

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена на кафедре систем пластического деформирования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва.

- Научный руководитель:** **Сосенушкин Евгений Николаевич**
доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры систем пластического деформирования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва
- Официальные оппоненты:** **Шибakov Владимир Георгиевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машиностроение» Набережночелнинского института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны
- Петров Михаил Александрович**
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет), г. Москва

Защита состоится «___» _____ 2025 г. в ____:____ на заседании диссертационного совета 24.2.332.01, при ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по адресу: 127055, Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте <https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/sharykin-mikhail-valerevich-/index.php>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направить в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.332.01, к.т.н.



Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Современные тенденции развития машиностроения требуют увеличения статической и динамической прочности деталей, в том числе лопастей, и использования материалов с необходимыми свойствами, а также повышения уровня научных достижений в области аэро- и гидродинамики. 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. Важнейшим фактором, почти всегда определяющим эффективность продукции кузнечнопрессовых цехов, является стойкость штамповой оснастки.

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

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие методов увеличения стойкости штампового инструмента в процессах горячей объёмной штамповки внесён трудами видных учёных – представителей российских и зарубежных научных школ обработки давлением, среди которых: Л.Б. Аксенов, А.Э. Артес, В.А. Бабенко, Е.И. Бельский, А.Н. Брюханов, Д.И. Васильев, А.В. Власов, С.И. Губкин, С.А. Довнар, И.Л. Константинов, А.В. Лясников, Р.И. Непершин, Я.М. Охрименко, А.Н. Петров, Л.А. Позняк, А.В. Ребельский, Е.И. Семёнов, С.В. Смирнов, Е.Н. Сосенушкин, Л.Г. Степанский, М.В. Сторожев, Б.Ф. Трахтенберг, М.А. Тылкин, Altan T., Worowski J., Gronostajski Z., Lange K., Montero M., Valle G., Shang X., Walters J. и многие другие.

Как показали исследования научно-технической литературы по данной тематике, одним из ключевых параметров, влияющих на стойкость штампового инструмента, являются механические и эксплуатационные свойства штамповой стали, в частности твёрдость рабочей поверхности штампа (гравюры). Предложены методики и ряд эмпирических зависимостей определения стойкости штампового инструмента, демонстрирующих удовлетворительную точность для определённых технологических условий.

В своей статье Хаймович И.Н. и Елистратов Д.А. установили, что модификация геометрии облойной канавки способна повысить стойкость инструмента до 2 раз.

Данные работ Власова А.В. 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 также 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.

Объектами исследования являются штампы горячей объёмной штамповки для изготовления поковок деталей типа «лопасть», изготавливаемых из инструментальной штамповой стали марки 5ХНВ ГОСТ 5950-2000.

Предмет исследования – технология горячей объёмной штамповки поковок детали типа «лопасть» и ее влияние на объёмный 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 объемной 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 стали 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 HRC 41, дополнительное сульфидирование увеличило износостойкость в среднем на 25 %, а проведение азотирования на твёрдость HRC 62 – на 67 %.

Методология и 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 объёмный 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 деформирующего 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, представлена научная новизна, перечислены методы исследования, теоретическая и практическая значимость, представлены результаты, полученные автором лично и выносимые на защиту, приведены данные об апробации результатов работы, подтверждающей их достоверность.

В первой главе были рассмотрены особенности изделия «штамп для горячей объёмной штамповки» и установлено, что формообразующие штампы являются сложными и дорогостоящими инструментами, работающими в тяжёлых условиях, что приводит к их быстрому износу.

Технология горячей объёмной штамповки (ГОШ) является самой распространённой технологией получения поковок не только машиностроения, но и других отраслей промышленности. Однако для неё в текущей практике еще недостаточно внедрены методики оценки влияния конструктивных параметров заготовки и штампа, и технологических параметров процесса на качественные и эксплуатационные характеристики поковки и штамповой оснастки.

Было установлено, что ключевые направления повышения стойкости штамповой оснастки традиционно подразделяются на: 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 компьютерный анализ и рационализация технологического процесса штамповки и, при необходимости, изменение конструкции штамповой оснастки.

Наибольшее влияние на стойкость штампов оказывает его напряжённо-деформированное состояние, зависящее от характера нагружения и распределения температурных полей. Существует множество методик, позволяющих их рассчитать, однако большинство из них относятся только к определённым видам поковок, имеют низкую точность из-за множества допущений или математическую сложность расчётов. Поэтому наибольший интерес представляет определение взаимосвязей между стойкостью штампового инструмента и режимами технологического процесса для поковок определённой группы.

