

На правах рукописи



ФОМИН Дмитрий Юрьевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПОЛУГОРЯЧЕЙ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ШТАМПОВКЕ ПОКОВОК**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена на кафедре "Технология конструкционных материалов и материаловедение" в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Радкевич Михаил Михайлович

Официальные оппоненты:

Толочко Олег Викторович
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технология исследования материалов» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Чижик Татьяна Александровна
кандидат технических наук, главный
металловед, начальник лаборатории
исследования материалов
Ленинградского металлического
завода ОАО «Силовые машины»,
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «15» октября 2013 года в 16 часов. На заседании диссертационного совета Д 212.229.19 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, лабораторно-аудиторный корпус, кафедра «Машины и обработка металлов давлением».

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « »

2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических
наук, доцент



Кункин
Сергей
Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Повышение надежности и продление ресурса работы деталей узлов машин и аппаратов весьма актуальные задачи российской науки, ориентированной на модернизацию промышленности.

Решение задачи модернизации возможно за счет разработки новых, а также оптимизации и рационализации существующих технологических процессов изготовления металлических заготовок за счет программирования структуры, а следовательно, механических свойств сталей и сплавов. При этом необходимо отметить, что для эксплуатации деталей важным является оптимальное сочетание прочности и запаса пластичности стали.

Одним из путей, позволяющим осуществить оптимизацию структуры металла, является применение режимов термомеханической обработки (ТМО) при производстве изделий. Под термомеханической обработкой понимают последовательное объединение в одном производственном цикле двух условно самостоятельных процессов — деформационного и термического воздействия на металлический сплав. Данная технология промышленно используется на протяжении длительного времени, но, несмотря на это, режимы и теоретические положения термомеханической обработки постоянно совершенствуются.

Теоретические и практические основы термомеханической обработки, освещены в работах ученых: М.Л. Берштейна, М.Е. Блантера, В.Д. Садовского, Р.И. Энтина, Е.Н. Соколова, В.С. Ивановой, А.П. Гуляева, К.Ф. Стародубова, В.И. Большакова. Исследования, касающиеся применения термомеханической обработки в интервале температур горячей пластической деформации отражены в работах ученых: А.И. Рудского, В.В. Рыбина, Г.Е. Коджаспирова, Е.И. Хлусовой, А.П. Атрошенко, В.В. Орлова, К.Н. Богоявленского, В.М. Счастливецца, А.А. Кругловой, В.Г. Хорошайлова. Теоретические и практические сведения, касающиеся применения термомеханической обработки в переходных интервалах температур горячей и теплой пластической деформации, имеются в работах зарубежных ученых: М. Dahme, Н. Kugler, О. Szebsdat, Н. Apholt.

Российскими предприятиями при производстве поковок для машиностроительной промышленности (тип «тяга соединительная», «вал инжектора», «вилка» и т.д.) применяются режимы термомеханической обработки в интервалах температур горячей пластической деформации, базирующиеся на следующих принципах: нагрев до $T_n = A_{c3} + (300 \div 400)^\circ\text{C}$, аустенизация, штамповка при $T_d = A_{c3} + (300 \div 400)^\circ\text{C}$, контролируемое охлаждение, отпуск при необходимости. Эта технология обеспечивает получение прочных изделий с ударной вязкостью, удовлетворяющей, как правило, техническим условиям (ТУ) завода-изготовителя. Анализ макроэкономической ситуации позволяет сделать вывод, что на современном этапе развития мирового машиностроения применяемые нашими заводами режимы ТМО не являются гибкими и не позволяют получать конкурентоспособные качественные стальные изделия с повышенной эксплуатационной прочностью.

Решить проблему повышения эксплуатационной прочности стальных деталей возможно при применении полугорячей термомеханической обработки (ПТМО) - термомеханической обработки в интервалах температур $T_d \in [0,6 \div 0,7] T_{пл}$, соответствующих переходу от горячей к теплой пластической деформации. Исследования показали, что технологический процесс ПТМО является промышленно реализуемым, способствует снижению затрат на энергоносители и металл. Может использоваться при производстве промышленных поковок различной номенклатуры.

Принципиальная схема реализации режимов полугорячей термомеханической обработки заключается в нагреве заготовки до температуры аустенизации, выдержке, штамповке при $T_d \in [Ac_3 \dots (Ac_3 + (50 \div 150))]^\circ C$, последеформационной паузе до 50 секунд, термообработке в соответствии с техническими условиями.

Известно, что режимы термомеханической обработки в интервалах температур $T_d \in [0,6 \div 0,7] T_{пл}^\circ C$ назначаются в основном при прокатке стали. Применение ПТМО при штамповке поковок сдерживается тем, что недостаточно изучено влияние параметров технологических режимов на протекание процессов полигонизации и рекристаллизации в сталях и их влияние на конечную структуру и свойства металла. Дополнительным сдерживающим фактором является отсутствие данных о влиянии параметров полугорячей термомеханической обработки на усилия штамповки и износ штампов. При этом возникают вопросы правильного выбора штамповочного оборудования и вопросы экономической целесообразности.

Для решения вопросов, связанных с разработкой технологического процесса полугорячей термомеханической обработки, требуется проведение комплексных исследований по изучению влияния процессов полигонизации и рекристаллизации в сталях на формирование структуры и комплекса эксплуатационных свойств поковок, изготавливаемых штамповкой в открытых штампах по режимам ПТМО на кузнечно-штамповочном оборудовании. При этом необходимо оценить степень влияния параметров на формирование структуры сталей и на стойкость штамповой оснастки к износу. А также определить возможный экономический эффект от внедрения техпроцесса полугорячей термомеханической обработки в производство, провести апробацию его работоспособности. В соответствии с этим исследования влияния параметров технологического процесса полугорячей термомеханической обработки на свойства и структуру стальных поковок являются **актуальными**.

