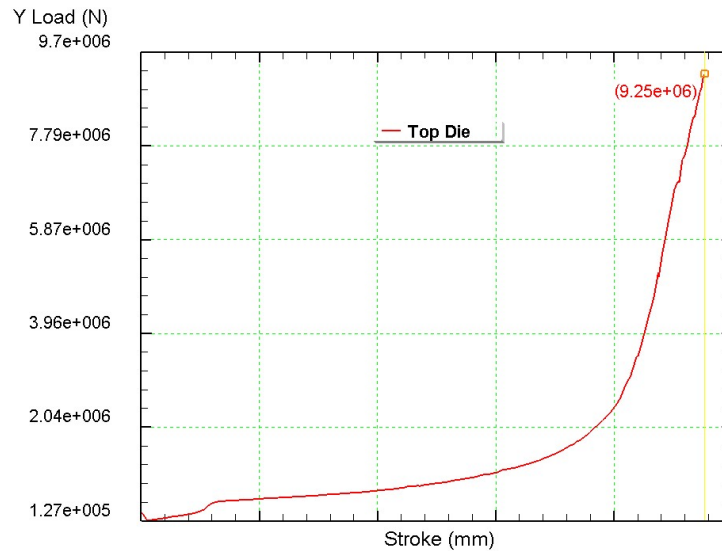


Рис. 3.16. График сила-перемещение при штамповке сдвоенной поковки из алюминия в штампе тип А

Согласно рисункам 3.17 и 3.19 температура штампа тип А за одну штамповку увеличилась в среднем на 50°C, а области с максимальным значением температур на 82°C.

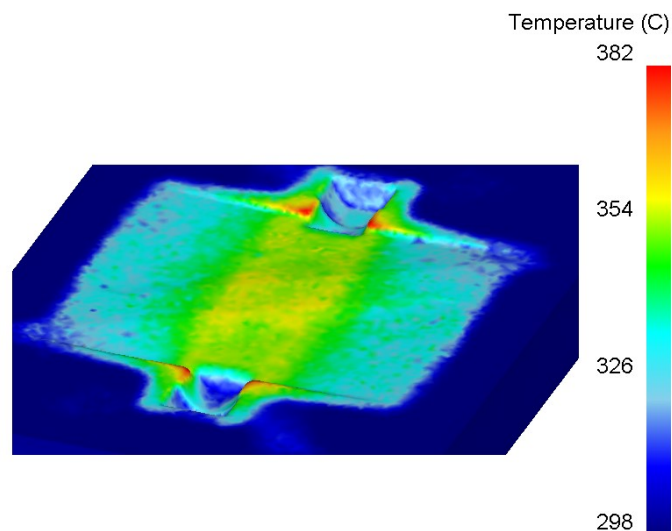


Рис. 3.17. Температура верхней половины штампа тип А алюминиевых поковок после штамповки

Это связано с тем, что в процессе штамповки деформация не дробится на несколько переходов, то время контакта штампа с горячей заготовкой

будет больше и, как следствие, температура самого штампа в конце деформации будет выше. Исходя из этого рекомендуется уделять особое внимание охлаждению штампа.

Максимальный износ верхней половины штампа тип А за одну штамповку (рисунок 3.18) достигает 0,0581 мкм.

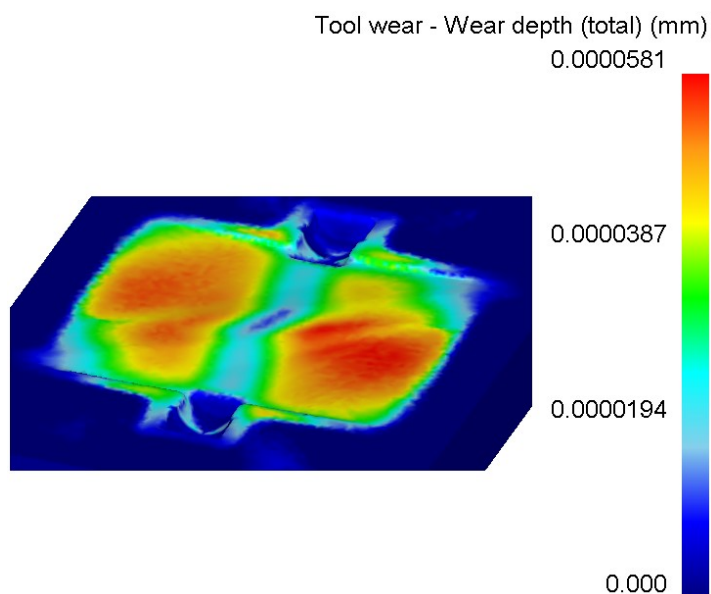


Рис. 3.18. Износ верхней половины штампа тип А алюминиевых поковок после штамповки

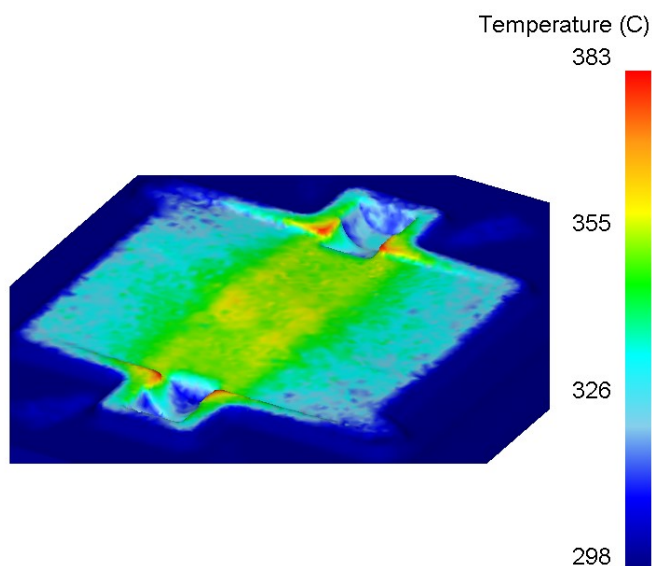


Рис. 3.19. Температура нижней половины штампа тип А алюминиевых поковок после штамповки

Максимальный износ нижней половины штампа тип А за одну штамповку (рисунок 3.20) составляет 0,0578 мкм.

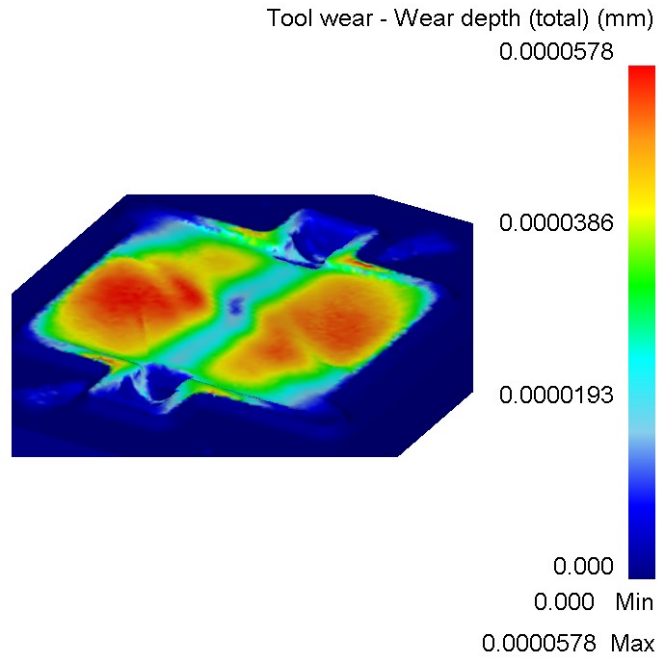


Рис. 3.20. Износ нижней половины штампа тип А алюминиевых поковок после штамповки

Как и в предыдущем случае, износ верхней половины штампа тип А выше на 0,52% вследствие особенности конструкции данного штампа.

Далее проанализируем параметры поковки полученной в штампе тип Б (рисунок 3.21) и самого штампа.

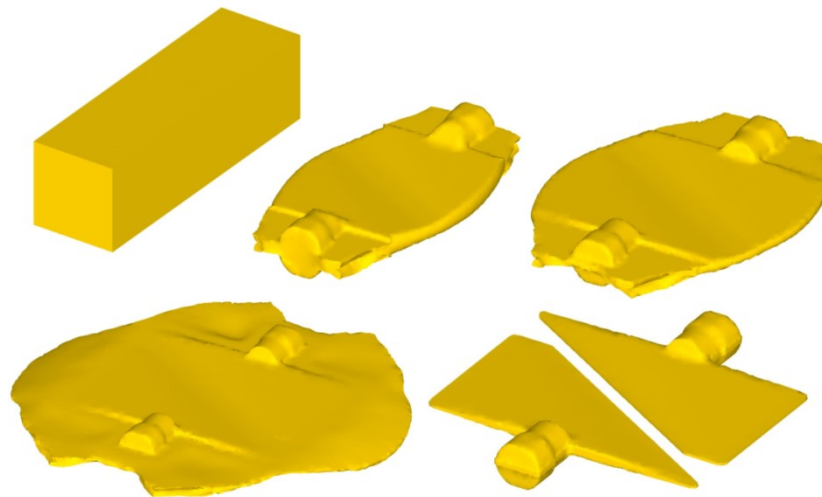


Рис. 3.21. Изменение геометрии заготовки по стадиям деформирования в ходе процесса горячей объёмной штамповки сдвоенной поковки в штампе тип Б

Заготовка в штампе тип Б не совпадает с осью хвостовиков поковок, но её смещение незначительно.

Как видно из рисунка 3.22 температура сдвоенной поковки в штампе тип Б по краям превышает температурный интервал штамповки на 48°C. Минимальная температура сосредоточена в области хвостовика поковки и составляет 458°C. Для соблюдения температурного интервала штамповки рекомендуется производить нагрев заготовки не более 420°C.

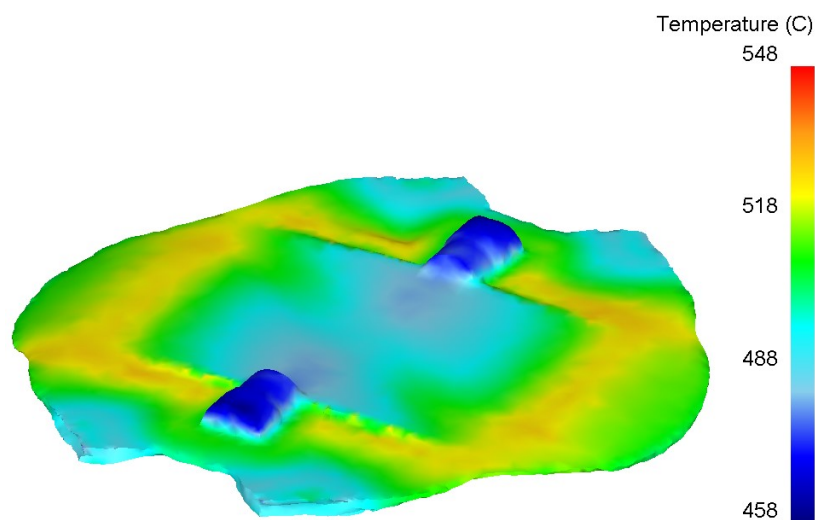


Рис. 3.22. Температура сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип Б

Максимальное значение интенсивности напряжений в поковке после штамповки в штампе тип Б (рисунок 3.23) достигает 71,9 МПа, что как и в предыдущем случае не превышает предел прочности материала.

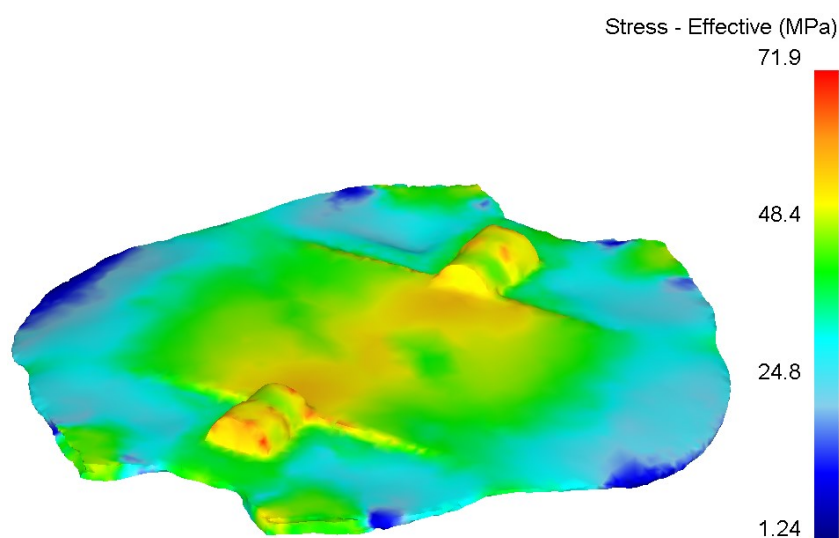


Рис. 3.23. Интенсивность напряжений сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип Б

Напряжения, возникающие в поковке после штамповки в штампе тип Б также сжимающие (рисунок 3.24). Максимальные значения средних напряжения поковки в штампе тип Б 470 МПа. Рассматривая величину и распределение напряжений по всей поковке можно заметить, что значение напряжения в центре составляет 300 МПа, а по края 120 МПа.

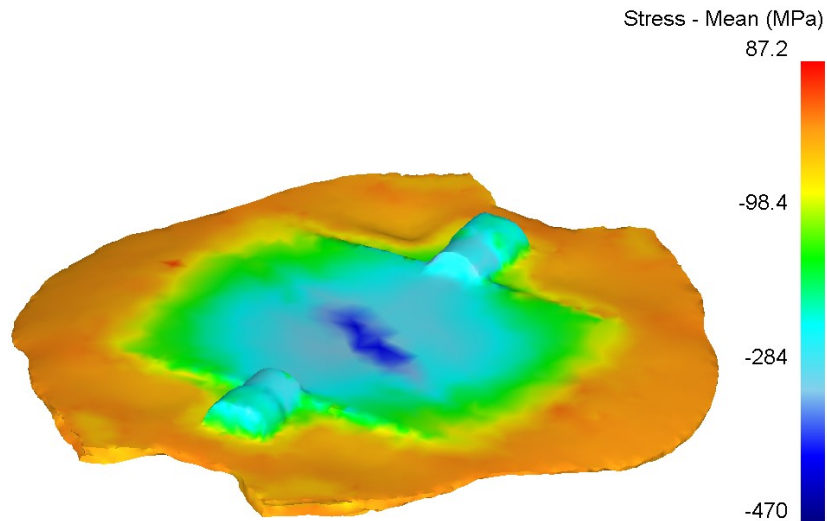


Рис. 3.24. Средние напряжения сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип Б

Распределение интенсивности деформаций в поковке после штамповки в штампе тип Б (рисунок 3.25) говорит о равномерности механических свойств поковки. Средняя величина накопленных деформаций 2,3 мм/мм.

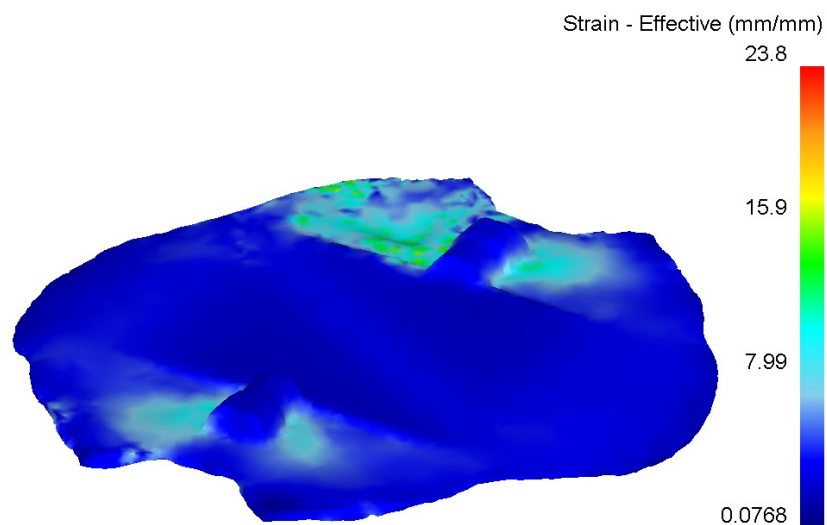


Рис. 3.25. Интенсивность деформаций сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип Б

Максимальное значение силы деформирования при штамповке сдвоенной поковки в штампе тип Б (рисунок 3.26) составляет 8,89 МН, что не превышает максимального значения силы прессы.

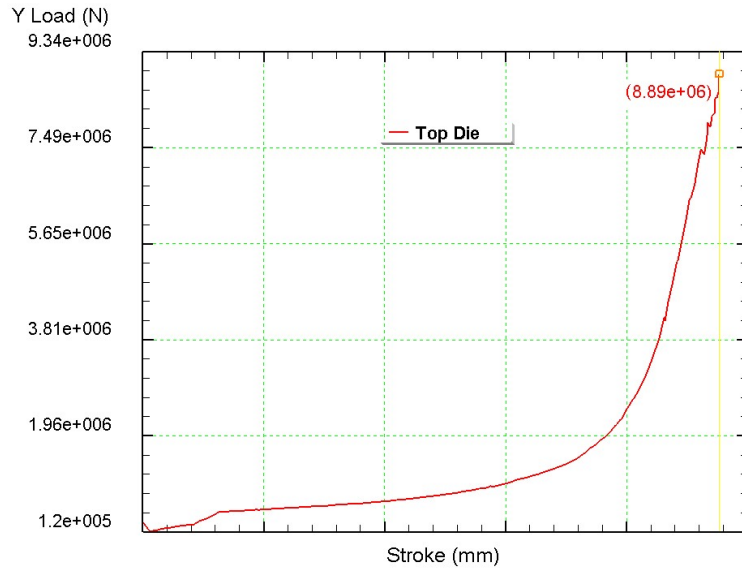


Рис. 3.26. График сила-перемещение при штамповке сдвоенной поковки из алюминия в штампе тип Б

Согласно рисункам 3.27 и 3.29 температура штампа тип Б за одну штамповку увеличилась в среднем на 50°C, а области с максимальным значением температур на 81°C. Исходя из этого рекомендуется уделять особое внимание охлаждению штампа.

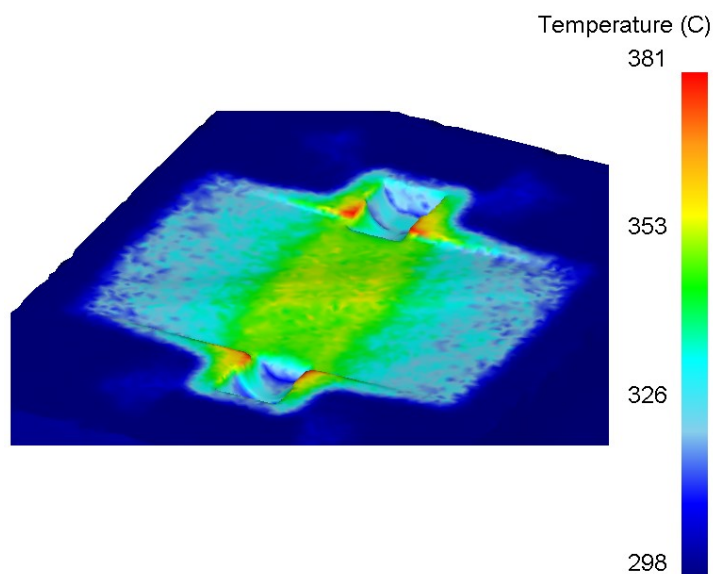


Рис. 3.27. Температура верхней половины штампа тип Б алюминиевой поковки после штамповки

Максимальный износ верхней половины штампа тип Б за одну штамповку (рисунок 3.28) достигает 0,0506 мкм.

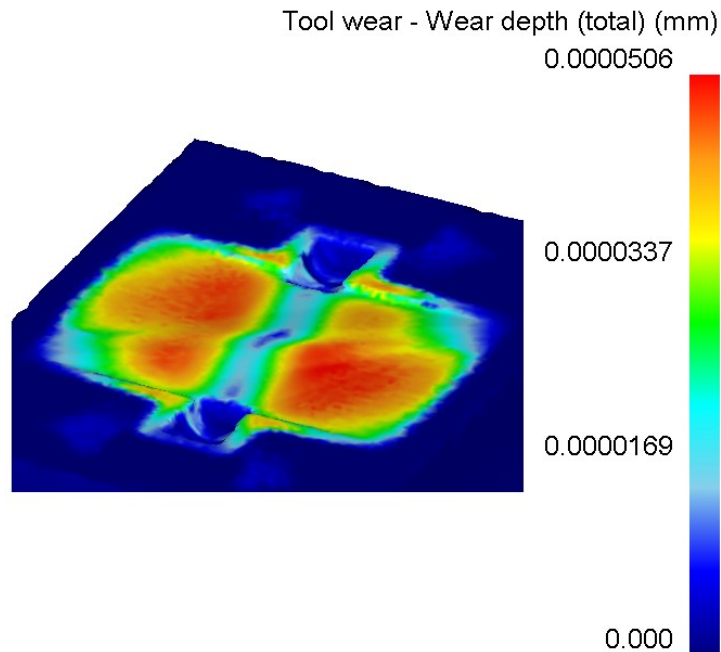


Рис. 3.28. Износ верхней половины штампа тип Б алюминиевой поковки после штамповки

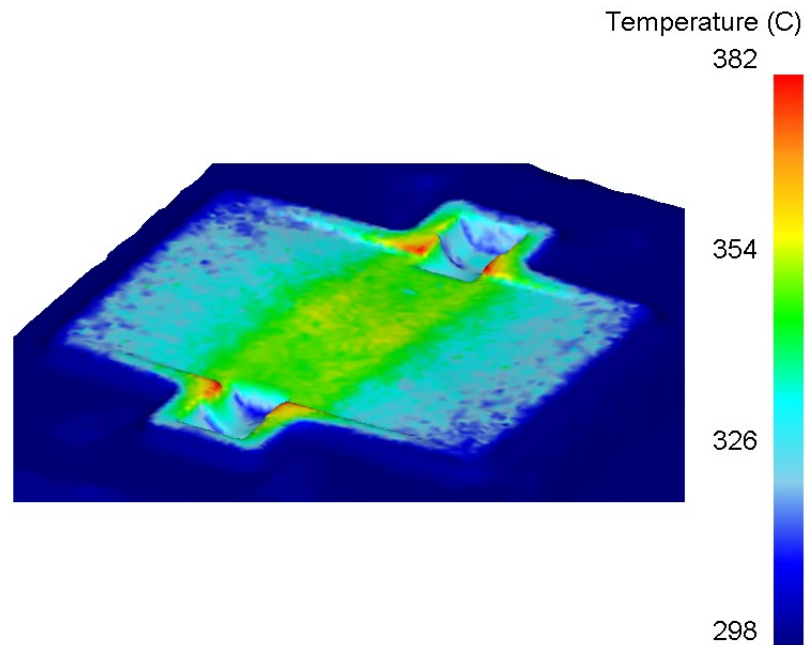


Рис. 3.29. Температура нижней половины штампа тип Б алюминиевой поковки после штамповки

Максимальный износ нижней половины штампа тип Б за одну штамповку (рисунок 3.30) составляет 0,0543 мкм.

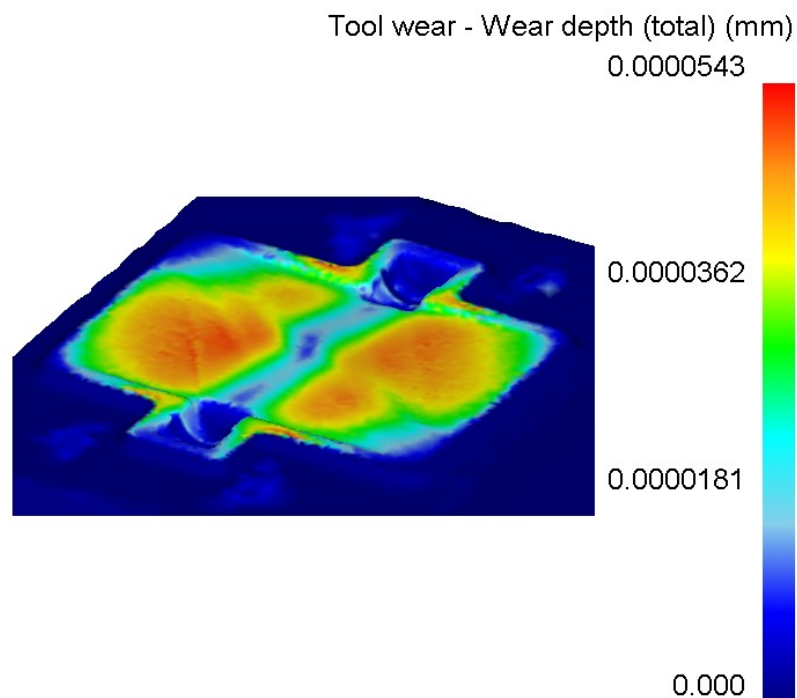


Рис. 3.30. Износ нижней половины штампа тип В алюминиевой поковки после штамповки

Теперь рассмотрим вариант штамповки поковки в штампе тип В (рисунок 3.31).

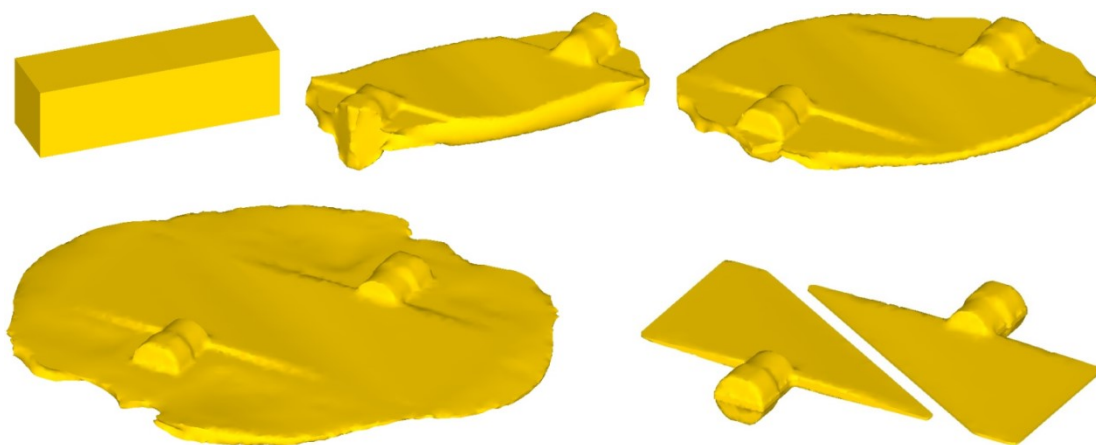


Рис. 3.31. Изменение геометрии заготовки по стадиям деформирования в ходе процесса горячей объёмной штамповки сдвоенной поковки в штампе тип В

Положение заготовки в штампе тип В не совпадает с осью хвостовиков поковок, что не позволяет в полной мере использовать ресурс механических характеристик поковок, а также усложняет позиционирование при укладке заготовки в штамп.

Температура алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип В (рисунок 3.32) имеет максимальное значение, которое превышает температурный интервал штамповки на 40°C , на краях поковок и уменьшается к центру, где значение температуры составляет 470°C . Для соблюдения температурного интервала штамповки рекомендуется производить нагрев заготовки не более 430°C .