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-3D, позволяющий оценить большинство характеристик технологического процесса и штамповой оснастки.

Во второй главе рассмотрены особенности конструкции деталей типа «лопасть», выбраны детали представители и проанализированы их производственные технологические процессы. Первой деталью представителем является поковка из алюминиевого сплава АК4-1, штампуемая на кривошипном прессе (рисунок 1).

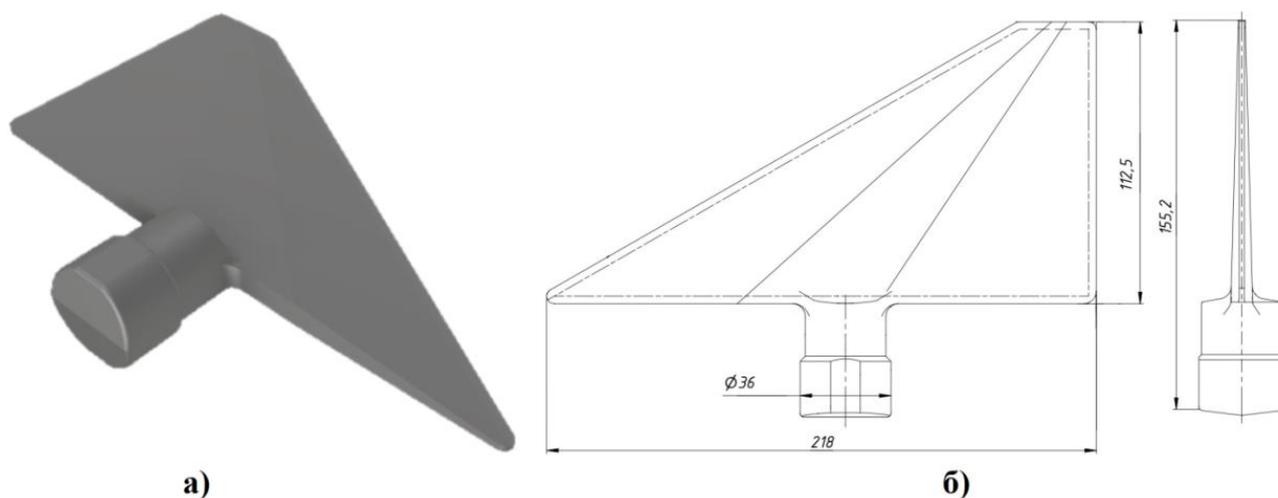


Рис. 1. 3D модель (а) и эскиз (б) поковки детали типа «лопасть» из АК4-1

В ходе анализа производственного технологического процесса штамповки данной поковки было выявлено, что для улучшения технико-экономических показателей производства необходимо: использовать более подходящие смазочные материалы, обеспечивающие снижение фактора трения $m \leq 0,2$ и заполнение металлом гравюры штампа; сократить количество

переходов, что в значительной степени увеличит стойкость обрезающего штампа и повысит производительность труда; повысить коэффициент использования материала, изменив форму и размеры заготовки. Расчётный коэффициент использования материала в производственной технологии составляет всего 39 %, что является значительным недостатком.

Для этой поковки были предложены два варианта новой технологии и новые конструкции штампов соответственно. В первом варианте предлагается использовать технологию штамповки сдвоенной поковки (рисунок 2), которая позволит использовать излишки металла, неизбежно уходящие в облой в зоне наклонной стороны полотна поковки, для оформления 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.