Цель работы и задачи исследования

Целью работы является разработка и исследование технологического процесса полугорячей термомеханической обработки, обеспечивающего однородность структуры и повышение комплекса механических свойств изделий из сталей основных структурных классов, изготавливаемых штамповкой.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1. Определение закономерностей развития и протекания процессов полигонизации и рекристаллизации, установление механизма упрочнения и разупрочнения в сталях при термомеханической обработке в условиях штамповки поковок в открытых штампах в температурном интервале горячей и теплой упругопластической деформации.
2. Анализ влияния основных технологических параметров режима полугорячей термомеханической обработки (температуры деформирования - T_d , степени деформации - ϵ , времени последеформационной паузы - τ_n , скорости деформирования - $\dot{\epsilon}_d$ и температуры окончательного отпуска - $T_{отп}$) на формирование структуры и механических свойств сталей при штамповке поковок в открытых штампах.
3. Анализ влияния температуры деформирования на усилия штамповки и износостойкость ручьев штампа в интервале, соответствующем горячей и теплой деформации.
4. Оценка эффективности разработанного технологического процесса полугорячей термомеханической обработки при штамповке поковок из конструкционных сталей в условиях кузнечно-штамповочного производства.

Научная новизна:

- Установлены закономерности совместного воздействия параметров полугорячей термомеханической обработки при объемной штамповке поковок на процессы полигонизации и рекристаллизации в сталях перлитного – 40X, мартенситного – 20X13 и аустенитного – 08X18H10T классов.
- Установлены закономерности упрочнения и разупрочнения исследуемых сталей в зависимости от последеформационной выдержки при полугорячей (температура деформационного воздействия $T_d \in [0,6 \div 0,7] T_{пл}$ °C) термомеханической обработке.
- Получены зависимости усилия и контактного давления в ручье штампа в условиях облойной штамповки поковок удлиненной формы при деформационно-термической обработке.

Личный вклад автора заключается в разработке технологического процесса упрочняющей полугорячей термомеханической обработки при

штамповке поковок, позволяющего получать заготовки с повышенным комплексом механических свойств, исследовании структурно-фазовых превращений на различных уровнях, исследовании механических характеристик изделий, получаемых в результате применения технологического процесса ПТМО, установлении закономерностей изменения усилия штамповки, контактного давления в ручье штампа, износ формующей полости ручья штампа при понижении температурного интервала штамповки.

Практическая значимость работы:

- Разработан технологический процесс упрочняющей полугорячей термомеханической обработки стальных заготовок удлиненной формы для схем объемной штамповки на КГШП, обеспечивающий изготовление изделий с повышенным комплексом механических свойств. Разработаны рекомендации по выбору режимов обработки.
- Установлено влияние температуры деформационного воздействия в интервале 800÷1200°С на усилия штамповки и износостойкость ручья штампа. Даны рекомендации по повышению стойкости штампов к абразивному износу. Уточнены формулы расчета усилий штамповки, обеспечивающие более рациональный выбор штамповочного оборудования.
- Результаты исследований апробированы в условиях ОАО «Климов» - РФ, Санкт-Петербург и ОАО «Октябрьский электровагоноремонтный завод» - РФ, Санкт-Петербург.

Основные положения, выносимые на защиту:

- технологический процесс упрочняющей полугорячей термомеханической обработки стальных заготовок удлиненной формы для схем объемной штамповки на КГШП;
- закономерности совместного воздействия параметров полугорячей термомеханической обработки при объемной штамповке поковок на процессы полигонизации и рекристаллизации в сталях перлитного – 40Х, мартенситного – 20Х13 и аустенитного – 08Х18Н10Т классов;
- закономерности упрочнения и разупрочнения исследуемых сталей в зависимости от последеформационной выдержки при полугорячей термомеханической обработке;
- зависимости усилия и контактного давления в ручье штампа в условиях облойной штамповки поковок удлиненной формы при деформационно-термической обработке.

Достоверность результатов обеспечивается использованием фундаментальных положений материаловедения, экспериментами, выполненными с применением современных методов исследования (конечно-элементное и физическое моделирование), сопоставлением установленных в

работе закономерностей с фактами, полученными другими исследователями. Проведением опытно-промышленных исследований.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на 5 международных научно-технических конференциях, в том числе на:

- Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование», Санкт-Петербург, 2013;
- Научно-практической конференции с международным участием «XLI неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, 2012;
- Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении», Барнаул, 2012;
- Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование», Санкт-Петербург, 2012;
- Международной научно-практической конференции «XL неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, 2011;
- Международной научно-практической конференции «XXXIX неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, 2010.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 10 статьях, 4 из них в изданиях, входящих в список ВАК РФ. Библиографический список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, библиографического списка и приложений. Работа содержит 186 страниц основного текста, включая 63 рисунка и 34 таблицы. В приложениях помещены акты внедрения результатов работы и промышленных испытаний. Библиографический список включает 163 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследований, поставлены основные задачи. Показана научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе диссертационной работы произведен обзор теоретических и экспериментальных результатов, посвященных исследованию процессов рекристаллизации, упрочнения и разупрочнения стали при термомеханической обработке, а также развития и применения термомеханической обработки у нас в стране и других странах. Проводится анализ состояния вопроса, рассмотрены основные параметры режимов термомеханической обработки, применяемые в настоящее время при изготовлении стальных поковок автотракторной промышленности, обеспечивающие повышенный комплекс механических свойств и увеличивающий срок службы изделий. При этом установлено, что наиболее перспективным является технологический процесс штамповки поковок с применением ТМО и наименее изученным техпроцесс полугорячей термомеханической обработки. В результате выполненного анализа поставлена цель и сформулированы задачи исследований.

Во второй главе сделано обоснование выбора материалов и основных методов исследования. Описано оборудование, аппаратура, технологическая оснастка, а также компьютерные программы, с помощью которых проводились эксперименты. Даны методики металлографических исследований и испытаний на твердость, ударную вязкость, относительное удлинение/сужение образцов, которые применялись для определения строения, структуры и свойств металла. Описана методика получения образцов для исследования формирования стали в рамках физического моделирования исследуемых параметров различных режимов ПТМО в лабораторных условиях на модуле «растяжение-сжатие» пластомера Gleeble 3800, обоснован выбор конфигурации и размеров образцов, используемых для исследования. Описаны алгоритмы компьютерного конечно-элементного моделирования режимов полугорячей термомеханической обработки для определения степени влияния параметров технологического процесса на структуру и свойства сталей, а также усилия штамповки и износ штамповой оснастки.