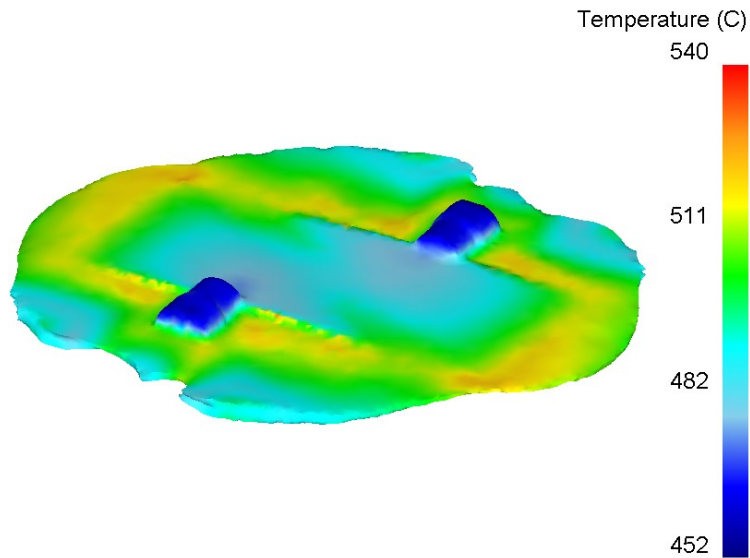


Рис. 3.32. Температура сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип В

Максимальное значение интенсивности напряжений в поковке после штамповки в штампе тип В (рисунок 3.33) достигает $75,8\text{ МПа}$.

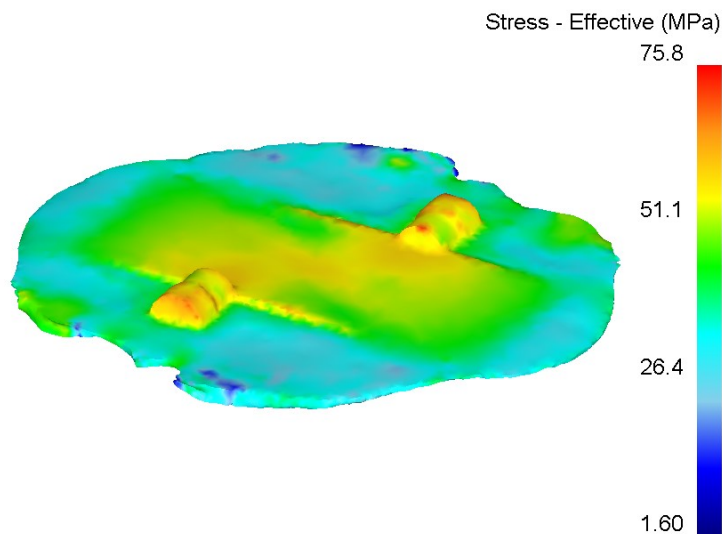


Рис. 3.33. Интенсивность напряжений сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип В

Напряжения, возникающие в поковке после штамповки в штампе тип В, как и в предыдущих вариантах – сжимающие (рисунок 3.34). Максимальные значения средних напряжения поковки в штампе тип В составляет 381 МПа, напряжения уменьшаются от центра к краю, достигая минимального значения в 116 МПа.

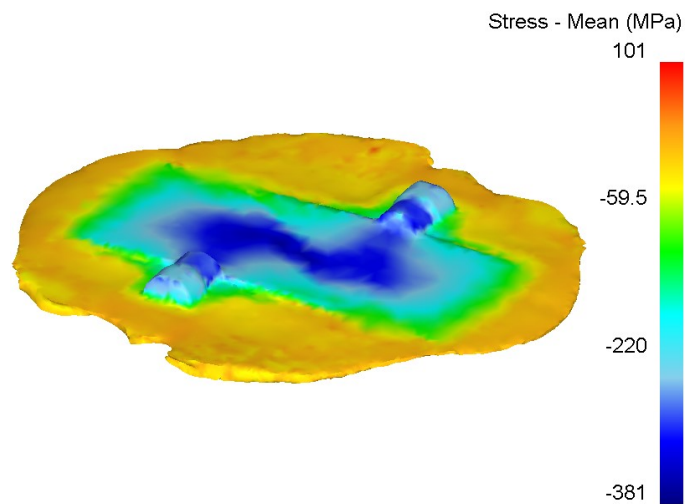


Рис. 3.34. Средние напряжения сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип В

Распределение интенсивности деформаций в поковке после штамповки в штампе тип В (рисунок 3.35) говорит о равномерности механических свойств поковок. Средняя величина накопленных деформаций 2,3 мм/мм.

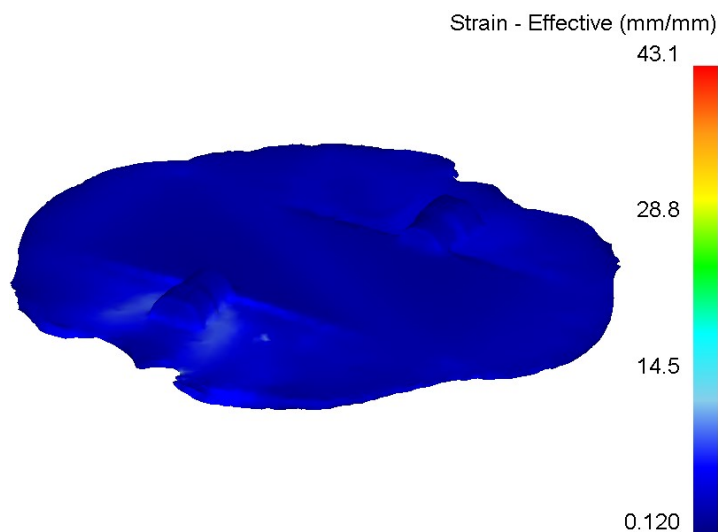


Рис. 3.35. Интенсивность деформаций сдвоенной алюминиевой поковки после штамповки в штампе тип В

Максимальное значение силы деформирования при штамповке сдвоенной поковки в штампе тип В (рисунок 3.36) составляет 8,88 МН, что, как и в предыдущих вариантах, не превышает мощности оборудования.

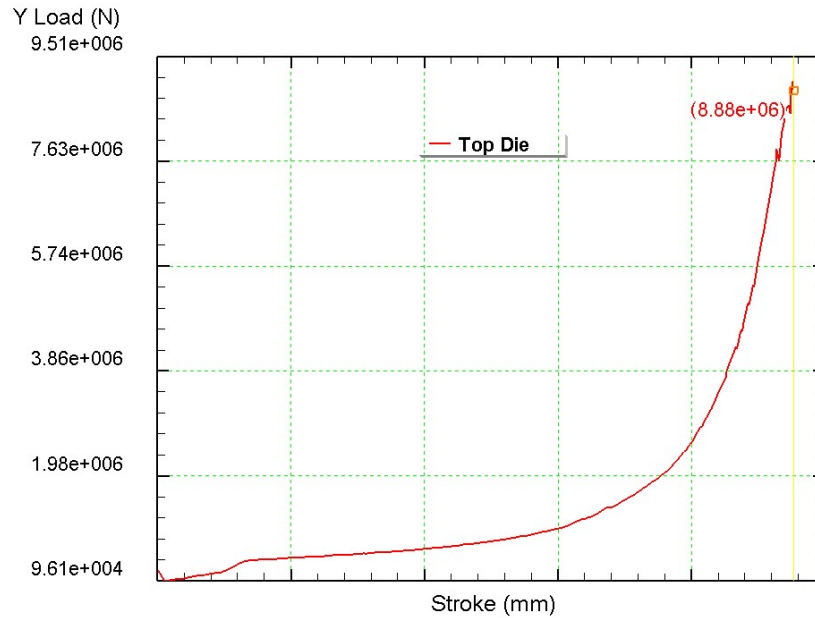


Рис. 3.36. График сила-перемещение при штамповке сдвоенной поковки из алюминия в штампе тип В

Согласно рисункам 3.37 и 3.39 температура штампа тип В за одну штамповку увеличилась в среднем на 50°C, а области с максимальным значением температур на 85°C. Исходя из этого рекомендуется уделять особое внимание охлаждению штампа.

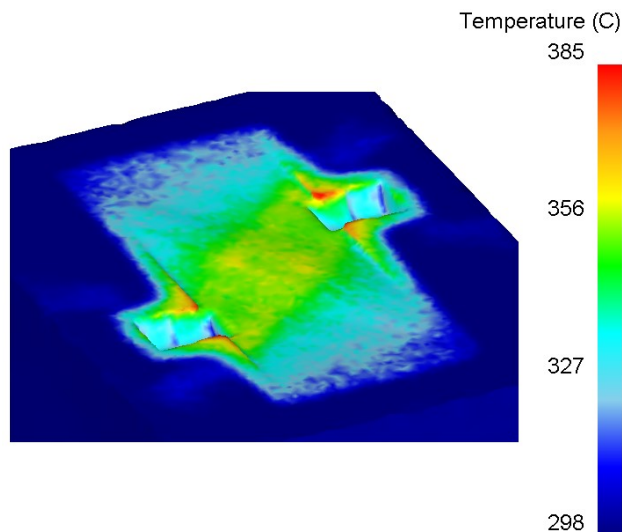


Рис. 3.37. Температура верхней половины штампа тип В алюминиевой поковки после штамповки

Максимальный износ верхней половины штампа тип В за одну штамповку (рисунок 3.38) достигает 0,0564 мкм.

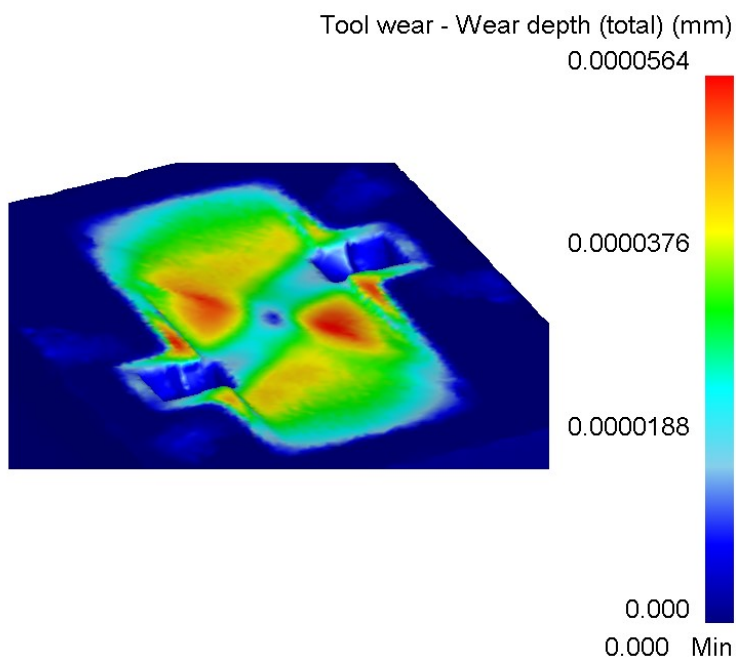


Рис. 3.38. Износ верхней половины штампа тип В алюминиевой поковки после штамповки

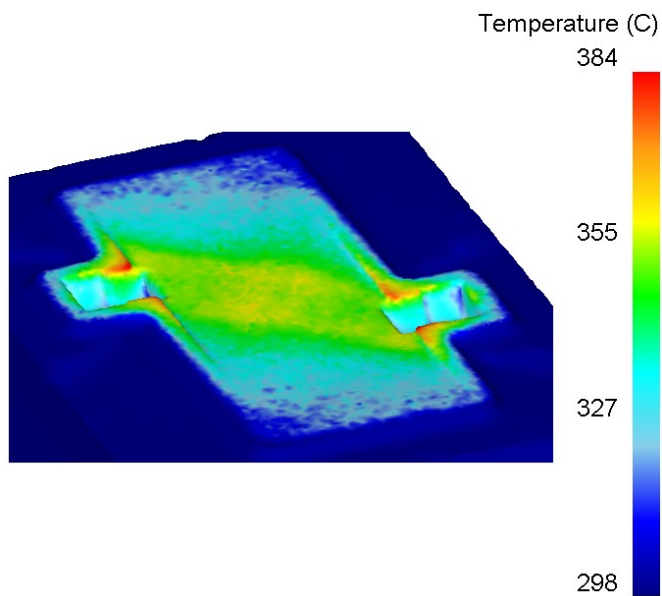


Рис. 3.39. Температура нижней половины штампа тип В алюминиевой поковки после штамповки

Максимальный износ нижней половины штампа тип В за одну штамповку (рисунок 3.40.) составляет 0,0645 мкм.

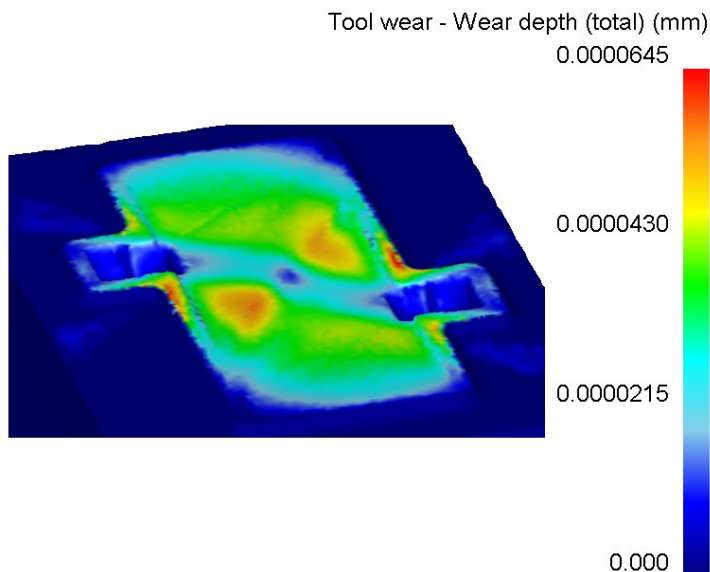


Рис. 3.40. Износ нижней половины штампа тип В алюминиевой поковки после штамповки

Для определения наиболее подходящего варианта конструкции штампа горячей объёмной штамповки при штамповке сдвоенной поковки из алюминия, сведём результаты компьютерных экспериментов в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Анализ параметров процесса получения сдвоенной поковки детали типа «лопасть» из алюминиевого сплава АК4-1

Конструкция штампа	Параметры поковок					Параметры штампа	
	Температура, °C	Интенсивность напряжений, МПа	Средние напряжения, МПа	Интенсивность деформации, мм/мм	Максимальная сила, МН	Максимальная температура, °C	Максимальный износ, мкм
Тип А	510	67,6	Max -470 Min -120	2,3	9,25	383	0,0581
Тип Б	518	71,9	Max -470 Min -120	2,3	8,89	382	0,0543
Тип В	510	75,8	Max -381 Min -116	2,3	8,88	385	0,0645

Отсюда можно сделать вывод, что самые лучшие результаты параметров поковки и штампа имеет технологический процесс с использованием штампа конструкции типа Б, а самые худшие типа В. В

дальнейшем при упоминании технологического процесса штамповки сдвоенной поковки будет подразумеваться процесс с использованием штампа тип Б.

Максимальный износ штампа для штамповки сдвоенной поковки составляет 0,0543 мкм и превышает износ штампа по производственному процессу на 19%. Однако так как за одну штамповку мы получаем две поковки, то стойкость такого штампа, по сравнению со стойкостью производственного штампа, повысилась на 62%.

3.4 Результаты компьютерного моделирования процесса штамповки поковки из алюминиевого сплава в штампе с ограничителем

Как и в прошлом случае, технологический процесс горячей объёмной штамповки в штампе с ограничителем (рисунок 3.41) проводится за один переход штамповки без промежуточных подогревов и обрезки облоя. Более подробно процесс был описан в главе 2.

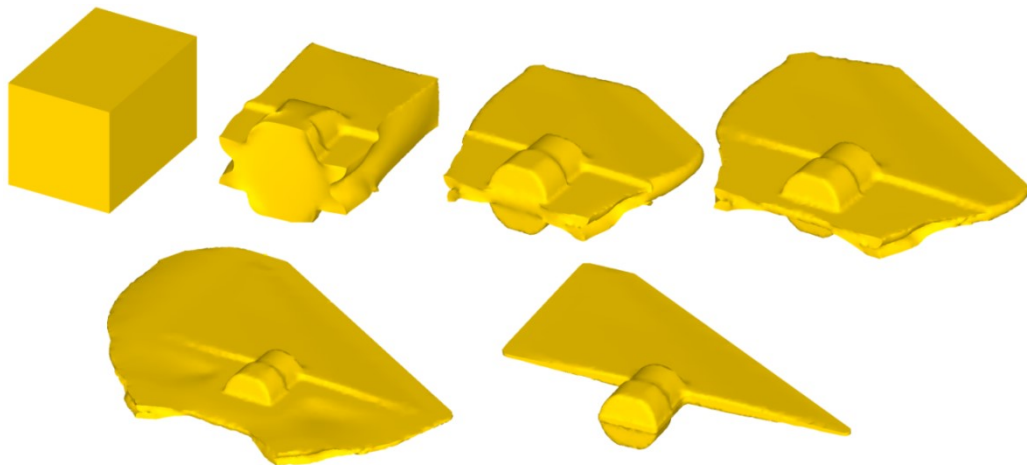


Рис. 3.41. Изменение геометрии заготовки по стадиям деформирования в ходе процесса горячей объёмной штамповки алюминиевой поковки в штампе с ограничителем

Ось заготовки при позиционировании в штампе совпадает с осью хвостовика поковки. Волокна в поковке будут повторять контур хвостовика, и механические свойства такой поковки будут выше.

Температура поковки в штампе с ограничителем (рисунок 3.42), как и в процессе сдвоенной штамповки, выше температурного интервала штамповки на 30°C. Поэтому температуру заготовки рекомендуется также брать ниже на 30-40°C.

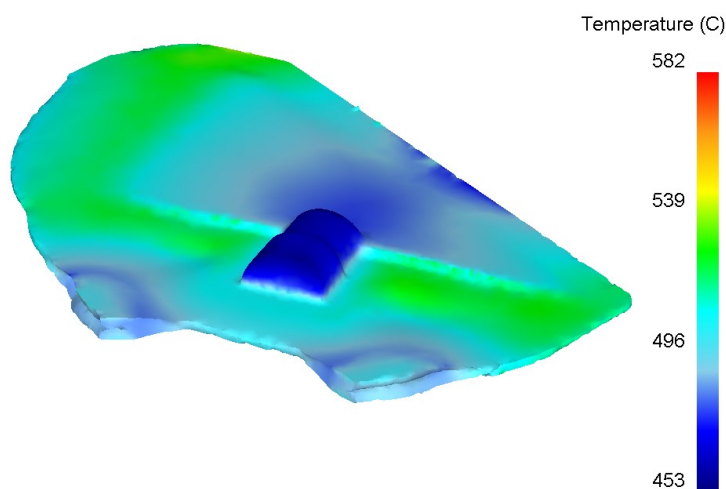


Рис. 3.42. Температура алюминиевой поковки после штамповки в штампе с ограничителем

Максимальное значение интенсивности напряжений в поковке после штамповки достигают 65 МПа.

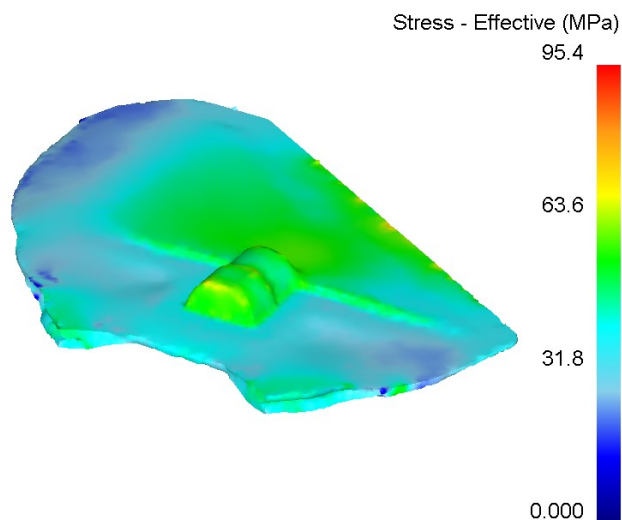


Рис. 3.43. Интенсивность напряжений алюминиевой поковки после штамповки в штампе с ограничителем

Как и в рассмотренных ранее процессах напряжения, возникающие в поковке после штамповки в штампе с ограничителем – сжимающие (рисунок 3.44). Максимальные значения средних напряжения в поковке

составляют 450 МПа, что повышает механические свойства поковки. Однако они расположены только в небольшой области поковки, напряжения в основном объёме поковки составляют от 300 МПа (в центре поковки) до 110 МПа (по краям поковки).

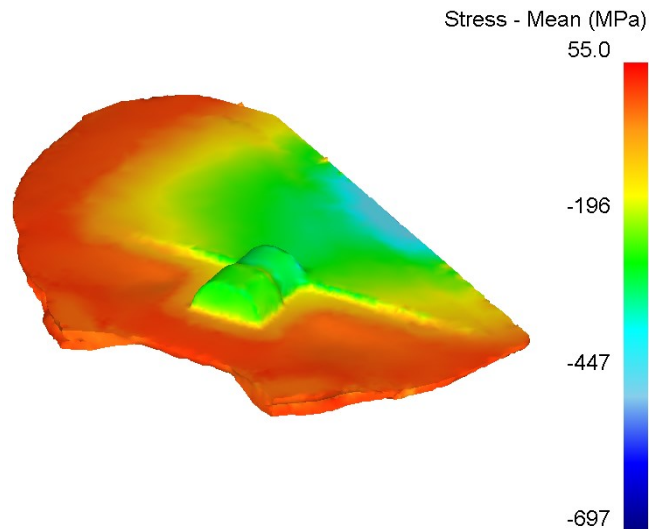


Рис. 3.44. Средние напряжения алюминиевой поковки после штамповки в штампе с ограничителем

Распределения интенсивности деформаций в поковке из штампа с ограничителем (рисунок 3.45) говорит о равномерности механических свойств будущего изделия. Средняя величина накопленных деформаций 2,3 мм/мм. Дефект недоштамповки отсутствует.

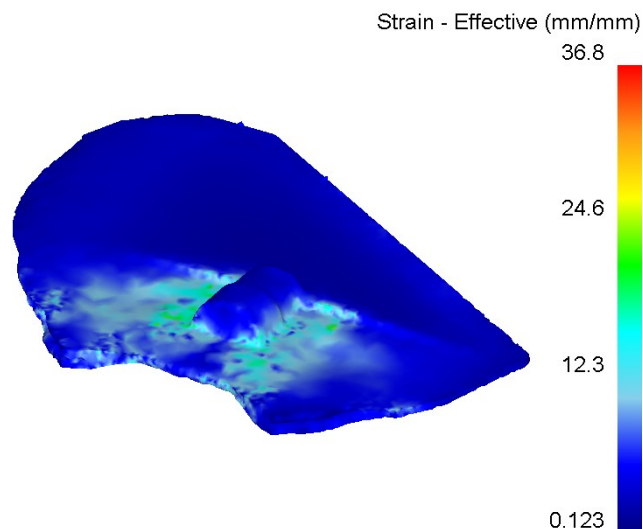


Рис. 3.45. Интенсивность деформаций алюминиевой поковки после штамповки в штампе с ограничителем

Максимальное значение силы деформирования при штамповке в штампе с ограничителем (рисунок 3.46) составляет 4,89 МН, и не превышает мощности оборудования.

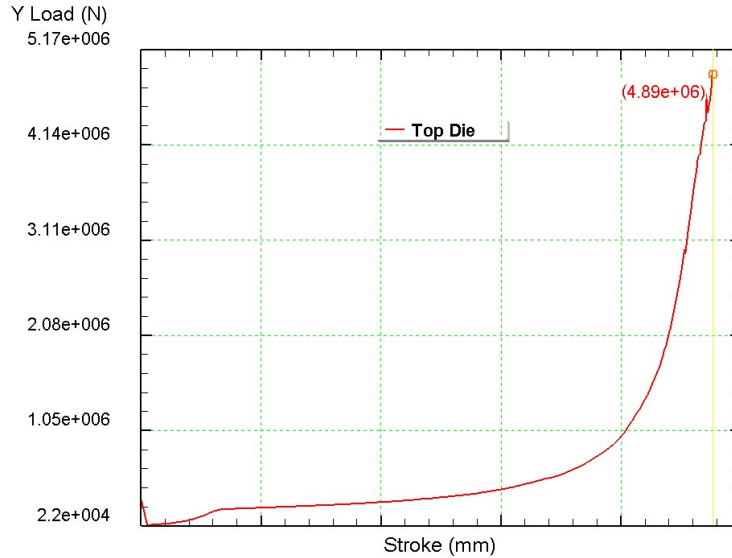


Рис. 3.46. График сила-перемещение при штамповке алюминиевой поковки в штампе с ограничителем

Температура штампа с ограничителем (рисунок 3.47 и 3.49) за одну штамповку выше в среднем на 50°C, а области с максимальным значением температур на 86°C.

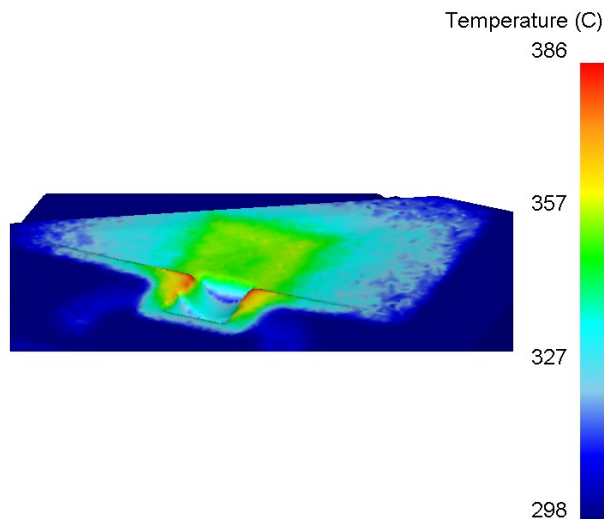


Рис. 3.47. Температура верхней половины штампа алюминиевой поковки после штамповки в штампе с ограничителем

Также как в процессе сдвоенной штамповки, это происходит из-за того, что деформация не дробится на несколько переходов, что приводит к тому,

что температура штампа в конце деформации выше, чем в производственном процессе. Исходя из этого, рекомендуется уделять особое внимание его охлаждению.

Максимальный износ верхней половины штампа с ограничителем за одну штамповку (рисунок 3.48) достигает 0,0467 мкм.

