

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Файфер Игорь Николаевич

**Анализ и совершенствование технологического процесса глубокой вытяжки
полусферических деталей из высокопрочных сталей**

2.6.4. Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2025

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением Института новых материалов и технологий в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
ЛОГИНОВ Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: **КАРЖАВИН Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры «Металлургические и роторные машины»;
ПОПОВ Игорь Петрович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самарский университет)», профессор кафедры «Обработка металлов давлением»;
ВИЧУЖАНИН Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, ФГБУН Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, старший научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов

Защита состоится «18» декабря 2025 г. в 14-00 ч на заседании диссертационного совета **УрФУ 2.6.01.04** по адресу: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Учёного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=7796>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Селиванова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Высокопрочные стали применяются в большинстве отраслей промышленности, в частности в авиа- и ракетостроении, в том числе для производства полых тонкостенных изделий, работающих при повышенных температурах и испытывающих избыточное давление. В состав таких изделий могут входить куполообразные, эллиптические или полусферические детали, изготовленные преимущественно методами листовой штамповки.

Высокопрочные стали 30Х2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42Х2ГСНМА (ВКС-1) были разработаны в 60-70-х годах XX века во Всесоюзном (ныне Всероссийском) научно-исследовательском институте авиационных материалов - ВИАМ. Стали предназначены для изготовления ответственных деталей и достаточно широко используется в авиационной и ракетной технике. Так как указанные отрасли промышленности служат в том числе обороноспособности нашей страны, до недавнего времени невозможно было найти открытых публикаций по сталям 30Х2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42Х2ГСНМА (ВКС-1). За последние несколько лет появились отдельные статьи по этим сталям или сталям со схожим химическим составом, но они касаются в основном материаловедения, термообработки или сварочных технологий. Что касается обработки давлением, то не удалось найти значимых публикаций, которые могут помочь в решении практических проблем. В справочной литературе приведены механические свойства в закалённом состоянии, обработка давлением производится в основном в состоянии поставки или отожжённом состоянии и необходимые данные приходится получать экспериментальным путём.

При изготовлении полусферических деталей традиционными способами возможно возникновение следующих дефектов: повышенное гофрообразование на стенках детали из-за большого внеконтактного участка в начале вытяжки, разрушение или искажение формы заготовки при неправильно подобранных технологических параметрах, а также неравномерная толщина готовой детали (ближе к центру детали материал претерпевает утонение, в то же время край детали становится толще). Обеспечить равномерное утонение без локализации деформаций - одна из важных технологических задач при производстве авиационной и ракетной техники.

В настоящее время для разработки технологических процессов вытяжки полусферических деталей используют в основном эмпирические данные, полученные как отечественными, так и зарубежными исследователями. Внедрение в производство последних достижений техники и технологий (в том числе цифровых) происходит медленно и не всегда успешно. С другой стороны, развитие цифровых технологий без тесной связи с производством также представляется затруднительным. Компьютерное моделирование процесса вытяжки позволяет без дополнительных затрат, на виртуальной модели, определить опасные сечения, рассмотреть несколько вариантов и отработать технологию изготовления детали и геометрию инструментов.

Таким образом, исследования, направленные на совершенствование процессов глубокой вытяжки высокопрочных сталей на основе компьютерного моделирования, являются актуальными, так как приводят к экономии времени и ресурсов предприятия.

Целью работы является разработка рекомендаций по совершенствованию технологического процесса производства полусферических деталей из высокопрочных сталей 30Х2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42Х2ГСНМА (ВКС-1) для снижения величины утонения стенки готовой детали на основе компьютерного моделирования процесса глубокой вытяжки.

Для достижения поставленной цели сформулированы **следующие задачи**:

1. Исследовать факторы, влияющие на процесс глубокой вытяжки полусферических деталей из высокопрочных сталей 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42X2ГСНМА (ВКС-1);

2. Построить реологические модели (кривые упрочнения) указанных сталей, пригодных для моделирования;

3. Получить коэффициенты анизотропии и рассчитать коэффициенты упрочнения для степенной аппроксимации кривых;

4. Провести компьютерное моделирование процесса глубокой вытяжки и выработать на его основе рекомендации по совершенствованию технологического процесса;

5. Получить закономерности изменения толщины стенки для различных режимов (вариантов смазки инструментов);

6. Провести экспериментальное исследование фактической разнотолщинности полусферических деталей, изготавливаемых на ПАО «Машиностроительный завод им. М. И. Калинина».

Объект исследования: холодная листовая штамповка.

Предмет исследования: изготовление полусферических деталей из листовой заготовки в инструментальных штампах за несколько переходов.

Научная новизна

1. Проведено сравнение механических свойств высокопрочных сталей 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42X2ГСНМА (ВКС-1) в разных состояниях в зависимости от времени хранения после смягчающей термической обработки;

2. На основе экспериментальных данных построены реологические модели (кривые упрочнения) сталей 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42X2ГСНМА (ВКС-1) в отожжённом состоянии, пригодные для загрузки в программный комплекс QFORM;

3. Определены коэффициенты анизотропии и коэффициенты упрочнения высокопрочных сталей 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42X2ГСНМА (ВКС-1);

4. Разработана трёхмерная компьютерная модель процесса глубокой вытяжки полусферических деталей за один и несколько переходов, проведён анализ показателей напряжённо-деформированного состояния заготовки на каждом переходе;

5. Получены закономерности утонения стенки полусферической детали из стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) при вытяжке с разными вариантами смазки инструментов в результате анализа компьютерной модели и экспериментальных данных.

Практическая значимость работы состоит в получении механических свойств высокопрочных сталей 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42X2ГСНМА (ВКС-1) в отожжённом состоянии, в формулировке рекомендаций по уменьшению утонения стенки деталей при вытяжке за несколько переходов и разработке мероприятий по рационализации процесса получения заготовок с целью снижения их металлоёмкости за счёт вырезки на лазерной установке, что подтверждается актом внедрения ПАО «МЗИК».

Методология и методы исследования. В экспериментальной части работы для исследования изменения толщины стенки деталей при холодной штамповке использован метод ультразвуковой толщинометрии. Для обработки полученных данных использованы традиционные методы математической статистики.

В теоретической части использован современный метод решения прикладных задач обработки металлов давлением – метод конечных элементов, реализованный в программных комплексах QFORM (© КванторФорм) и ABAQUS (© Dassault Systèmes).

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерности изменения толщины стенки полусферических деталей при холодной штамповке в зависимости от режимов обработки;

2. Трёхмерная компьютерная модель процесса холодной штамповки полусферической детали за несколько переходов;

3. Механические свойства, коэффициенты анизотропии и коэффициенты упрочнения высокопрочных сталей 30Х2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42Х2ГСНМА (ВКС-1) в отожжённом состоянии.

Степень достоверности результатов работы в экспериментальной части подтверждена применением современных средств измерений и методов статистической обработки полученных данных. В теоретической части – экспериментальной проверкой результатов вычислительного эксперимента.

Личный вклад автора состоит в выдвижении гипотезы о влиянии времени хранения заготовок после термической обработки на механические свойства материала, в проверке правильности гипотезы в ходе экспериментов по растяжению плоских образцов в разных состояниях, в планировании промышленного эксперимента, сборе статистики, обработке и анализе полученных результатов, в разработке рекомендаций для снижения утонения стенки полусферической детали из высокопрочной стали при многопереходной вытяжке.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

XII Научно-практическая конференция «Инновационные технологии и технические средства специального назначения», 2019; XXI Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов — молодых учёных, 2022; VI Международная молодёжная научно-техническая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice - 2022»; VII Международная молодёжная научно-техническая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice - 2023»; VIII Международная молодёжная научно-техническая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice - 2024»; I научно-практическая конференция «Цифровое производство: наука, практика, кадры», 2024; XXVII Уральская школа металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», 2025.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 14 научных работах, из них 4 статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определённых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 2 статьи в журналах, индексируемых SCOPUS.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 114 наименований, изложенных на 134 страницах машинописного текста. Работа включает 58 рисунков и 22 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована её цель, раскрыты научная новизна и практическая ценность, а также перечислены основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе описаны существующие и перспективные способы получения полусферических деталей, в том числе из высокопрочных сталей, проведён анализ факторов, влияющих на процесс формоизменения и качество готовых деталей, описаны возможные причины образования дефектов, а также существующие методы борьбы с ними. Отдельно рассматривается влияние анизотропии механических свойств на процессы штамповки. В конце главы приведены исходные данные по высокопрочным сталям 30Х2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42Х2ГСНМА (ВКС-1), дано описание существующей технологии изготовления полусферической детали, проведено сравнение способов

получения заготовок (механической обработкой или вырезкой на лазерной установке), сформулированы цели и задачи исследования.

Объектом исследования являются высокопрочные среднелегированные стали марок 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42X2ГСНМА (ВКС-1), изготавливаемые по ТУ 14-14461-88. Химический состав сталей приведён в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Химический состав стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д), %

C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	Fe	S	P
0.26-0.33	0.9-1.2	1.0-1.3	1.5-2.0	1.0-1.3	1.0-1.3	0.4-0.6	Основа	≤0.011	≤0.015
								Суммарное содержание S и P не более 0.022 %	

Таблица 2 - Химический состав стали 42X2ГСНМА (ВКС-1), %

C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo	Fe	S	P
0,38-0,43	0,9-1,2	0,75-1,0	1,5-2,0	0,5-0,8	0,03-0,1	0,4-0,6	Основа	≤0,011	≤0,015
								Суммарное содержание S и P не более 0,022 %	

Основными технологическими параметрами, влияющими на механические свойства сталей и качество готовых деталей, являются способ получения заготовок, степень деформации при штамповочных операциях, температура и время выдержки при термических операциях. В меньшей степени оказывают влияние другие параметры — колебания химического состава в пределах ТУ, скорость деформации, условия трения и колебания температуры отжига. Основным недостатком высокопрочных сталей является повышенная чувствительность к концентраторам напряжений.