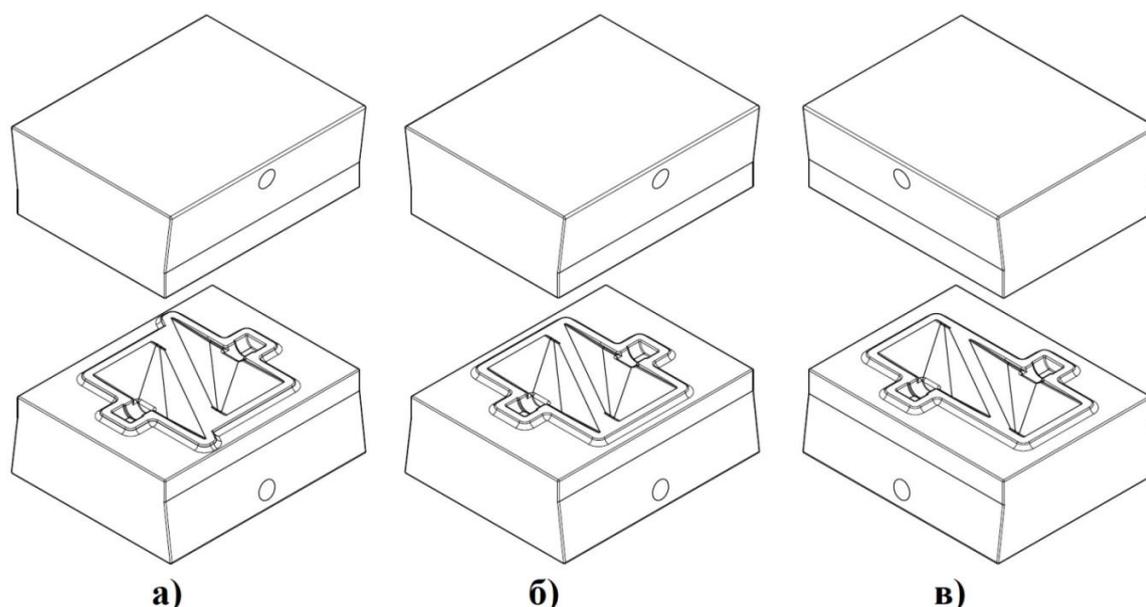


Рис. 2. 3D модели штамповых вставок для штамповки сдвоенных поковок из алюминия: а – оси хвостовиков поковок совпадают с осью заготовки располагаемой в штампе; б – оси хвостовиков поковок смещены друг относительно друга, крайние точки боковых поверхностей лежат на одной линии; в – оси хвостовиков поковок смещены друг относительно друга, верхняя часть первой поковки лежит на одной линии с нижней частью второй поковки

Во втором варианте предлагается ввести дополнительные поверхности (рисунок 3), которые будут препятствовать чрезмерному выходу металла в облой. 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 на 19 %. Число переходов штамповки, как и в предыдущем варианте, уменьшится до одного, что также повышает производительность процесса.

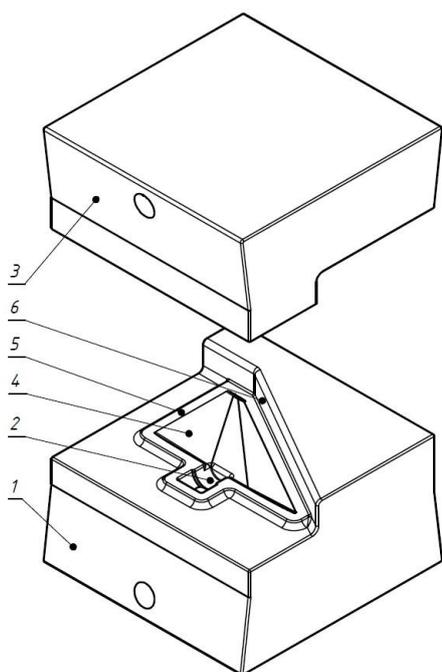


Рис. 3. 3D модель штамповых вставок с ограничителем для штамповки алюминиевой поковки: 1 и 3 – нижняя и верхняя штамповая вставка соответственно; 2 и 4 – элемент гравюры штампа, отвечающий за формирования хвостовика и полотна поковки соответственно; 5 – облойный мостик; 6 – вертикальная стенка (ограничитель)

Вторым представителем была выбрана поковка из жаропрочной стали марки 13X11H2B2MФ-Ш штампуемая на паровоздушном штамповочном молоте (рисунок 4). 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 при позиционировании заготовки в штампе. Расчётный коэффициент использования материала в производственной технологии составляет 70 %, однако было установлено, что это значение можно повысить.

коэффициент использования материала, уменьшить количество технологических переходов, а также повысить устойчивость при позиционировании заготовки в штампе. Расчётный коэффициент использования материала в производственной технологии составляет 70 %, однако было установлено, что это значение можно повысить.