В третьей главе представлены результаты исследования основных параметров технологического процесса T_n , T_d , $T_{отп}$, τ_n , ϵ на механизм протекания процессов полигонизации и рекристаллизации в конструкционных сталях на примере сталей 40X, 20X13, 08X18N10T. Основными варьируемыми параметрами были: температура деформирования T_d в диапазоне от A_{c3} до $A_{c3}+350^\circ\text{C}$, степень деформации ϵ в диапазоне от 20% до 60%, время последеформационной паузы τ_n в диапазоне от 20 до 50 сек. Исследование параметров технологического процесса на структуру сталей осуществляли на межкристаллитном и внутрикристаллитном уровне.

Микроструктурные исследования позволили установить рациональное время выдержки стали после деформации. Для сталей мартенситного – 20X13 и перлитного – 40X классов это время не должно быть более 30 сек., а для стали

аустенитного – 08X18H10T класса не более 20 сек. При данной выдержке формируется однородная и мелкозернистая структура сталей. Увеличение времени подстуживания до 50 сек. не оказывает существенного влияния на однородность структуры металла, но снижает степень дисперсности стали, что свидетельствует о развитии процессов рекристаллизации.

Исследования влияния температуры деформирования T_d на тонкую структуру сталей показали, что при температурах горячей пластической деформации $T_d \geq 0,7T_{пл}$ карбидная фаза растворена в зерне, а с понижением температуры $T_d \in [0,6 \div 0,7]T_{пл}$ карбиды выделяются по границам зерен, в основном ближе к внутренней зеренной полости, и реже в наружную межкристаллитную область. За счет этого увеличивается удельная плотность барьеров, препятствующих сдвигу. Микроструктурными исследованиями установлено увеличение размеров зерен стали при штамповке в температурном интервале $T_d \geq 0,7T_{пл}$ по сравнению с температурным интервалом $T_d \in [0,6 \div 0,7]T_{пл}$. Повышенная температура штамповки приводит к увеличению подвижности зеренных границ, энергии активации рекристаллизационных процессов в сталях.

Механические испытания образцов исследуемых сталей при различных степенях деформации в рамках техпроцесса ПТМО показали, что наибольшая прочность наблюдается у поковок, отштампованных со степенью деформации 30%. Дальнейшее увеличение степени деформации до значений 60% не оказывает существенного влияния на прочность стали.

В результате экспериментов была предложена рациональная с инженерной и экономической точки зрения температурно-временная схема технологического процесса ПТМО: аустенизация при температуре $A_{c3} + (350 \div 400)^\circ C$, деформация при температуре $T_d \in (0,6 \div 0,7)T_{пл}$, со скоростью 5 с^{-1} и степенью деформации $\epsilon = 30\%$, последеформационная пауза не более 30 сек., высокоскоростное охлаждение со скоростью более $100^\circ C/\text{сек.}$, отпуск при необходимости в соответствии с техническими условиями.

Отработка техпроцесса по предложенной температурно-временной схеме показала, что структура стали перлитного – 40X и мартенситного – 20X13 класса после отпуска в основном состоит из реечного мартенсита с незначительным содержанием мартенсита самоотпуска (рис.1). Тонкое строение мартенсита унаследовано от деформированного аустенита. По границам реечного мартенсита и в мартенсите самоотпуска присутствуют дисперсные частицы. Уменьшение последеформационной паузы при температуре окончания деформации с 50 до 30 сек. приводит к уменьшению размера карбидов, образовавшихся в процессе отпуска с 110 нм до 40 нм. Карбидные частицы образуются при отпуске на границах реек на месте прослоек остаточного аустенита. С ростом последеформационной паузы (времени выдержки) с 20 до 30 сек. происходит изменение плотности дислокаций, что связано с перераспределением структурных единиц между реечным мартенситом и мартенситом самоотпуска. С ростом времени выдержки объемная плотность карбидной фазы внутри мартенсита самоотпуска увеличивается. Назначение последеформационной выдержки не более 30 сек. обеспечивает прохождение лишь начальной стадии статической рекристаллизации после деформации и формирование в стали более гомогенной,

стабильной тонкой структуры.