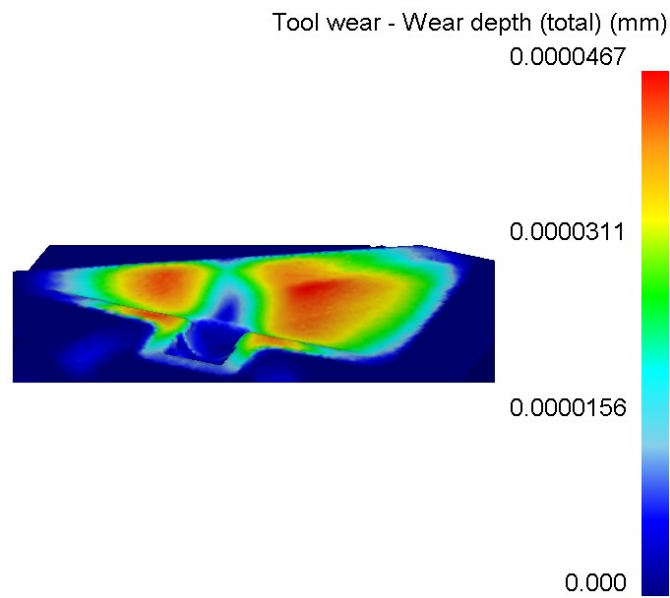


Рис. 3.48. Износ верхней половины штампа алюминиевой поковки после штамповки в штампе с ограничителем

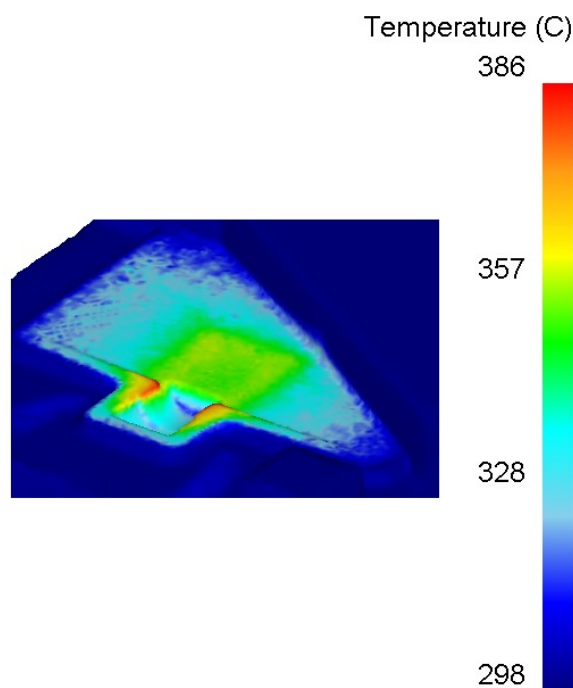


Рис. 3.49. Температура нижней половины штампа алюминиевой поковки после штамповки в штампе с ограничителем

Максимальный износ нижней половины штампа с ограничителем за одну штамповку (рисунок 3.50) достигает 0,0485 мкм.

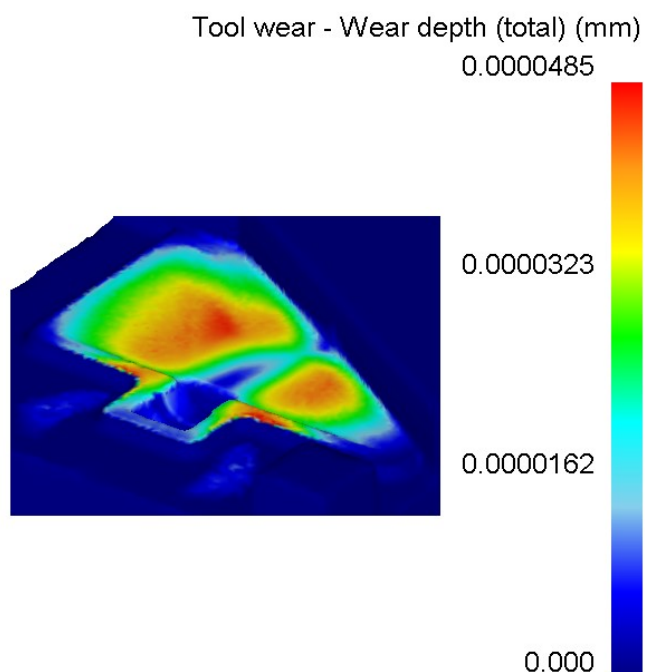


Рис. 3.50. Износ нижней половины штампа алюминиевой поковки после штамповки в штампе с ограничителем

Как и в прошлом случае, износ штампе с ограничителем превышает износ штампа по производственному процессу на 10%, но расходы на материал заготовки значительно снижаются (на 19%). По сравнению с износом штампа сдвоенной поковки, износ штампе с ограничителем ниже на 11%, но если учитывать, что за одну штамповку штамп сдвоенной поковкой выдаёт две поковки, то износ штампа с ограничителем выше на 79% при том, что расход материала на сдвоенную штамповку выше всего на 7% по сравнению со штамповкой в штампе с ограничителем.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что наиболее рациональной технологией для горячей объёмной штамповки поковки детали типа «лопасть» из алюминиевого сплава АК4-1 является технология штамповки сдвоенной поковки в штампе тип Б, применяя которую, стойкость штампа возрастает на 62%, по сравнению с производственной, а экономия материала заготовки достигает 12%.

3.5 Моделирования технологии ГОШ поковки из стали

Компьютерное моделирование процесса горячей объёмной штамповки поковки детали типа «лопасть» (рисунок 2.7.) из хромоникелевой жаропрочной высоколегированной стали марки 13X11H2B2MФ-Ш, штампуемая за несколько переходов на молоте MB2145 с номинальной массой падающих частей 3150 кг, также проводилось в программном комплексе DEFORM-2D/3D.

Марка материала штампа – 5ХНВ. Температурный интервал штамповки заготовок из стали марки 13X11H2B2MФ-Ш – 1250-850°C.

Виртуальные эксперименты проводились при следующих параметрах: температура заготовки, устанавливаемой в штамп – 1180°C; температура штампа – 250°C; твёрдость штампа по шкале Бринелля – 372 *HB*; фактор трения $m = 0,3$ с учетом применяемой технологической смазки.

3.6 Результаты компьютерного моделирования производственного процесса штамповки поковки из стали

В технологическом процессе предприятия перед штамповкой мерная заготовка круглого сечения осаживалась, а затем протягивалась для придания квадратного поперечного сечения. Следовательно, происходили потери не только времени и сил кузнеца-штамповщика, но и электроэнергии на дополнительные переходы на этапах формообразования, приводят к уменьшению производительности.

Последовательность изменения геометрии заготовки представлена на рисунке 3.51.

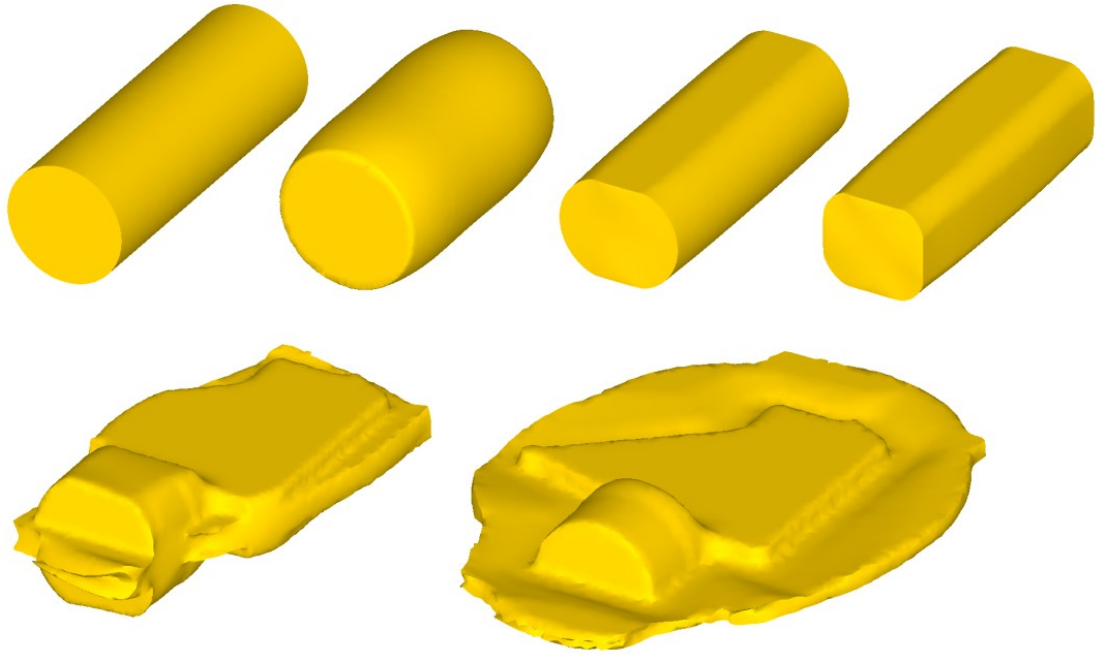


Рис. 3.51. Изменение геометрии заготовки в ходе процесса горячей объёмной штамповки стальной поковки по производственной технологии

Температура поковки (рисунок 3.52) в конце деформации в левой части превышает температурный интервал штамповки на 60°C , вследствие деформационного нагрева. Остальная часть поковки имеет температуру, не выходящую за интервал штамповки. Для предотвращения температурных дефектов в поковке, температуру нагрева рекомендуется уменьшить на 60°C .

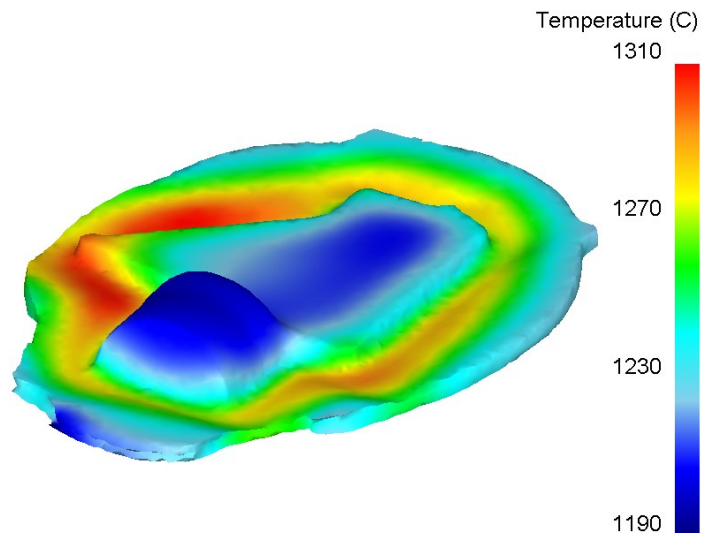


Рис. 3.52. Температура стальной поковки после последнего перехода штамповки производственного процесса

Максимальное значение интенсивности напряжений (рисунок 3.53)

достигает 406 МПа. Данное значение не превышает значения предела прочности материала, что говорит об отсутствии дефектов в виде трещин в поковке.

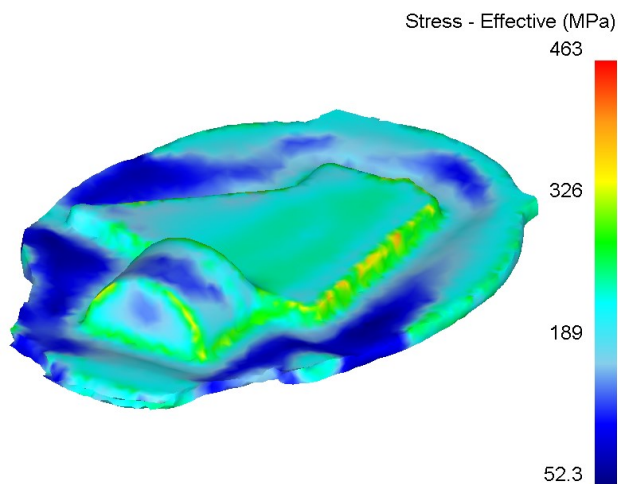


Рис. 3.53. Интенсивность напряжений стальной поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

Средние напряжения стальной поковки производственного процесса (рисунок 3.54) – сжимающие, с максимальным значением 1710 МПа, что способствует повышению механических свойств поковки. Напряжения в поковки уменьшаются от центра к краю, минимальное значение находится в левой части поковки и принимает значение 300 МПа.

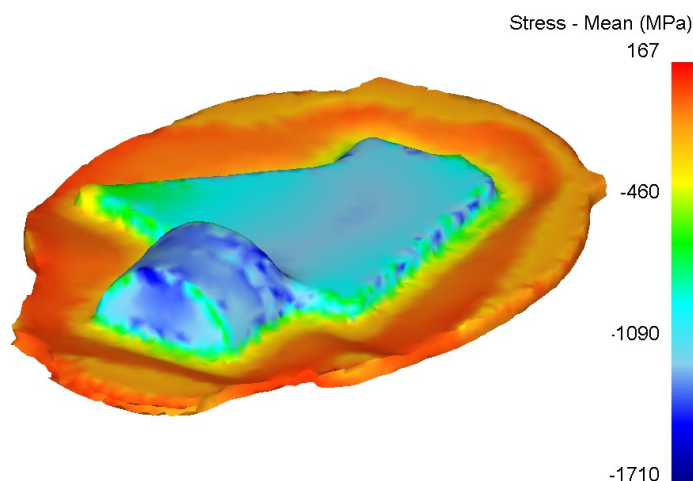


Рис. 3.54. Средние напряжения стальной поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

Интенсивность деформаций (рисунок 3.55), характеризующая прочность заготовки после обработки, говорит нам о равномерности

механических свойств будущего изделия. Среднее значение интенсивности деформации составляет 1,33 мм/мм. Минимальное значение находится в области хвостовика поковки и составляет 0,49 мм/мм. Дефект по недоштамповке отсутствует.

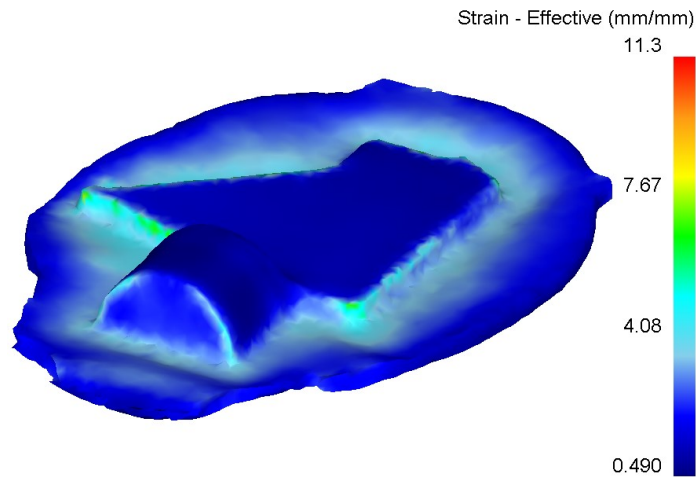


Рис. 3.55. Интенсивность деформаций стальной поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

Исследование и оценку износа штампов стальной поковки в процессе ГОШ также будем проводить по модели Арчарда (3.1) в зонах наибольшего износа.

В процессе штамповки штамп нагревается от контакта с горячей заготовкой, за одну штамповку температура штампа (рисунок 3.56 и 3.58) в среднем увеличилась на 5-8°C, а температура отдельных участков на 14°C.

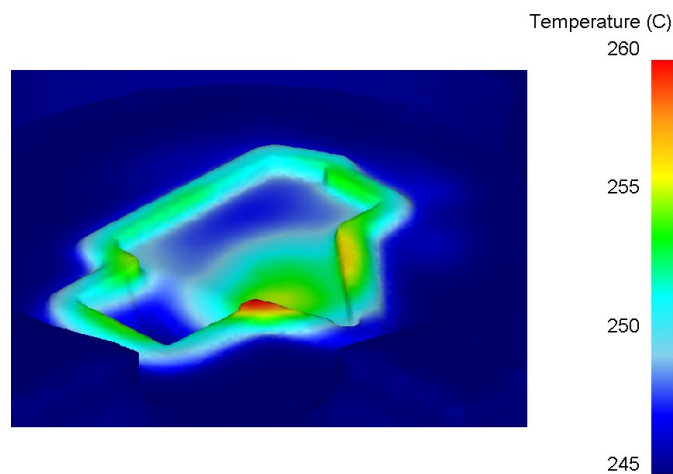


Рис. 3.56. Температура верхней половины штампа стальной поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

После штамповки одной поковки максимальный износ верхней и нижней половины штампа (рисунок 3.57 и 3.59) составил 0,110 мкм. Участки с износом более 0,110 мкм образовались вследствие искажения гравюры штампа из-за невысокой плотности сетки КЭ, поэтому такие значения не учитываем.

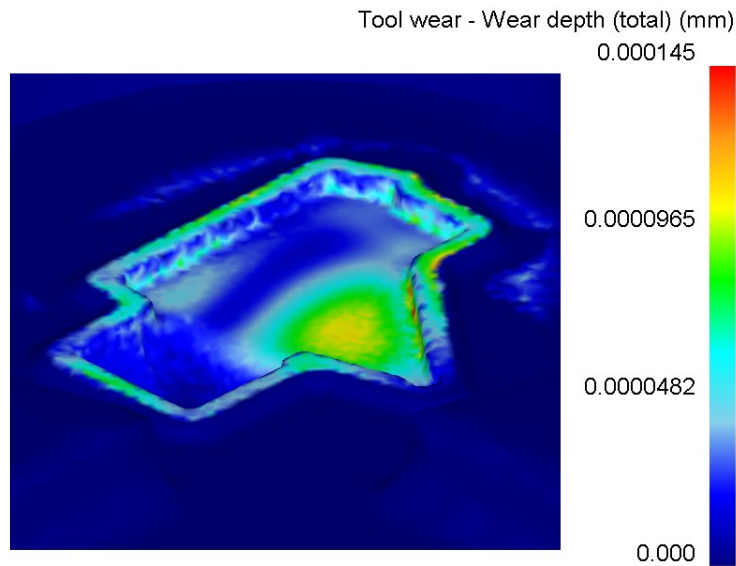


Рис. 3.57. Износ верхней половины штампа стальной поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

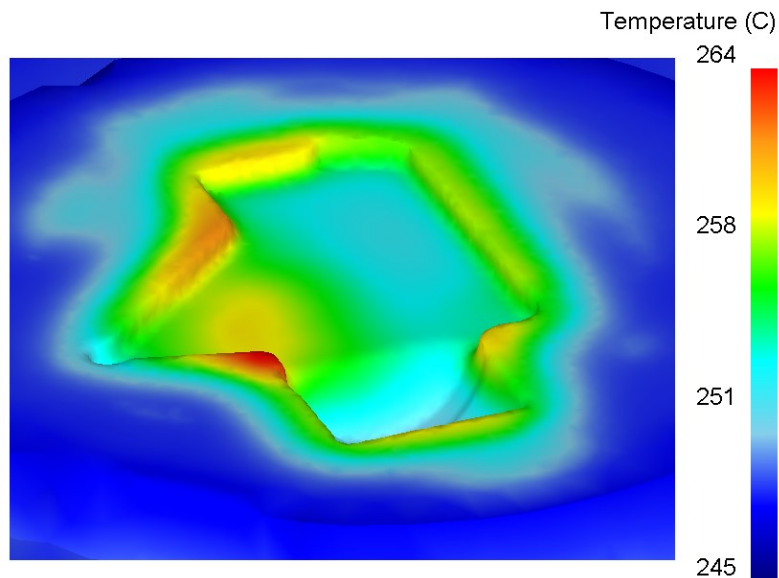


Рис. 3.58. Температура нижней половины штампа стальной поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

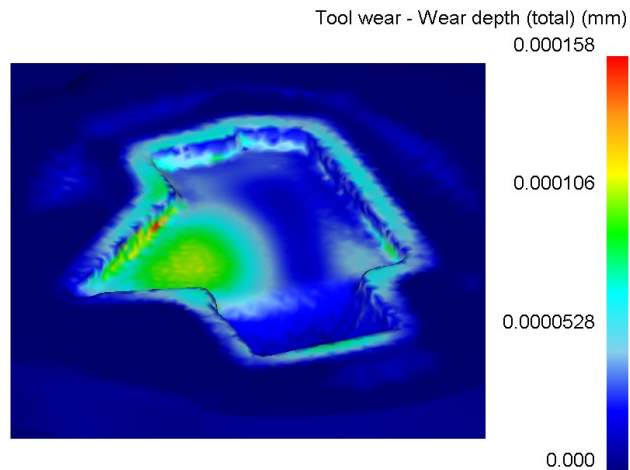


Рис. 3.59. Износ нижней половины штампа стальной поковки на последнем переходе штамповки производственного процесса

Максимальное значение износа для обеих половин штампа одинаково, зона наибольшего износа находится на участке сужения полотна поковки.

3.7 Результаты компьютерного моделирования предлагаемого процесса штамповки поковки из стали

В предлагаемом технологическом процессе перед штамповкой прутки круглого сечения также осаживались для снятия окалины, а также увеличения площади поперечного сечения заготовки.

Изменения геометрии заготовки иллюстрируется на рисунке 3.60.

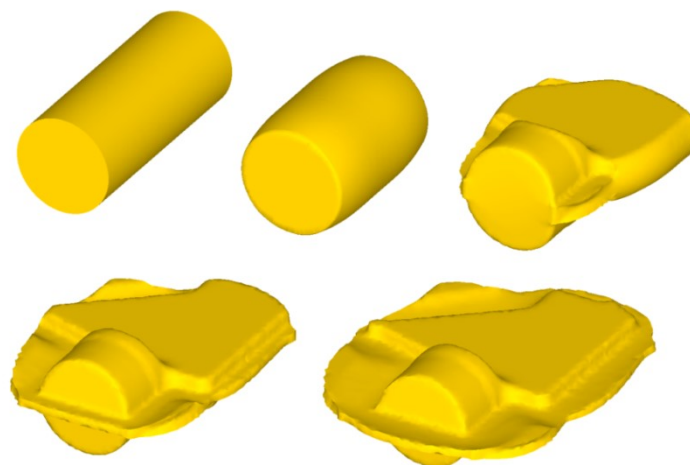


Рис. 3.60. Изменение геометрии заготовки в ходе процесса горячей объёмной штамповки стальной поковки по предлагаемой технологии

Температура поковки (рисунок 3.61) в конце деформации, как и в производственном процессе, в левой части имеет максимальную температуру, но в данном случае не превышает температурный интервал штамповки.

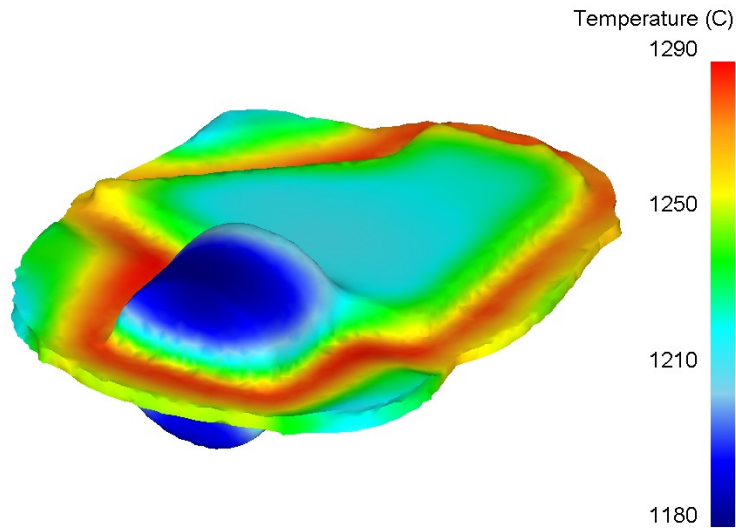


Рис. 3.61. Температура стальной поковки после последнего перехода штамповки предлагаемого процесса

Максимальное значение интенсивности напряжений (рисунок 3.62) достигает 406 МПа, также как и в производственном процессе, однако распределены они более равномерно.

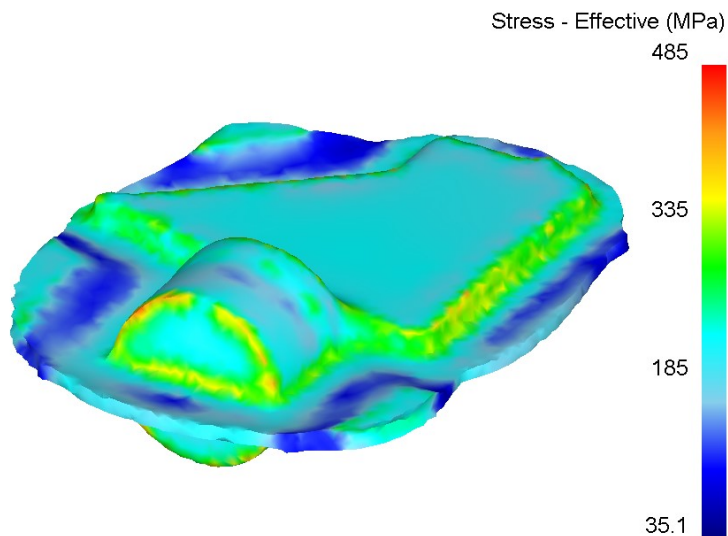


Рис. 3.62. Интенсивность напряжений стальной поковки на последнем переходе штамповки предлагаемого процесса

В предлагаемом процессе средние напряжения (рисунок 3.63) стальной поковки – сжимающие, с максимальным значением 1890 МПа, что способствует повышению механических свойств поковки. Напряжения в полотно поковки уменьшаются от центра к краю, минимальное значение находится в левой части поковки и принимает значение 680 МПа.

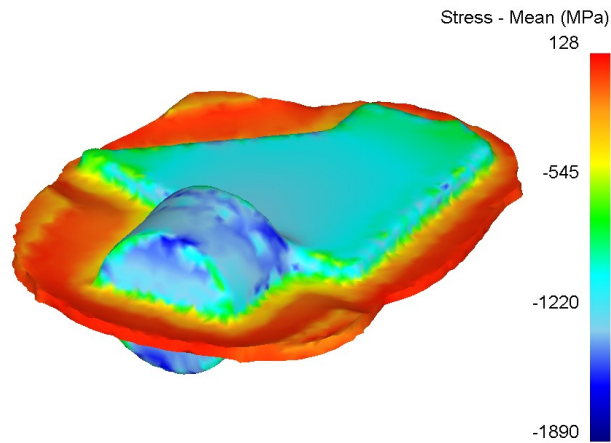


Рис. 3.63. Средние напряжения стальной поковки на последнем переходе штамповки предлагаемого процесса

Интенсивность деформаций в предлагаемом процессе (рисунок 3.64), говорит нам о равномерности механических свойств будущего изделия. Среднее значение интенсивности деформации в полотно поковки составляет 1,55 мм/мм, что говорит о более высокой степени «проработки» поковки. Минимальное значение находится в области хвостовика поковки и составляет 0,209 мм/мм. Гравюра штампа заполнена полностью.

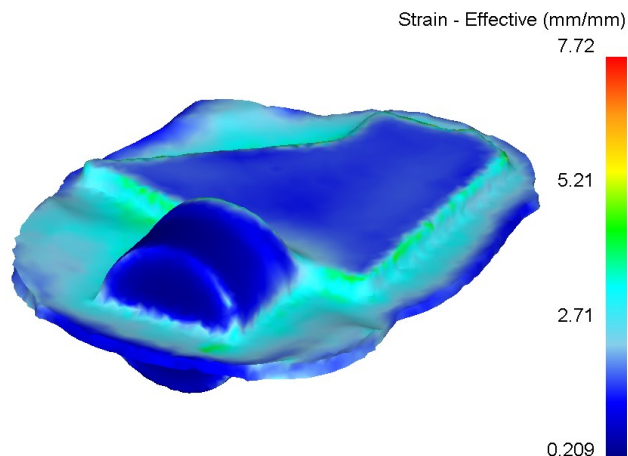


Рис. 3.64. Интенсивность деформаций стальной поковки на последнем переходе штамповки предлагаемого процесса

В процессе штамповки по предлагаемой технологии, как и в случае с производственной технологией, штамп нагревается от контакта с горячей заготовкой за одну штамповку (рисунок 3.65 и 3.67) в среднем на 5-8°C, а температура отдельных участков на 11°C.