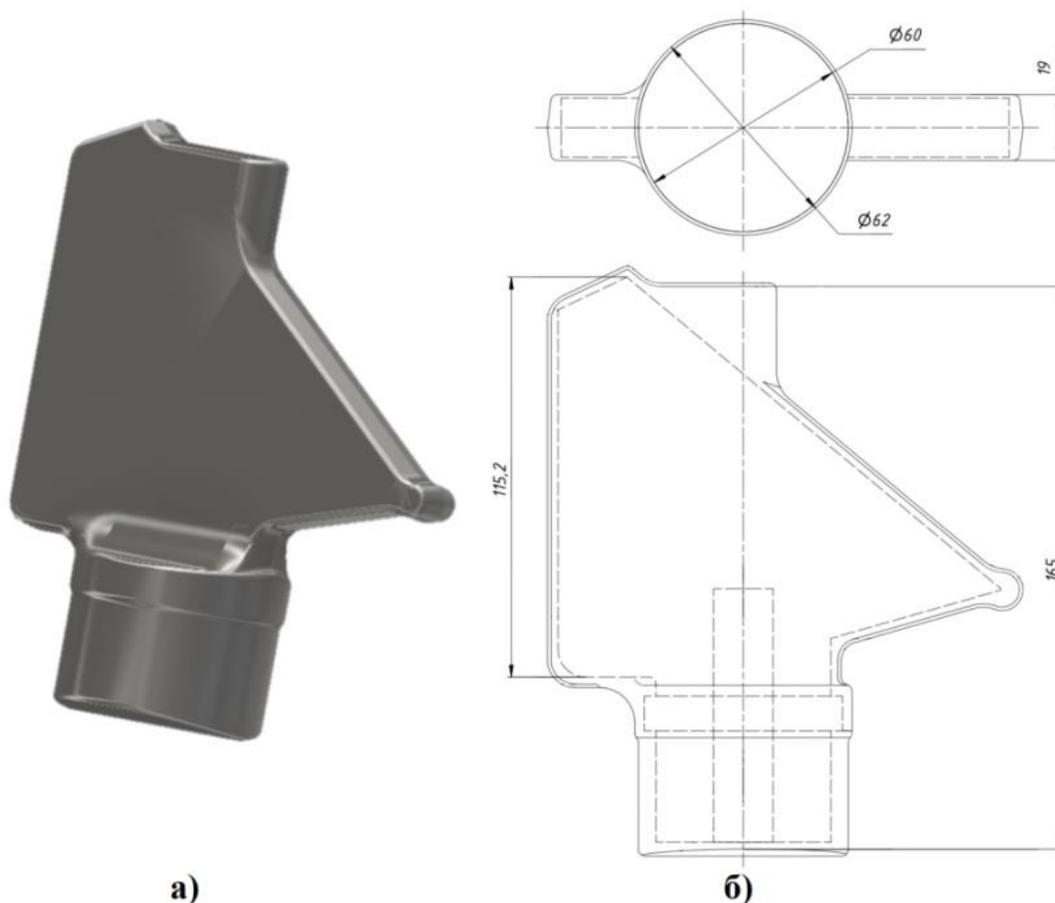


Рис. 4. 3D модель (а) и эскиз (б) поковки детали типа «лопасть» из 13X11H2B2MФ-Ш

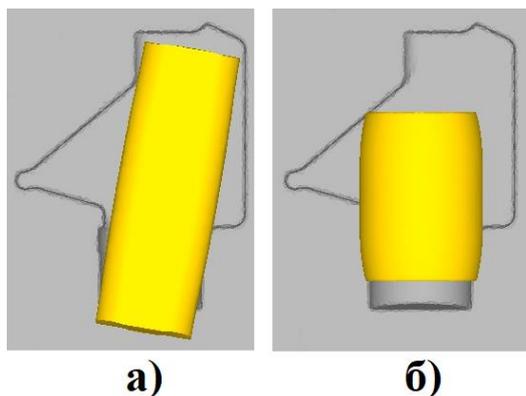


Рис. 5. Позиционирование заготовки в штампе при штамповке стальной поковки по производственной (а) и предлагаемой (б) технологиям

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 (рисунок 5).

Третья глава посвящена компьютерному моделированию производственных и разработанных процессов горячей объёмной штамповки обсуждаемых поковок и сравнению характеристик альтернативных процессов. В качестве исходных данных для моделирования ГОШ поковки из алюминия как по производственному (рисунок 6), так и по предлагаемым процессам использовались следующие параметры: номинальная сила пресса – 20 МН; материал заготовки – АК4-1; температура заготовки, устанавливаемой в штамп – 470 °С; температура штампа – 300 °С; твёрдость штампа по шкале Бринелля – НВ 372; фактор трения $m = 0,2$.