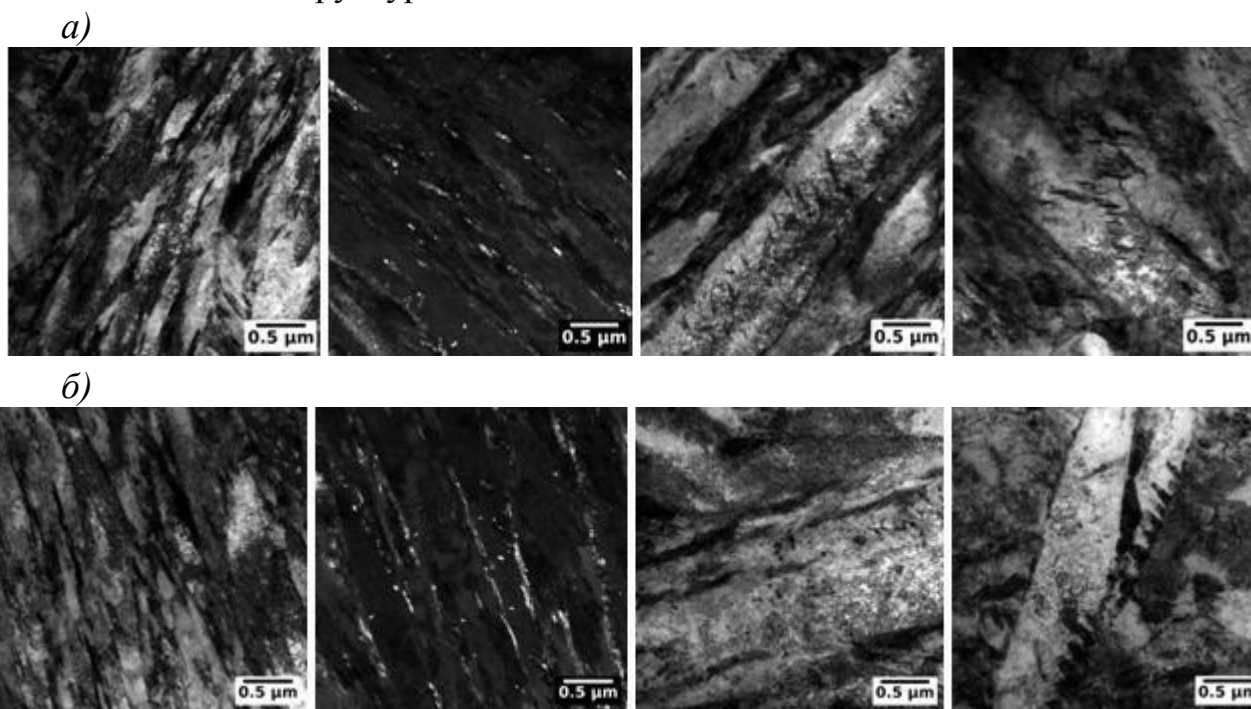


Рисунок 1 - Тонкое строение стали 40X после ПТМО $\times 5900$: а) время выдержки после деформации 20 сек. б) время выдержки после деформации 30 сек.

Для аустенитной стали 08X18H10T отпуск не назначался. Анализ тонкой структуры стали 08X18H10T показал, что во время пластической деформации в стали протекает процесс динамической полигонизация. Поэтому сразу после деформации в субструктуре металла наблюдается горяченаклепанная и фрагментированная структурные составляющие (рис.2,а,верхний).

Соотношение составляющих субструктуры изменяется с течением времени последеформационной выдержки в результате статической полигонизации и прохождения начальной стадии рекристаллизации. При статической полигонизации происходит формирование дислокационных субграниц с различными разориентировками (рис.2,б,средний), в результате чего происходит уменьшение плотности дислокаций.

Деформация в температурном интервале $(0,6 \div 0,7)T_{пл}$ и время последеформационной выдержки не более 30 сек. обеспечивают развитие статической полигонизации и зарождение центров рекристаллизации (рис.2,б,нижний). Увеличение длительности последеформационной выдержки при этих температурах деформации до 40 сек. (рис.2,в) ускоряет процесс рекристаллизации, что приводит к увеличению доли крупной фрагментированной структуры, а также доли и размера рекристаллизованных зерен в стали (рис.2,в, нижний). При этом собирательная рекристаллизация не успевает протекать. Изменение температуры деформирования в интервале $T_d \in (0,6 \div 0,7)T_{пл}$ не оказывает определяющего влияния на механизм формирования структуры аустенитной стали. Отметим, что уменьшение температуры деформации с $0,7T_{пл}$ до $0,6T_{пл}$ приводит к формированию горяченаклепанной фрагментированной структуры. Основное влияние на формирование структуры аустенитной стали в рамках техпроцесса

ПТМО при облойной штамповке оказывает время последеформационной выдержки. Регулирование времени выдержки позволяет управлять структурой аустенитной стали. Большая прочность может быть достигнута при выдержках в 20 сек., а рост пластических свойств будет происходить с увеличением времени выдержки до 40 сек. Необходимо отметить, что во всех образцах выявлены карбонитриды титана, которые, видимо, способствуют замедлению рекристаллизационных процессов.