При изготовлении полусферических деталей возможны следующие виды дефектов: образование гофр, наличие концентраторов напряжений в виде локальных утонений стенки заготовки сверх допустимых значений (более 20 % от исходной толщины заготовки), хрупкое разрушение заготовок в средней части, искажение формы детали, кольцевой дефект (рисунок 1).

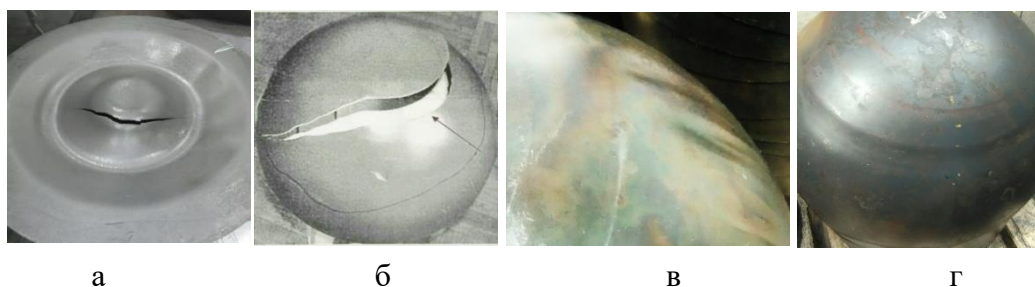


Рисунок 1 - Виды дефектов при вытяжке полусферических деталей: а - разрушение заготовки на первом переходе; б - разрушение заготовки на последнем переходе; в - гофры на последнем переходе вытяжки; г - кольцевой дефект в верхней трети полусферы

Термин «кольцевой дефект» здесь означает искажение формы готовой детали в виде местного кольцевого углубления в верхней трети полусферы.

При вытяжке утонение стенок детали может достигать от 15 до 20 %, а в отдельных случаях и до 30 % от начальной толщины заготовки. Для компенсации утонения полусферических и эллиптических деталей на некоторых предприятиях вводят технологическую прибавку до 15 % на толщину заготовки, что значительно увеличивает металлоёмкость и итоговую стоимость изделия.

Жёсткие требования по толщине и форме готовой детали заставляют искать различные варианты изготовления, что приводит к дополнительным затратам на отладку технологии. Даже при небольшом увеличении усилия вытяжки возникают зоны значительного утонения материала заготовки, которые могут послужить концентраторами напряжений. При увеличении количества межоперационных отжигов увеличивается слой обезуглероженного металла примерно на 0,1 мм за каждую операцию термической обработки.

Ряд авторов указывает на то, что большое количество неравновесного углерода в стали, образовавшегося в результате термической обработки или интенсивной пластической деформации, приводит к ускорению процессов старения стали. Естественным старением называется самопроизвольное повышение прочности и уменьшение пластичности термообработанного сплава, происходящее в процессе его выдержки при нормальной температуре в течение 15 — 16 суток.

Известно, что время хранения, транспортирования и ожидания изготовления на производстве может быть существенно выше 15 суток, т. е. во всех термообработанных заготовках перед формоизменяющими операциями уже протекают процессы естественного старения, которые необходимо учитывать при разработке технологических процессов.

Во второй главе описывается порядок построения и анализа кривых упрочнения сталей 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42X2ГСНМА (ВКС-1).

В качестве объекта исследования выбраны образцы для контроля механических свойств №7к-II по ОСТ 1.90011-70. Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 11701-84 с использованием разрывной машины фирмы «Zwick/Roell». Испытания проводились при температуре 20 °С, преднагрузка составила 2 МПа, скорость испытания - 12 мм/мин.

Из листа толщиной 2,2 мм на лазерной установке вырезали образцы, по 30 штук вдоль и поперёк относительно направления проката, всего по 60 образцов из каждой марки стали. Образцы маркировались порядковым номером по возрастанию от 1 до 60. С 1 по 30 номер образцы нарезаны вдоль, с 31 по 60 – поперёк направления проката. В первой части эксперимента проведены испытания на разрыв 20 образцов в состоянии поставки (с 1 по 10 вдоль, с 31 по 40 поперёк направления проката).

Затем проведена термическая обработка (высокий отжиг при $t^{\circ} = 720$ °С, выдержка 2 - 3 часа, охлаждение на воздухе) и испытаны ещё 20 образцов (с 11 по 20 вдоль проката, с 41 по 50 поперёк направления проката). Оставшиеся 20 образцов испытаны через 30 дней после термообработки (с 21 по 30 вдоль проката, с 51 по 60 поперёк направления проката). В ходе испытаний были получены графики растяжения в каждом из направлений к прокату (для стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) рисунки 2 и 3).

При сравнении графиков в состоянии поставки вдоль и поперёк проката видно, что кривые имеют достаточно продолжительную площадку текучести и слабо оформленный зуб текучести. Различия графиков на участке упрочнения более выражены, разница значений временного сопротивления достигает 80 МПа в точке начала шейкообразования.

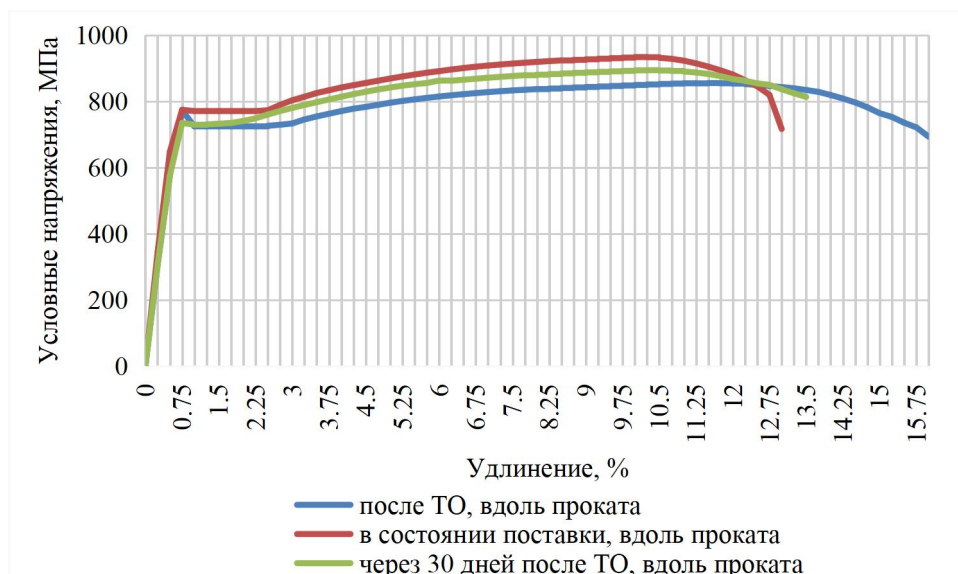


Рисунок 2 - Графики растяжения стали 30Х2ГСНМА (ВЛ1Д) в направлении вдоль проката в трёх состояниях (в состоянии поставки, после ТО и через 30 дней после ТО)

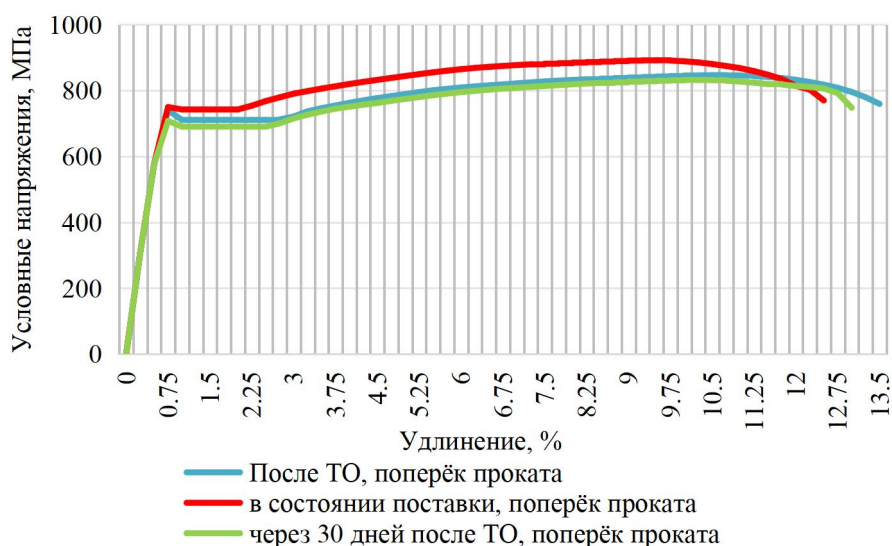


Рисунок 3 - Графики растяжения стали 30Х2ГСНМА (ВЛ1Д) поперёк направления проката в трёх состояниях (в состоянии поставки, после ТО и через 30 дней после ТО)

При использовании заготовок для вытяжки из стали в состоянии поставки при средних степенях деформации разница практически неощутима, но будет нарастать с увеличением глубины деталей. Разница в распределении степени деформации может достигать нескольких процентов и приводить к искажению формы готовой детали после снятия нагрузки.