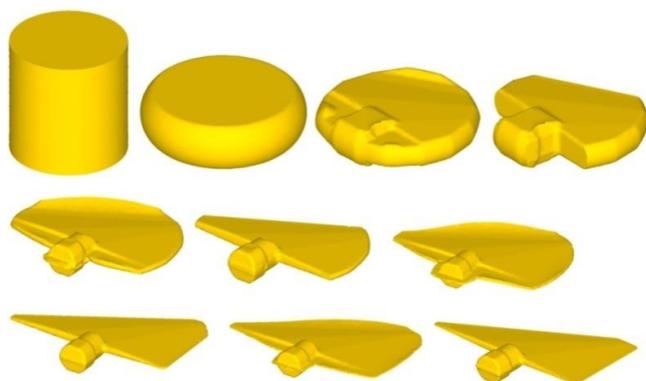


Рис. 6. Изменение геометрии заготовки по переходам производственного процесса горячей объёмной штамповки поковки из АК4-1

Во всех предлагаемых процессах операции пластического деформирования проводятся с одного нагрева, уменьшая затраты времени и энергии, благодаря отказу от проведения промежуточных нагревов. Кроме того, технология штамповки сдвоенной поковки позволит в большей степени использовать мощность оборудования, а не тратить энергию вхолостую.

Напряжения, возникающие в металле поковок – сжимающие, что способствует повышению механических свойств. Для рассмотренной поковки из АК4-1 средние напряжения имеют следующие значения при штамповке: по производственному процессу – от 379 до 143 МПа; сдвоенной поковки в штампе тип А – от 470 до 120 МПа; сдвоенной поковки в штампе тип Б – от 470 до 120 МПа; сдвоенной поковки в штампе тип В – от 381 до 116 МПа; в штампе с ограничителем – от 450 до 110 МПа.

Наиболее удачным вариантом технологического процесса горячей объёмной штамповки алюминиевой поковки является технология штамповки сдвоенной поковки в штампе тип Б (рисунок 7). Согласно данным

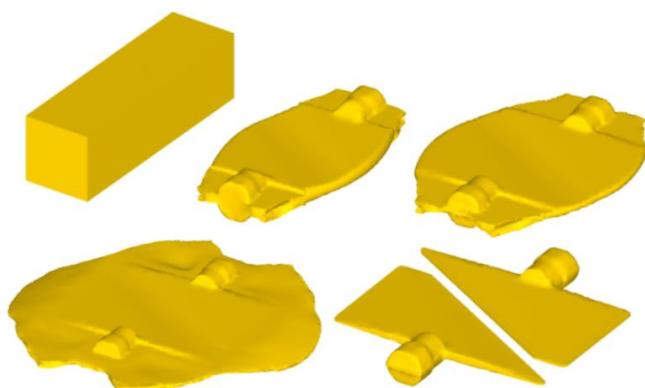


Рис. 7. Изменение геометрии заготовки по стадиям деформирования в ходе процесса горячей объёмной штамповки сдвоенной поковки в штампе тип Б

моделирования, стойкость такого штампа, по сравнению с производственным, повысилась на

62 %. Другое преимущество конструкции штампа заключается в возможности 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.

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 %.

В качестве исходных данных для моделирования ГОШ поковки из стали как по производственному (рисунок 8), так и по предлагаемому (рисунок 9) процессу использовались следующие параметры: номинальная масса падающих частей молота – 3150 кг; материал заготовки – 13X11H2B2MФ-III; температура заготовки, устанавливаемой в штамп – 1180°C; температура штампа – 250°C; твёрдость штампа по шкале Бринелля – HB 372; фактор трения $m = 0,3$.