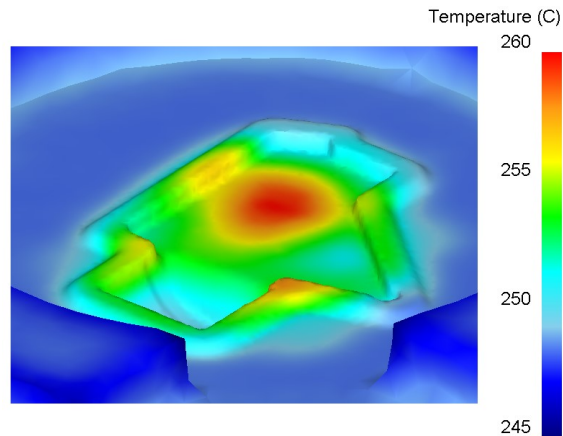


Рис. 3.65. Температура верхней половины штампа стальной поковки на последнем переходе штамповки предлагаемого процесса

После штамповки одной поковки максимальный износ верхней и нижней половины штампа (рисунок 3.66 и 3.68) составил 0,0867 мкм. Участки с повышенным износом вследствие искажения гравюры штампа из-за невысокой плотности сетки КЭ – не учитывались.

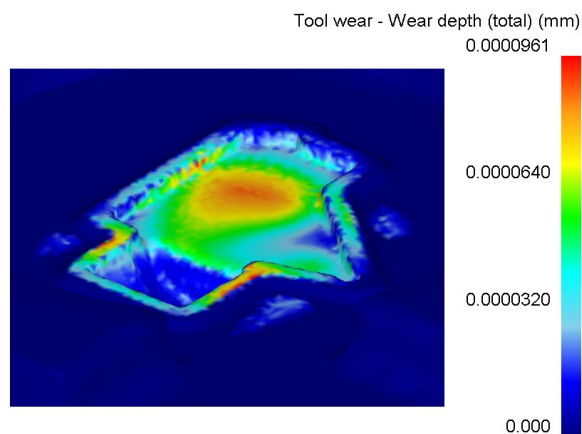


Рис. 3.66. Износ верхней половины штампа стальной поковки на последнем переходе штамповки предлагаемого процесса

Максимальное значение износа для обеих половин штампа одинаково, зона наибольшего износа находится в области выше центра полотна поковки.

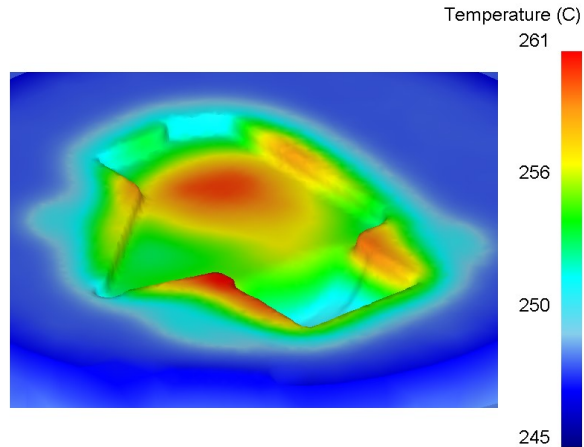


Рис. 3.67. Температура нижней половины штампа стальной поковки на последнем переходе штамповки предлагаемого процесса

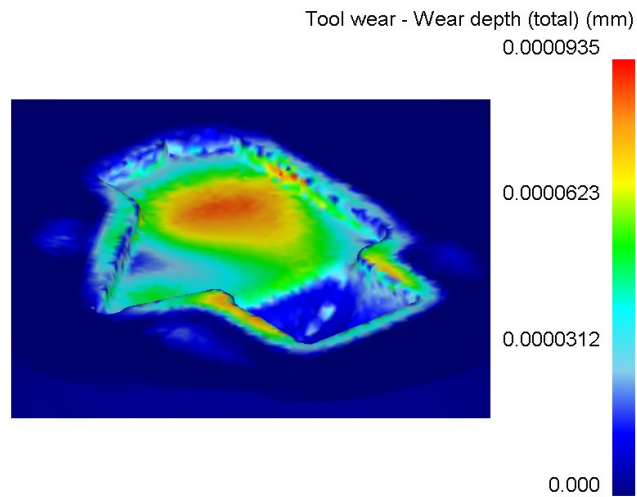


Рис. 3.68. Износ нижней половины штампа стальной поковки на последнем переходе штамповки предлагаемого процесса

По сравнению с производственной технологией, износ штампа на самой нагруженной зоне ручья предлагаемого технологического процесса уменьшился на 23%, а экономия металла заготовки составила 15%. Механические свойства поковки предлагаемого процесса лучше, чем поковки производственного, за счёт более высоких значений сжимающих напряжений, в среднем на 10%.

Сравнение производственных данных по стойкости штампов и моделирования показало, что необходимо скорректировать коэффициент K в модели Арчарда (3.1). Исходя из анализа, новое значение коэффициента должно составлять 0,000284.

3.8 Выводы по главе 3

1. С помощью компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM-2D/3D проанализировали напряжённое состояние поковок деталей типа «лопасть». Напряжения, возникающие в поковках – сжимающие, что способствует повышению их механических свойств. Для рассмотренной поковки из АК4-1 средние напряжения имеют следующие значения при штамповке: по производственному процессу – 379-143 МПа; сдвоенной поковки в штампе тип А – 470-120 МПа; в штампе тип Б – 470-120 МПа; в штампе тип В – 381-116 МПа; в штампе с ограничителем – 450-110 МПа. Для рассмотренной поковки из 13Х11Н2В2МФ-Ш при штамповке по: производственному процессу – 1710-300 МПа; предлагаемому процессу – 1890-680 МПа.

2. Во всех предлагаемых процессах операции пластического деформирования проводятся с одного нагрева, а для алюминиевой поковки ещё и за один ход, уменьшая затраты времени и энергии, в особенности на необходимость в проведении промежуточных нагревов. Кроме того, в случае с алюминиевой поковкой, технология штамповки сдвоенной поковки позволит в большей степени использовать мощность оборудования, а не тратить энергию вхолостую. При назначении параметров процесса необходимо учесть наличие деформационного разогрева поковок. Кроме того, следует уделять особое внимание охлаждению штампов при штамповке алюминиевых поковок.

3. Наиболее удачным вариантом технологического процесса горячей объёмной штамповки алюминиевой поковки является технология штамповки сдвоенной поковки в штампе тип Б. Согласно данным моделирования, стойкость этого штампа, по сравнению с производственным, повысилась на 62%. Также, такая конструкция штампа позволит компенсировать возникающие в процессе штамповки сдвигающие силы,

действующие на штамп и ползун прессы, и будет способствовать уменьшению износа направляющих штампа и прессы, и увеличению геометрической точности поковок.

4. По сравнению с производственной технологией горячей объёмной штамповки стальной поковки, износ штампа предлагаемого процесса уменьшился на 23%. А механические свойства поковки предлагаемого процесса лучше, за счёт более высоких значений сжимающих напряжений, в среднем на 10%.

5. Сравнение производственных данных и моделирования показало, что необходимо скорректировать коэффициент K в модели Арчарда. Новое значение коэффициента 0,000284.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗНОСА ШТАМПОВОЙ СТАЛИ МАРКИ 5ХНВ

4.1 Методика проведения экспериментальных исследований стойкости на истирание штамповой стали марки 5ХНВ

Из анализа данных предприятия было установлено, что в большинстве случаев решение о непригодности штамповой оснастки принимается по признаку несоответствия размеров поковки чертежу, вследствие изменения размеров гравюры штампа из-за интенсивного течения металла. Из всех факторов, влияющих на износ штампового инструмента для штамповки поковок деталей типа «лопасть» наибольшее влияние оказывает истирание, поэтому уменьшение его величины будет в большей степени способствовать повышению стойкости штампов.

Задачей экспериментальных исследований являлось изучение влияния термической и химико-термической обработки (сульфидирования и азотирования) на способность материала инструмента сопротивляться истиранию. Эксперименты проводили на трёх видах образцов (рисунок 4.1.) из теплостойкой инструментальной стали марки 5ХНВ: термообработанные на твёрдость 41 HRC; термообработанные на твёрдость 41 HRC и подвергнутые сульфидированию с глубиной слоя 0,1 мм; азотированные на твёрдость 62 HRC с глубиной слоя 0,3 мм.

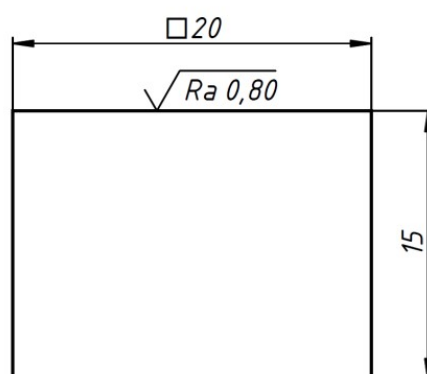


Рис. 4.1. Испытываемый образец

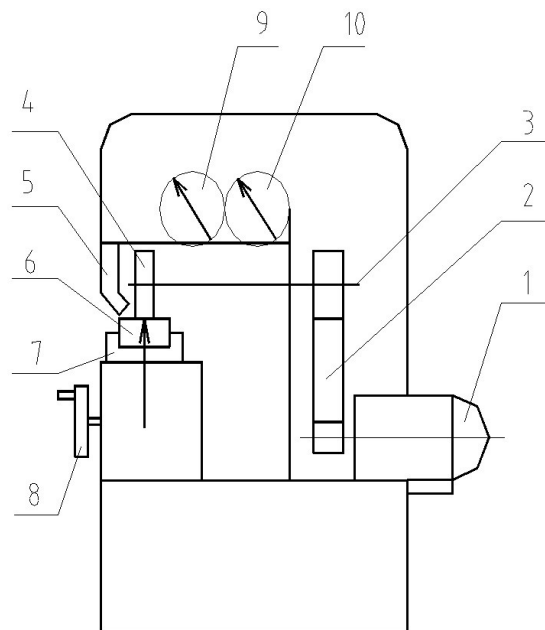
С целью определения влияния различной термической и химико-термической обработки на сопротивление истиранию была проведена серия экспериментов, в ходе которых образцы устанавливались в испытательную машину и зажимались в тиски, после чего к образцам прижимается ролик под нагрузкой. Вращающийся ролик начинает процесс износа образца. Нагрузка узла трения составила 10 кг, частота вращения ролика 675 об/мин, а время каждого испытания 15 мин. Для охлаждения и удаления абразивных частиц в зону трения подавался 0,5% раствор K_2CrO_4 . Более подробно методика испытаний описана в [39, 40, 41, 42].

4.2 Оборудование и инструмент экспериментальных исследований процесса износа

Испытания проводили на испытательной машине трения «Шкода-Савин», внешний вид и схема которой представлена на рисунке 4.2 [42].



а)



б)

Рис. 4.2. Испытательная машина трения «Шкода-Савин»: а – внешний вид; б – схема расположения узлов [42]

Передача вращения происходит по схеме: электродвигатель постоянного тока 1 – ременная передача 2 – вал 3 с роликом 4. Испытуемый образец 6 фиксируется в регулируемых тисках 7 и нагружается подводом к ролику 4 вертикальным перемещением салазок тисков 7 посредством вращения маховика 8, а для охлаждения узла трения в зону контакта подведена система подачи охлаждающей жидкости 5. Контроль давления ролика на испытываемый образец осуществляет индикатор нагрузки узла трения 9, а контроль количества оборотов ролика – счетчик 10 [42].

В рамках исследования счетчик оборотов 10 заменили портативным измерительным датчиком, монтируемым над роликом и регистрирующий его вертикальное перемещение в процессе истирания поверхности образца [42].

Основное назначение установки – определение сопротивления материалов истиранию роликом из сплава ВК8 (рисунок 4.3), практически не подверженному износу [42], что было верифицировано контрольными тестами.

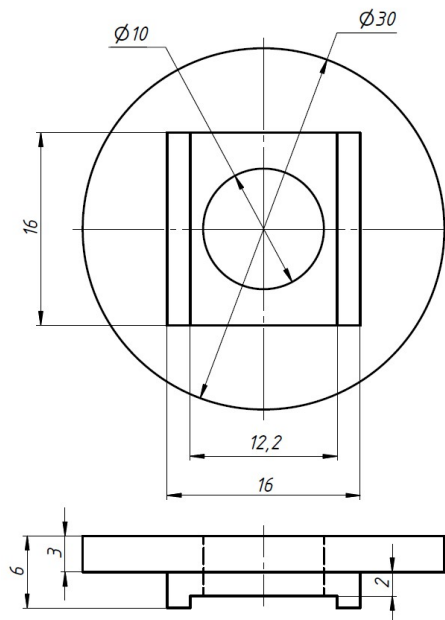


Рис. 4.3. Испытательный ролик

Испытуемые образцы фиксировались в регулируемых тисках, оснащенных механизмом вертикального перемещения при вращении маховика (рисунок 4.4). Выравнивание поверхности образца относительно

ролика осуществлялось регулировкой положения тисков, после чего производился подъем системы до контакта с роликом [42].

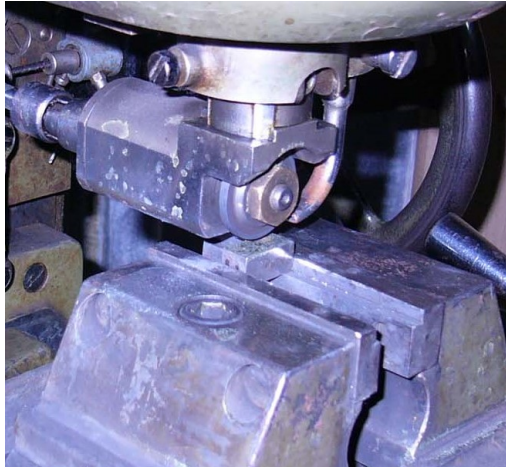


Рис. 4.4. Схема установки образца в узле трения испытательной машины «Шкода-Савин» [42]

Завершение установки образца подтверждается визуальным отсутствием зазора между роликом и образцом [42], а также нулевым положением стрелки индикатора 9. Далее осуществляется подъем тисков для создания необходимой нагрузки на ролик (два полных оборота основной стрелки индикатора), после чего положение салазок фиксируется зажимом. На завершающем этапе производится обнуление показаний датчика, включается система подачи жидкости и машина приводится в действие.

Испытательный цикл завершается после истечения заданного времени, затем блокируется поступление жидкости, освобождается зажимное устройство, и образец вместе с тисками перемещается в нижнее положение.

4.3 Результаты экспериментальных исследований процесса износа образцов из штамповой стали 5ХНВ

Для обеспечения большей статистической точности результатов, испытания на каждом образце проводилось трижды, после каждого

испытания образец смешался относительно ролика так, чтоб новая «лунка» не пересекалась со старой (рисунки 4.5-4.9). Расположение пятен контакта пары трения вблизи одной из граней обусловлено удобством подачи охлаждающей жидкости к поверхности контакта (подвод охлаждающей жидкости находился с противоположной стороны).

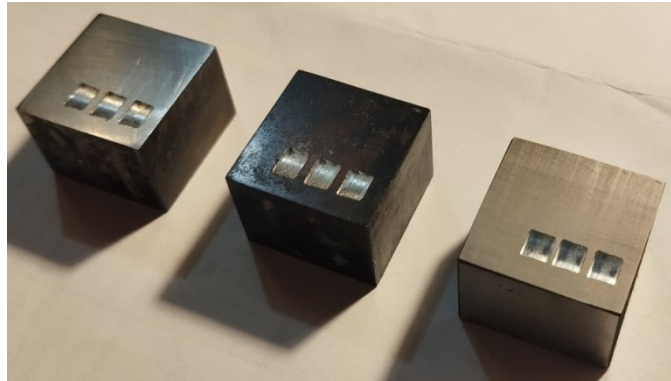


Рис. 4.5. Образцы после испытаний (слева направо): термообработанный; с сульфидированием; азотированный

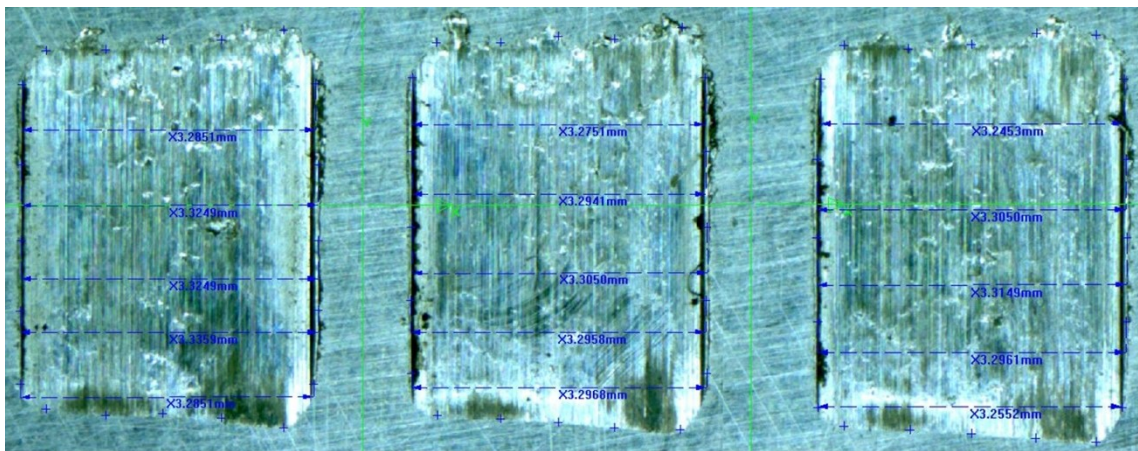


Рис. 4.6. Ширина пятен контакта термообработанного образца

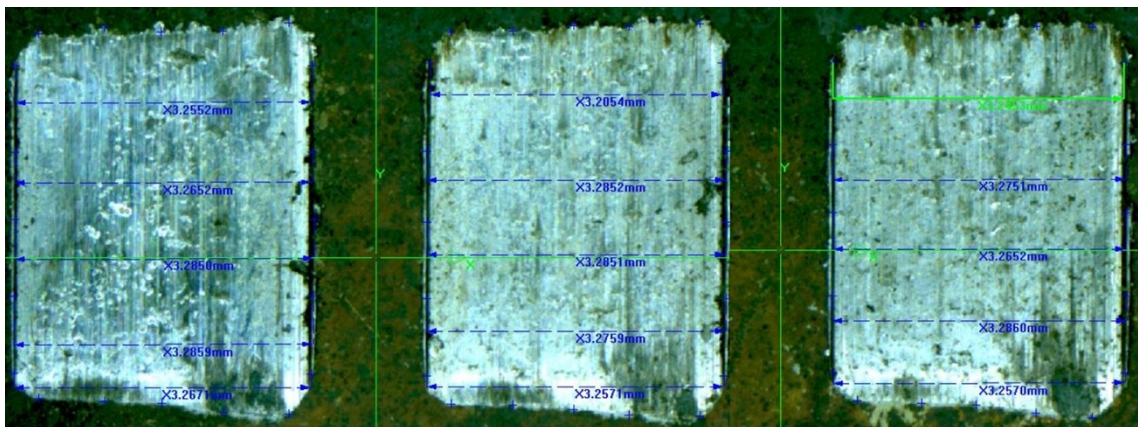


Рис. 4.7. Ширина пятен контакта образца подвергнутого сульфидированию

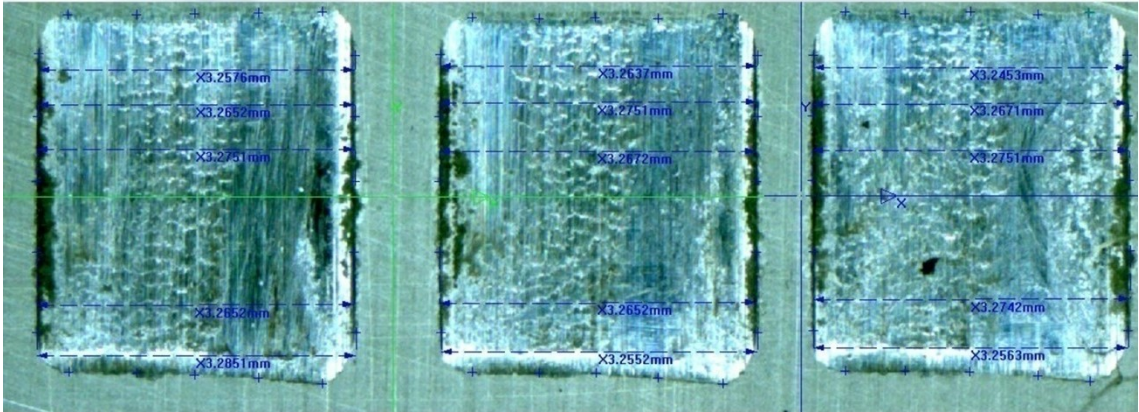


Рис. 4.8. Ширина пятен контакта азотированного образца

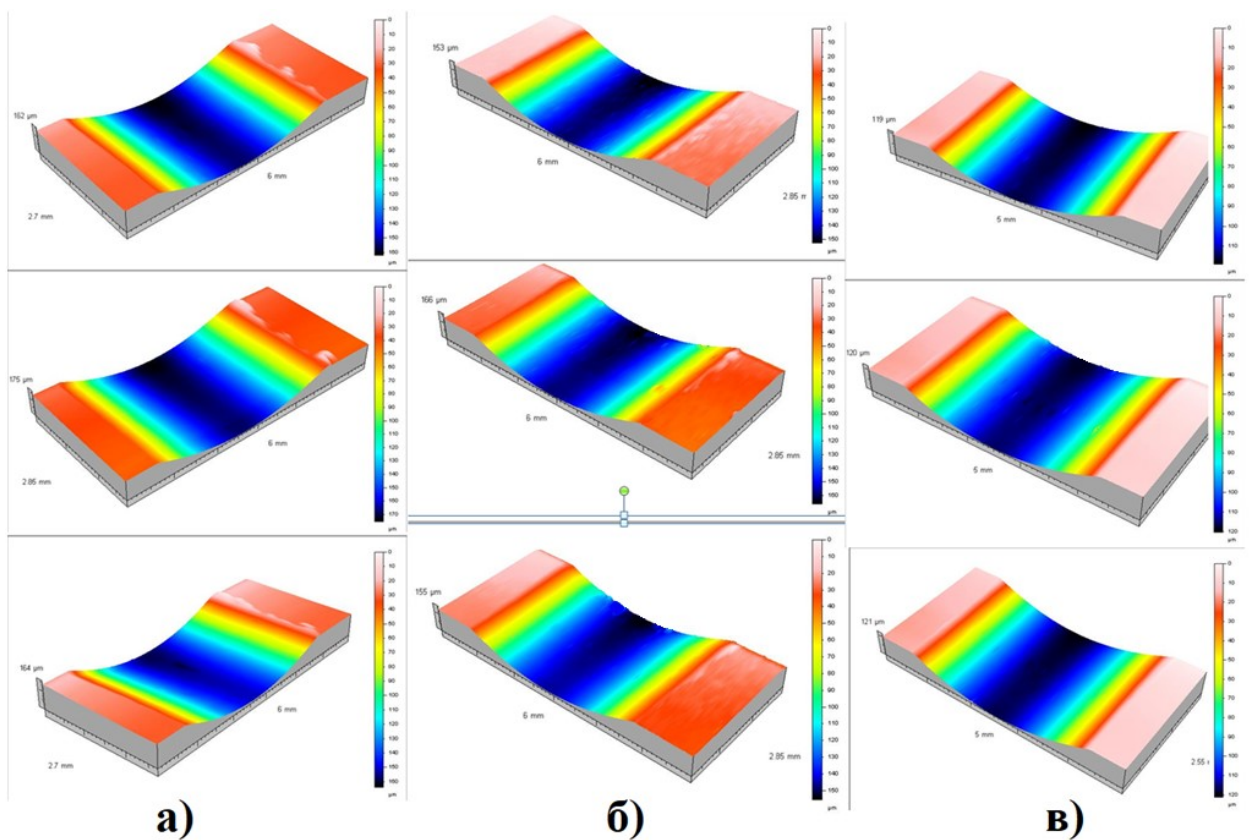


Рис. 4.9. Глубина пятен контакта образцов: а) – термообработанного; б) – сульфидированного; в) – азотированного

В ходе испытаний датчик каждые 1,5 секунды фиксировал положение ролика и записывал результат на компьютер. Усреднённые результаты испытаний образцов на истирание были аппроксимированы с помощью полинома второго порядка (рисунки 4.10-4.12).