Сразу после термической обработки кривые практически идентичны на большей части графиков, однако, зуб текучести выражен более ярко, увеличивается площадка текучести, одновременно снижается предел текучести и предел прочности. В этом случае основным негативным фактором, влияющем на процесс вытяжки (при прочих равных), становится площадка текучести, которая имеет большую продолжительность. Отдельные авторы предлагают бороться с площадкой текучести проведением предварительной «дрессировки» листа.

Через 30 дней после термической обработки на кривой вдоль направления проката площадка текучести практически отсутствует, деформация предтекучести становится менее заметной, наблюдается слабый зуб текучести. На кривой поперёк направления проката присутствует зуб текучести средней величины, площадка текучести имеет значительную протяжённость, практически не меняясь с течением времени. Разница между пределами прочности становится ещё более заметна.

На кривых во всех направлениях по отношению к прокату наблюдается зуб текучести и площадка текучести, что свидетельствует о том, что сталь склонна к естественному старению, то есть к самопроизвольному изменению механических свойств после термической обработки при комнатной температуре. Соответственно, если производить вытяжку деталей из заготовок с приобретённой в процессе старения анизотропией свойств, то на одном и том же шаге вытяжки участки вдоль направления проката будут получать меньшие степени деформации, чем участки, ориентированные поперёк направления проката. В результате возможно смещение распределения максимумов степени деформации от оси симметрии в направлении поперёк проката.

Ниже приведены графики для сравнения предела прочности, предела текучести и относительного удлинения вдоль и поперёк проката в зависимости от наличия термической обработки и времени хранения (рисунки 4 - 6).

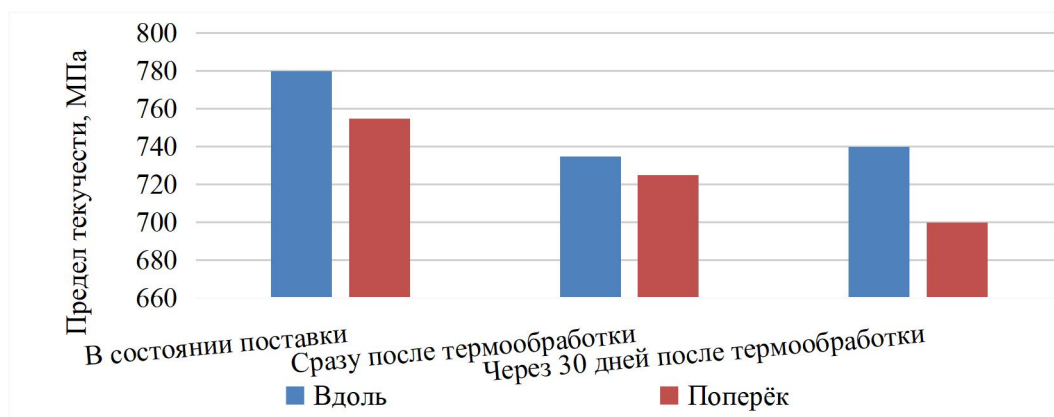


Рисунок 4 - Изменение предела текучести стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) в зависимости от направления проката, наличия термической обработки и времени хранения после ТО

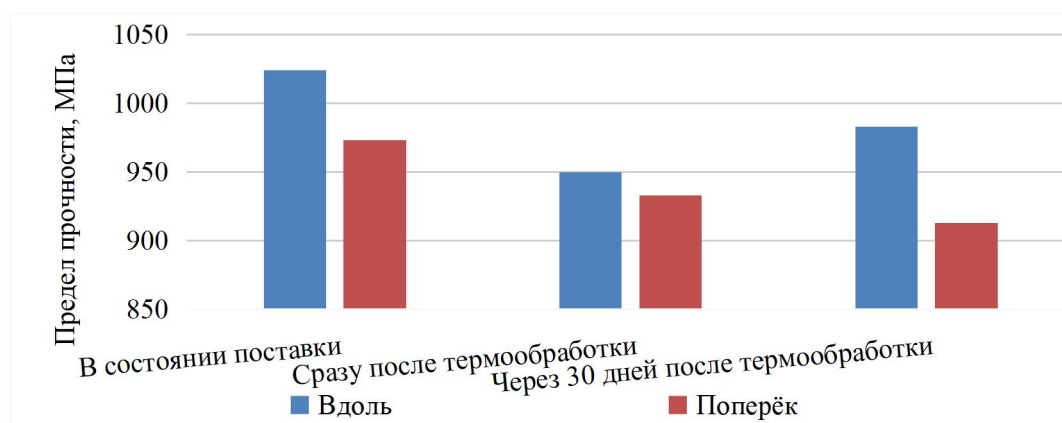


Рисунок 5 - Изменение предела прочности стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) в зависимости от направления проката, наличия термической обработки и времени хранения после ТО

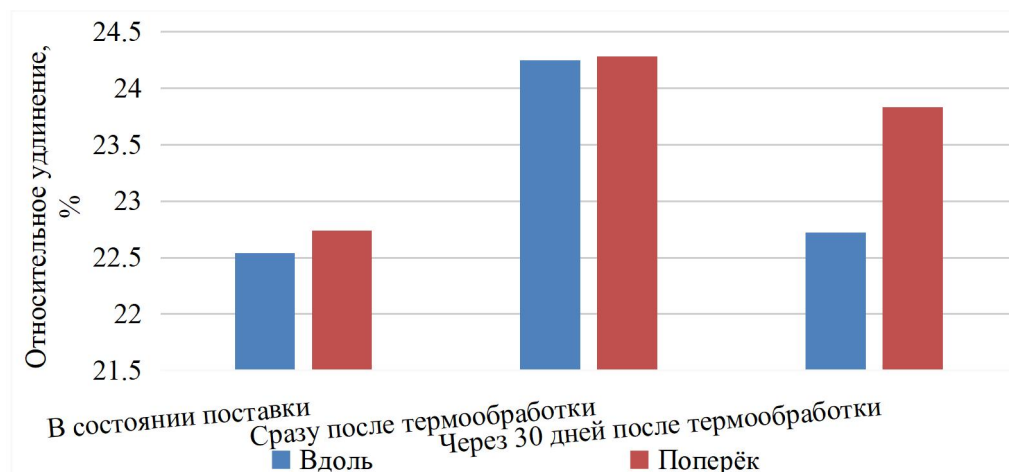


Рисунок 6 - Изменение относительного удлинения стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) в зависимости от направления проката, наличия термической обработки и времени хранения после ТО

Так как сталь сразу после термической обработки наиболее полно отвечает требованиям по снижению влияния анизотропии свойств, кривые упрочнения строили для состояния сразу после отжига. Для этого провели ещё по одному эксперименту для каждой стали, аналогичных описанному выше. Образцы ориентировались в трёх направлениях: вдоль проката, поперёк и под 45° к направлению проката, по 10 образцов в каждом направлении проката для каждой из сталей. В ходе испытаний были определены значения основных механических характеристик сталей (временное сопротивление σ_b , равномерное удлинение δ_r , относительное сужение ψ , относительное удлинение δ), одновременно были рассчитаны коэффициенты анизотропии.

Полученные в ходе испытаний кривые растяжения по известным формулам были перестроены в координатах «Истинное напряжение — Степень деформации». В процессах ОМД основное внимание уделяется пластическим деформациям и исключая из диаграмм истинных напряжений упругий участок, получаем кривые упрочнения.

На рисунке 7 приведены кривые упрочнения стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) сразу после термообработки, пригодные для загрузки в базу данных расчётного модуля.

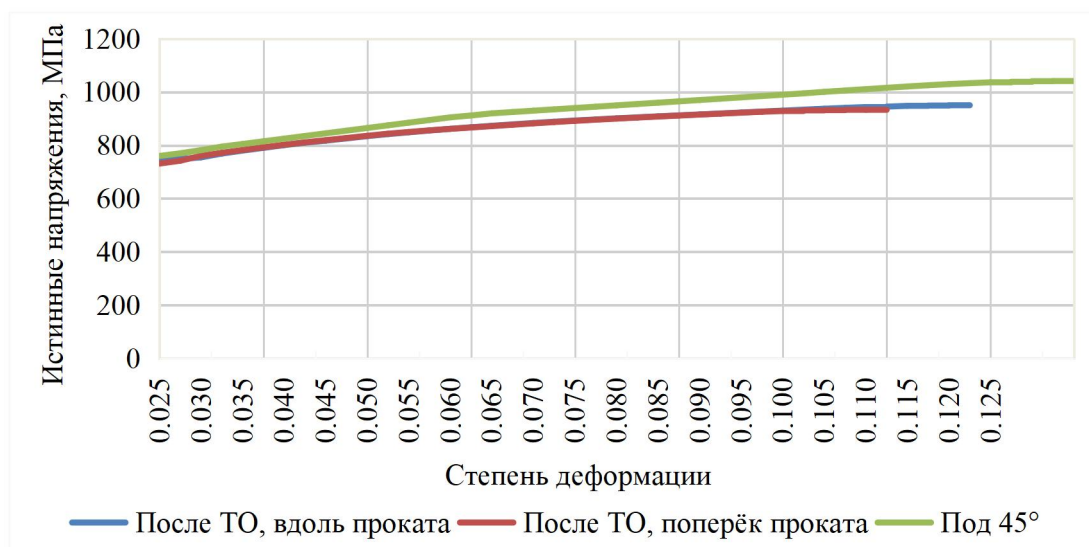


Рисунок 7 - Кривые упрочнения стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) в состоянии сразу после термической обработки

Аналогично описанному выше был проведён анализ графиков растяжения высокопрочной стали 42Х2ГСНМА (ВКС-1), на рисунке 8 показаны кривые упрочнения названной стали в отожжённом состоянии.

