

На правах рукописи

КУЛЬТЕШОВА Вера Владимировна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ
С ГЛУХОЙ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПОЛОСТЬЮ
НА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

Специальность 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2023

Работа выполнена на кафедре оборудования и технологий прокатки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), в отделе технологий производства службы главного технолога Акционерного общества «Научно-производственное объединение «Прибор» имени С.С. Голембиовского» (АО «НПО «Прибор» им. С.С. Голембиовского).

Научный руководитель: **Иванов Андрей Владимирович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Романцев Борис Алексеевич**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС» (НИТУ МИСИС)

Шаталов Роман Львович
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский политехнический
университет» (Московский Политех)

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт металлургии и
материаловедения имени А.А. Байкова
Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Защита состоится « » 2023 года в 14 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета 24.2.331.01 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Справки по телефону: 8 (499) 267-09-63

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный печатью
организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана
и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан « » 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.01
кандидат технических наук, доцент



А.И. Плохих

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В машиностроении широкое применение находят цилиндрические детали с глухой профилированной полостью, например, корпуса изделий специального назначения. Способы получения таких деталей определяются маркой материала и, как правило, являются комбинацией методов холодной штамповки и обработки резаньем. При этом обработке резаньем подвергаются заготовки из средне- и высокоуглеродистых, легированных сталей, что приводит к низкому коэффициенту использования материала (КИМ) и высокой трудоемкости и, как следствие, росту себестоимости их изготовления, высокой энергоемкости производства.

Наиболее перспективным и эффективным методом изготовления заготовок из среднеуглеродистых сталей с глухой профилированной полостью является горячая прошивка на трехвалковом стане поперечно-винтовой прокатки (ПВП), встроенном в автоматизированную линию винтовой прокатки (АЛВП) (Рисунок 1).

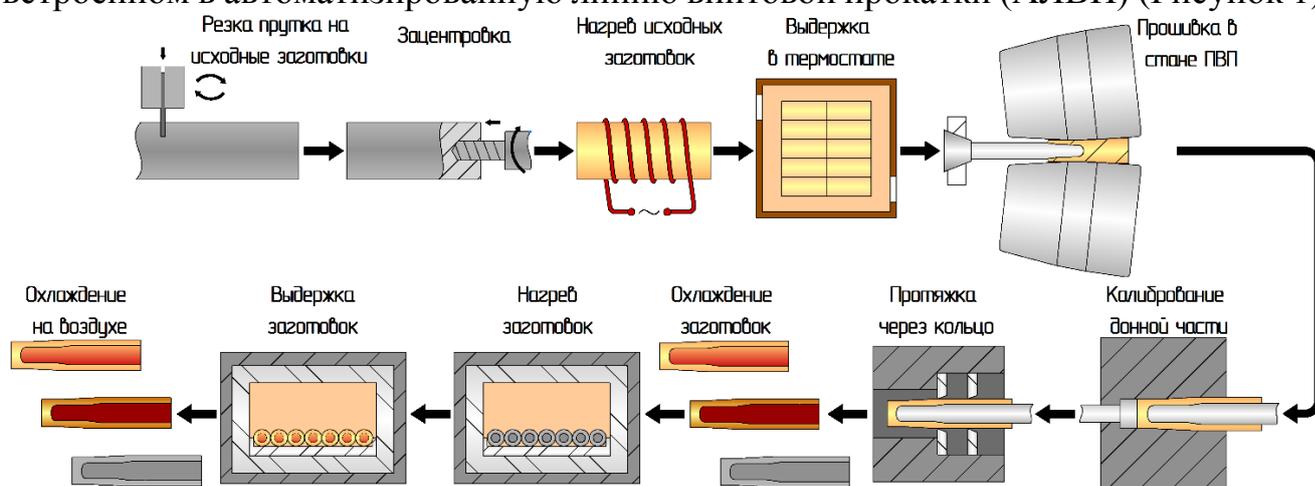


Рисунок 1 – Схема технологического процесса получения цилиндрических заготовок с глухой профилированной полостью

На данной линии возможно получать заготовки из средне- и высокоуглеродистых, легированных сталей за несколько переходов с прокатного нагрева, включая термическую обработку, чего нельзя обеспечить методами холодной штамповки. Однако, существующий способ обработки на стане ПВП имеет недостатки, приводящие к необходимости проведения дополнительных операций и, как следствие, затратам, которые не позволяют использовать данную технологию в промышленных масштабах.