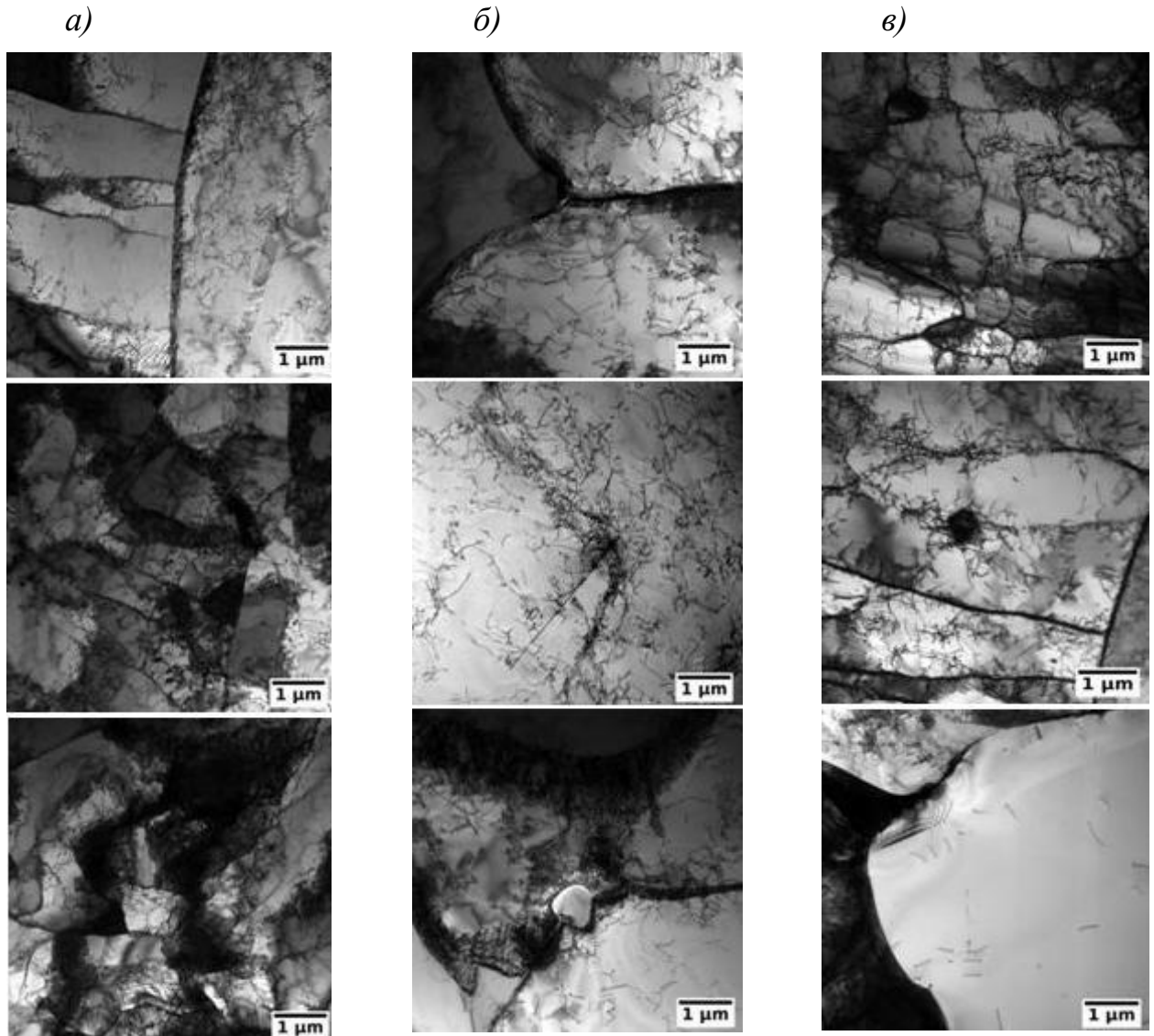


Рисунок 2 - Тонкое строение стали 08X18H10T после ПТМО $\times 2900$: а) деформация $0,6T_{пл}$, время выдержки после деформации 20 сек. б) деформация $0,7T_{пл}$, время выдержки после деформации 20 сек. в) деформация $0,7T_{пл}$, время выдержки после деформации 40 сек.

Результаты исследований структуры позволили установить закономерности протекания рекристаллизационных процессов в сталях. Выдержка при температуре аустенизации инициирует процессы полигонизации, в результате чего происходит подготовка - гомогенизация исходной структуры и субструктуры стали перед штамповкой. При пластическом деформировании изменения в структуре происходят в результате процесса пластической деформации и динамической полигонизации, при этом протекание процессов в объеме удлиненной поковки происходит неравномерно ввиду неоднородного

распределения очага деформации. Важно, что при деформации в интервале $T_d \in (0,6 \div 0,7)T_{пл}$ и дальнейшей выдержке не более 40 сек. происходит начальная стадия статической рекристаллизации - развитие центров рекристаллизации.

В четвертой главе отражены результаты исследований по определению влияния температуры деформирования на энергосиловые параметры технологического процесса при объемной штамповке удлиненных поковок и износ штампового инструмента. Для определения энергосиловых параметров штамповки осуществлялось конечно-элементное моделирование с применением программного комплекса *simufact.forming (msc.superforge)*. Температура штамповки варьировалась в диапазоне температур $T_d \in [600 \div 1300]^\circ\text{C}$ с шагом в каждом новом расчете $50 \div 100^\circ\text{C}$ для различных сталей.

По результатам конечно-элементного моделирования построены кривые зависимостей усилия штамповки и контактного давления, развиваемого в ручье штампа, от температуры деформации (рис.3,4). Было установлено, что снижение температуры деформации T_d заготовки в интервале от 1200°C до 800°C вызывает рост усилия штамповки P в среднем на 25%, а контактного давления в полости ручья штампа в среднем на 14%.

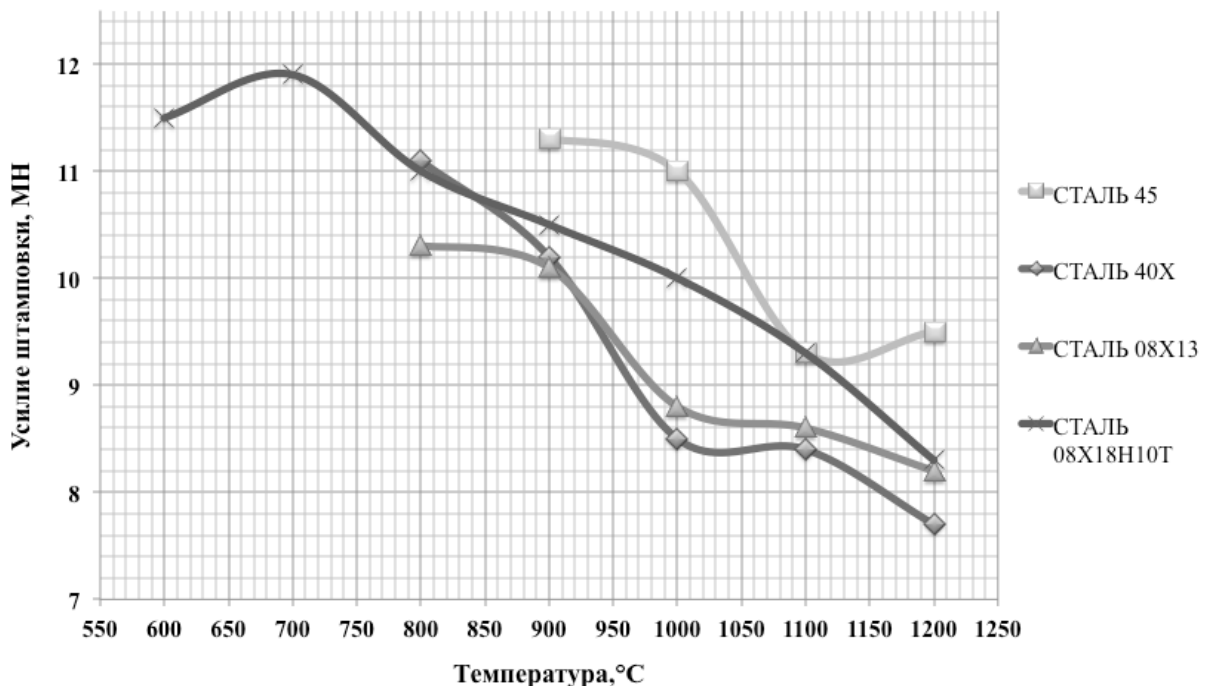


Рисунок 3 – Зависимость усилия штамповки от температуры для исследованных сталей

Так как износ штампа определяется работой на истирание полости ручья штампа, а работа на истирание тем больше, чем выше контактное давление в ручье штампа, то расчетами установлено, что понижение температуры штамповки T_d до $900 \div 850^\circ\text{C}$ приводит к увеличению износа полости ручья штампа в среднем на 20÷30%. При этом увеличение износа штампа может быть частично нивелировано за счет предварительной подготовки штампа и заготовки посредством теплой смазки.