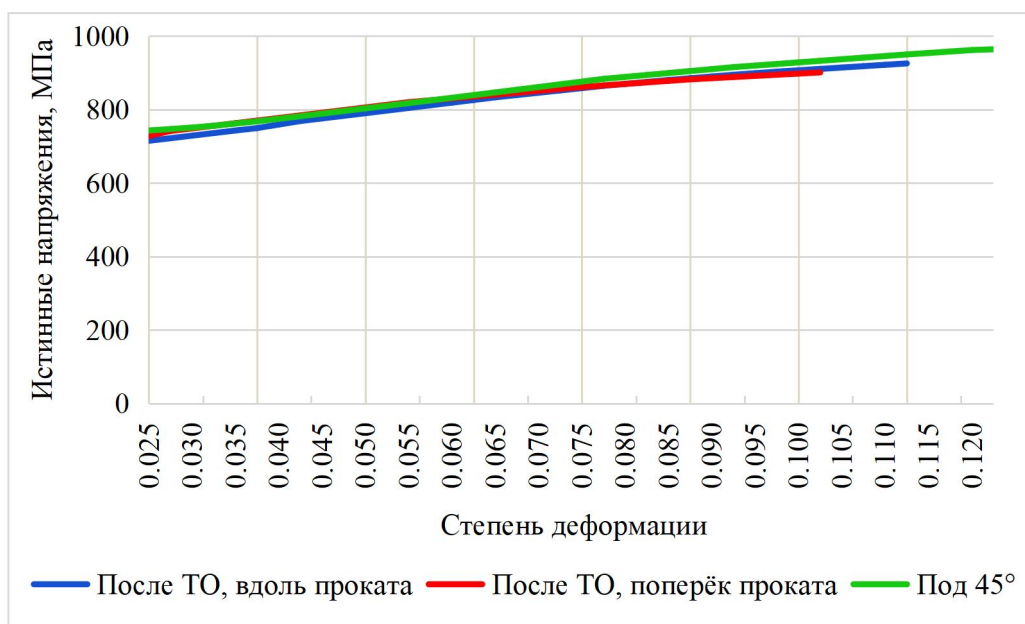


Рисунок 8 - Кривые упрочнения стали 42Х2ГСНМА (ВКС-1) в состоянии сразу после термической обработки

Для нахождения напряжений за пределами приведённых графиков можно задаваться рассчитанными коэффициентами упрочнения из таблицы 3.

Для степенной аппроксимации было использовано следующее условие проведения функции: она должна проходить через две точки - точку физического предела текучести (S_T, δ_T) и точку предела прочности (S_B, δ_p), где $S_B = \sigma_B (1 + \delta_p)$ - сопротивление деформации, $S_T \approx \sigma_T$, $\delta_T = 2,5\%$ - относительное удлинение окончания площадки текучести.

Решая систему уравнений с двумя неизвестными, после преобразования необходимые коэффициенты степенной аппроксимации k и n можно найти по формулам (1-3):

$$k = \frac{S_B}{\delta_p^n} \quad (1)$$

$$n = \frac{\ln S_B - \ln S_{0.2}}{\ln \delta_p - \ln \delta_{0.2}} \quad (2)$$

$$\delta_{0.2} = 0,002 + \frac{\sigma_{0.2}}{E} \quad (3)$$

При использовании кривых в компьютерном моделировании, получаемая модель материала является изотропной, то есть не учитывается анизотропия механических свойств. Расхождение в параметрах при глубокой вытяжке (силовые режимы, предельные коэффициенты утонения, напряжённо-деформированное состояние заготовки) может достигать от 15 до 50 %.

Таблица 3 - Механические свойства, коэффициенты степенной аппроксимации и коэффициенты анизотропии высокопрочных сталей 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42X2ГСНМА (ВКС-1) в состоянии сразу после термической обработки

Марка стали	Состояние материала	Направление проката	Физический предел текучести S_T , МПа	Предел прочности S_B , МПа	Равномерное удлинение δ_p , %	Коэффициенты степенной аппроксимации		Коэффициенты анизотропии	
						n	k	R_i	R_{cp}
30X2ГСНМА (ВЛ1Д)	Сразу после ТО	Вдоль	735	950	11	0,042	858	0,5092	0,4828
		Под 45°	760	1041	11,1	0,052	907	0,5372	
		Поперёк	725	933	10,9	0,042	845	0,4020	
42X2ГСНМА (ВКС-1)		Вдоль	728	926	10,9	0,04	842	0,3976	0,4324
		Под 45°	757	950	11	0,037	869	0,4871	
		Поперёк	716	901	10,8	0,038	823	0,4126	

Для получения компьютерной модели детали, максимально приближенной к реальности, необходимо использовать коэффициенты анизотропии R_0 , R_{45} , R_{90} и R_{cp} . Порядок расчёта показан в работе [3]. Рассчитанные коэффициенты пластической анизотропии стали приведены в таблице 3.

В третьей главе описываются постановка задач и сравниваются результаты компьютерного моделирования процесса глубокой вытяжки полусферической детали в один переход из четырёх разных сталей - 12X18H10T, 30X2ГСНМА (ВЛ1Д), 42X2ГСНМА (ВКС-1) и сталь 85.

В качестве расчётного инструмента в исследовании для сталей 12X18H10T, 30X2ГСНМА (ВЛ1Д), и стали 85 выбран программный модуль ABAQUS, версия до 1000 конечных элементов, имеющая свободную лицензию.

Для определения влияния вида кривой упрочнения на характер формоизменения проведено сравнение кривых сталей 85 и 12X18H10T. Выявлено, что для кривой с более высоким градиентом упрочнения (сталь 85) наблюдается выравнивание распределения максимумов степени деформации, за счёт чего утонение стенки детали происходит более равномерно по координатам, что подтверждено проведённым моделированием. Задача ставилась в 2D-постановке. В цилиндрической системе координат $r\phi z$ листовая заготовка 1 в форме диска толщиной 4 мм расположена с опорой на матрицу 2, на заготовку воздействует пуансон 3, который имеет рабочий торец радиального профиля (рисунок 9). Радиус закругления на рабочей кромке матрицы равен 2 мм. Отверстие матрицы выполнено диаметром 60 мм. На контакте с инструментом задан закон трения Кулона при коэффициенте трения 0,1.

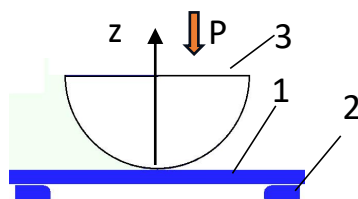


Рисунок 9 - Схема глубокой вытяжки полусферы без использования прижима

На рисунке 10, а представлена правая половина очага деформации с распределением степени деформации PEEQ (Equivalent Plastic Strain) для случая вытяжки детали из высокопрочной стали 85, на рисунке 10, б – то же для коррозионностойкой стали. На рисунке видно также, что профиль заготовки имеет область утонения, размещённую на некотором расстоянии от оси штамповки.

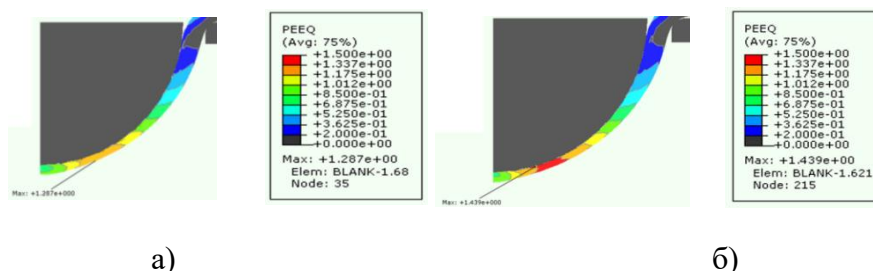


Рисунок 10 - Правая половина очага деформации с распределением степени деформации PEEQ, указаны места локализации максимальной степени деформации

В первом случае максимум степени деформации находится на внешней кромке детали, во втором - на внутренней кромке, значения максимумов равны 1,287 и 1,439 соответственно. В месте локализации степени деформации при штамповке стали 85 толщина заготовки равна 1,15 мм, для коррозионностойкой стали - 1,04 мм, т.е. на 10 % меньше.

В условиях предыдущей постановки задачи назначили свойства деформируемого металла для стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д). Деформация такого материала связана с трудностями из-за низкой пластичности. При постановке задачи на компьютерное моделирование использовалась усреднённая кривая упрочнения стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д), полученная во второй главе.

На рисунке 11 показано, что максимумы распределения степени деформации PEEQ перемещаются по ходу формоизменения: вначале они локализованы по центру нижней части заготовки, но к концу процесса происходит их смещение от центра на величину примерно равную $\frac{1}{4}$ от длины дуги полусферы на этом участке.

Максимальная степень деформации достигает величины 1,38. В этом сечении определены главные нормальные деформации: максимальная в плане +0,795, минимальная в плане -1,357 и в ортогональном направлении +0,584. Таким образом, экстремальные значения главных нормальных деформаций локализованы в одной точке.

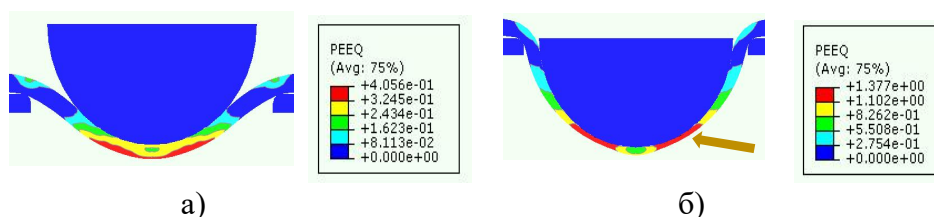


Рисунок 11 - Распределение степени деформации PEEQ на половине пути пуансона (а) и в конце процесса (б), стрелка показывает положение максимума функции

В нижней части очага деформации преобладают значения среднего нормального напряжения на уровне $+ 400 \dots + 550$ МПа. В целом, это создаёт опасность развития трещин из-за преобладания растягивающих напряжений.