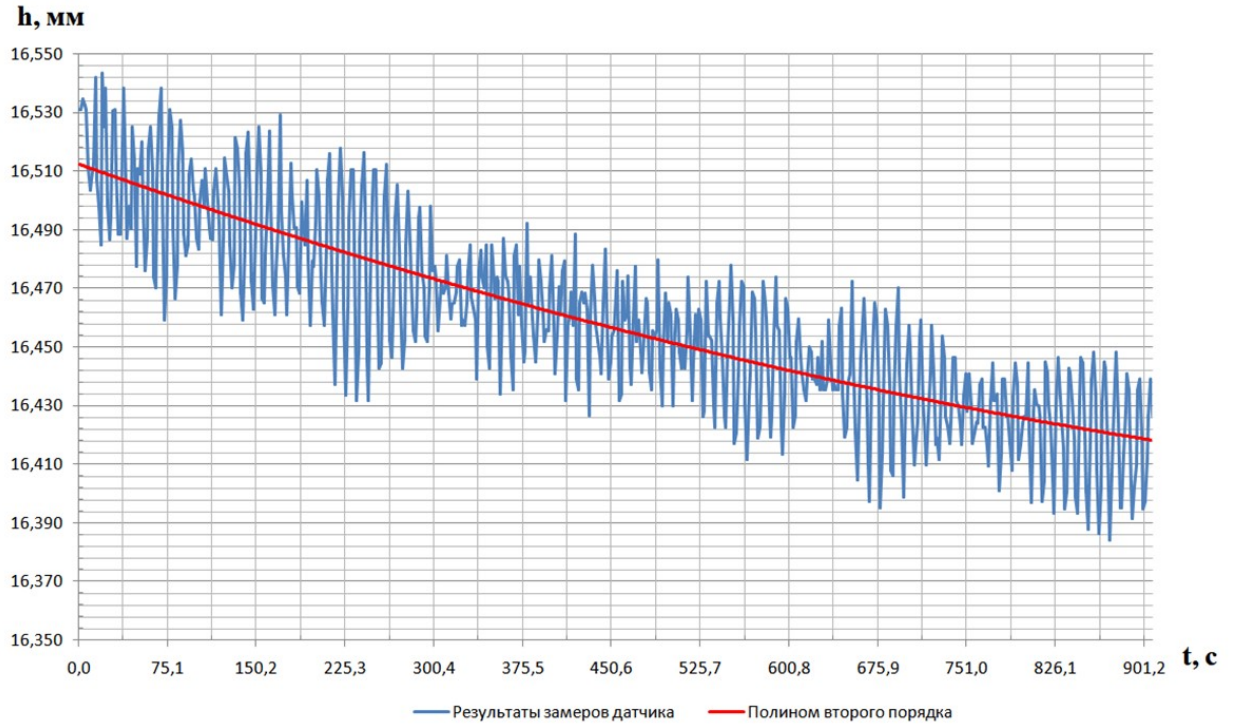


Рис. 4.10. Усреднённые результаты испытаний термообработанного образца и аппроксимирующая функция

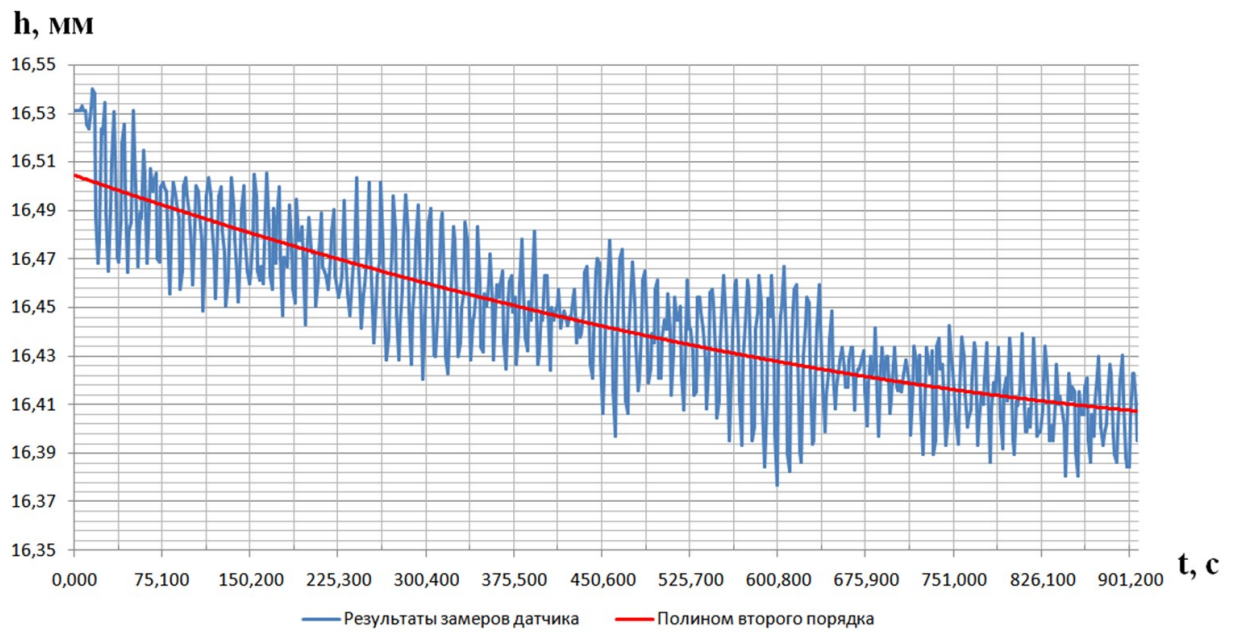


Рис. 4.11. Усреднённые результаты испытаний термообработанного образца с сульфидированием и аппроксимирующая функция

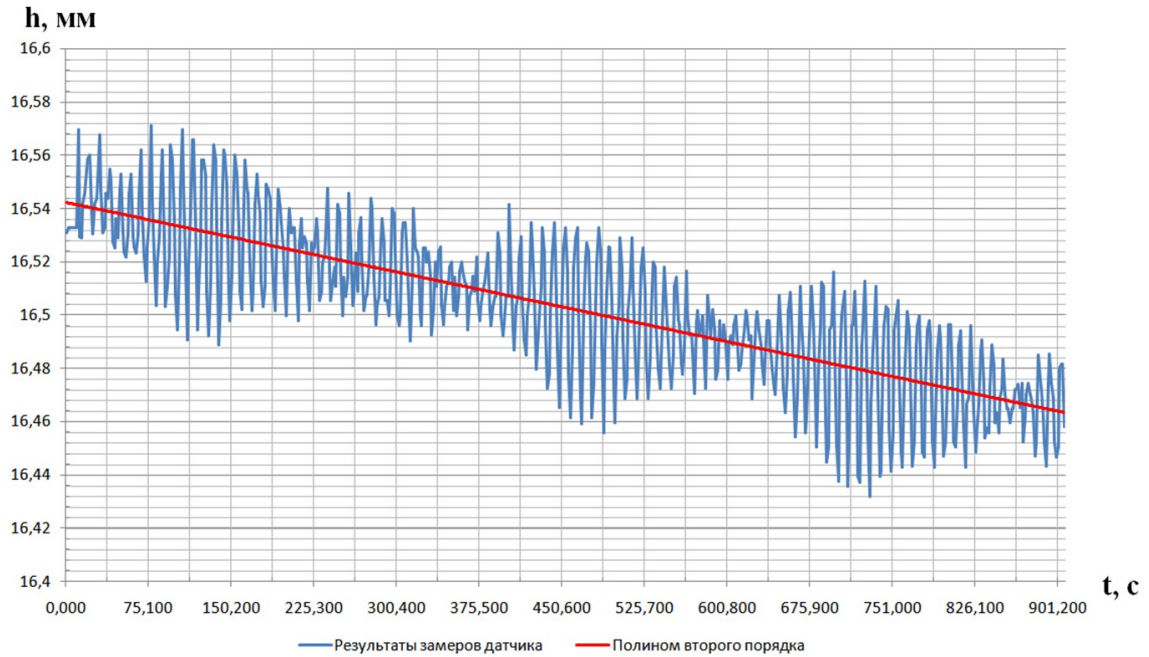


Рис. 4.12. Усреднённые результаты испытаний азотированного образца и аппроксимирующая функция

После чего сведены в графиках, представленных на рисунках 4.13 и 4.14.

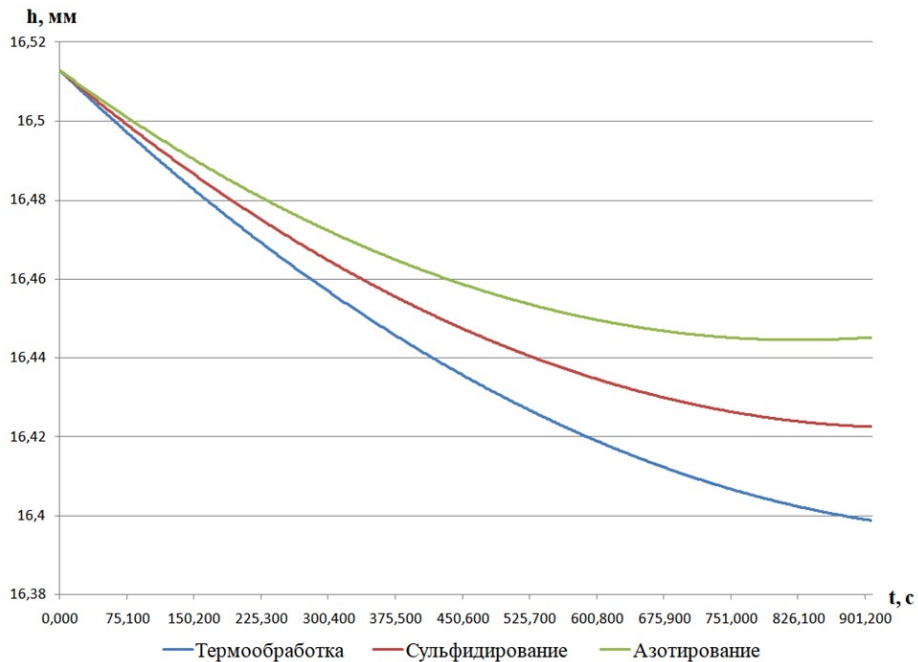


Рис. 4.13. График зависимости уменьшения высоты образца от времени испытания

При испытании термообработанного образца за 15 мин износ составил 0,114 мм, образца с сульфидированием – 0,09 мм; азотированного образца –

0,068 мм.

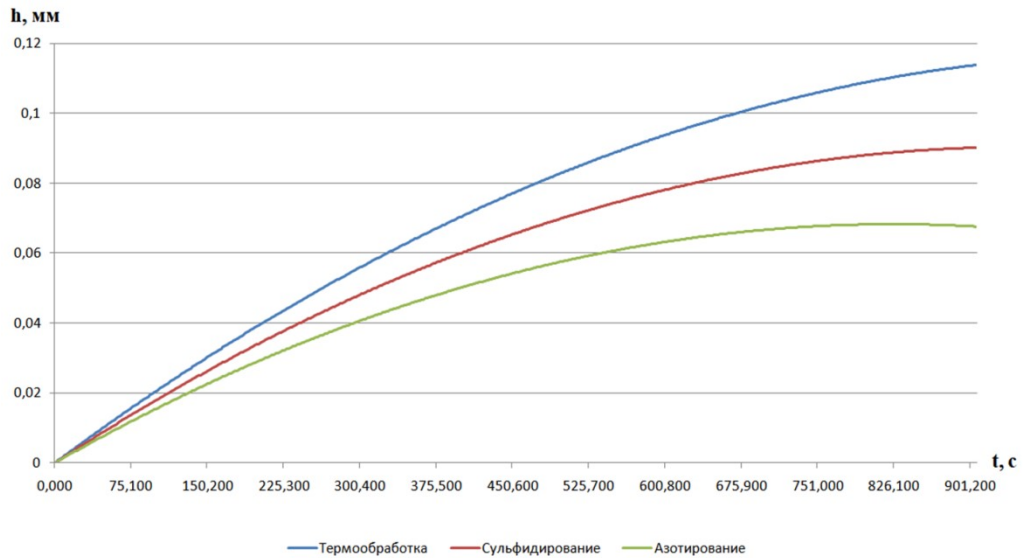


Рис. 4.14. Кривые изнашивания образцов из стали 5ХНВ в зависимости от вида термической/химико-термической обработки

Зная исходные геометрические размеры контртела (рисунок 4.3), и принимая их постоянными, а также линейное заглубление ролика, можно определить и проанализировать изменение во времени основных трибологических характеристик, таких как: объемный износ, скорость изнашивания, интенсивность изнашивания [39, 40, 41].

Объемный износ рассчитывается как величина выработанного сегмента, исходя из геометрии ролика и величины его заглубления (рисунок 4.15).

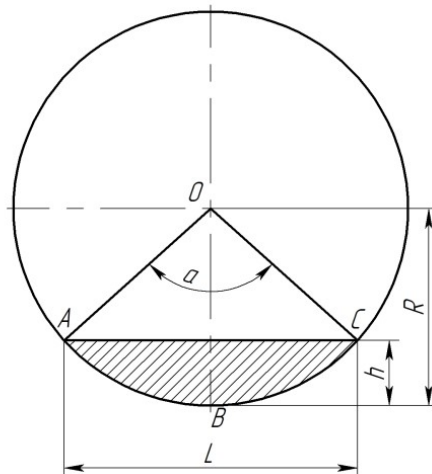


Рис. 4.15. Схема расчёта объемного износа

$$S_{ABC} = \frac{R^2}{2} \left(2 \arccos \frac{R-h}{R} - \sin \left(2 \arccos \frac{R-h}{R} \right) \right), \quad (4.1)$$

где S_{ABC} – площадь выработанного сегмента, мм²; R – радиус ролика, мм; h – величина заглубления, мм.

$$V_{\text{изн.}} = S_{ABC} \cdot b, \quad (4.2)$$

где $V_{\text{изн.}}$ – объёмный износ, мм³; b – ширина ролика, мм.

Интенсивность изнашивания определяется отношением объемного износа к пути трения:

$$I_{\text{изн.}} = V_{\text{изн.}}/l, \quad (4.3)$$

где l – путь трения, мм.

Путь трения вычисляется исходя из времени испытания, количества оборотов диска в единицу времени и параметров диска.

$$l = t \cdot \omega \cdot 2\pi R, \quad (4.4)$$

где t – время испытания, мин; ω – количество оборотов (675 об/мин).

Скорость изнашивания – это отношение объемного износа к времени испытания.

$$v_{\text{изн.}} = V_{\text{изн.}}/t, \quad (4.5)$$

Исходя из полученных данных, проанализируем основные трибологические характеристики для испытанных образцов и представим графически на рисунке 4.16.

Объёмный износ:

$$\begin{aligned} V_{\text{изн.ТО}} &= \frac{15^2}{2} \left(2 \arccos \frac{15 - 0,114}{15} - \sin \left(2 \arccos \frac{15 - 0,114}{15} \right) \right) \cdot 3 = \\ &= 0,843 \text{ мм}^3; \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{изн.Сульф.}} &= \frac{15^2}{2} \left(2 \arccos \frac{15 - 0,09}{15} - \sin \left(2 \arccos \frac{15 - 0,09}{15} \right) \right) = \\ &= 0,591 \text{ мм}^3; \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{изн.Азот.}} &= \frac{15^2}{2} \left(2 \arccos \frac{15 - 0,068}{15} - \sin \left(2 \arccos \frac{15 - 0,068}{15} \right) \right) = \\ &= 0,387 \text{ мм}^2. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Интенсивность изнашивания:

$$I_{\text{изн.ТО}} = 0,843/15 \cdot 675 \cdot 2\pi \cdot 15 = 0,9^{-6}; \quad (4.9)$$

$$I_{\text{изн.Сульф.}} = 0,591/15 \cdot 675 \cdot 2\pi \cdot 15 = 0,6^{-6}; \quad (4.10)$$

$$I_{\text{изн.Азот.}} = 0,387/15 \cdot 675 \cdot 2\pi \cdot 15 = 0,4^{-6}. \quad (4.11)$$

Скорость изнашивания:

$$v_{\text{изн.ТО}} = 0,843/15 = 0,056 \text{ мм/мин}; \quad (4.12)$$

$$v_{\text{изн.}} = 0,591/15 = 0,039 \text{ мм/мин}; \quad (4.13)$$

$$v_{\text{изн.}} = 0,387/15 = 0,026 \text{ мм/мин}. \quad (4.14)$$

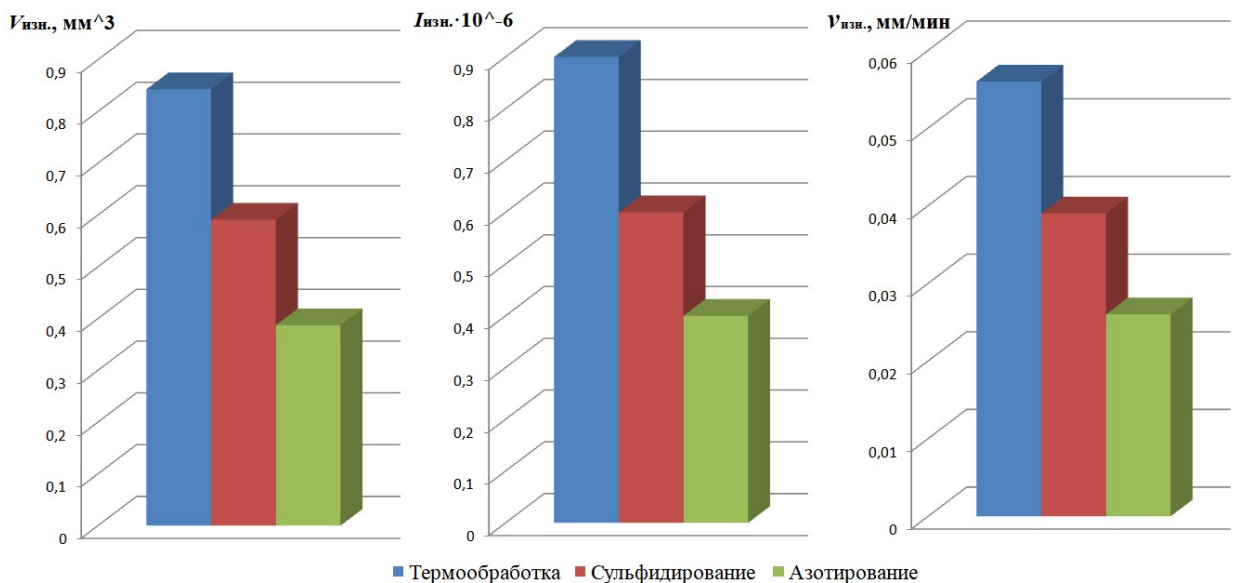


Рис. 4.16. Графическое представление основных трибологических характеристик испытанных образцов из стали 5ХНВ в зависимости от вида обработки

Проанализировав результаты испытаний на истирание трёх видов образцов, можно сделать вывод что, по сравнению с термообработкой стали марки 5ХНВ на твёрдость 41 HRC, дополнительное сульфидирование увеличило износостойкость в среднем на 25%, а проведение азотирования на твёрдость 62 HRC – на 67%.

4.4 Выводы по главе 4

1. С помощью испытательной машины трения «Шкода-Савин» провели ряд экспериментов по испытанию на истирание образцов из штамповой стали марки 5ХНВ, подвергнутых различным термическим и химико-термическим обработкам. Было установлено, что, по сравнению с термообработкой стали марки 5ХНВ на твёрдость 41 HRC, дополнительное сульфидирование увеличило износостойкость образцов в среднем на 25%, а проведение азотирования на твёрдость 62 HRC – на 67%.

2. По результатам испытаний были рассчитаны основные трибологические характеристики образцов из стали марки 5ХНВ, такие как: объёмный износ, интенсивность и скорость изнашивания. Объёмный износ образца подвергнутого: термообработке – $0,843 \text{ мм}^3$; сульфидированию – $0,591 \text{ мм}^3$; азотированию – $0,387 \text{ мм}^3$. Интенсивность износа образца подвергнутого: термообработке – $0,9^{-6}$; сульфидированию – $0,6^{-6}$; азотированию – $0,4^{-6}$. Скорость изнашивания образца подвергнутого: термообработке – $0,056 \text{ мм/мин}$; сульфидированию – $0,039 \text{ мм/мин}$; азотированию – $0,026 \text{ мм/мин}$.

3. На основе проведённых исследований построили кривые изнашивания штамповой стали марки 5ХНВ в зависимости от вида термической/химико-термической обработки (рисунок 4.14), которые позволяют, с определённой точностью, оценить влияние данных видов обработки на способность материала к сопротивлению изнашивания.

ГЛАВА 5. ПЛАНИРОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ СТАЛИ МАРКИ 5ХНВ ПРИ ШТАМПОВКЕ ПОКОВОК ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ЛОПАСТЬ»

5.1 Цель и задачи планирования эксперимента

Для проведения эксперимента (физического или компьютерного) необходимо выявить факторы, которые будут оказывать наибольшее влияние на параметры процесса.

Чтобы верно и грамотно провести научное исследование процесса посредством эксперимента, необходимо однозначно сформулировать его цели и поставить задачи, решение которых позволит определить интересующие параметры процесса и влияющие на него факторы, которые необходимо проконтролировать.

Цель планирования эксперимента: получение математических моделей отражающей взаимосвязи технологических параметров процессов и величины максимального износа штампового инструмента из стали марки 5ХНВ при штамповке поковок деталей типа «лопасть» по модели Арчарда за одну штамповку.

Задачи планирования эксперимента:

1. Определить факторы, которые предположительно окажут наибольшее влияние на износостойкость штампового инструмента;
2. Составить матрицу планирования;
3. Получить математические модели в виде уравнений регрессии;
4. Проверить модели на адекватность.

5.2 Оцениваемая характеристика

При проектировании технологического процесса, необходимо учитывать оборудование, на котором он будет осуществляться, и какие характеристики будут оцениваться у полученного объекта.

В связи с этим, характеристикой для оценки рациональности технологического процесса штамповки поковок деталей типа «лопасть», изготавливаемых по предлагаемой технологии, в сравнении с изготовлением по заводской технологии, было принято решение взять – износ штампового инструмента из стали марки 5ХНВ по модели Арчарда за одну штамповку.

Эксперименты будут проводиться как на ЭВМ при помощи моделирования в программном комплексе DEFORM-2D/3D, так и физически на территории предприятия. Так как объектами исследования выступают два различных штампа, участвующие в двух различных технологических процессах и устанавливаемых на разное оборудование, то для каждого будет составлено своё уравнение регрессии.

5.3 Факторы процесса штамповки поковок деталей типа «лопасть» и уровни их варьирования

Факторы, которые будут варьироваться:

1. Технология штамповки. В главе 2 были рассмотрены несколько вариантов технологических процессов штамповки поковок деталей типа «лопасть». Варьировать технологию штамповки будем на двух уровнях: производственная и предлагаемая (на основе выводов в главе 3).
2. Объём заготовки. Объём заготовки будем варьировать на двух уровнях: для производственного процесса штамповки алюминиевой поковки – 276948 мм^3 (480420 мм^3 для стальной) и для предлагаемого процесса

штамповки алюминиевой поковки – 425000 мм³ (395640 мм³ для стальной).

3. Твёрдость рабочей поверхности (гравюры) штампа. Так как штамп может подвергаться различным видам термической, химико-термической и другим видам обработки, то его твёрдость может быть различна. Даже при изготовлении штампов по одной и той же технологии их твёрдость не будет одинакова. Варьировать будем твёрдость поверхности ручья штампа на трёх уровнях: 40, 50 и 60 HRC.

4. Температура заготовки. Температуру заготовки будем варьировать на четырёх уровнях: для технологического процесса штамповки поковки из АК4-1 – 470, 440, 410 и 380°C; для процесса штамповки поковки из 13X11H2B2MФ-Ш – 1180, 1130, 1080 и 1030°C.

5.4 Построение матрицы плана эксперимента

В данном исследовании варьируются четыре фактора. Два из которых варьируются на двух уровнях, один на трёх и один на четырёх. Согласно этому строим следующую модель:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{i=3}^4 b_{ii} X_i^2 + b_{iii} X_i^3, \quad (5.1)$$

где X_i – значение фактора; b_0 – коэффициент, стоящий при факторе; Y – значение исследуемого параметра.

План, соответствующий записанной модели обозначается $4 \times 3 \times 2^2 // 16$ и содержит 16 опытов. Полный факторный эксперимент для такого плана включал бы в себя $4 \times 3 \times 2^2 = 48$ опытов.

Так как готового плана под эту модель нет, то возьмём ближайший стандартный план дробного факторного эксперимента (рисунок 5.1.) и преобразуем его [52].

Номер плана	План	Способ построения	
		Вспомогательная матрица	Номера столбцов
1	$2^3//4$	$D//4$	1 – 3
2	$2^7//8$	$D//8$	1 – 7
3	$2^{11}//12$	$D//12$	1 – 11
4	$2^{15}//16$	$D//16$	1 – 15
5	$2^{19}//20$	$D//20$	1 – 19
6	$2^{23}//24$	$D//24$	1 – 23
7	$2^{27}//28$	$D//28$	1 – 27
8	$2^{31}//32$	$D//32$	1 – 31
9	$3^4//9$	$D//9$	1 – 4
10	$3^{13}//27$	$D//27$	1 – 13
11	$4^5//16$	$D//16$	16 – 20
12	$5^6//25$	$D//25$	1 – 6
13	$6^3//36$	$D//36$	4 – 6
14	$7^8//49$	$D//49$	1 – 8

Рис. 5.1. Равномерные симметричные планы мощности 2 [65]

План $4 \times 3 \times 2^2 // 16$ строим путем преобразования симметричного плана $4^5 // 16$ (таблица 5.1.).

Преобразования, которые будут использованы при построении плана, представлены на рисунке 5.2. [52].

Таблица 5.1

Матрица плана $4^5 // 16$ в кодах F_i

Номер опыта	F_0	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
1	0	0	0	0	0	0
2	0	2	0	2	1	3
3	0	3	0	3	3	1
4	0	1	0	1	2	2
5	0	0	2	2	3	2
6	0	2	2	0	2	1
7	0	3	2	1	0	3
8	0	1	2	3	1	0
9	0	0	3	3	2	3
10	0	2	3	1	3	0
11	0	3	3	0	1	2

12	0	1	3	2	0	1
13	0	0	1	1	1	1
14	0	2	1	3	0	2
15	0	3	1	2	2	0
16	0	1	1	0	3	3

Первый четырехуровневый фактор плана $4^5//16$ оставлен без изменения $F_1 \rightarrow F'_1$ ($S_r = 3, \psi_r = 1$); второй заменён на один трехуровневый с помощью преобразования 3б $F_2 \rightarrow F'_2$ ($S_r = 2, \psi_r = 0,9$); третий, также как и четвёртый, заменён на один двухуровневый с помощью преобразования 2в $F_3 \rightarrow F'_3; F_4 \rightarrow F'_4$ ($S_r = 1, \psi_r = 1$); столбец пятого фактора из матрицы плана $4^5//16$ вычеркнут.

<u>Преобразование 1</u>			<u>Преобразование 2</u>			<u>Преобразование 3</u>		
0	0 0		0	0 1 1		0	0 0	
1	→ 0 1		1	→ 1 0 1		1	→ 0 1	
2	1 0		2	1 1 0		2	1 0	
			3	0 0 0		3	2 1	
		Ψ_r			Ψ_r			Ψ_r
1а)	$3 \rightarrow 2^2$	** 0,67	2а)	$3 \rightarrow 2^3$	** * 1	3а)	$4 \rightarrow 3 \times 2$	** 0,6
1б)	$3 \rightarrow 2$	* 0,89	2б)	$3 \rightarrow 2^2$	* * 1	3б)	$4 \rightarrow 3$	* 0,9
			2в)	$3 \rightarrow 2$	* 1			

Рис. 5.2. Способы преобразования [52]

После преобразования плана оцениваем его близость к Q -оптимальному. Близость плана к Q -оптимальному оцениваем с помощью коэффициента эффективности преобразования Ψ по формуле:

$$\Psi = \frac{k}{1 - n + \sum_{r=1}^n \frac{1 + S_r'}{\psi_r}} \quad (5.2)$$

где k – число коэффициентов в модели, которую необходимо построить; n – число преобразований (включая тождественные); r – номер преобразования; $S_r = (S_1 - 1) + (S_2 - 1) + \dots$, где S_i – число уровней нового фактора, вводимого с помощью r -го преобразования; ψ_r – коэффициент эффективности r -го преобразования.

План Q -оптимален в том случае, когда $\Psi \rightarrow 1$. В нашем случае $k = 7$; $n = 4$; $S_1 = (4 - 1) = 3$; $S_2 = (3 - 1) = 2$; $S_3 = (2 - 1) = 1$; $S_4 = (2 - 1) = 1$; $\psi_1 = 1$; $\psi_2 = 0,9$; $\psi_3 = 1$; $\psi_4 = 1$. Отсюда по формуле (5.2) находим $\Psi = 0,84$. Значение является удовлетворительным.

Преобразованная матрица плана $4 \times 3 \times 2^2 // 16$ в кодах F'_i представлена в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Матрица плана $4 \times 3 \times 2^2 // 16$ в кодах F'_i

Номер опыта	F_0	F'_1	F'_2	F'_3	F'_4
1	0	0	0	0	0
2	0	2	0	1	1
3	0	3	0	0	0
4	0	1	0	1	1
5	0	0	1	1	0
6	0	2	1	0	1
7	0	3	1	1	0
8	0	1	1	0	1
9	0	0	2	0	1
10	0	2	2	1	0
11	0	3	2	0	1
12	0	1	2	1	0
13	0	0	0	1	1
14	0	2	0	0	0
15	0	3	0	1	1
16	0	1	0	0	0

Принятые факторы и их обозначения:

F'_1 – Температура заготовки перед началом штамповки, °С.

F'_2 – Твёрдость гравюры штампа, HRC.

F'_3 – Объём заготовки, мм³.

F'_4 – Технология штамповки.

Однако объём заготовки привязан к технологии штамповки, поэтому значение 0 (276948 мм³ для поковки из АК4-1; 480420 мм³ для поковки из 13X11H2B2MФ-Ш) фактора F'_3 может соответствовать только значению 0 (производственный процесс) фактора F'_4 , а значение 1 (425000 мм³ для поковки из АК4-1; 395640 мм³ для поковки из 13X11H2B2MФ-Ш) фактора F'_3 – только значению 1 (предлагаемый процесс) фактора F'_4 (таблица 5.3).

Таблица 5.3

Матрица плана $4 \times 3 \times 2^2 // 16$ в кодах F'_i с учётом привязки факторов

Номер опыта	F_0	F'_1	F'_2	F'_3	F'_4
1	0	0	0	0	0
2	0	2	0	1	1
3	0	3	0	0	0
4	0	1	0	1	1
5	0	0	1	0	0
6	0	2	1	1	1
7	0	3	1	0	0
8	0	1	1	1	1
9	0	0	2	1	1
10	0	2	2	0	0
11	0	3	2	1	1
12	0	1	2	0	0
13	0	0	0	1	1
14	0	2	0	0	0
15	0	3	0	1	1
16	0	1	0	0	0

Матрице плана в кодированном масштабе (таблица 5.3) соответствует матрица плана в натуральном масштабе: для поковки из АК4-1 – таблица 5.4; для поковки из 13X11H2B2MФ-Ш – таблица 5.5.