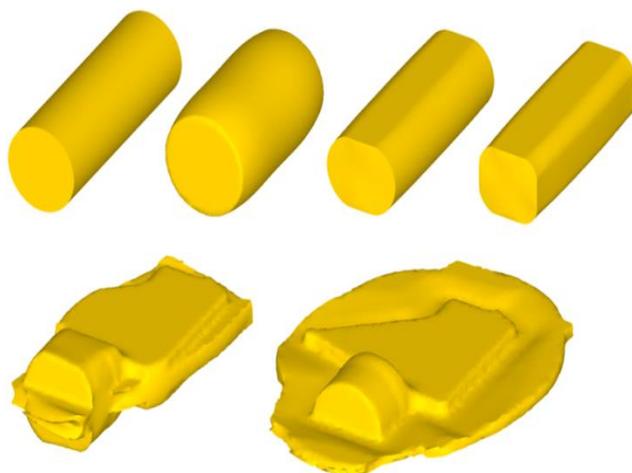


Рис. 8. Изменение геометрии заготовки по стадиям процесса горячей объёмной штамповки стальной поковки по производственной технологии

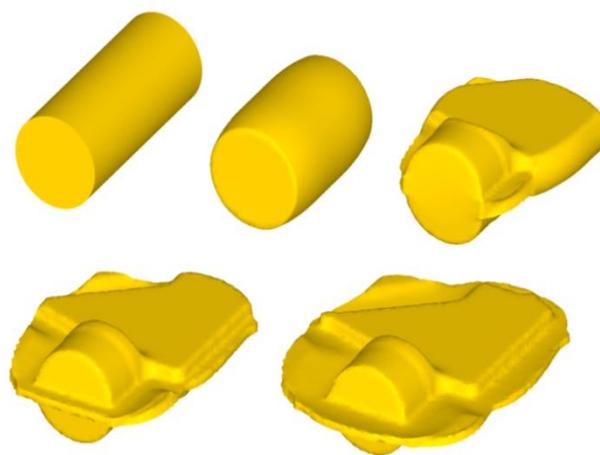


Рис. 9. Изменение геометрии заготовки по стадиям процесса горячей объёмной штамповки стальной поковки по предлагаемой технологии

Для рассмотренной поковки из 13X11H2B2MФ-Ш напряжения, возникающие в деформируемом металле по ходу подвижных частей штампа сжимающие. Средние напряжения имеют значения при штамповке по: производственному процессу – от 1710 до 300 МПа; предлагаемому процессу – от 1890 до 680 МПа. По сравнению с производственной технологией горячей объёмной штамповки стальной поковки, износ штампа по предлагаемому процессу уменьшится на 23 %.

В главе четыре описаны экспериментальные исследования износа штамповой стали марки 5ХНВ и установление влияния термической и химико-термической обработки, а именно сульфидирования и азотирования, на способность материала инструмента сопротивляться истиранию. Была проведена серия экспериментов, в ходе которых образцы устанавливались в испытательную машину и зажимались в тиски (рисунок 10), после чего к образцам прижимается вращающийся ролик под нагрузкой.



Рис. 10. Схема установки образца в узле трения испытательной машины «Шкода–Савин»

Нагрузка на ролик 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 . Испытания проводили на трёх видах образцов: термообработанные на твёрдость HRC 41; термообработанные на твёрдость HRC 41 и подвергнутые сульфидированию с глубиной слоя 0,1 мм; азотированные и термообработанные на твёрдость HRC 62 с глубиной слоя 0,3 мм.

Было установлено, что, по сравнению с термообработкой стали марки 5ХНВ на твёрдость HRC 41, дополнительное сульфидирование увеличило износостойкость образцов в среднем на 25 %, а проведение азотирования на твёрдость HRC 62 – на 67 %. На основе проведённых исследований построили кривые изнашивания штамповой стали марки 5ХНВ в зависимости от вида термической/химико-термической обработки (рисунок 11).

По результатам испытаний были рассчитаны основные трибологические характеристики образцов из стали марки 5ХНВ, такие как: объёмный износ, интенсивность и скорость изнашивания (рисунок 12). 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 – $0,026 \text{ мм/мин}$.