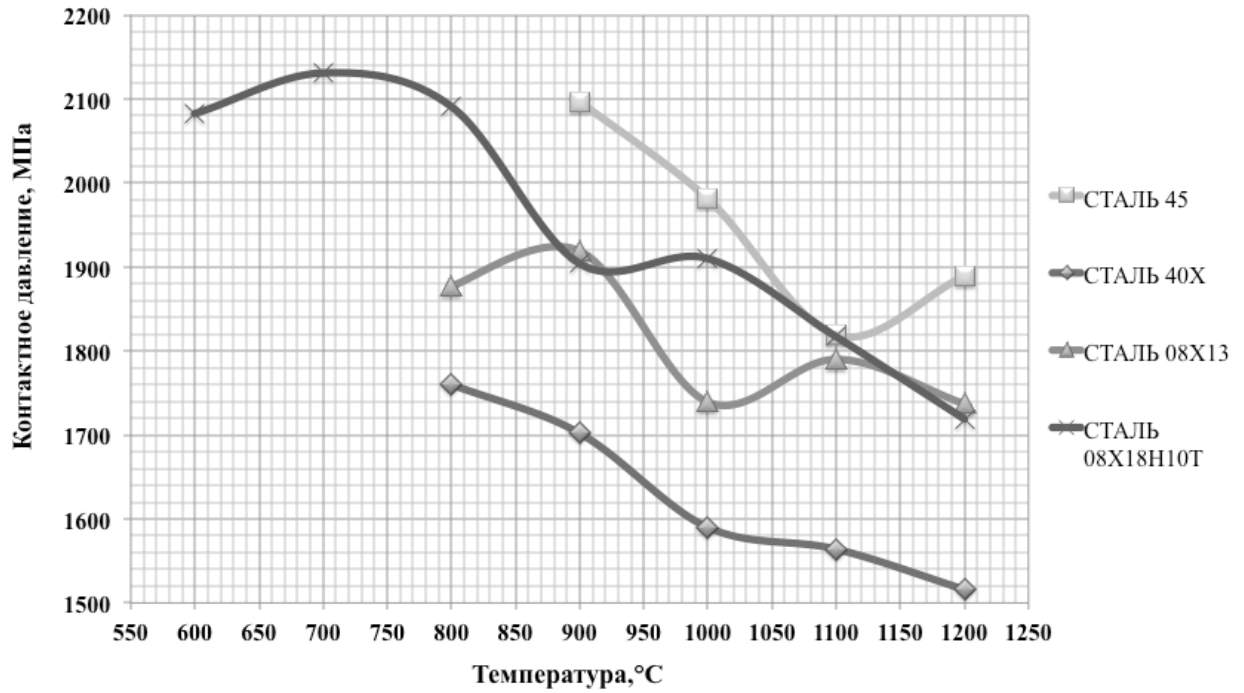


Рисунок 4 – Зависимость контактного давления в ручье штампа от температуры для исследованных сталей

На практике выбор кузнечно-штамповочного оборудования осуществляется по результатам расчета. Был произведен сравнительный анализ расчетных значений усилий штамповки по различным формулам, которые применяются для определения усилия штамповки. Для определения усилия штамповки P на КГШП используют формулы А.В.Ребельского, Л.В.Прозорова, М.В.Сторожева, полученные эмпирическим путем в результате анализа напряженного состояния металла в ряде сделанных допущений. Формулы А.В.Ребельского и М.В.Сторожева встречаются наиболее часто в научно-методической литературе, как рекомендуемые при проектировании техпроцессов облойной штамповки. По результатам анализа формул А.В.Ребельского, Л.В.Прозорова, М.В.Сторожева показано, что усилие штамповки, рассчитанное по формулам, определяется однофакторно, а именно, оно пропорционально напряжению текучести металла σ_s или временному сопротивлению σ_b , то есть

$$P \sim x_n F_n \sigma_s \quad \text{ли} \quad P \sim x_n [\sigma_s] \quad (1)$$

где x_n – безразмерный коэффициент, учитывающий геометрическую форму поковки; F_n – площадь проекции поковки на плоскости разреза, мм^2

Для расчета усилия облойной штамповки в литературе наиболее часто рекомендуют применять формулу М.В.Сторожева, которая имеет вид:

$$P = 1,15 \sigma_s \left[\left(1 + 0,5 \frac{b}{h_3} \right) F_3 + \left(1 + \frac{b}{h_3} + 0,1 \frac{a}{h_3} \right) F_n \right] \quad (2)$$

где

σ_s – напряжение текучести металла, соответствующее температуре и скорости деформации при штамповке, приблизительно равное временному сопротивлению на растяжение при той же температуре, $\text{кг}/\text{мм}^2$; b – ширина мостика канавки для заусенца, мм ; h_3 – толщина заусенца в мостике, мм ; F_n – площадь проекции поковки на плоскости разреза, мм^2 ; F_3 – площадь мостика канавки для заусенца,

мм²; d – диаметр или сторона квадрата поковки в плане, мм; a – средняя ширина поковки, мм.

Проведенным экспериментом по компьютерному моделированию упругопластического формоизменения заготовки из стали 45 и 40X показано, что усилие деформирования P не пропорционально напряжению текучести σ_s или временному сопротивлению σ_b , а изменяется по более сложной зависимости. Установлено, что в интервале температур деформирования $T_d \in [800 \div 1200]^\circ\text{C}$ расчетные усилия штамповки меньше экспериментальных в 2-4 раза (табл.1).

Таблица 1 – Усилия штамповки, рассчитанные по формуле и экспериментально

№	Температура деформации $T_d, ^\circ\text{C}$	$\sigma_s, \text{кгс/мм}^2$	Усилие P_p по формуле 2, кН	Усилие P , при моделировании, кН	$\Delta P = P/P_p$
Сталь 45					
1.	900	8,3	7 197,70	11 300	1,57
2.	1000	5,1	4 422,68	11 000	2,49
3.	1100	3,1	2 688,30	9 500	3,53
4.	1200	2,1	1 821,11	9 300	5,11
Сталь 40X					
1.	800	10	9 748,09	11 100	1,14
2.	900	7,04	6 862,66	10 200	1,49
3.	1000	4,38	4 269,66	8 700	2,04
4.	1100	2,65	2 583,24	8 500	3,29
5.	1200	2,44	2 378,53	8 400	3,53

По-видимому, в расчетных формулах не учитывается многофакторность процесса пластической деформации и неоднородность формирования очага деформации, а поэтому требуется их корректировка за счет введения корректирующих коэффициентов. Показано, что применение к формуле М.В.Сторожева корректирующего коэффициента равного скоростному коэффициенту С.И.Губкина не обеспечивает определение расчетного значения P по сравнению с экспериментальным в пределах приемлемой погрешности 10%. Введение нами в формулу М.В. Сторожева коэффициента k^- (табл.2), привело к тому, что расчетное усилие штамповки отличается в среднем на 8% от эксперимента.