Таблица 5.4

Матрица плана в натуральном масштабе для поковки из АК4-1

Номер опыта	F'_1	F'_2	F'_3	F'_4
1	470	40	276948	Производственная
2	410	40	425000	Предлагаемая
3	380	40	276948	Производственная
4	440	40	425000	Предлагаемая
5	470	50	276948	Производственная
6	410	50	425000	Предлагаемая
7	380	50	276948	Производственная
8	440	50	425000	Предлагаемая
9	470	60	425000	Предлагаемая
10	410	60	276948	Производственная
11	380	60	425000	Предлагаемая
12	440	60	276948	Производственная
13	470	40	425000	Предлагаемая
14	410	40	276948	Производственная
15	380	40	425000	Предлагаемая
16	440	40	276948	Производственная

Таблица 5.5

Матрица плана в натуральном масштабе для поковки из 13X11H2B2MФ-Ш

Номер опыта	F'_1	F'_2	F'_3	F'_4
1	1180	40	480420	Производственная
2	1080	40	395640	Предлагаемая
3	1030	40	480420	Производственная
4	1130	40	395640	Предлагаемая
5	1180	50	480420	Производственная
6	1080	50	395640	Предлагаемая
7	1030	50	480420	Производственная
8	1130	50	395640	Предлагаемая
9	1180	60	395640	Предлагаемая
10	1080	60	480420	Производственная
11	1030	60	395640	Предлагаемая
12	1130	60	480420	Производственная
13	1180	40	395640	Предлагаемая

14	1080	40	480420	Производственная
15	1030	40	395640	Предлагаемая
16	1130	40	480420	Производственная

5.5 Результаты опытов

Результаты проведённых компьютерных и физических опытов сведены в таблицы: для поковки из АК4-1 – таблица 5.6; для поковки из 13X11H2B2MФ-Ш – таблица 5.7.

Таблица 5.6

Матрица плана в натуральном масштабе для поковки из АК4-1 (составлено автором)

	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_{Al}
Номер опыта	Температура заготовки $T_3, ^\circ\text{C}$	Твёрдость штампа $H_{ш}, HRC$	Объём заготовки $V_3, \text{мм}^3$	Технология штамповки	Величина износа за одну штамповку $\delta, \text{мкм}$
1	470	40	276948	Производственная (0)	1,25
2	410	40	425000	Предлагаемая (1)	2,24
3	380	40	276948	Производственная (0)	1,98
4	440	40	425000	Предлагаемая (1)	1,85
5	470	50	276948	Производственная (0)	0,79
6	410	50	425000	Предлагаемая (1)	1,42
7	380	50	276948	Производственная (0)	1,26
8	440	50	425000	Предлагаемая (1)	1,29
9	470	60	425000	Предлагаемая (1)	0,72
10	410	60	276948	Производственная (0)	0,83
11	380	60	425000	Предлагаемая (1)	1,11
12	440	60	276948	Производственная (0)	0,68
13	470	40	425000	Предлагаемая (1)	1,54
14	410	40	276948	Производственная (0)	1,82
15	380	40	425000	Предлагаемая (1)	2,44
16	440	40	276948	Производственная (0)	1,5

Исходя из результатов проведённых опытов для поковки из АК4-1 (таблица 5.6) можно заметить, что, в рассматриваемых интервалах, чем выше температура заготовки и твёрдость штампа, тем ниже величина износа гравюры штампа. Степень влияния технологии штамповки на величину износа гравюры штампа была рассмотрена в главе 3, и данные опытов также подтверждают выводы, что применение предлагаемого процесса снижает значение износа.

Таблица 5.7

Матрица плана в натуральном масштабе для поковки из 13X11H2B2MФ-Ш
(составлено автором)

	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_{St}
Номер опыта	Температура заготовки $T_3, ^\circ\text{C}$	Твёрдость штампа $H_{ш}, HRC$	Объём заготовки $V_3, \text{мм}^3$	Технология штамповки	Величина износа за одну штамповку $\delta, \text{мкм}$
1	1180	40	480420	Производственная	3,13
2	1080	40	395640	Предлагаемая	3,87
3	1030	40	480420	Производственная	6,24
4	1130	40	395640	Предлагаемая	3,04
5	1180	50	480420	Производственная	1,99
6	1080	50	395640	Предлагаемая	2,45
7	1030	50	480420	Производственная	3,98
8	1130	50	395640	Предлагаемая	1,94
9	1180	60	395640	Предлагаемая	1,4
10	1080	60	480420	Производственная	2,49
11	1030	60	395640	Предлагаемая	2,16
12	1130	60	480420	Производственная	1,69
13	1180	40	395640	Предлагаемая	2,46
14	1080	40	480420	Производственная	4,9
15	1030	40	395640	Предлагаемая	4,93
16	1130	40	480420	Производственная	3,86

5.6 Формализованное описание

Математическая модель (уравнение регрессии):

$$Y_j = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{111}X_1^3 + b_{12}X_1X_2, \quad (5.3)$$

Для дальнейшей обработки результатов необходимо перевести матрицу плана эксперимента в кодированный масштаб, в котором она будет симметрична и ортогональна.

Математическая модель в кодированном масштабе примет вид:

$$y_j = b'_0 + b'_1x_1 + b'_2x_2 + b'_3x_3 + b'_4x_4 + b'_{11}z_1 + b'_{22}z_2 + b'_{111}q_1 + b'_{12}x_1x_2, \quad (5.4)$$

где x_i, z_i, q_i – факторы технологического процесса в кодированном масштабе; b'_i – коэффициент, стоящий при факторе.

Функция x_i от X_i – линейная и имеет вид:

$$x_i = k_i(X_i + A_i), \quad (5.5)$$

где k_i и A_i – константы; k_i необходимо подобрать так, чтобы x_i было небольшим числом; A_i рассчитывается по формуле:

$$A_i = -\frac{\sum_{u=1}^N X_{iu}}{N}, \quad (5.6)$$

где N – число экспериментов.

Функция z_i от x_i – квадратичная и имеет вид:

$$z_i = k'_i(x_i^2 + a_ix_i + c_i), \quad (5.7)$$

где k'_i, a_i, c_i – константы; k'_i необходимо подобрать так, чтобы z_i было небольшим числом; a_i и c_i рассчитываются по формулам:

$$a_i = -\frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}^3}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (5.8)$$

$$c_i = -\frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}{N}. \quad (5.9)$$

Функция q_i от x_i – кубическая и имеет вид:

$$q_i = k''_i(x_i^3 + d_ix_i^2 + e_ix_i + n_i), \quad (5.10)$$

где k''_i, d_i, e_i, n_i – константы; k''_i необходимо подобрать так, чтобы q_i было небольшим числом; d_i, e_i и n_i рассчитываются по формулам:

$$d_i = -\frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}^3 z_{iu}}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 z_{iu}}; \quad (5.11)$$

$$e_i = -\frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}^4}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (5.12)$$

$$n_i = -d_i \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}{N}. \quad (5.13)$$

По приведённым выше формулам производим расчёты коэффициентов и сводим результаты в таблицы 5.8 и 5.9.

Таблица 5.8

Коэффициенты для поковки из АК4-1 (составлено автором)

Фактор	X_1	X_2	X_3	X_4
	x_i			
A_i	-425	-47,5	-350974	-0,5
	z_i			
a_i	0	-1,64	-	-
c_i	-5	-11	-	-
	q_i			
d_i	0	-	-	-
e_i	-8,2	-	-	-
n_i	0	-	-	-

Переход к кодированному масштабу совершён с использованием формул (5.5), (5.7) и (5.10) для поковки из АК4-1:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{15}(X_1 - 425); \\ x_2 &= \frac{10}{25}(X_2 - 47,5); \\ x_3 &= \frac{1}{74026}(X_3 - 350974); \\ x_4 &= 2(X_4 - 0,5); \\ z_1 &= \frac{1}{4}(x_1^2 - 5); \\ z_2 &= (x_2^2 - 1,64x_2 - 11); \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$q_1 = \frac{10}{24}(x_1^3 - 8,2x_1).$$

Таблица 5.9

Коэффициенты для поковки из 13X11H2B2MФ-Ш (составлено автором)

Фактор	X_1	X_2	X_3	X_4
x_i				
A_i	-1105	-47,5	-438030	-0,5
z_i				
a_i	0	-1,64	-	-
c_i	-5	-11	-	-
q_i				
d_i	0	-	-	-
e_i	-8,2	-	-	-
n_i	0	-	-	-

Переход к кодированному масштабу совершён с использованием формул (5.5), (5.7) и (5.10) для поковки из 13X11H2B2MФ-Ш:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \frac{1}{25}(X_1 - 1105); \\
 x_2 &= \frac{10}{25}(X_2 - 47,5); \\
 x_3 &= \frac{1}{42390}(X_3 - 438030); \\
 x_4 &= 2(X_4 - 0,5); \\
 z_1 &= \frac{1}{4}(x_1^2 - 5); \\
 z_2 &= (x_2^2 - 1,64x_2 - 11); \\
 q_1 &= \frac{10}{24}(x_1^3 - 8,2x_1).
 \end{aligned}
 \tag{5.15}$$

Рассчитав коэффициенты, составим матрицу плана в кодированном масштабе: для поковки из АК4-1 – таблица 5.10; для поковки из 13X11H2B2MФ-Ш – таблица 5.11.

Таблица 5.10

Матрица плана в кодированном масштабе для поковки из АК4-1 (составлено автором)

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	z_1	z_2	q_1	x_1x_2
1	3	-3	-1	-1	1	2,92	1	-9
2	-1	-3	1	1	-1	2,92	3	3
3	-3	-3	-1	-1	1	2,92	-1	9
4	1	-3	1	1	-1	2,92	-3	-3
5	3	1	-1	-1	1	-11,64	1	3
6	-1	1	1	1	-1	-11,64	3	-1
7	-3	1	-1	-1	1	-11,64	-1	-3
8	1	1	1	1	-1	-11,64	-3	1
9	3	5	1	1	1	5,8	1	15
10	-1	5	-1	-1	-1	5,8	3	-5
11	-3	5	1	1	1	5,8	-1	-15
12	1	5	-1	-1	-1	5,8	-3	5
13	3	-3	1	1	1	2,92	1	-9
14	-1	-3	-1	-1	-1	2,92	3	3
15	-3	-3	1	1	1	2,92	-1	9
16	1	-3	-1	-1	-1	2,92	-3	-3

Таблица 5.11

Матрица плана в кодированном масштабе для поковки из 13X11H2B2MФ-Ш (составлено автором)

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	z_1	z_2	q_1	x_1x_2
1	3	-3	1	-1	1	2,92	1	-9
2	-1	-3	-1	1	-1	2,92	3	3
3	-3	-3	1	-1	1	2,92	-1	9
4	1	-3	-1	1	-1	2,92	-3	-3
5	3	1	1	-1	1	-11,64	1	3
6	-1	1	-1	1	-1	-11,64	3	-1
7	-3	1	1	-1	1	-11,64	-1	-3
8	1	1	-1	1	-1	-11,64	-3	1
9	3	5	-1	1	1	5,8	1	15
10	-1	5	1	-1	-1	5,8	3	-5
11	-3	5	-1	1	1	5,8	-1	-15

12	1	5	1	-1	-1	5,8	-3	5
13	3	-3	-1	1	1	2,92	1	-9
14	-1	-3	1	-1	-1	2,92	3	3
15	-3	-3	-1	1	1	2,92	-1	9
16	1	-3	1	-1	-1	2,92	-3	-3

Матрицы приняты требуемый вид – они симметричны и ортогональны.

Для определения коэффициентов, стоящих при факторах (5.4) воспользуемся формулой:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} Y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (5.16)$$

где Y_u – значение параметра, полученное в результате эксперимента.

Значения рассчитанных коэффициентов сводим в таблицу 5.12.

Таблица 5.12

Значения коэффициентов, стоящих при факторах

	Y_{Al}	Y_{St}
b'_0	1,42	3,1581
b'_1	-0,0708	-0,3376
b'_2	-0,1327	-0,2918
b'_3	0,0588	0,4456
b'_4	0,0588	0,4456
b'_{11}	-0,1313	0,0594
b'_{22}	0,0102	0,0296
b'_{111}	-0,0215	-0,0246
b'_{12}	0,0003	0,0346

Для определения значимости коэффициентов и проверки адекватности моделей, необходимо знать дисперсию опытов, которую можно определить, продублировав опыты. В нашем случае для обоих уравнений дублировать будем один опыт – №1 (таблицы 5.6 и 5.7).

Результаты дублирования эксперимента сведены в таблицы 5.13 и 5.14.

Таблица 5.13

Результаты дублирования эксперимента №1 поковки из АК4-1 (составлено автором)

	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_{Al}
Номер опыта	Температура заготовки $T_3, ^\circ\text{C}$	Твёрдость штампа $H_{ш}, HRC$	Объём заготовки $V_3, \text{мм}^3$	Технология штамповки	Величина износа за одну штамповку $h, \text{мкм}$
1	470	40	276948	Производственная (0)	1,25
1	470	40	276948	Производственная (0)	1,23
1	470	40	276948	Производственная (0)	1,29

Таблица 5.14

Результаты дублирования эксперимента №1 поковки из 13X11H2B2MФ-Ш (составлено автором)

	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_{Al}
Номер опыта	Температура заготовки $T_3, ^\circ\text{C}$	Твёрдость штампа $H_{ш}, HRC$	Объём заготовки $V_3, \text{мм}^3$	Технология штамповки	Величина износа за одну штамповку $h, \text{мкм}$
1	1180	40	480420	Производственная (0)	3,13
1	1180	40	480420	Производственная (0)	3,07
1	1180	40	480420	Производственная (0)	3,22

Дисперсию воспроизводимости эксперимента рассчитываем как:

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^n (y_g - \bar{y})^2}{f_1}, \quad (5.17)$$

где y_g – результат g – го повтора опыта, \bar{y} – среднее арифметическое значение при n повторах опыта, f_1 – число степеней свободы, которое определяется как $f_1 = n - 1 = 2$.

По формуле (5.15) рассчитываем построчную дисперсию для двух параметров: $S_{y_{Al}}^2 = 0,00093$; $S_{y_{St}}^2 = 0,0057$.

Поскольку дублировали только один опыт, дисперсию оценок коэффициентов рассчитываем по формуле:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_{y_u}^2}{N}; \quad (5.18)$$

Получаем, что $S_{b_{Al}}^2 = 0,000058$; $S_{b_{St}}^2 = 0,000356$.

Значимость коэффициентов математических моделей можно оценить по формуле:

$$|b_i| \geq t_{\alpha;f_1} \cdot S_{b_i}, \quad (5.19)$$

где $t_{\alpha;f_1}$ – квантиль распределения Стьюдента. При уровне значимости $\alpha = 0,01$ и числе степеней свободы $f_1 = 2$ табличное значение t -критерия $t_{0,01;2} = 2,92$.

Результаты расчёта значимости коэффициентов сводим в таблицу 5.15, где знаком «-» обозначены коэффициенты, которые не являются значимыми.

Таблица 5.15

Значимые коэффициенты модели

	Y_{Al}	Y_{St}
b'_0	+	+
b'_1	+	+
b'_2	+	+
b'_3	+	+
b'_4	+	+
b'_{11}	+	+
b'_{22}	-	-
b'_{111}	-	-
b'_{12}	-	-

Таким образом, при расчёте износа штампового инструмента по модели Арчарда за одну штамповку, в обоих случаях мы можем отказаться от коэффициентов: $b'_{22}, b'_{111}, b'_{12}$.

Получены следующие уравнения регрессии:

$$\begin{aligned}
 y_{Al} &= 1,42 - 0,0708x_1 - 0,1327x_2 + 0,0588x_3 + 0,0588x_4 - \\
 &\quad - 0,1313z_1; \\
 y_{St} &= 3,1581 - 0,3376x_1 - 0,2918x_2 + 0,4456x_3 + 0,4456x_4 + \\
 &\quad + 0,0594z_1.
 \end{aligned} \quad (5.20)$$

Проверку гипотезы об адекватности моделей будем проводить по F -критерию (критерий Фишера), который определяется как:

$$F_{f_2; f_1} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_{y_u}^2}, \quad (5.21)$$

где $S_{\text{неад}}^2$ – дисперсия неадекватности моделей, которая рассчитывается как:

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{SS_{\text{неад}}}{f_2}, \quad (5.22)$$

где f_2 – число степеней свободы, определяемое по формуле:

$$f_2 = N - k, \quad (5.23)$$

где k – количество коэффициентов признанных значимыми.

Поскольку мы дублировали только один опыт (№1), для нахождения $SS_{\text{неад}}$ воспользуемся формулой:

$$SS_{\text{неад}} = n(y_{1 \text{ расч}} - y_{1 \text{ эксп}})^2 + \sum_{u=2}^N (y_{u \text{ расч}} - y_{u \text{ эксп}})^2, \quad (5.24)$$

где $y_{u \text{ расч}}$ – значение выходного параметра в u -ом опыте, рассчитанное по уравнению регрессии; $y_{u \text{ эксп}}$ – значение выходного параметра в u -ом опыте, определённое экспериментально.

Расчётные значения $y_{u \text{ расч}}$ определены по уравнению (5.20) и указаны в таблицу 5.16.

Таблица 5.16

Сравнение экспериментальных и расчётных значений параметров
(составлено автором)

Номер опыта	$y_{Alu \text{ расч}}$	$y_{Alu \text{ эксп}}$	$y_{Stu \text{ расч}}$	$y_{Stu \text{ эксп}}$
1	1,357181818	1,25	3,079909091	3,13
2	2,137681818	2,24	4,311659091	3,87
3	1,781681818	1,98	5,105659091	6,24
4	1,996181818	1,85	3,636409091	3,04
5	0,826272727	0,79	1,912863636	1,99
6	1,606772727	1,42	3,144613636	2,45
7	1,250772727	1,26	3,938613636	3,98
8	1,465272727	1,29	2,469363636	1,94
9	0,530363636	0,72	0,745818182	1,4

10	0,840863636	0,83	1,977568182	2,49
11	0,954863636	1,11	2,771568182	2,16
12	0,699363636	0,68	1,302318182	1,69
13	1,592181818	1,54	3,079909091	2,46
14	1,902681818	1,82	4,311659091	4,9
15	2,016681818	2,44	5,105659091	4,93
16	1,761181818	1,5	3,636409091	3,86

По формуле (5.24) находим, что $SS_{\text{неад } Al} = 0,4901$; $SS_{\text{неад } St} = 4,6415$. Тогда при $f_{2Al} = 10$ получаем, что $S_{\text{неад } Al}^2 = 0,049$; а $F_{Al \text{ расч}} = 52,51$. При $f_{2St} = 10$ получаем, что $S_{\text{неад } St}^2 = 0,462$; а $F_{St \text{ расч}} = 81,43$.

После расчета, полученные значения сравниваем с табличными (таблица 5.17). Табличные значения критерия Фишера выбираем при 1% уровне значимости.

Таблица 5.17

Критерий Фишера при 1%-ном уровне значимости

f_1	f_2						
	1	2	3	4	5	6	12
1	4052	4999	5403	5625	5764	5859	6106
2	98,49	99,01	99,17	99,25	99,3	99,33	99,42
3	34,12	30,81	29,46	28,71	28,24	27,91	27,06
4	21,2	18	16,69	15,98	15,52	15,51	14,37
5	16,26	13,27	12,06	11,39	10,97	10,67	9,89
6	13,74	10,92	9,98	9,15	8,75	8,47	7,72

Расчётные и допустимые критерии Фишера представлены в таблице 5.18.

Таблица 5.18

Критерии Фишера

	Y_{Al}	Y_{St}
$F_{f_2; f_1 \text{ расч}}$	52,51	81,43
$F_{f_2; f_1 \text{ max}}$	99,33	

Так как расчётный критерий Фишера меньше табличного, то гипотеза об адекватности математических моделей в виде уравнений регрессий (5.18) при 1%-ном уровне значимости не отвергается.

На основании проведенных исследований, получены математические модели, по которым вычисляется износ штампового инструмента по модели Арчарда за одну штамповку при штамповке поковок деталей типа «лопасть»: δ_{Al} – для штамповки алюминиевой поковки, δ_{St} – для стальной.

Полученные математические модели в натуральном масштабе примут вид:

$$\begin{aligned}
 Y_{Al} &= -20,585375 + 0,119195X_1 - 0,05308X_2 + 0,0000008X_3 + \\
 &\quad + 0,1176X_4 - 0,0001459X_1^2, \text{ мкм}; \\
 Y_{St} &= 47,50225 - 0,066004X_1 - 0,11672X_2 + 0,00001051X_3 + \\
 &\quad + 0,5912X_4 + 0,00002376X_1^2, \text{ мкм}.
 \end{aligned}
 \tag{4.25}$$

Для удобства вместо Y и X подставим обозначения параметров и факторов соответственно, тогда уравнения примут вид:

$$\begin{aligned}
 \delta_{Al} &= -20,585375 + 0,119195 \cdot T_3 - 0,05308 \cdot H_{III} + 0,0000008 \cdot V_3 + \\
 &\quad + 0,1176 \cdot T_{III} - 0,0001459 \cdot T_3^2, \text{ мкм}; \\
 \delta_{St} &= 47,50225 - 0,066004 \cdot T_3 - 0,11672 \cdot H_{III} + 0,00001051 \cdot V_3 + \\
 &\quad + 0,5912 \cdot T_{III} + 0,00002376 \cdot T_3^2, \text{ мкм}.
 \end{aligned}
 \tag{4.26}$$

Так как при штамповке по предлагаемой технологии поковки из АК4-1 мы получаем две поковки, то для определения износа за одну штамповку значение δ_{Al} следует ещё разделить на 2.

На основании полученных математических моделей, были построены графики влияния отдельно взятых факторов на выходные параметры (рисунки 5.3-5.6). За базовый был принят технологический процесс со следующими факторами:

Для поковок из АК4-1:

1. Температура заготовки – 470°C;

2. Твёрдость гравюры штампа – 40 *HRC*;
3. Объём заготовки – 276948; 425000 мм³;
4. Технология штамповки – Производственная; Предлагаемая.

Для поковок из 13X11H2B2MФ-Ш:

1. Температура заготовки – 1180°C;
2. Твёрдость гравюры штампа – 40 *HRC*;
3. Объём заготовки – 480420; 395640 мм³;
4. Технология штамповки – Производственная; Предлагаемая.

В таблицах 5.19 и 5.20 представлены варьируемые параметры, по которым строились графики. Однако следует помнить, что объём заготовки привязан к технологии штамповки, поэтому графики зависимости будем строить для двух вариантов штамповки независимо друг от друга.

Для анализа влияния отдельно взятого фактора на выходные параметры, фиксируем все факторы, кроме одного, влияние которого и будем исследовать.

Таблица 5.19

Значения параметров, задаваемых при построении графиков для поковок из АК4-1

Номер опыта	0	1	2	3	0	1	2	3
Температура заготовки $T_3, ^\circ\text{C}$	470	440	410	380	470	440	410	380
Твёрдость штампа $H_{ш}, HRC$	40	45	50	60	40	45	50	60
Объём заготовки $V_3, \text{мм}^3$	276948	305000	332000	360000	425000	467500	510000	552500
Технология штамповки ТШ	Производственная				Предлагаемая			

Таблица 5.20

Значения параметров, задаваемых при построении графиков для поковок из
13X11H2B2MФ-III

Номер опыта	0	1	2	3	0	1	2	3
Температура заготовки $T_3, ^\circ\text{C}$	1180	1130	1080	1030	1180	1130	1080	1030
Твёрдость штампа $H_{ш}, HRC$	40	45	50	60	40	45	50	60
Объём заготовки $V_3, \text{мм}^3$	480420	528462	576504	624546	395640	435204	474768	514332
Технология штамповки ТШ	Производственная				Предлагаемая			

Графики, представленные на рисунках 5.3 и 5.4, позволяют сделать вывод, что вне зависимости от выбранной технологии:

1. Температура заготовки оказывает значительное влияние на износ гравюры штампа. Причём чем ниже температура заготовки, тем выше износ. Так при снижении температуры заготовки на 23,5% износ увеличивается на 58,5%. Это связано с увеличением значения контактного давления, которое возрастает с увеличением сопротивления материала деформированию;

2. Твёрдость гравюры штампа – фактор, оказывающий наибольшее влияние на износ. С увеличением твёрдости гравюры, износ уменьшается. При увеличении твёрдости гравюры в 1,5 раза износ уменьшается, в зависимости от процесса, от 1,5 до 4 раз;

С увеличением объёма заготовки износ также увеличивается, однако влияния незначительно. При увеличении объёма заготовки на 30% износ увеличивается всего на 5-6%.