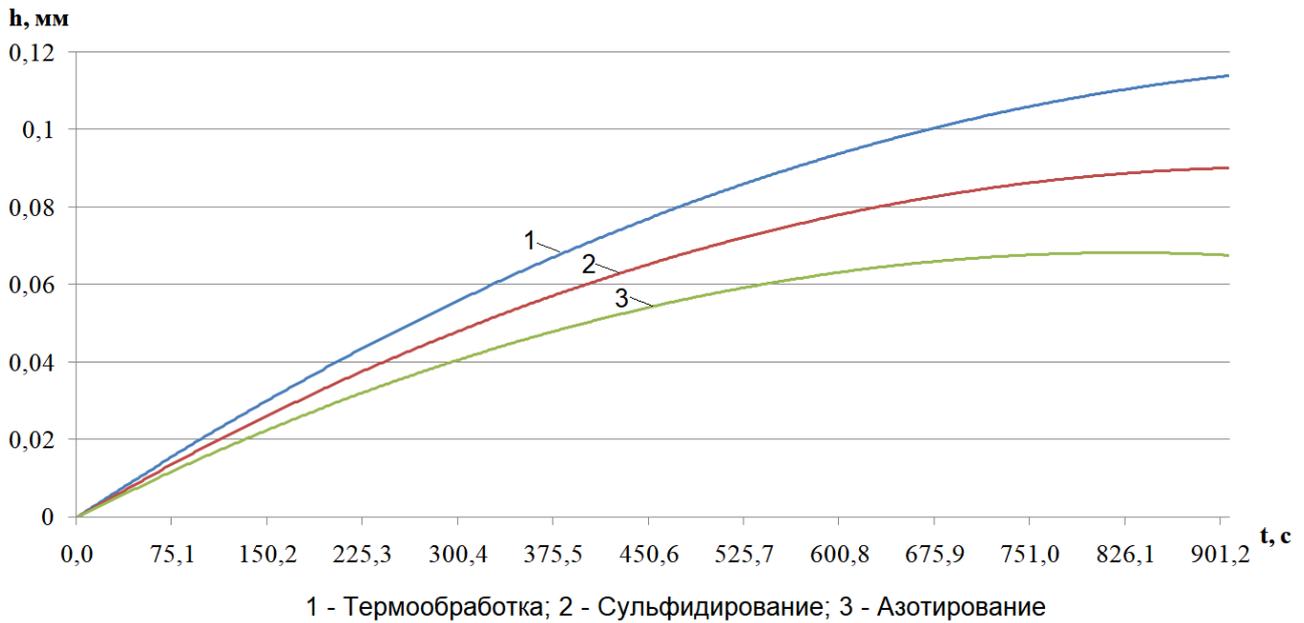


Рис. 11. Кривые изнашивания образцов из стали 5ХНВ в зависимости от вида термической / химико-термической обработки

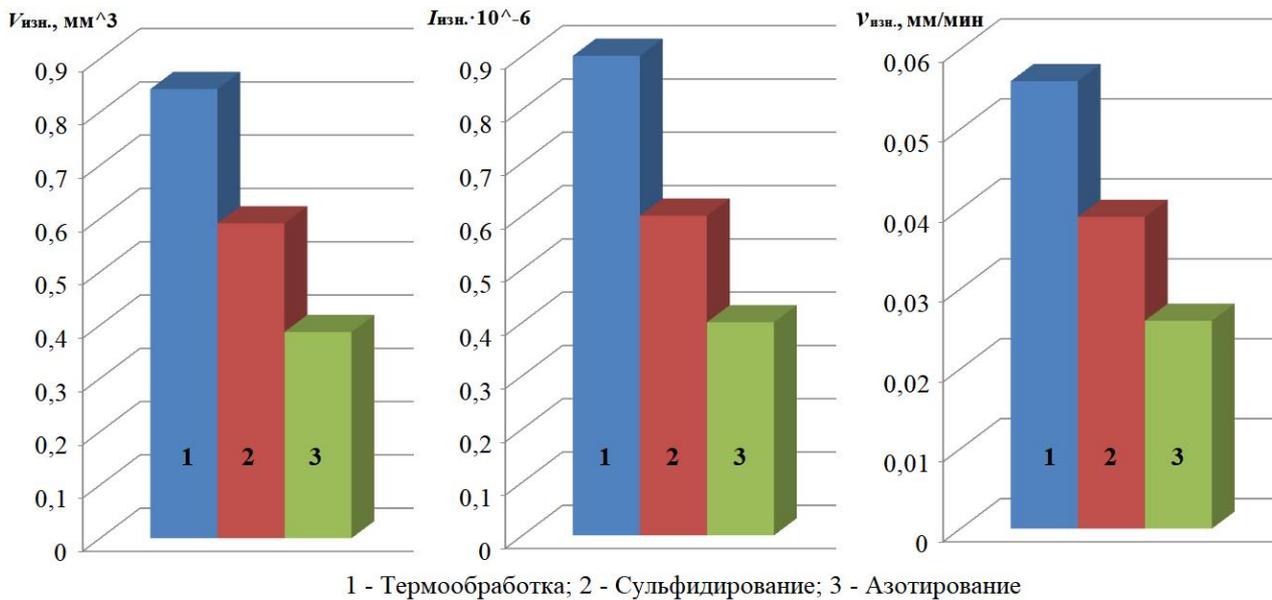


Рис. 12. Графическое представление основных трибологических характеристик испытанных образцов из стали 5ХНВ в зависимости от вида обработки