Таблица 2 - Значения коэффициента k^-

Отношение температур деформации и плавления стали			
	$T_d / T_{пл} = 0,5 \div 0,6$	$T_d / T_{пл} = 0,6 \div 0,7$	$T_d / T_{пл} = 0,7 \div 0,8$
k^-	1,0 ÷ 1,5	1,5 ÷ 2,5	3,0 ÷ 4,0

В этом случае формула М.В. Сторожева принимает следующий вид:

$$P = 1,15k\sigma_s \left[\left(1 + 0,5 \frac{b}{h_3} \right) F_3 + \left(1 + \frac{b}{h_3} + 0,1 \frac{a}{h_3} \right) F_n \right] \quad (3)$$

На рис. 5,а-б показаны кривые зависимостей величины усилия деформирования от температуры штамповки для стали 45, рассчитанные по формуле М.В. Сторожева с использованием коэффициента k^- (рис.5,б) и без него (рис.5,а).

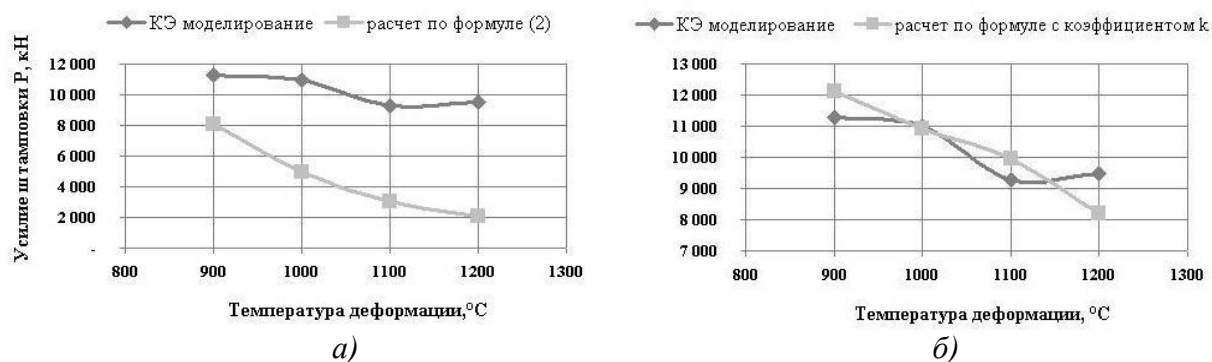


Рисунок 5 – Опытные и расчетные зависимости усилия штамповки

По результатам конечно-элементного моделирования упругопластического формоизменения заготовок установлено, что при одинаковой температуре усилие штамповки зависит от марки стали. Значение усилия штамповки P стали 45 выше в среднем на 15% по сравнению со сталью 40Х. Это косвенно подтверждает предположение о различном механизме протекания процессов полигонизации и рекристаллизации в исследуемом интервале температур пластической деформации при штамповке на КГШП в зависимости от степени легирования сталей. Наиболее вероятно, что снижение сопротивления деформированию при штамповке легированной стали по сравнению с углеродистой сталью обуславливается большей скоростью ее рекристаллизации. Возможной причиной этого может являться выпадение дисперсных частиц вблизи границ зерен и по плоскостям скольжения. Дисперсные частицы, располагаясь по плоскостям скольжения, активируют поверхности сдвига внутри кристалла, позволяя кристаллам быстрее вытягиваться в направлении сдвига, то есть служат дополнительными полюсами скольжения структурных единиц, увеличивают степень подвижности конгломерата кристаллов, наделяют отдельно взятый объем металлического сплава большей энергией активации рекристаллизационных процессов. Описанный механизм скольжения повышает пластичность стали и позволяет заготовке быстрее принимать форму, соответствующую конфигурации ручья штампа. Для исследуемых сталей установлено, что вне зависимости от степени легирования характерным является рост скорости рекристаллизации с увеличением температуры деформационного воздействия, что обусловлено увеличением подвижности зеренных границ.

Результаты конечно-элементного моделирования показали, что снижение температуры деформирования не является препятствием для реализации техпроцессов полугорячей термомеханической обработки при температурах, соответствующих теплой пластической деформации, применительно к схемам объемной штамповки.

В пятой главе отражены результаты апробации разработанного техпроцесса в заводских условиях для выбранных сталей основных структурных классов и сравнение с результатами лабораторных исследований. Так анализ микроструктуры промышленных поковок показал, что структура исследуемых сталей в целом достаточно однородна, однако дисперсность структуры промышленных образцов ниже, чем лабораторных на 10÷15%, отштампованных

по одинаковым режимам, что можно объяснить масштабным фактором. Так средний размер бывшего аустенитного зерна стали 40X и 20X13 равен 49,6 мкм (6 баллов) и 42,2 мкм (6 баллов) соответственно. Степень дисперсности стали перлитного и мартенситного класса после полугорячей термомеханической обработки по разработанным режимам выше, чем при штамповке по стандартным заводским режимам. Средний размер аустенитного зерна промышленной поковки из стали 08X18H10T при времени подстуживания 20 сек. составил 39,4 мкм (6 баллов). При понижении температуры штамповки стали аустенитного класса до значения $(0,6 \div 0,7)T_{пл}$ и сокращении времени выдержки с 40 до 20 сек. наблюдается уменьшение среднего размера аустенитного зерна примерно в два раза с 87 до 40 мкм. Деформационное воздействие при упругопластической деформации изменяет структуру аустенита, при этом фрагментирование зерен происходит в основном по линиям скольжения внутри кристаллита.