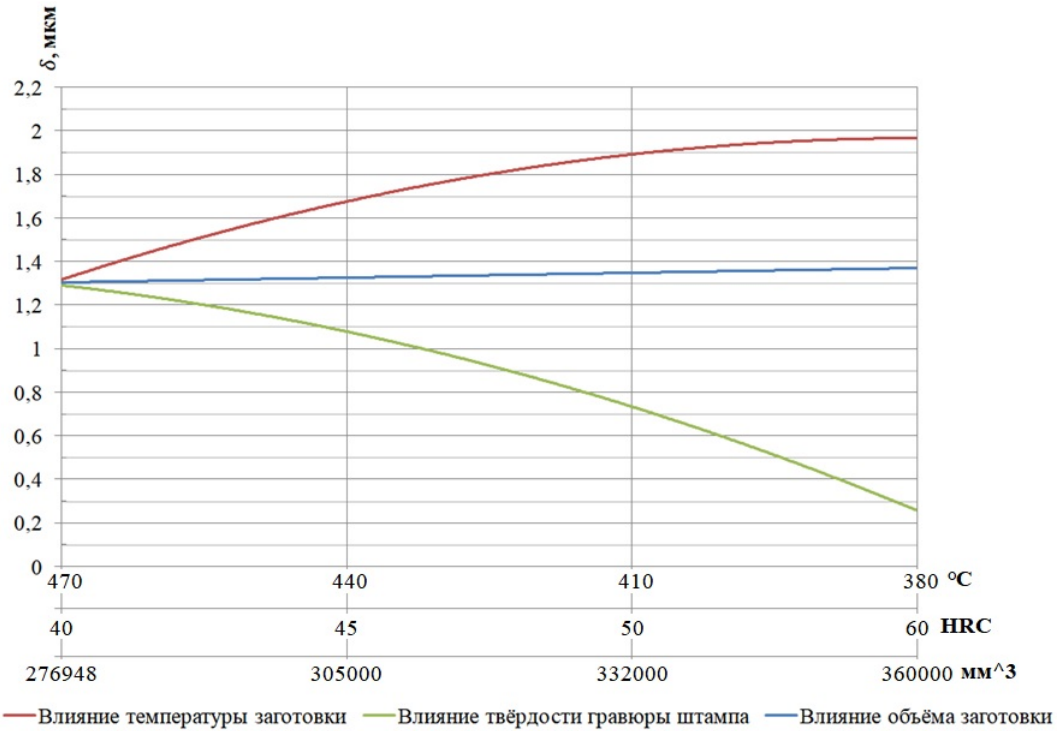


Рис. 5.3. График влияния отдельно взятых факторов модели на износ штампа по модели Арчарда за один ход при штамповке поковок деталей типа «лопасть» из АК4-1 по производственной технологии

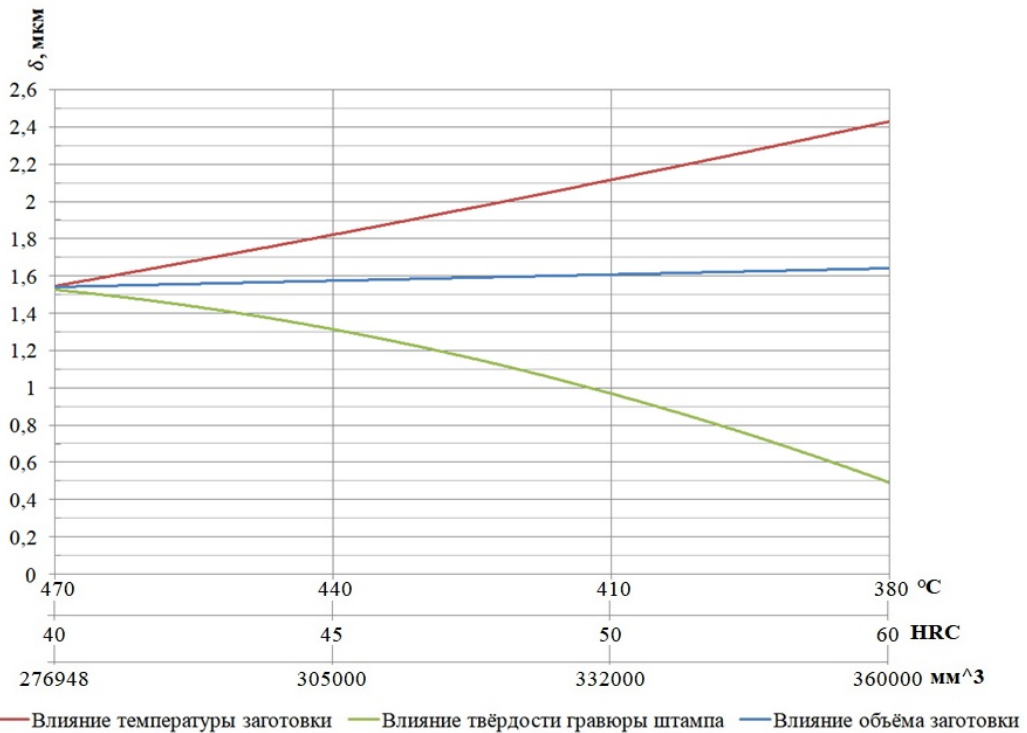


Рис. 5.4. График влияния отдельно взятых факторов модели на износ штампа по модели Арчарда за один ход при штамповке поковок деталей типа «лопасть» из АК4-1 по предлагаемой технологии

Графики, представленные на рисунках 5.5 и 5.6, указывают на то, что вне зависимости от выбранной технологии:

1. Как и в случае с поковкой из АК4-1, температура заготовки оказывает значительное влияние на износ гравюры штампа. При снижении температуры заготовки на 14,5% износ увеличивается на 50%. Как и для поковки из АК4-1 это связано с увеличением значения контактного давления;

2. В случае с поковкой из 13X11H2B2MФ-Ш, твёрдость гравюры штампа также фактор, оказывающий наибольшее влияние на износ. При увеличении твёрдости гравюры в 1,5 раза износ уменьшается, в зависимости от процесса, от 1,5 до 6 раз;

3. В отличие от штамповки поковки из АК4-1 на кривошипном прессе, при штамповке поковки из 13X11H2B2MФ-Ш на ПШМ объём заготовки оказывает большее значение. При увеличении объёма заготовки на 30% износ увеличивается на 33%.

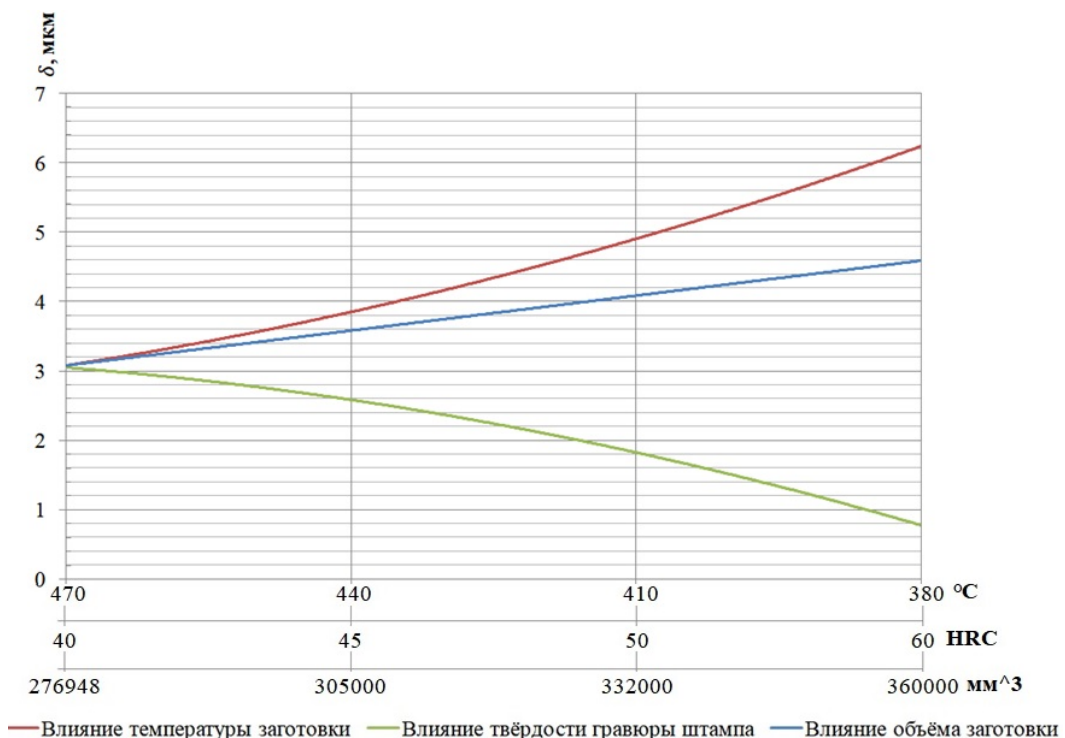


Рис. 5.5. График влияния отдельно взятых факторов модели на износ штампа по модели Арчарда за один ход при штамповке поволоков деталей типа «лопасть» из 13X11H2B2MФ-Ш по производственной технологии

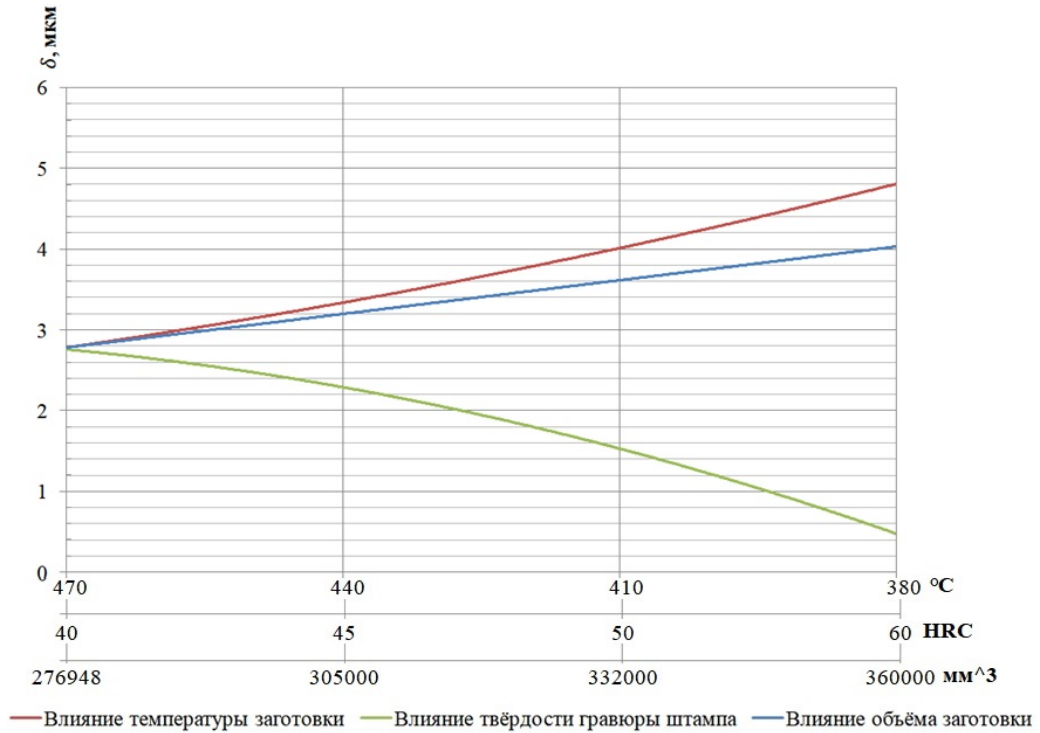


Рис. 5.6. График влияния отдельно взятых факторов модели на износ штампа по модели Арчарда за один ход при штамповке поковок деталей типа «лопасть» из 13X11H2B2MФ-Ш по предлагаемой технологии

Исходя из анализа графиков (рисунок 5.3-5.6) для модели были заданы такие значения факторов, которые обеспечивали бы наибольшее и наименьшее значение износа (рисунок 5.7 и 5.8).

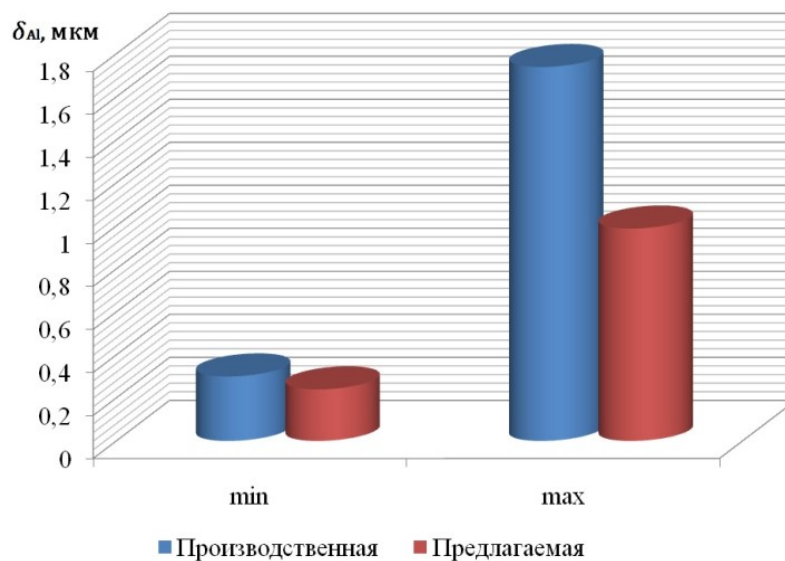


Рис. 5.7. Сравнение минимальных и максимальных значений износа штампов при штамповке поковок деталей типа «лопасть» из АК4-1

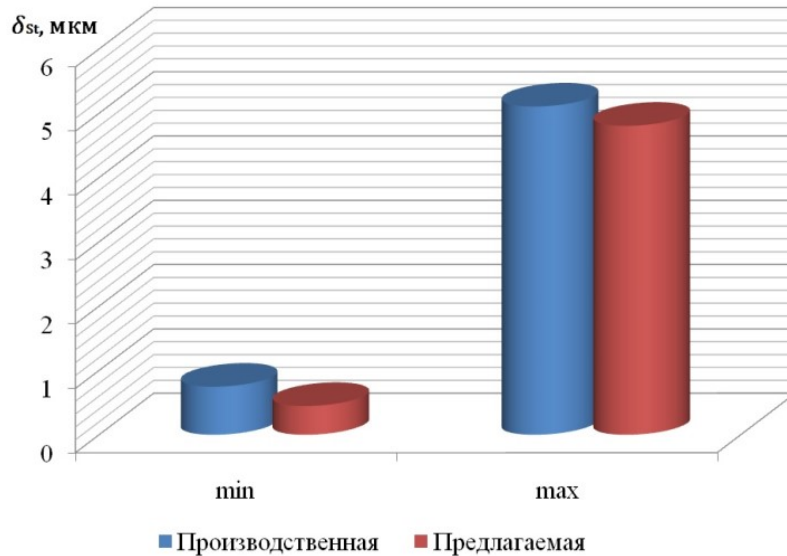


Рис. 5.8. Сравнение минимальных и максимальных значений износа штампов при штамповке поковок деталей типа «лопасть» из 13X11H2B2MФ-Ш

Для определения стойкости штампов до первой переточки необходимо разделить поле допуска размера поковки, который будет соответствовать области наибольшего износа гравюры штампа, на величину износа за одну штамповку.

Для алюминиевой поковки область наибольшего износа находится в части полотна поковки, где поле допуска составляет 0,65 мм. Для производственного процесса штамповки поковки при условии, что штамповые вставки изготовлены на минимальный размер, и можно в полной мере использовать поле допуска поковки, стойкость штампа до первой переточки будет составлять 520 шт., что соответствует данным предприятия. При использовании технологии сдвоенной штамповке в штампе конструкции тип Б – 844 шт.

Для стальной поковки область наибольшего износа также находится в части полотна поковки, где поле допуска составляет 2,5 мм. Для производственного процесса при условии, что штамп изготовлен на минимальный размер, стойкость штампа до первой переточки будет составлять 799 шт. Для предлагаемого процесса – 1016 шт.

5.7 Выводы по главе 5

1. На основе конечно элементного моделирования разработаны математические модели в виде уравнений регрессии и выявлены зависимости для технологического процесса ГОШ поковок деталей типа «лопасть» (4.26). Их применение позволит упростить работы по проектированию и выбору технологических режимов ГОШ, что приведёт к значительному сокращению времени и затрат на прогнозирование стойкости штампового инструмента.

2. Было установлено, что на величину износа штампового инструмента наибольшее влияние оказывает твёрдость гравюры штампа. При увеличении твёрдости гравюры в 1,5 раза (средствами ТО/ХТО и др.) износ уменьшается, в зависимости от процесса, от 1,5 до 6 раз.

3. Также большое влияние оказывает температура заготовки. При снижении температуры заготовки на 14,5-23,5% (например, при достаточно длительной транспортировке от печи к прессу, или при больших затратах времени на позиционирование заготовки в штампе) износ увеличивается на 50-58,5%.

4. Объём заготовки оказывает меньше влияния. При увеличении объёма заготовки на 30% (часто на предприятиях объём заготовки значительно превышает минимально необходимый) износ увеличивается, в зависимости от процесса, от 5 до 33%. Поэтому следует стремиться к рационализации технологических процессов в области уменьшения объёма заготовки не только для повышения КИМ, но также для снижения износа штампового инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные и оригинальные технические, технологические и конструктивные решения, направленные на совершенствование процесса горячей объемной штамповки поковок деталей типа «лопасть». Предложенные разработки способствуют повышению износостойкости прессовых и молотовых штампов при повышении КИМ, а также увеличению производительности за счет штамповки, реализуемой в один переход на прессе и за два удара на молоте. Эти разработки вносят значительный вклад в дальнейшее развитие отечественного машиностроения.

1. Исследование научно-технических работ и современных разработок выявило три принципиальных подхода к повышению: конструкторские, технологические и организационные. В условиях действующего производства, когда требуется достичь существенного эффекта без масштабного изменения технологической цепочки и при отсутствии возможности проведения продолжительных научных изысканий или затратных экспериментальных исследований, экономичным решением будет анализ и рационализация технологического процесса штамповки и, при необходимости, изменение конструкции штамповой оснастки.

2. Выполненный комплекс аналитических и экспериментальных исследований позволил разработать новые варианты технологических процессов для штамповки поковок деталей типа «лопасть» из алюминиевого деформируемого сплава АК4-1 на кривошипном прессе и из хромоникелевой жаропрочной высоколегированной стали марки 13X11H2B2MФ-Ш на паровоздушном штамповочном молоте.

3. Проведённые численные эксперименты на разработанных компьютерных моделях показали, что наиболее рациональным технологическим процессом штамповки поковки детали типа «лопасть» из АК4-1 из предлагаемых, является штамповка сдвоенной поковки в штампе

конструкции тип Б. Применение новой технологии позволит повысить износостойкость разработанного штампа, по сравнению с производственным, на 62% и увеличить КИМ на 12%. Новые конструкции штампов позволят компенсировать сдвигающие силы, действующие на штамп и направляющие ползуна прессы, и будет способствовать уменьшению их износа и увеличению геометрической точности поковок, а также повышению производительности за счёт сдваивания поковок. По сравнению с производственной технологией ГОШ поковки из 13X11H2B2MФ-Ш, износ штампа предлагаемого процесса уменьшился на 23%. Также удалось повысить КИМ на 15%.

4. На основе разработанных компьютерных моделей заготовок и штампов реализовано численное конечно-элементное моделирование вариантов технологических процессов горячей объёмной штамповки поковок двух типов деталей «лопасть» и определены значения объёмного износа штампов по модели Арчарда, которые позволяют достаточно точно оценивать износостойкость инструмента за один цикл штамповки.

5. Экспериментальными исследованиями объёмного износа на образцах, подвергнутых различной химико-термической обработке на разную твердость, установлено, что, по сравнению с термообработкой стали марки 5ХНВ на твердость 41 HRC, дополнительное сульфидирование увеличило износостойкость образцов в среднем на 25%, а проведение азотирования на твердость 62 HRC – на 67%. По результатам испытаний были рассчитаны основные трибологические характеристики образцов из стали марки 5ХНВ, такие как: объёмный износ, интенсивность и скорость изнашивания. Объёмный износ образца подвергнутого: термообработке – $0,843 \text{ мм}^3$; сульфидированию – $0,591 \text{ мм}^3$; азотированию – $0,387 \text{ мм}^3$. Интенсивность износа образца подвергнутого: термообработке – $0,9^{-6}$; сульфидированию – $0,6^{-6}$; азотированию – $0,4^{-6}$. Скорость изнашивания образца подвергнутого: термообработке – $0,056 \text{ мм/мин}$; сульфидированию

– 0,039 мм/мин; азотированию – 0,026 мм/мин. Для исследованных производственных условий рекомендуется штампы (молотовые, прессовые и т.д.) из стали 5ХНВ подвергать термической обработке с последующим азотированием, а после первой переточки с определённой периодичностью проводить сульфидирование.

6. С помощью планирования многофакторного эксперимента получена математическая модель в виде уравнения регрессии, с помощью которой было выявлено, что на величину износа штампового инструмента наибольшее влияние оказывает твёрдость гравюры штампа. При увеличении твёрдости гравюры в 1,5 раза износ уменьшается, в зависимости от процесса, от 1,5 до 6 раз. Также большое влияние оказывает температура заготовки. При снижении температуры заготовки на 14,5-23,5% износ увеличивается на 50-58,5%. Колебание объёма заготовки оказывает меньшее влияние. При увеличении объёма заготовки на 30% износ увеличивается, в зависимости от процесса, от 5 до 33%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонова, Г. В. Методология выбора материалов и упрочняющие технологии : учебно-методическое пособие / Г. В. Агафонова. – Волгоград : ВолгГТУ, 2017. – 96 с. : ил. – Текст : непосредственный.
2. Аксёнов, Л. Б. Системное проектирование процессов штамповки / Л. Б. Аксёнов. – Ленинград : Машиностроение, 1990. – 240 с. : ил. – Текст : непосредственный.
3. Алексеев, С. Ю. Повышение стойкости штампов при объемной штамповке с помощью моделирования в QFORM / С. Ю. Алексеев. – Текст : непосредственный // *Металлург.* – 2022. – № 6. – С. 85-87.
4. Бабенко, В. А. Объемная штамповка. Атлас схем и типовых конструкций штампов : учебное пособие для машиностроительных вузов / В. А. Бабенко, В. В. Бойцов, Ю. П. Волик. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1982. – 104 с. : ил. – Текст : непосредственный.
5. Барановский, М. А. В помощь кузнецу-штамповщику / М. А. Барановский. – Минск : Беларусь, 1976. – 207 с. : ил. – Текст : непосредственный.
6. Бельский, Е. И. Стойкость кузнечных штампов / Е. И. Бельский. – Минск : Наука и техника, 1975. – 240 с. : ил. – Текст : непосредственный.
7. Биллигман, И. Высадка и другие методы объемной штамповки. Справочное руководство по штамповке сталей и цветных металлов в холодном и горячем состоянии при серийном и массовом производствах / И. Биллигман ; пер. с нем. Е. Н. Ланского. – Москва : Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1960. – 468 с. : ил. – Текст : непосредственный.
8. Бурлаков, А. В. Усовершенствование конструкции штампов в целях

- увеличения износостойкости рабочих частей штампа при горячей объемной штамповке / А. В. Бурлаков, А. С. Белоусова, А. М. Бадамшин. – Текст : непосредственный // Техника и технологии машиностроения : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф., Омск, 08–10 июня 2020 г. – Омск : ОмГТУ, 2020. – С. 31-35.
9. Васильев, Д. И. Основы проектирования деформирующего инструмента : учеб. пособие для металлург. и машиностроит. спец. вузов / Д. И. Васильев, М. А. Тылкин, Г. П. Тетерин. – Москва : Высшая школа, 1984. – 223 с. : ил. – Текст : непосредственный.
10. Владимирова, В. М. Изготовление штампов, пресс-форм и приспособлений : учебник / В. М. Владимирова. – Москва : Высшая школа, 1974. – 431 с. : ил. – Текст : непосредственный.
11. Власов, А. В. Расчет поврежденности металла при холодной радиальной ковке по результатам конечно-элементного моделирования в программе DEFORM 3D / А. В. Власов. – Текст : непосредственный // Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и обработки давлением : сб. докл. и материалов IX Конгресса «Кузнец-2009». – 2009. – С. 204-218.
12. Власов, А. В. Расчёт долговечности штампового инструмента в программном комплексе Qform / А. В. Власов, С. А. Стебунов, Н. В. Биба – Текст : непосредственный // Перспективы развития отечественного кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств в условиях импортозамещения : сб. докл. и науч. ст. XII Конгресса «Кузнец-2015». – 2015. – С. 443-453.
13. Власов, А. В. Термомеханическая усталость штампов для горячей штамповки / А. В. Власов. – Текст : непосредственный // Сталь. – 2016. – № 5. – С. 49-53.
14. Вовченко, А. В. Вариант определения заготовительных форм в объемной штамповке обратным расчётом формоизменения / А. В.

- Вовченко, О. И. Катрич. – Текст : непосредственный // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 1 (125). – С. 125-133.
15. Головин, В. А. Расширение технологических возможностей и повышение эффективности процессов холодной и полугорячей объёмной штамповки / В. А. Головин. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – № 7. – С. 14–17.
16. Головнёва, М. А. Точная горячая штамповка мелких деталей / М. А. Головнёва, И. Ф. Головнёв. – Москва : Машгиз, 1952. – 255 с. : ил. – Текст : непосредственный.
17. Гордеева, Э. С. К вопросу об использовании азотируемых штамповых сталей для прессового инструмента / Э. С. Гордеева, В. Б. Богуцкий – Текст : непосредственный // Фундаментальные основы механики. – 2020. – № 6. – С. 73-75.
18. ГОСТ 15830-84. Обработка металлов давлением. Штампы. Термины и определения. – Москва : Изд-во стандартов, 1992. – 22 с. : ил. – Текст : непосредственный.
19. ГОСТ 21488-97. Прутки прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – Минск : Изд-во стандартов, 2001. – 22 с. : ил. – Текст : непосредственный.
20. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – Москва : Стандартиформ, 2009. – 12 с. – Текст : непосредственный.
21. ГОСТ 5632-2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 48 с. – Текст : непосредственный.
22. ГОСТ 5949-2018.Metalлопродукция из сталей нержавеющей и сплавов на железоникелевой основе коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 31 с.

- Текст : непосредственный.
- 23.ГОСТ 5950-2000. Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия. – Минск : Изд-во стандартов, 2004. – 35 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 24.Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов : в 3 т. Т. 2. Физико-химическая теория пластичности / С. И. Губкин. – Москва : Металлургия, 1961. – 416 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 25.Довнар, С. А. Термомеханика упрочнения и разрушения штампов объёмной штамповки / С. А. Довнар. – Москва : Машиностроение, 1975. – 255 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 26.Доможиров, Л. И. Определение характеристик сопротивления многоцикловой усталости металлов с позиции уточнённых подходов линейной механики разрушения : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Л. И. Доможиров. – Москва : ЦНИИТМАШ, 1998. – 39 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 27.Елистратов, Д. А. Исследование стойкости открытого молотового штампа / Д. А. Елистратов. – Текст : непосредственный // Молодежь и наука : материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. старшеклассников, студентов и аспирантов : в 2 т. Т. 1. – Нижний Тагил : НТИ (ф) УрФУ, 2022. – С. 31-33.
- 28.Захаров, А. М. Разработка технологии и оснастки процесса многостадийной полугорячей объёмной штамповки детали «приводной вал» на основе компьютерного моделирования : диссертация магистра / А. М. Захаров. – Санкт-Петербург : СПбПУ, 2018. – Текст : электронный. – URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/v18-2750.pdf> (дата обращения: 10.05.2024).
- 29.Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – Москва : Мир, 1975. – 542 с. : ил. – Текст : непосредственный.