Выполненными расчётами показано, что сложное напряжённо-деформированное состояние приводит к локализации утонения листового металла, что нежелательно с позиции обеспечения равнопрочности конструкции. Представление нагружения заготовки с помощью компонентов тензоров напряжений и деформаций позволило выявить, что наибольшую опасность представляют тангенциальные растягивающие напряжения.

Также, в программном комплексе QFORM, версия 10, проведено моделирование глубокой вытяжки полусферы из стали 42Х2ГСНМА (ВКС-1) для определения влияния выявленных различий в реологических моделях стали на процессы штамповки. Диаметр исходной заготовки – 180 мм, толщина 2,2 мм, радиус сферы готовой детали – 40 мм, глубина вытяжки – 52 мм. Односторонний зазор между матрицей и пуансоном принят равным 2,5 мм, радиус закругления матрицы – 10 мм. Материал инструмента задавался абсолютно жёсткий. Коэффициент трения был выбран 0,3 по Леванову. Скорость перемещения инструмента – 10 мм/с.

Положение инструментов в начале, в середине и в конце расчёта представлено на рисунке 12, а-в.

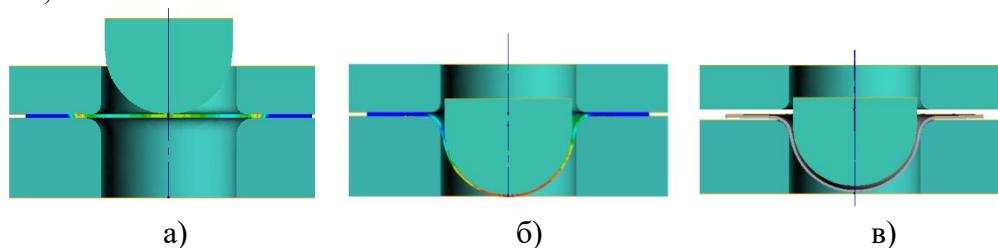


Рисунок 12 – Положение инструментов: а) – в начале расчёта, б) – в конце вытяжки, в) – после снятия нагрузки

При моделировании с кривой упрочнения в состоянии поставки максимальная степень пластической деформации составляет 0,4281 и локализуется в районе радиуса скругления матрицы, в верхней части полусферы максимальное значение составляет 0,3902. При вытяжке на глубину 45 мм, максимум степени деформации смещается от центра заготовки к радиусу скругления матрицы, распадается на отдельные очаги и дальнейшее деформирование происходит в основном за счёт цилиндрического участка заготовки. В этом месте может произойти критическое утонение металла и разрушение заготовки (рисунок 13, а). Минимальная толщина стенки заготовки после вытяжки составляет 1,52 мм.

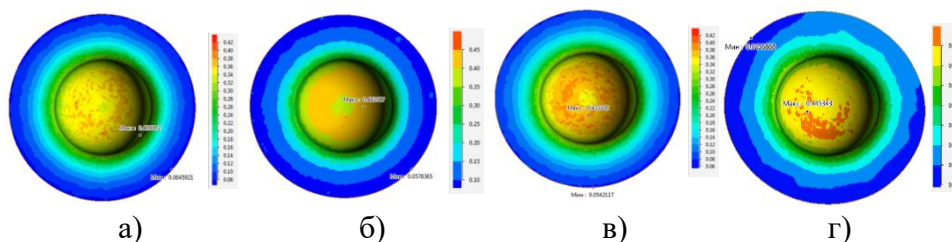


Рисунок 13 – Распределение степени пластической деформации в конце вытяжки: а) - в состоянии поставки, б) - сразу после термической обработки, в) - в состаренном состоянии, г) - в состоянии сразу после термической обработки с заданными коэффициентами анизотропии

При задании кривой в состоянии сразу после термической обработки распределение степени деформации происходит равномерно в верхней трети полусферы, максимальное значение составляет 0,4333 (рисунок 13, б). Минимальная толщина заготовки после вытяжки составляет 1,55 мм.

При моделировании с кривой в состаренном состоянии в конце вытяжки максимальная степень пластической деформации составляет 0,4455. Локализация степени деформации происходит в отдельных точках, равномерно распределённых в верхней трети полусферы (рисунок 13, в). Минимальная толщина - 1,43 мм

Используя в моделировании кривую упрочнения в состоянии сразу после термической обработки с заданными коэффициентами анизотропии в процессе расчёта вытяжки получили локализацию степени пластической деформации в направлении примерно 45° к оси x (рисунок 13, г). Максимальная пластическая деформация сосредоточена в верхней трети полусферы, расположена в нескольких больших очагах несимметрично относительно центра полусферы и составляет 0,4539. Минимальная толщина заготовки после вытяжки составляет 1,47 мм.

Выполненными расчётами показано, что изменение механических свойств заготовок при длительном хранении оказывает значительное влияние на распределение степени деформации и состояние поставки материала необходимо учитывать при разработке технологических процессов листовой штамповки, особенно для заготовок из высокопрочных сталей.

В четвёртой главе для оценки влияния варианта смазки инструментов описывается постановка задачи и анализ напряжённо-деформированного состояния заготовки после компьютерного моделирования процесса глубокой вытяжки полусферической детали из стали 30Х2ГСНМА (ВЛ1Д) на каждом из переходов, отдельно показаны результаты моделирования с учётом коэффициентов анизотропии.

Для определения влияния коэффициента трения на возможные дефекты, в программном комплексе «QFORM, v.10» в два этапа проведено компьютерное моделирование глубокой вытяжки детали с разными смазками. Так как получить готовое изделие за одну операцию не удаётся из-за слишком малой пластичности металла, процесс был разбит на четыре перехода с промежуточными отжигами для восстановления пластических свойств.

На первом этапе моделирования контактные граничные условия для всех инструментов выбирали из стандартной базы данных QFORM в виде назначения коэффициента трения по Кулону: 0,5 - без смазки, 0,3 – смазка машинным маслом; 0,2 – медное покрытие и машинное масло; 0,1 - фосфатное покрытие и мыло. Для ускорения расчётов задачу решали в 2D-постановке (рисунок 14).

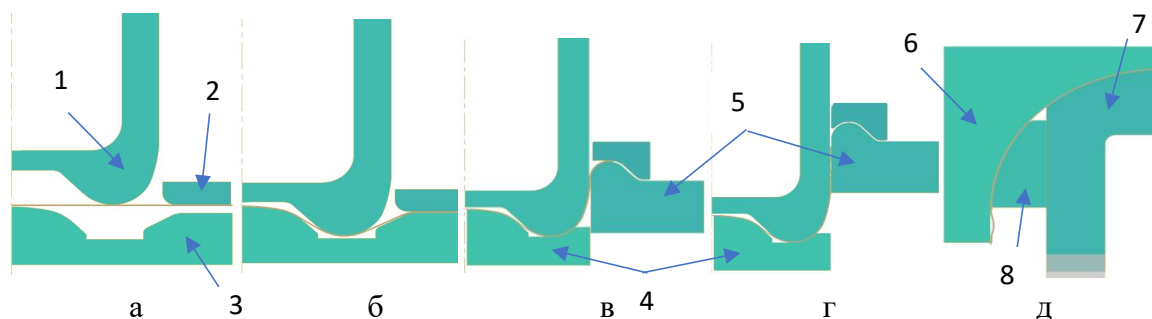


Рисунок 14 - Положение инструментов: а – исходное положение; б – после первого перехода; в – после второго перехода; г – после третьего перехода; д – после четвёртого перехода; 1, 7 – пуансон по переходам, 2, 8 – прижим по переходам, 3, 5, 6 - матрица по переходам, 4 – выталкиватель по переходам

На первом этапе определена смазка, которая обеспечивает рациональное распределение полей деформации по всем четырём переходам; на втором этапе рассмотрены различные варианты смазки инструментов с выбранной смазкой.

На рисунке 15 представлены данные о наибольшей степени деформации при использовании различных смазок. Эти же данные свидетельствуют о наибольшей степени утонения стенки.

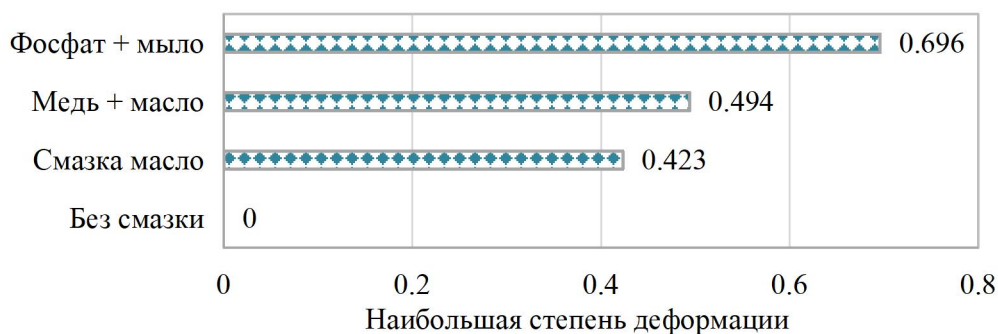


Рисунок 15 - Наибольшая степень деформации по вариантам моделирования

По результатам анализа было принято решение использовать как основной вариант применение смазки медь + масло, которая обеспечивает меньшее утонение на всех четырёх переходах вытяжки. Далее приводятся данные второго этапа моделирования с разным сочетанием применения смазки инструментов (таблица 4).