В первую очередь, проблемы связаны со сложностью получения после прошивки на стане ПВП профилированной внутренней полости с заданной формой и размерами. После прошивки, на стадии формирования чистой внутренней поверхности путем калибровки дна и профильной протяжки из-за несоответствия профилей прошивной оправки и пуансона калибровки происходит деформация донной части, в связи с чем требуется дополнительная обработка резаньем поверхностей внутренней полости, увеличение припусков на обработку. Такая технология приводит к значительным временным затратам на машинную

обработку, снижению КИМ при негарантированном обеспечении требуемых размеров внутренней полости.

Второй проблемой, ограничивающей применение линии стана ПВП для получения деталей в промышленном масштабе, является наличие термической обработки, состоящей из промежуточного нагрева и нормализации перед окончательной обработкой резаньем. Такая последовательность операций обусловлена необходимостью термообработки заготовок, поступающих как после калибровки, так и со склада, что приводит к разрыву непрерывности технологического процесса в линии стана.

Помимо прочего, описанные проблемы усугубляются наличием скудной информации по технологии горячей прошивки на станах ПВП заготовок из среднеуглеродистых сталей с глухой полостью, а также условиями проведения термообработки этих сталей для достижения требуемых механических свойств, с учетом проведенных ранее операций обработки металлов давлением (ОМД).

Таким образом, перспективы развития технологии получения цилиндрических заготовок из среднеуглеродистых сталей с глухой профилированной полостью связаны с совершенствованием существующих процессов производства, а снижение трудоемкости и себестоимости получения таких заготовок при серийном производстве методом ПВП является актуальной задачей.

Цель работы. Совершенствование технологии производства цилиндрических заготовок малого диаметра (20...60 мм) из стали 50 с глухой профилированной полостью на АЛВП.

Научная новизна работы:

- разработана конечно-элементная (КЭ) модель процесса горячей прошивки цилиндрических заготовок с глухой профилированной полостью из стали 50 на трехвалковом стане ПВП, основанная на вязкопластической модели материала, упрочняющейся по закону Купера-Саймондса;
- аналитически определены параметры модели упрочнения Купера-Саймондса для стали 50 при горячей ОМД (ГОМД);
- предложен метод расчета температурных полей в заготовке на стадиях прошивки и протяжки с учетом нагрева металла за счет пластической деформации и реальных условий теплообмена заготовки с окружающей средой и инструментом;
- установлены зависимости механических свойств стали 50 после термообработки на сорбит от температуры нагрева и концентрации охлаждающего раствора закалочной жидкости «Термовит-М» по ТУ 2219-045-23763315-2007;
- выявлено, что микроструктура заготовок из стали 50 после горячей прошивки на трехвалковом стане ПВП и протяжки соответствует микроструктуре материала в состоянии поставки (горячекатаный подкат) и представляет собой крупнодисперсную перлитную структуру с величиной зерна 8 баллов.

Практическая значимость работы. Усовершенствована и внедрена технология и оборудование прошивки и протяжки цилиндрических заготовок с глухой профилированной полостью из среднеуглеродистых сталей массой 0,5...3 кг диаметром 20...60 мм длиной 100...200 мм на Богородском филиале АО «НПО «Прибор имени С.С. Голембиовского», г. Ногинск, что позволило решить

вопрос снижения трудоемкости и себестоимости производства за счет исключения операции обработки резаньем внутренней профилированной полости и обеспечения требуемых механических свойств с прокатного нагрева.

Методология и методы исследований базируются на теории ОМД и численном анализе, основанном на методе конечных элементов (МКЭ). Экспериментальные исследования проводились на АЛВП АО «НПО «Прибор» им. С.С. Голембиовского». Разработка прошивного и калибровочного инструмента осуществлялась по результатам КЭ-моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовок во время горячей прошивки, на основе экспериментальных данных и положений проектирования.

Достоверность результатов исследований обеспечивалась проведением большого объема физических экспериментов с использованием стандартных методов, средств измерений и высокоточного оборудования; применением современных методов исследований, включающих численное моделирование.

Личный вклад. Соискатель непосредственно участвовал в постановке диссертационной работы, формулировке цели и задач, планировании, организации и проведении натурных экспериментов и численных исследований, обработке и анализе полученных данных, а также во внедрении результатов работы.