- 30.Инженерные программы: DEFORM // ТЕСИС : [сайт]. – 1998. – URL: https://tesis.com.ru/cae_brands/deform/ (дата обращения: 27.08.2023). – Текст. Изображение : электронные.
- 31.Карапетян, Ж. А. О температурных напряжениях, возникающих в пуансонах при горячей штамповке / Ж. А. Карапетян, С. А. Еленев. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1979. – № 1. – С. 12–14.
- 32.Климов, В. Н. Глубокое азотирование теплостойких и нетеплостойких инструментальных сталей / В. Н. Климов, И. И. Богачёв, И. Ю. Сапронов [и др.] – Текст : непосредственный // Состояние и перспектива развития отечественных технологий обработки металлов давлением и оборудования кузнечно-прессового машиностроения : сб. науч. ст. и докл. XIII Конгресса «Кузнец-2017». – 2017. – С. 114-118.
- 33.Константинов, И. Л. Кузнечно-штамповочное производство : учебник / И. Л. Константинов, С. Б. Сидельников. – 2-е изд. – Москва : ИНФРА-М ; Красноярск : СФУ, 2014. – 464 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 34.Константинов, И. Л. Технологияковки и горячей объемной штамповки : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / И. Л. Константинов. – Москва : ИНФРА-М ; Красноярск : СФУ, 2016. – 549 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 35.Костин, Н. А. Научно-технологические основы интенсивного азотонауглероживания из активных сред сталей штампового инструмента : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Н. А. Костин. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2023. – 290 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 36.Косяченко, А. П. Слесарное дело / А. П. Косяченко, И. А. Молчан. – Москва : Машгиз, 1956. – 228 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 37.Крайнов, А. Ю. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса : учеб. пособие / А. Ю. Крайнов, Л. Л. Миньков. – Томск

- : STT, 2016. – 92 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 38.Кривошеин, В. А. Разработка оптимальной технологии штамповки детали типа «краб» – Текст : электронный / В. А. Кривошеин, А. В. Ощепков // Наука и образование. – 2008. – № 3. – 11 с. – URL: https://studvesna.qform3d.ru/db_files/articles/183/article.pdf (дата обращения: 29.08.2023).
39. Куксенова, Л. И. Влияние состава и структуры азотированных сплавов железа на износостойкость в условиях трения скольжения / Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева, М. С. Алексеева, С. А. Герасимов. – Текст : непосредственный // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 1. – С. 55-62.
- 40.Куксенова, Л. И. Влияние условий нагрева при азотировании на структуру и износостойкость поверхностных слоев на стали 38Х2МЮА / Л. И. Куксенова, М. С. Мичугина. – Текст : непосредственный // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 2 (632). – С. 29-34.
- 41.Куксенова, Л. И. Степень сопротивления пластической деформации - критерий выбора режимов азотирования триботехнического назначения / Л. И. Куксенова, С. А. Герасимов, В. Г. Лаптева [и др.]. – Текст : электронный // Наука и образование : науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2012. – № 7. – С. 1-10. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/429061.html> (дата обращения: 29.08.2023).
- 42.Лавриненко, В. Ю. Разработка методики автоматизированного проектирования процессов высадки поковок типа стержня с шаровой головкой с направленным волокнистым строением : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. Ю. Лавриненко. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 245 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 43.Ланской, Е. Н. Совершенствование процессов полугорячей объемной

- штамповки / Е. Н. Ланской, Б. М. Позднеев. – Москва : НИИмаш, 1983. – 56 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 44.Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебник для машиностроит. вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1980. – 493 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 45.Лясников, А. В. К вопросу оценки точности полостей, изготавливаемых выдавливанием / А. В. Лясников, Б. П. Рудаков, Н. И. Нестеров. – Текст : непосредственный // Перспективы производства точных заготовок и деталей методами объемного деформирования. – Москва : МДНТП, 1990. – С. 132-134.
- 46.Милевская, Т. В. Исследование процесса горячей объёмной штамповки медицинского инструмента в программном комплексе QForm на примере технологии точной горячей объёмной штамповки левой полустворки зубных щипцов Щ-13 / Т. В. Милевская, Н. В. Коробова. – Текст : электронный // Наука и образование : науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2011. – № 13. – 9 с. : ил. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protssessa-goryachey-obemnoy-shtampovki-meditsinskogo-instrumenta-v-programmnom-komplekse-qform-na-primere-tehnologii> (дата обращения: 10.02.2024).
- 47.Минков, К. А. Повышение эксплуатационной стойкости штампов из стали 5ХНМ за счет формирования заданной структуры и свойств при водо-воздушном охлаждении : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / К. А. Минков. – Нижний Новгород : НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2022. – 187 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 48.Михайлицын, С. В. Восстановление и упрочнение деталей машин : учеб. пособие / С. В. Михайлицын, М. А. Шекшеев, А. В. Ярославцев. – Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2017. – 179 с. : ил. – Текст : непосредственный.

49. Молот штамповочный паровоздушный арочного типа МВ2145 // Станкоснаб : [сайт]. – 2008. – URL: <https://www.stanki-snab.ru/catalog/kuznechno-pressovoe-oborudovanie/moloty/parovozdushnye-arochnogo-tipa-shtampovochnye/molot-shtampovochnyy-parovozdushnyy-arochnogo-tipa-mv2145/> (дата обращения: 03.12.2023). – Текст. Изображение : электронные.
50. Мухаметзянов, И. Р. Совершенствование материалов и технологические решения по повышению стойкости штамповой оснастки для горячедеформируемых полуфабрикатов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / И. Р. Мухаметзянов. – Казань : КФУ, 2024. – 122 с. : ил. – Текст : непосредственный.
51. Непершин, Р. И. Влияние основных параметров горячей штамповки тонких заготовок из углеродистой стали на температурно-напряженное состояние системы инструмент-заготовка / Р. И. Непершин, Ю. Г. Иванов, Л. Я. Макшанов. – Текст : непосредственный // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – № 11. – С. 34-36.
52. Новик, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – Москва : Машиностроение ; София : Техника, 1980. – 304 с. : ил. – Текст : непосредственный.
53. Об износостойкости штампов // Строительный портал : [сайт]. – 2013. – URL: <http://okvsk.ru/masterstvo-kuzneca/1074-ob-iznostoykosti-shtampov.html> (дата обращения: 27.08.2023). – Текст : электронный.
54. Орлов, А. Р. Тёплая деформация / А. Р. Орлов, Л. Н. Тюрин, В. К. Грибовский [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1978. – 216 с. : ил. – Текст : непосредственный.
55. Охрименко, Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства /

- Я. М. Охрименко. – Москва : Машиностроение, 1976. – 601 с. : ил. – Текст : непосредственный.
56. Патент № 2224011 Российская Федерация, МПК С10М 173/02 (2000.01), С10М 125/02 (2000.01), С10М 125/10 (2000.01), С10М 135/10 (2000.01), С10М 125/24 (2000.01), С10М 125/26 (2000.01), С10М 145/40 (2000.01), С10М 129/16 (2000.01), С10N 30/06 (2000.01), С10N 40/20 (2000.01). Смазка для заготовок при горячей или полугорячей обработке металлов давлением : № 2002132250 : заявл. 02.12.2002 : опубл. 20.02.2004, Бюл. № 5 / Петров А. Н., Андрейченко Т. П., Сайранова Т. А. – 4 с. – Текст : непосредственный.
57. Патент № 2784307 Российская Федерация, МПК В21К 5/16 (2006.01). Способ изготовления гаечных ключей пластическим деформированием : № 2021136355 : заявл. 09.12.2021 : опубл. 23.11.2022, Бюл. № 33 / Сосенушкин Е. Н., Гусев Д. С., Шарыкин М. В. [и др.]. – 10 с. : ил. – Текст : непосредственный.
58. Патент № 2784309 Российская Федерация, МПК В21К 5/16 (2006.01). Способ штамповки гаечных ключей : № 2021136354 : заявл. 09.12.2021 : опубл. 23.11.2022, Бюл. № 33 / Сосенушкин Е. Н., Гусев Д. С., Шарыкин М. В. [и др.]. – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.
59. Патент № 2827963 Российская Федерация, МПК В21К 5/16 (2006.01), В21К 27/04 (2006.01), В21J 13/08 (2006.01). Способ штамповки гаечных ключей : № 2023123383 : заявл. 08.09.2023 : опубл. 04.10.2024, Бюл. № 28 / Сосенушкин Е. Н., Гусев Д. С., Шарыкин М. В. [и др.]. – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.
60. Петров, А. Н. Коллоидно-графитовые смазочные материалы в процессах горячего деформирования сталей и сплавов / А. Н. Петров. – Москва : Московский Политех, 2019. – 216 с. : ил. – Текст : непосредственный.
61. Петров, А. Н. Теория обработки металлов давлением: штампы, износ и

- смазочные материалы : учеб. пособие для сред. проф. образования / А. Н. Петров, П. А. Петров, М. А. Петров. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2023. – 130 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 62.Петров, В. И. Технологические основы обеспечения стойкости инструмента и формирования качества изделий цепного производства при полугорячем выдавливании : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / В. И. Петров. – Тула : ТулГУ, 2007. – 39 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 63.Пещеров, А. В. Полугорячее выдавливание инструмента из труднодеформируемых сталей : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. В. Пещеров. – Тула : ТулГУ, 2001. – 193 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 64.Позняк, Л. А. Штамповые стали / Л. А. Позняк, Ю. М. Скрынченко, С. И. Тишаев. – Москва : Металлургия, 1980. – 244 с. : ил. – Текст : непосредственный.
- 65.Прокофьев, С. И. Исследование заполнения и стойкости штампа на окончательном переходе горячей объемной штамповки поковок типа кронштейн / С. И. Прокофьев. – Текст : непосредственный // Профессиональные коммуникации в научной среде - фактор обеспечения качества исследований : Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции, Альметьевск, 16 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: ООО Издательский дом «Сциентиа», 2024. – С. 98-100.
- 66.Ремпис, М. Технологические процессы и автоматизированные комплексы для полугорячей штамповки фирмы Schuler (Германия) / М. Ремпис. – Москва : МДИТП, 1990. – 30 с. – Текст : непосредственный.
- 67.Савостьянов, В. Н. 100 Лет: фотоупругость - ЛИН МИСИ – МГСУ / В. Н. Савостьянов, Л. Ю. Фриштер. – Текст : электронный // Вестник МГСУ. – 2021. – № 10. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/100-let->

[fotouprugost-lin-misi-mgsu](#) (дата обращения: 15.07.2023).

68. Сачков, Ю. В. Статистические методы / Ю. В. Сачков. – Текст : непосредственный // Новая философская энциклопедия : в 4 т. Т. 3. – Москва : Мысль, 2010. – С. 636-637.
69. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – Москва : Мир, 1979. – 392 с. : ил. – Текст : непосредственный.
70. Селищев, А. И. К вопросу об определении стойкости штампов для горячей объемной штамповки / А. И. Селищев. – Текст : непосредственный // КШП. ОМД. – 2015. – № 1. – С. 6-13.
71. Селищев, А. И. Повышение стойкости оснастки для горячей объемной штамповки / А. И. Селищев, Л. К. Набиуллина, А. В. Корнилова. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2014. – № 3. – С. 58-61.
72. Селищев, А. И. Разработка метода определения стойкости штампов для горячей объемной штамповки по величине коэрцитивной силы / А. И. Селищев, А. В. Корнилова. – Текст : непосредственный // КШП. ОМД. – 2018. – № 9. – С. 27-36.
73. Семёнов, Е. И. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / Е. И. Семёнов [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2010. – 717 с. : ил. – Текст : непосредственный.
74. Семёнов, Е. И. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 2. Горячая штамповка / Е. И. Семёнов [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2010. – 720 с. : ил. – Текст : непосредственный.
75. Сидоров, А. А. Разработка технологического процесса высадки поковок типа стержня с полусферическим фланцем с направленным волокнистым строением : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. А. Сидоров. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 158 с. : ил. – Текст : непосредственный.

- 76.Скрипаленко, М. М. К вопросу выбора программных продуктов для моделирования процессов обработки металлов давлением / М. М. Скрипаленко, М. Н. Скрипаленко. – Текст : непосредственный // *Металлург.* – 2013. – № 1. – С. 20-23.
- 77.Смирнов, С. В. Моделирование разрушения штамповой стали от трещин разгара при циклическом термомеханическом воздействии / С. В. Смирнов, Р. Е. Лаповок, В. П. Швейкин. – Текст : непосредственный // *Кузнечно-штамповочное производство.* – 1997. – № 8. – С. 11–14.
- 78.Сосенушкин, Е. Н. Автоматизированный выбор инструментального материала для штампов объемного деформирования / Е. Н. Сосенушкин, А. Е. Сосенушкин, А. В. Хроменков. – Текст : непосредственный // *Вестник машиностроения.* – 2018. – № 3. – С. 17-24.
- 79.Сосенушкин, Е. Н. Износ штампов объемного деформирования по критериям малоциклового усталости и пластического смятия / Е. Н. Сосенушкин, А. В. Хроменков, И. М. Володин [и др.]. – Текст : непосредственный // *Трение и износ.* – 2019. – Т. 40, № 2. – С. 227-237.
- 80.Сосенушкин, Е. Н. Математическая модель адгезионного износа штампов объемной штамповки / Е. Н. Сосенушкин, А. В. Хроменков, Ю. А. Мельник. – Текст : непосредственный // *Трение и износ.* – 2014. – Т. 35, № 6. – С. 752-758.
- 81.Сосенушкин, Е. Н. Оценка изнашивания штампов для объемного деформирования по критерию пластического смятия контактной поверхности / Е. Н. Сосенушкин, А. Е. Сосенушкин, А. В. Хроменков. – Текст : непосредственный // *Вестник машиностроения.* – 2017. – № 7. – С. 59-63.
- 82.Сосенушкин, Е. Н. Прогрессивные процессы объёмной штамповки / Е. Н. Сосенушкин. – Москва : Машиностроение, 2011. – 480 с. : ил. – Текст : непосредственный.

83. Сосенушкин, Е. Н. Совершенствование технологической подготовки производства деталей холодной и полугорячей объёмной штамповкой / Е. Н. Сосенушкин. – Текст : непосредственный // Машиностроительное пр-во. Сер. Технология и оборудование кузнечно-штамповочного пр-ва : обзор. информ. ВНИИТЭМР. Вып. 1. – Москва : ВНИИТЭМР, 1991. – 108 с. : ил.
84. Сосенушкин, Е. Н. Термомеханика разрушения контактной поверхности штампов объёмного деформирования / Е. Н. Сосенушкин, А. В. Хроменков, М. В. Шарыкин. – Текст : непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2023. – Т. 21, № 7. – С. 317-322.
85. Специальные технологии штамповки // Центральный металлический портал РФ : [сайт]. – 2011. – URL: http://metallicheckiy-portal.ru/articles/obrabotka/shtampovka/tehnol_soxr_metalla_pri_stampovke/spec_tehnol_shtampovki/16 (дата обращения: 02.10.2021). – Текст : электронный.
86. Степанович, В. А. Философия и методология науки (понятия категории проблемы школы направления): терминологический словарь-справочник / В. А. Степанович, А. В. Климович. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. – 275 с. – Текст : непосредственный.
87. Степанский, Л. Г. Прогнозирование надёжности технологических процессов, инструмента и машин в обработке металлов давлением / Л. Г. Степанский. – Москва : Модерат, 2015. – 288 с. : ил. – Текст : непосредственный.
88. Сторожев, М. В. Ковка и объёмная штамповка стали : справочник : в 2 т. Т. 2. / М. В. Сторожев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1967. – 448 с. : ил. – Текст : непосредственный.
89. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. –

- Москва : Машиностроение, 1977. – 423 с. : ил. – Текст : непосредственный.
90. Стуканов, В. А. Материаловедение : учеб. пособие для сред. проф. образования / В. А. Стуканов. – Москва : Форум, 2020. – 368 с. : ил. – Текст : непосредственный.
91. Табаков, В. П. Повышение стойкости рабочих поверхностей деталей штампов и пресс-форм из теплостойких сталей / В. П. Табаков, В. Н. Кокорин, Ю. А. Титов [и др.]. – Текст : электронный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – № 11-1. – С. 64-68. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-stoykosti-rabochih-poverhnostey-detaley-shtampov-i-press-form-iz-teplostoykih-staley> (дата обращения: 08.10.2023).
92. Термомеханическая обработка металлов // Металлообработка : [сайт] – 2005. – URL: <https://www.metobr-expo.ru/ru/articles/termomechanicheskaya-obrabotka-metallov/> (дата обращения: 13.11.2021). – Текст : электронный.
93. Технологии анализа информации и визуализации знаний. Аналитические методы // iRule : [сайт] – 2004. – URL: <https://irule.ru/tehnologii/vidy-analiza.html> (дата обращения: 06.12.2022). – Текст : электронный.
94. Технологические пути повышения стойкости // StudFiles : [сайт] – 2012. – URL: <https://studfile.net/preview/2114681/page:23/> (дата обращения: 13.11.2021). – Текст : электронный.
95. Трахтенберг, Б. Ф. Стойкость штампов и пути её повышения / Б. Ф. Трахтенберг. – Куйбышев : Куйбышев. кн. изд-во, 1964. – 280 с. : ил. – Текст : непосредственный.
96. Трусова, Е. В. Рост зерна аустенита при нагревании штамповых сталей / Е. В. Трусова, Н. А. Костин. – Текст : непосредственный // Новая наука: современное состояние и пути развития : сб. ст.

- Междунар. науч.-практ. конф. – 2016. – № 3. – С. 145-148.
97. Трусова, Е. В. Технологические особенности процесса термической обработки деталей штампов / Е. В. Трусова. – Текст : электронный // Auditorium. – 2017. – № 3 (15). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskie-osobennosti-protssesa-termicheskoy-obrabotki-detaley-shtampov> (дата обращения: 14.11.2021).
98. Тылкин, М. А. Штампы для горячего деформирования металлов : учеб. пособие для вузов / М. А. Тылкин. – Москва : Высшая школа, 1977. – 496 с. : ил. – Текст : непосредственный.
99. Фомин, Д. Ю. Технологический процесс упрочняющей полугорячей термомеханической обработки при штамповке поковок : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. Ю. Фомин. – Санкт-Петербург : СПбПУ, 2013. – 224 с. : ил. – Текст : непосредственный.
100. Хаймович, И. Н. Исследование стойкости молотового штампа и её влияние на конечную стоимость инструментальной оснастки / И. Н. Хаймович, Д. А. Елистратов, Е. А. Громовая [и др.]. – Текст : электронный // Известия Самарского научного центра РАН. – 2022. – № 1 (105). – С. 20-23. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-stoykosti-molotovogo-shtampa-i-eyo-vliyanie-na-konechnuyu-stoimost-instrumentalnoy-osnastki> (дата обращения: 16.09.2023).
101. Хамин, О. Н. Исследование влияния метода изготовления формообразующих полостей штампов для холодной высадки заготовок шаров на их стойкость / О. Н. Хамин, И. А. Краснов. – Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии. – 2022. – № 6 (45). – С. 92-98.
102. Хыбеяги, А. И. Холодное выдавливание рельефных полостей технологической оснастки / А. И. Хыбеяги. – Москва :

- Машиностроение, 1981. – 79 с. : ил. – Текст : непосредственный.
103. Численные методы : [сайт]. – 2009. – URL: https://lms2.sseu.ru/courses/eresmat/metod/met3/parmet3_1.htm (дата обращения: 11.12.2022). – Текст : электронный.
104. Шарыкин, М. В. Анализ влияния конструкции ручья штамповых вставок горячей штамповки сдвоенных тонкопалотных поковок из алюминийевого сплава на их напряженно-деформированное состояние и стойкость инструмента / М. В. Шарыкин, Е. Н. Сосенушкин, Е. А. Яновская. – Текст : непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2025. – Т. 23. № 5. С. 216-220.
105. Шарыкин, М. В. Анализ основных методов оценки стойкости молотовых штампов при горячей объемной штамповке детали типа «лопасть» / М. В. Шарыкин, Е. Н. Сосенушкин. – Текст : непосредственный // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2023 : материалы XV Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 1–3 нояб. 2023 г. : в 2 т. Т. 1. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. – С. 230-232.
106. Шарыкин, М. В. Вариант технологии штамповки сдвоенных тонкопалотных поковок из алюминийевого сплава и его влияние на стойкость штамповой оснастки / М. В. Шарыкин, Е. Н. Сосенушкин. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 2 (73). – С. 99–106.
107. Шарыкин, М. В. Износостойкость штампа с ограничением течения металла при штамповке тонкопалотных поковок / М. В. Шарыкин, Е. Н. Сосенушкин. – Текст : непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2025. – Вып. 3. – С. 362–370.
108. Шарыкин, М. В. Исследование влияния формы, размеров и расположения заготовки в молотовом штампе на его стойкость / М. В. Шарыкин, Т. Х. Аюпов, Е. Н. Сосенушкин, Н. С. Толмачев. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 3 (66). –

С. 103–109.

109. Шарыкин, М. В. Исследование износа штампа при штамповке тонкополотной поковки на кривошипно-коленном прессе / М. В. Шарыкин, Е. Н. Сосенушкин, Т. Х. Аюпов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы науки и техники. 2024 : материалы Всерос. (нац.) науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 19–21 марта 2024 г. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 1066-1067.
110. Шарыкин, М. В. Исследование процесса формоизменения тонкополотной поковки при штамповке на кривошипно-коленном прессе / М. В. Шарыкин, Е. Н. Сосенушкин. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы науки и техники. 2023 : материалы Всерос. (нац.) науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 15–17 марта 2023 г. – Ростов-на-Дону, 2023. – С. 983-984.
111. Шпунькин, Н. Ф. Обработка материалов давлением: терминологический словарь / Н. Ф. Шпунькин. – Москва : Моск. политех, 2018. – 192 с. – Текст : непосредственный.
112. Bandar, A. R. Modeling Spin Testing Using Location Specific Material Properties / A. R. Bandar, R. Shankar, W. Wu [et al.]. – Текст : электронный // Presentation of Scientific Forming Technologies Corporation. – Columbus, OH, 2012. – 57 p. – URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA579315.pdf> (дата обращения: 02.12.2022).
113. Basermann, A. Dynamic load-balancing of finite element applications with the drama library / A. Basermann, J. Clinckemahillie, T. Coupez [et al.]. – Текст : непосредственный // Applied Mathematical Modelling. – 2000. – Vol. 25, № 2. – P. 83-98.
114. Borowski, J. The phenomenon of durability variable dies for aluminum extrusion profiles / J. Borowski, J. Wendland. – Текст : непосредственный // METALURGIJA. – 2016. – Vol. 55, № 2. – P. 229-

- 232.
115. Chantzis, D. Review on additive manufacturing of tooling for hot stamping / D. Chantzis, X. Liu, D. J. Politis [et al.]. – Текст : непосредственный // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 109. – P. 87–107.
116. Gharbi, M. Increasing performance of Hot Stamping systems / M. Gharbi, C. Palma, R. Vollmer [et al.]. – Текст : непосредственный // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 207. – P. 765-770.
117. Gronostajski, Z. Comprehensive Review of Methods for Increasing the Durability of Hot Forging Tools / Z. Gronostajski, P. Widomski. – Текст : непосредственный // Procedia Manufacturing. – 2020. – Vol. 47. – P. 349-355.
118. Hu, C. L. Effect of Warm Deformation Parameters and Cooling Rates on the Recrystallization Transformation Microstructure in 40Cr Steel / C. L. Hu, Z. Zhao, A. J. Gong [et al.]. – Текст : непосредственный // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2015. – Vol. 24. – P. 505-516.
119. Machine's specifications Smeral LLK 2000 // Exapro : [сайт]. – 2004. – URL: <https://www.exapro.com/sp/smeral-llk2000-6948/> (дата обращения: 03.12.2022). – Текст. Изображение : электронные.
120. McClung, R. C. Integration of manufacturing process simulation with probabilistic damage tolerance analysis of aircraft engine components / R. C. McClung, M. P. Enright, W. Liang [et al.]. – Текст : электронный // Presentation at AIAA SDM Conference. – Honolulu, 2012. – 13 p. – URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2012-1528> (дата обращения: 02.12.2022).
121. Rolinski, E. Enhancing automotive stamping-die performance with plasma nitriding / E. Rolinski, M. Woods. – Текст : электронный // INDUSTRIAL HEATING. – 2020. – Vol. 28. – P. 25-28. – URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2012-1528> (дата обращения: 06.12.2022).
122. Shang, X. Optimization design of insert hot stamping die's cooling

- system and research on the microstructural uniformity control of martensitic phase transitions in synchronous quenching process / X. Shang, L. Pang. – Текст : непосредственный // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 1. – P. 1-11.
123. Wang, W. Variable contour two-step warm extrusion forming of spur gear and the deformation behavior of 20Cr2Ni4A steel / W. Wang, J. Zhao, R. Zhai [et al.]. – Текст : непосредственный // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 88. – P. 3163-3173.
124. Xing, L. Prior Warm Deformation Dependence on Microstructural Evolution and Tensile Properties of a High-Mn Steel / L. Xing, Z. Yang, C. Liqing. – Текст : непосредственный // *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. – 2019. – Vol. 71. – P. 1303-1312.

ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТЫ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

«УТВЕРЖДАЮ»
проректор по образовательной
деятельности и молодежной политике
к.т.н.
М.В. Бильчук
« 12 » _____ 2025 г.

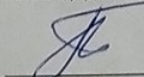


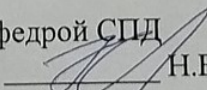
АКТ
внедрения в учебный процесс результатов
диссертационной работы «Повышение стойкости штампов горячей объёмной
штамповки поковок деталей типа «лопасть»»
аспиранта М.В. Шарыкина

Результаты теоретических исследований механизмов износа при нестационарном течении тонких слоев со сложными границами при заполнении полости ручьев штампов, полученные на основе разработанных аспирантом математической и компьютерных моделей, а также результаты экспериментов по реализации вариантов технологии изготовления поковок, имеющих тонкие полотна, которые подтверждают адекватность выдвинутых гипотез и проведенных расчетов, внедрены в учебный процесс в курсах бакалавриата «Планирование экспериментов в исследовании технологического процесса», «Специализированное оборудование для инновационных процессов обработки давлением», «Технология производства кузнечно-штамповочного оборудования и штамповой оснастки» согласно учебным планам направления 15.03.01 «Машиностроение», а также в курсе «Проблемы прочности и пластичности в технологических процессах» для магистратуры направления 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» профиль «Физико-технологические процессы обработки давлением» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Представитель подразделения, в котором внедрена разработка: Представители подразделения разработчика:

Начальник
учебно-методического управления
к.т.н.

 С.А. Тясто

Зав. кафедрой СПД
д.т.н.  Н.В. Коробова

Аспирант  М.В. Шарыкин

ТЕХНОДИНАМИКА
МПО им. И. Румянцева

АО «МПО им. И. Румянцева»

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор

В.В. Фроленков

АКТ

« 19 » 03 2025 г.

Москва

№ _____

о внедрении результатов диссертационной работы, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук аспирантом кафедры систем пластического деформирования Шарькиным Михаилом Валерьевичем

Настоящим актом подтверждаем, что полученные в диссертации на тему «Повышение стойкости штампов горячей объемной штамповки поковок деталей типа «лопасть»» научная специальность 2.5.7. «Технологии и машины обработки давлением» (научный руководитель д.т.н., профессор Сосенушкин Е.Н.), теоретические и экспериментальные результаты исследования процессов горячей объемной штамповки поковок сложной формы с целью обеспечения повышенной стойкости штампов, работающих в тяжелых условиях циклических температурных и механических нагрузок, внедрены в АО «МПО им. И. Румянцева».

Предмет внедрения: разработанные новые технологические процессы пластического деформирования на прессах и молотах в открытых штампах одинарных и сдвоенных поковок, имеющих тонкие полотна, из сталей и цветных сплавов. Процессы являются ресурсосберегающими и обеспечивающими большую стойкость штампов.

Результат внедрения: увеличение производительности ГОШ в 2 раза за счет сдваивания поковок, уменьшение расхода металла увеличением коэффициента использования металла заготовок на 12%, что связано с уменьшением отходов и минимизацией вероятности получения бракованных поковок, а также повышение стойкости штампов: молотовых - на 23%; прессовых - на 62% за счет конструкторско-технологических и эксплуатационных мероприятий, включающих изменение форм и размеров заготовок под конкретные технологии и окончательные ручки, обеспечивающие изменение направлений течения металла при их заполнении, подбором составов смазочных материалов для уменьшения фактора трения, а также проведением разных вариантов химико-термической обработки рабочих поверхностей штампов для повышения их износостойкости.

Технологические параметры, полученные по разработанным соискателем математическим и компьютерным моделям, подтверждены физическими экспериментами в промышленных условиях, в том числе в кузнечно-прессовом цехе нашего предприятия.

Главный металлург _____ А.А. Степанов

« 19 » 03 2025 г.

АО МПО им. И. Румянцева
ОГМет

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2784307

Способ изготовления гаечных ключей пластическим деформированием

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Кадымов Вагид Ахмедович (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Гусев Дмитрий Сергеевич (RU), Шарыкин Михаил Валерьевич (RU), Хохлова Ника Геннадьевна (RU)*

Заявка № 2021136355

Приоритет изобретения **09 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **23 ноября 2022 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **09 декабря 2041 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2784309

Способ штамповки гаечных ключей

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Кадымов Вагид Ахмедович (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Гусев Дмитрий Сергеевич (RU), Шарыкин Михаил Валерьевич (RU), Хохлова Ника Геннадьевна (RU)*

Заявка № 2021136354

Приоритет изобретения **09 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **23 ноября 2022 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **09 декабря 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