Таблица 4 - Варианты смазки инструментов при моделировании

№ перехода	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1 переход	матрица и пуансон без смазки, прижим — медь + масло	матрица и пуансон без смазки, прижим — медь + масло	матрица и пуансон без смазки, прижим — медь + масло
2 переход	выталкиватель без смазки, прижим, пуансон и матрица — медь + масло	выталкиватель и пуансон без смазки, матрица и прижим — медь + масло	выталкиватель и пуансон без смазки, матрица и прижим — медь + масло
3 переход	выталкиватель без смазки, прижим, пуансон и матрица — медь + масло	выталкиватель и пуансон без смазки, матрица и прижим — медь + масло	выталкиватель и пуансон без смазки, матрица и прижим — медь + масло
4 переход	пуансон без смазки, прижим и матрица — медь + масло	прижим и пуансон без смазки, матрица — медь + масло	пуансон без смазки, прижим и матрица — медь + масло

Наилучшие результаты получены при третьем варианте смазки: средняя толщина по 4 замерам составила 1,75 мм, минимальная толщина стенки — 1,67 мм, глубина кольцевого дефекта — 0,39 мм.

Применяя различные варианты смазки инструментов на переходах, можно эффективно управлять утонением заготовки в процессе вытяжки. Выбранный вариант смазки инструментов на переходах позволяет снизить усилие вытяжки на последнем

переходе с 18,64 МН до 15,54 МН, то есть на 17 %, уменьшить максимальную степень деформации с 0,568 до 0,410, то есть на 28 %, последний фактор говорит о снижении опасности лишнего утонения детали.

Далее анализировали напряжённо-деформированное состояние заготовки на каждом из переходов с выбранным вариантом смазки инструментов. Задачу решали в 2D-постановке (осесимметричный случай). Решение представлено в виде инвариантных величин степени деформации ε (рисунок 16, а) и среднего нормального напряжения σ (рисунок 16, б).

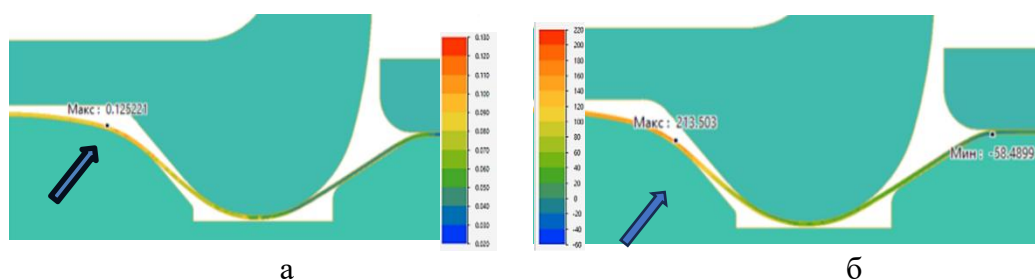


Рисунок 16 - Распределение степени деформации (а) и среднего нормального напряжения (б) на первом переходе вытяжки

Стрелками показаны максимальные значения величин, эту точку можно считать опасным сечением.

Для оценки ситуации в цилиндрической системе координат $r\varphi z$ рассчитаны компоненты тензора напряжений σ_{rr} , $\sigma_{\varphi\varphi}$, σ_{zz} , σ_{rz} . В настоящее время вероятность разрушения заготовки в любой момент времени оценивают в том числе по следующим двум показателям - напряжённому состоянию k и коэффициенту Лоде μ_σ .

Рассчитанные по известным формулам значения показателей напряжённого состояния и коэффициента Лоде для всех четырёх переходов штамповки были проанализированы в соответствии с размещением контрольных точек, при этом точка 1 это центр штамповки, точка 2 – место смены знака перегиба, точка 3 – место наибольшего прогиба, точка 4 приближена к кромке заготовки (рисунок 17, а).

Программой QFORM предусмотрена возможность определения толщины детали. Поскольку эта величина оказывается переменной по контуру, назначены контрольные точки, отображённые на рисунке 17, а, на рисунке 17, б показан пример оценки толщины в контрольной точке.

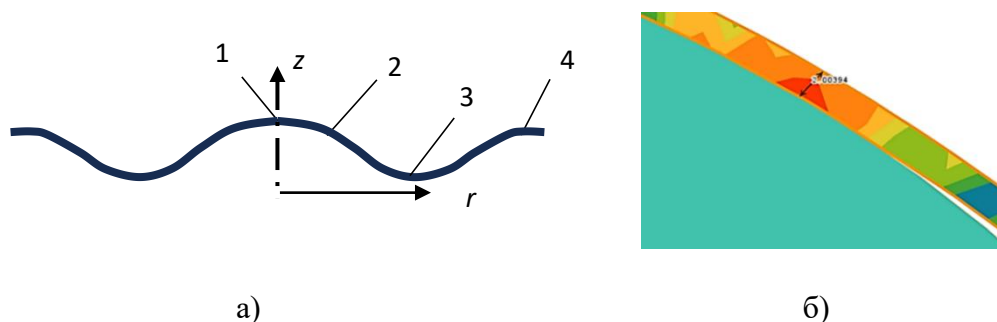


Рисунок 17 - Схема размещения контрольных точек (а) и пример распределения толщины заготовки в области размещения контрольной точки 2 (б)

Максимальные нормальные напряжения σ_{rr} , $\sigma_{\varphi\varphi}$, σ_{zz} в точке 2 на первом переходе равны соответственно 254, 273 и 162 МПа, то есть они все положительны и являются

напряжениями растяжения (таблица 5). Напряжённое состояние характеризуется как трёхосное растяжение.

Таблица 5 - Значения показателя напряжённого состояния k и коэффициента Лоде μ_σ на первом переходе

№ точки	Среднее напряжение σ , МПа	Интенсивность напряжений σ_n	Главные нормальные напряжения			Интенсивность касательных напряжений T	k	μ_σ
			σ_1	σ_2	σ_3			
1	146	232	235	232	3	134	1,09	0,97
2	213	269	321	273	64	156	1,37	0,62
3	36	178	151	-9	-42	103	0,35	-0,66
4	-59	134	30	-63	-131	78	-0,75	-0,16

Как видно из приведённых в таблице 6 данных в месте размещения прижима утонение минимально, большее утонение испытывает металл в точках 1 и 2, при этом в месте перегиба утонение наибольшее, что может иметь негативные последствия. В идеальном варианте желательно, чтобы деталь сохраняла исходную толщину, либо утонение должно происходить равномерно без локализации опасных сечений.

Таблица 6 - Рассчитанные параметры по контуру заготовки с начальной толщиной 2,2 мм на первом переходе

Номер точки	Толщина в состоянии поставки, мм	Толщина после перехода, мм	Абсолютное утонение, мм	Относительное утонение, %	Степень деформации
1	2,2	2,027	0,173	7,9	0,082
2	2,2	2,004	0,196	8,9	0,093
3	2,2	2,118	0,082	3,7	0,038
4	2,2	2,185	0,015	0,7	0,007

Полученное в приведённых выше расчётах положение опасного сечения находит подтверждение в практике работы. Наиболее часто разрушение на первом переходе происходит в районе точки 2 на заготовке (рисунок 18).



Рисунок 18 - Разрушение заготовки в точке 2 на первом переходе штамповки

На последующих переходах вытяжки максимальные растягивающие напряжения также располагаются близко к точке 2, здесь происходит локализация степени деформации.

Наибольшее утонение происходит на первом и четвёртом переходах вытяжки в верхней трети полусферы в районе, ограниченном диаметрами $\varnothing 120$ мм и $\varnothing 230$ мм от центра детали. После четвёртого перехода вытяжки толщина стенки в этой области минимальная и составляет 1,771 мм.

Таким образом, на основе компьютерного моделирования было определено опасное сечение и при проведении практической штамповки деталей в этой области должен быть организован сплошной контроль толщины стенки.

На рисунке 19, а-б приведены результаты компьютерного моделирования первого перехода вытяжки из изотропного материала и материала с заданными коэффициентами анизотропии. Задачу решали в 3D-постановке, для ускорения расчётов моделировался сектор 90° . Коэффициенты анизотропии задавались таким образом, что направление вдоль проката ориентировано по оси x. Для задания анизотропии свойств применялось условие пластичности Хилла-Мизеса и использовались коэффициенты анизотропии, приведённые в таблице 3.

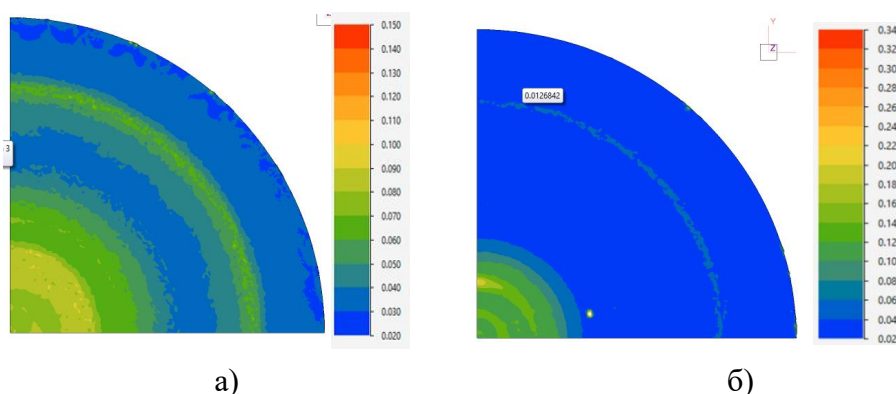


Рисунок 19 - Распределение полей пластической деформации при вытяжке первого перехода а) изотропный материал, б) материал с заданными коэффициентами анизотропии

При изотропном материале распределение полей степени деформации происходит равномерно в одной и той же зоне, максимальное значение степени деформации располагается в верхней части полусферы в районе точки 2 (рисунок 19, а) и составляет 0,14.