Пятая глава посвящена планированию многофакторного эксперимента и построению математических моделей износостойкости штампового инструмента из стали марки 5ХНВ при штамповке поковок деталей типа «лопасть». На основе производственных данных и результатов конечно-элементного моделирования были получены уравнения регрессии (1) и выявлены зависимости для технологического процесса ГОШ поковок деталей типа «лопасть». 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.

$$\begin{aligned} \delta_{Al} &= -20,585375 + 0,119195 \cdot T_3 - 0,05308 \cdot H_{III} + 0,0000008 \cdot V_3 + \\ &\quad + 0,1176 \cdot TШ - 0,0001459 \cdot T_3^2, \text{ мкм}; \\ \delta_{St} &= 47,50225 - 0,066004 \cdot T_3 - 0,11672 \cdot H_{III} + 0,00001051 \cdot V_3 + \\ &\quad + 0,5912 \cdot TШ + 0,00002376 \cdot T_3^2, \text{ мкм}, \end{aligned} \quad (1)$$

где δ_{Al} и δ_{St} – величина износа, мкм; T_3 – температура заготовки, °С; H_{III} – твёрдость гравюры штампа, HRC; V_3 – объём заготовки, мм³; TШ – технология штамповки (0 – производственная; 1 – предлагаемая).

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

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

Объём заготовки оказывает меньшее влияние. 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 объёма заготовки в технологических процессах 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 поковок 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 твёрдость 41 HRC, дополнительное сульфидирование увеличило износостойкость образцов в среднем на 25 %, а проведение азотирования на твёрдость 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 – $0,039 \text{ мм/мин}$; азотированию – $0,026 \text{ мм/мин}$. 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 существенное 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 %.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

В ведущих рецензируемых научно-технических журналах, включенных ВАК РФ в Перечень изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. Сосенушкин, Е.Н. Термомеханика разрушения контактной поверхности штампов объемного деформирования / Е.Н. Сосенушкин, А.В. Хроменков, **М.В. Шарыкин** // Заготовительные производства в машиностроении. – 2023. – Т. 21, № 7. – С. 317–322.

2. **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 // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 3 (66). – С. 103–109.

3. **Шарыкин, М.В.** Износостойкость штампа с ограничением течения металла при штамповке тонкопалотных поковок / М.В. Шарыкин, Е.Н. Сосенушкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – Вып. 3. – С. 362–370.

4. **Шарыкин, М.В.** Вариант технологии штамповки сдвоенных тонкопалотных поковок из алюминиевого сплава и его влияние на стойкость штамповой оснастки / М.В. Шарыкин, Е.Н. Сосенушкин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 2 (73). – С. 99–106.

5. **Шарыкин, М.В.** Анализ влияния конструкции ручья штамповых вставок горячей штамповки сдвоенных тонкопалотных поковок из алюминиевого сплава на их напряженно-деформированное состояние и стойкость инструмента / М.В. Шарыкин, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская // Заготовительные производства в машиностроении. – 2025. – Т. 23. № 5. – С. 216–220.

Патентах:

6. 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.

7. 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.

8. 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.

В других рецензируемых научных изданиях:

9. **Шарыкин, М.В.** Исследование процесса формоизменения тонкопалотной поковки при штамповке на кривошипно-коленном прессе / М.В. Шарыкин, Е.Н. Сосенушкин // 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.

10. **Шарыкин, М.В.** Анализ основных методов оценки стойкости молотовых штампов при горячей объемной штамповке детали типа «лопасть» / М.В. Шарыкин, Е.Н. Сосенушкин // Научные 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.

11. **Шарыкин, М.В.** Исследование износа штампа при штамповке тонкопалотной поковки на кривошипно-коленном прессе / М.В. Шарыкин, Е.Н. Сосенушкин, Т.Х. Аюпов // 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.

Научное издание

Шарыкин Михаил Валерьевич

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

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 00.00.2025.

Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 00.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
ФГАОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
127055, Москва, Вадковский пер., 3а
Тел.: 8(499)973-31-93