Сравнительный анализ механических свойств показал, что поковки, изготовленные на КГШП по режимам полугорячей термомеханической обработки, имеют механические свойства выше, чем поковки, изготовленные по стандартной заводской технологии: нагрев до $T_n = A_{c3} + (300 \div 400)^\circ C$, аустенизация, штамповка при $T_d = A_{c3} + (300 \div 400)^\circ C$, охлаждение в естественных условиях, закалка, отпуск в соответствии с техническими условиями. Так для поволок из стали 40X после полугорячей термомеханической обработки достигнуто повышение характеристик твердости на 75%, условного предела текучести на 10%, ударной вязкости на 18%; для стали 20X13 - твердости на 76%, временного сопротивления разрушению на 75%, условного предела текучести на 20%; для стали 08X18H10T твердости на 5%, временного сопротивления разрушению на 2%, условного предела текучести на 23%. По итогам производственного освоения техпроцесса можно заключить, что повышение механических свойств исследуемых сталей произошло в результате качественных изменений в микроструктуре и субструктурах металла.

Экономический расчет показал, что предлагаемые режимы являются экономически эффективными, так как позволяют снизить себестоимость продукции в среднем на 20÷23% за счет минимизации затрат на энергоносители, металл и механическую обработку вследствие уменьшения припуска.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан технологический процесс упрочняющей полугорячей термомеханической обработки стальных заготовок применительно к штамповке в открытых штампах на КГШП. Рациональной деформационно-температурно-временной схемой данного технологического процесса является: аустенизация, штамповка на КГШП в интервале $T_d \in [A_{c3} \dots (A_{c3} + (50 \div 150))]^\circ C$ со степенью деформации 30÷40%, последеформационная выдержка 30 сек., быстрое охлаждение со скоростью более 100°С/сек. и окончательный отпуск в зависимости от марки стали.

2. Определены закономерности развития и протекания процессов рекристаллизации и полигонизации в сталях основных структурных классов на различных этапах технологического процесса ПТМО. Установлены закономерности упрочнения и разупрочнения исследуемых марок сталей 40Х, 20Х13, 08Х18Н10Т. Установлено, что целенаправленное регулирование времени подстуживания после деформации в пределах $20 \div 40$ сек. обеспечивает наиболее рациональное соотношение прочностных и пластических свойств стали.
3. Проанализировано влияние основных деформационно-термических параметров режимов полугорячей термомеханической обработки - температуры деформирования T_d , степени деформации ϵ , времени последеформационной паузы τ_p , скорости деформирования и температуры окончательного отпуска $T_{отп}$ на структуру и комплекс механических свойств сталей при штамповке поковок в открытых штампах. Определены основные деформационно-термические параметры режимов ПТМО, обеспечивающие формирование однородной микро- и субструктуры.
4. Произведен анализ влияния снижения температуры деформирования в интервале $(0,5 \div 0,8)T_{пл}$ на усилия штамповки и износостойкость штампа. Установлено, что при понижении температуры деформирования T_d заготовки в интервале температур $1200 \div 800^\circ\text{C}$ наблюдается рост усилия штамповки P в среднем на 25%, а контактного давления в ручье штампа - в среднем на 14%. Результаты конечно-элементного моделирования и исследования структуры показали, что неравномерное формирование очага деформации происходит вследствие разных скоростей течения металла в формирующей полости штампа. Разработаны рекомендации для расчета мощности КГШП.
5. Технологический процесс полугорячей термомеханической обработки удлиненной формы поковок при штамповке в открытых штампах на КГШП обеспечивает сокращение расхода металла, увеличение ресурса эксплуатации изделий за счет более высокого комплекса механических свойств, уменьшение себестоимости изделия примерно на 23%.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. **Фомин Д.Ю.** Формирование структуры в сталях аустенитного класса при штамповке в открытых штампах / Фомин Д.Ю. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: изд-во Политехнического ун-та. – 2013. – №2(171). – С.146-150. *(Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК).*
2. **Фомин Д.Ю.** Применение полугорячей деформационно-термической штамповки поковок / Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование. – СПб.: изд-во Политехнического ун-та. – 2012. – №2-1(147). – С.149-152. *(Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК).*

3. **Фомин Д.Ю.** Физическое моделирование технологического процесса полугорячей штамповки / Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование. – СПб.: изд-во Политехнического ун-та. – 2012. – №1(142). – С.143-146. *(Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК).*
4. **Фомин Д.Ю.** Формирование структуры сталей в условиях программной механико-термической обработки / Радкевич М.М., Новиков А.И., Фомин Д.Ю. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование. – СПб.: изд-во Политехнического ун-та. – 2010. – №4(110). – С.192-196. *(Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК).*
5. **Фомин Д.Ю.** ПТМО для схем облойной штамповки поковок удлиненной формы / Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й международной научно-практической конференции. – СПб.: изд-во Политехнического ун-та. – 2013. – С.883-887.
6. **Фомин Д.Ю.** Структурные изменения в сталях при штамповке заготовок в открытых штампах с применением термомеханической обработки / Фомин Д.Ю. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й международной научно-практической конференции. – СПб.: изд-во Политехнического ун-та. – 2013. – С.888-893.
7. **Фомин Д.Ю.** Влияние последеформационной паузы на структуру поковок при полугорячей термомеханической обработке / Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й международной научно-практической конференции. – СПб.: изд-во Политехнического ун-та. – 2012. – С.645-650.
8. **Фомин Д.Ю.** Влияние температуры деформирования и степени деформации на прочность и структуру поковок при полугорячей термомеханической обработке / Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. // Ползуновский альманах. – Барнаул: АлтГУ – 2012. – №1. – С.65-69.
9. **Фомин Д.Ю.** Определение износа штамповой оснастки при изготовлении стальных поковок с применением ТМО / Фомин Д.Ю., Радкевич М.М. // XLI неделя науки СПбГПУ: Материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч.IV. – СПб.: изд-во Политехнического ун-та. – 2012. – С.147-149.
10. **Фомин Д.Ю.** Разработка и моделирование технологического процесса полугорячей штамповки круглых в плане поковок из легированной стали / Фомин Д.Ю., Радкевич М.М. // XL неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч.IV. – СПб.: изд-во Политехнического ун-та. – 2011. – С.155-156.