При моделировании анизотропного материала распределение полей степени деформации становится неравномерным по зонам. Максимум также располагается в районе точки 2, однако явно видно смещение по оси y (в направлении поперёк проката), значение увеличилось более чем в два раза и составляет 0,33 (рисунок 19, б). Можно предположить, что в направлении поперёк проката в зоне максимальных значений степени деформации и происходит максимальное утонение стенки детали.

Изменение толщины стенки в трёх направлениях (по оси x, под 45° и по оси y) подтверждает это предположение. На изотропном материале в зоне точки 2 толщина остаётся практически одинаковой и составляет 1,851, 1,865 и 1,865 мм соответственно, на анизотропном материале толщина изменяется: по оси x - 1,869 мм, под 45° - 1,661 мм и по оси y толщина всего 1,552 мм (рисунок 20, а-б).

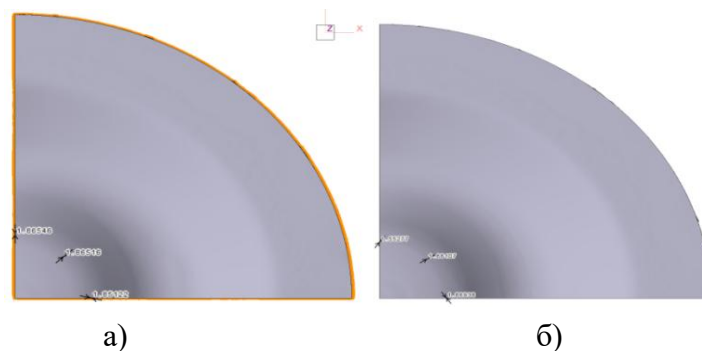


Рисунок 20 - Распределение толщины стенки после вытяжки первого перехода в районе точки 2: а) изотропный материал, б) материал с заданными коэффициентами анизотропии

При постановке задачи с установленными коэффициентами анизотропии время расчёта значительно (почти в три раза) увеличивается. Максимальные значения степени деформации располагаются в виде отдельных точек, которые чередуются с зонами низких значений (рисунок 21). Появление таких пятен при моделировании может свидетельствовать об ошибках расчёта.

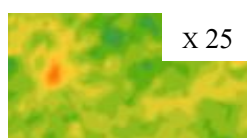


Рисунок 21 - Локализация степени деформации при постановке задачи с установленными коэффициентами анизотропии

Трудность моделирования операций глубокой вытяжки заключается в том, что исходная заготовка на всех этапах деформации обладает малым размером по толщине. Это приводит к тому, что количество конечных элементов и узлов оказывается большим по двум координатам, а по третьей оказывается малым.

Чрезмерно большое количество элементов может приводить к потере точности решения из-за накопления ошибок при определении напряжённо-деформированного состояния каждого элемента. Моделирование процесса вытяжки в 2D- и 3D-постановке как с изотропным материалом, так и с заданными коэффициентами анизотропии подтверждает описанное в литературе опасное сечение в верхней части полусферы.

В пятой главе сформулированы рекомендации по совершенствованию технологического процесса глубокой вытяжки и обсуждаются результаты двух промышленных экспериментов (положительного и отрицательного) по внедрению результатов исследования.

По результатам анализа технологического процесса и проведённого компьютерного моделирования были разработаны следующие рекомендации по изменению технологического процесса: вырезку заготовок производить в чистовые размеры на лазерной установке с одновременной маркировкой, применять отжиг заготовок в среде защитных газов для снижения окалинообразования и ограничить 3 - 5 днями время хранения заготовок после термической обработки до формоизменяющих операций, изменить схему смазки инструментов по переходам, ввести сплошной контроль толщины деталей в опасном сечении заготовки после четвёртого перехода.

На основе указанных рекомендаций была проведена опытная штамповка партии деталей из 10 штук для отладки откорректированного технологического процесса. По

требованиям конструкторской документации минимальная толщина стенки должна составлять не менее 1,7 мм.

Заготовки размечались по часовой стрелке на сектора по 45° . В каждом секторе начиная от центра заготовки откладывалось шесть точек (на диаметрах $\varnothing 100$, $\varnothing 160$, $\varnothing 240$, $\varnothing 340$, $\varnothing 480$ и $\varnothing 640$ мм). Листовой прокат, из которого вырезали заготовки, был изготовлен с небольшим плюсовым отклонением от номинальной толщины (от 2,27 мм до 2,29 мм), следов зачистки дефектов не обнаружено.

По результатам моделирования было определено опасное сечение, располагающееся в верхней части полусферы. При штамповке первых трёх переходов критических утонений выявлено не было. После четвёртого перехода в верхней части полусферы, в кольце, ограниченном диаметрами $\varnothing 125$ мм и $\varnothing 270$ мм (рисунок 22), был произведён сплошной контроль толщины стенки детали и фиксировалось минимальное значение.

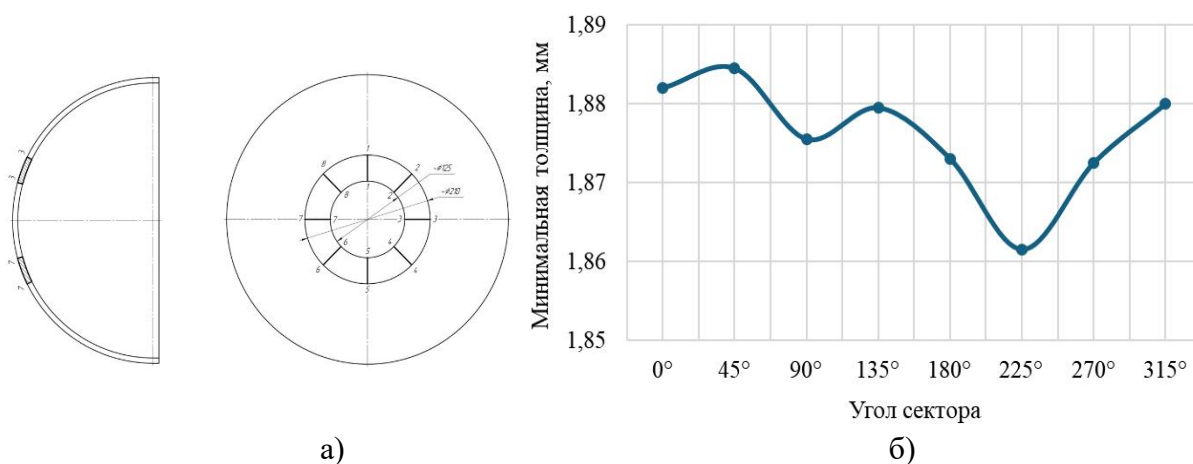


Рисунок 22 - Сплошной контроль толщины после четвёртого перехода в опасном сечении: а) - схема разметки детали, б) - минимальная толщина стенки

Из рисунка 22, б видно, что максимальное утонение располагается не симметрично относительно оси вращения детали, а с некоторым смещением в одну сторону. Это может быть связано с неравномерным прижимом заготовки из-за неправильной центровки штампа, возможным износом оборудования или другими причинами. Такое же смещение степени деформации наблюдалось при моделировании глубокой вытяжки из материала с заданными коэффициентами анизотропии.

Однако, несмотря на указанное смещение, минимальная толщина стенки готовой детали при изготовлении с учётом разработанных рекомендаций укладывается в требования конструкторской документации с хорошим запасом (минимальная толщина стенки - 1,86 мм, относительное утонение за четыре перехода составило 18 %). Указанные изменения были учтены в технологическом процессе и внедрены в производство.

При штамповке следующей партии из 57 заготовок был нарушен технологический процесс - после третьего перехода вытяжки заготовки были отправлены на термическую обработку, но вытяжка четвёртого перехода сразу не была произведена (сломался пресс, ремонт занял 2,5 месяца). После запуска прессы не стали повторно проводить термическую обработку, что повлекло разрушение одной заготовки на четвёртом переходе (рисунок 23) и образование критических утонений ещё на 18 заготовках.



Рисунок 23 - Разрушение заготовки на четвёртом переходе вытяжки

На заготовке с минимальной толщиной в состоянии поставки в этой партии (2,14 мм) минимальная толщина стенки в опасном сечении после третьего перехода составляла 1,82 мм, после четвёртого перехода - 1,57 мм. Относительное утонение в опасном сечении на четвёртом переходе по результатам компьютерного моделирования и в отладочной партии составляет 4,9 %, в случае нарушения технологии возрастает почти в два раза, до 9,57 % (рисунок 24). Общее относительное утонение за четыре перехода составило 22,89 %.

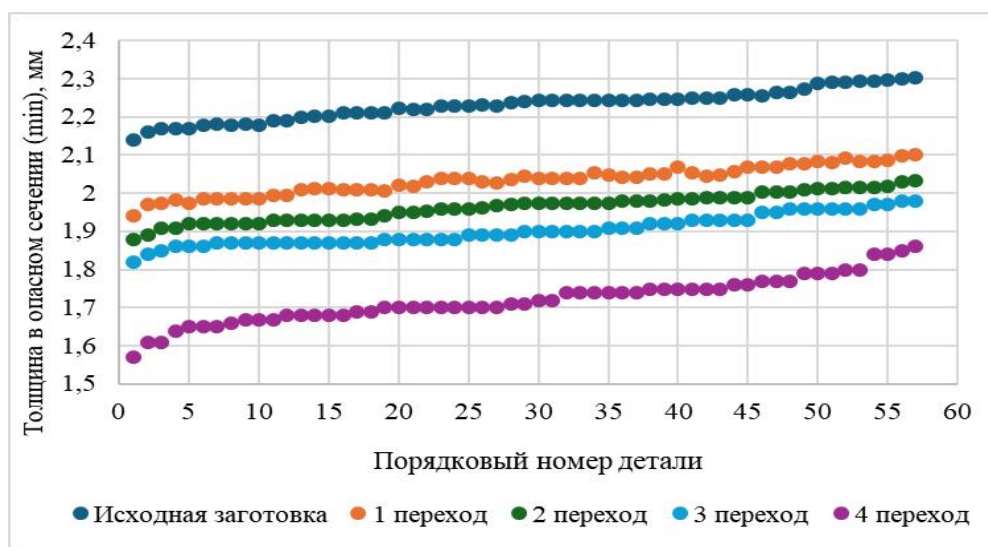


Рисунок 24 - Распределение минимальной толщины в опасном сечении на первой серийной партии деталей из 57 штук

Опыт практической штамповки деталей в целом подтверждает правильность результатов компьютерного моделирования и разработанных на его основе рекомендаций. При соблюдении рекомендаций минимальная толщина готовой детали в опасном сечении укладывается в требования конструкторской документации при использовании листа любой толщины в пределах допуска на толщину проката.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации разработаны рекомендации, позволяющие снизить утонение стенки готовой детали при многопереходной вытяжке.

1. Проведено широкое экспериментальное исследование фактического утонения полусферических деталей из высокопрочной стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д), изготавливаемых по изначальной и скорректированной технологии при предложенном варианте смазки инструментов. В рамках эксперимента исследована 161 деталь, изменение толщины стенки при штамповке определено в 222048 точках (по 48 точек на каждой заготовке в плоском виде и на первых трёх переходах, на четвёртом переходе проводился сплошной контроль в опасном сечении - 36576 точек на 127 деталях);

2. Выявлена зависимость утонения стенки детали от времени хранения заготовок после смягчающей термообработки (оптимальное время хранения не более 3-5 дней). Определено, что анизотропия свойств, приобретённая из-за процессов естественного старения материала, оказывает большее влияние на формоизменение, чем площадка и зуб текучести. Также выявлена зависимость утонения от варианта смазки инструментов на каждом переходе;

3. В результате экспериментального исследования получены следующие новые закономерности: среднее утонение толщины стенки деталей при вытяжке по предложенной технологии изготовления составляет 9,67 %, наибольшее утонение - 19,5 %. Зона с максимальным утонением расположена в верхней части полусферы, в районе, ограниченном диаметрами от Ø 120 до Ø 230 мм от оси симметрии;

4. Получены кривые упрочнения и коэффициенты анизотропии высокопрочных сталей 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) и 42X2ГСНМА (ВКС-1). Разработана трёхмерная компьютерная модель процесса холодной листовой штамповки полусферической детали за четыре перехода с использованием программного комплекса QFORM. Сопоставление результатов компьютерного моделирования с результатами экспериментального исследования показало достаточную сходимость по силовым параметрам и по разнотолщинности полусфер;

5. Разработаны мероприятия, направленные на совершенствование существующего технологического процесса изготовления полусферических деталей из высокопрочной стали 30X2ГСНМА (ВЛ1Д) и её заменителя 42X2ГСНМА (ВКС-1), в том числе на уменьшение утонения стенки.

Перспективой дальнейшей разработки темы является исследование особенностей и закономерностей деформирования высокопрочных сталей при холодной штамповке деталей другой формы, например, полусферических деталей двойной кривизны, применяемых в химической и нефтяной аппаратуре.

Результаты работы могут быть использованы для изготовления полусферических деталей на ПАО «Машиностроительный завод им. М. И. Калинина, г. Екатеринбург».

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в рецензируемых научных журналах, определённых ВАК РФ и
Аттестационным советом УрФУ:*

1. Логинов, Ю. Н. Влияние параметров кривой упрочнения материала на распределение деформаций при глубокой вытяжке / Ю. Н. Логинов, И. Н. Файфер // Чёрные металлы.—2025.— №5.— С.58–62.— 0,38 печ. л./0,19 печ. л. (Scopus).— Q3.
2. Файфер, И. Н. Пластический изгиб круглой в плане листовой заготовки переменной кривизны / И. Н. Файфер, Ю. Н. Логинов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова.—2024.— Т. 22, № 4.— С. 98–105.— 0,50 печ. л./0,25 печ. л.— K1.
3. Loginov, Yu. N. Analysis of stress-and-strain state of billet at deep drawing of hemisphere / Yu. N. Loginov, I. N. Faifer // Steel in Translation. — 2024. — Vol. 54, no. 7. — P. 697–702. — 0,40 печ. л./0,2 печ. л. (Scopus). — Q4.
4. Файфер, И. Н. Цифровое моделирование многопереходной глубокой вытяжки полусферической детали при различных условиях трения / И. Н. Файфер, Ю. Н. Логинов // Заготовительные производства в машиностроении. — 2023. — Т. 21, № 10. — С. 448–453. — 0,40 печ. л./0,2 печ. л.

5. Файфер, И. Н. Моделирование операции глубокой вытяжки / И. Н. Файфер, Ю. Н. Логинов // Цифровое производство: наука, практика, кадры : сборник материалов Первой Всероссийской научно-практической конференции. — Екатеринбург, 2025. — С. 41–43. — 0,25 печ. л./0,13 печ. л.
6. Файфер, И. Н. Формоизменение тонкой круглой стальной заготовки при вытяжке с позиции теории пластин и оболочек / И. Н. Файфер, Ю. Н. Логинов // Уральская школа молодых металлургов = Ural School for Young Metal Scientists : сборник статей XXIII Международной научно-технической конференции Уральской школы-семинара металлургов - молодых учёных, посвящённой 100-летию кафедры Термообработки и физики металлов. - Екатеринбург, 2025. - С. 193–197. - 0,38 печ. л./0,19 печ. л.
7. Ишмуратов, А. Ш. Деформации при листовой штамповке детали с радиальной образующей / А. Ш. Ишмуратов, Ю. Н. Логинов, И. Н. Файфер // Уральская школа молодых металлургов = Ural School for Young Metal Scientists : сборник статей XXIII Международной научно-технической конференции Уральской школы-семинара металлургов — молодых учёных, посвящённой 100-летию кафедры Термообработки и физики металлов. — Екатеринбург, 2025. — С. 113–117. — 0,38 печ. л./0,12 печ. л.
8. Файфер, И. Н. Моделирование распределения остаточных напряжений при вытяжке цилиндрической детали / И. Н. Файфер, Ю. Н. Логинов // Magnitogorsk Rolling Practice 2024 : материалы VIII международной молодёжной научно-технической конференции. — Магнитогорск, 2024. — С. 109–111. — 0,25 печ. л./0,13 печ. л.
9. Ишмуратов, А. Ш. Моделирование получения полусферы методом объёмной штамповки / А. Ш. Ишмуратов, Ю. Н. Логинов, И. Н. Файфер // Magnitogorsk Rolling Practice 2024 : материалы VIII международной молодёжной научно-технической конференции.—Магнитогорск,2024.—С.96–97.—0,13 печ.л./0,03 печ. л.
10. Логинов, Ю. Н. Анализ напряженно-деформированного состояния заготовки при глубокой вытяжке полусферы / Ю. Н. Логинов, И. Н. Файфер // Прокатное производство : приложение к журналу «Технология металлов». — 2024. — № 22. — С. 10–17. — 0,50 печ. л./0,25 печ. л.
11. Faifer, I. N. Simulation of deep drawing of a hemisphere in QFORM software module / I. N. Faifer, Yu. N. Loginov // Magnitogorsk Rolling Practice 2023 : proceedings of the VII International Youth Scientific and Technical Conference. — Magnitogorsk, 2023. — P. 132–133. — 0,13 печ. л./0,07 печ. л.
12. Файфер, И.Н. Показатели анизотропии высокопрочных сталей 42Х2ГСНМА (ВКС-1) и 30Х2ГСНВМ (ВЛ-1Д) / И.Н. Файфер // Уральская школа молодых металлургов = Ural School for Young Metal Scientists : материалы XXI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов — молодых учёных. — Екатеринбург, 2022. — С. 8–12. — 0,38 печ. л.
13. Faifer, I.N. Elastic effect when forging high-strength steel 42H2GSNMA (VKS-1) while taking into account the anisotropy of properties/ I.N. Faifer, Y.N. Loginov// Magnitogorsk Rolling Practice 2022 : proceedings of the VI International Youth Scientific and Technical Conference. — Magnitogorsk, 2022. — P. 74–75. — 0,13 печ. л./0,07 печ. л.
14. Файфер, И. Н. Влияние термической обработки и времени хранения на анизотропию механических свойств высокопрочной стали 42Х2ГСНМА (ВКС-1) / И. Н. Файфер, Д. Р. Салихьянов // Инновационные технологии и технические средства специального назначения : труды XII общероссийской научно-практической конференции. В 3-х томах. Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»».—2020.—С.225–231.— 0,40 печ. л./0,2 печ. л.