Положения, выносимые на защиту:

- КЭ-модель процесса прошивки заготовок из стали 50 на трехвалковом стане ПВП и метод расчета температурных полей в заготовке перед сорбитизацией в зависимости от температуры нагрева перед прошивкой и условий проведения операций ОМД;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований получения цилиндрических заготовок с глухой профилированной полостью на АЛВП;
- результаты исследования качества металла заготовок из стали 50 и условий проведения термообработки для получения заданной микроструктуры и механических свойств;
- усовершенствованный технологический процесс (ТП), оснастка и инструмент для промышленного изготовления цилиндрических заготовок малого диаметра из стали 50 с глухой профилированной полостью.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и конгрессах: 44 научно-техническая конференция (НТК) «Проектирование систем». М. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), 2017; 45 НТК «Проектирование систем». М. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), 2018; 15 международный конгресс сталеплавыльщиков. Тула. 2018; 29 Всероссийская конференция научно-технической школы-семинара «Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах». Сочи. 2018; 46 НТК «Проектирование систем». М. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), 2019; научный семинар кафедры оборудования и технологий прокатки МГТУ им. Н.Э. Баумана». М. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), 2019; 47 НТК «Проектирование систем». М. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), 2020; 48 НТК «Проектирование систем». М. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), 2021.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 6 научных трудах, 3 из которых в изданиях из Перечня ВАК РФ и 2 в изданиях из международной базы данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов и результатов работы, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов и списка литературы из 165 отечественных и зарубежных авторов. Текст работы содержит 139 страниц машинописного текста, включая 18 таблиц и 81 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы и сформулирована ее цель.

В Главе 1 приведен сравнительный анализ действующих технологий изготовления цилиндрических заготовок из среднеуглеродистых сталей с глухой профилированной полостью (Рисунок 2), даны описания методов, определены их достоинства и недостатки.

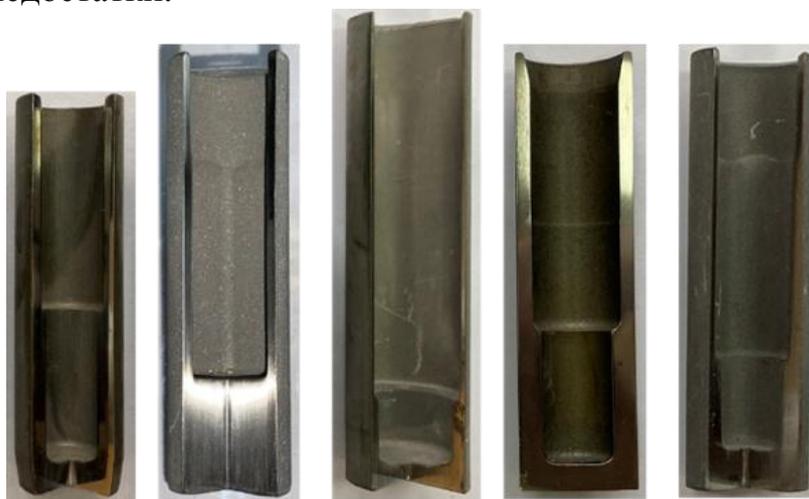


Рисунок 2 – Цилиндрические заготовки с глухой профилированной полостью

Проведен анализ литературных источников по технологии прошивки цилиндрических заготовок с глухой профилированной полостью из среднеуглеродистых сталей, определены требования к заготовкам и оценены возможности по усовершенствованию технологии для увеличения производительности линии и снижения энергетических затрат за счет исключения технологических операций.

Представлены технические характеристики АЛВП для получения цилиндрических заготовок с глухой профилированной полостью, установленной в Богородском филиале АО «НПО «Прибор» им. С.С. Голембиовского» (рисунок 2).

В работах Г.М. Третьякова, А.П. Чекмарева, Я.Л. Ваткина, М.И. Ханина, Б.А. Романцева, В.И. Биба, Н.С. Кирвалидзе, И.А. Фомичева, Ю.В. Гамина, А.А. Рыбаржа, В.П. Кирпичникова, Y. Seishiko, J.-Y. Jang, Y.-W. Chiu и др. сформулированы основные требования к качеству цилиндрических заготовок из среднеуглеродистых сталей с глухой профилированной полостью, рассмотрены дефекты, связанные с разрушением металла при ПВП, способы их предупреждения

и устранения, выявлены условия и причины образования центрального и кольцевого разрушений при прошивке на станах ПВП. В работах отмечена важность определения методов и режимов термической обработки заготовок для формирования в металле требуемой структуры и механических свойств.

На основе проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

- существующая технология получения цилиндрических заготовок диаметром 20...60 мм с глухой профилированной полостью на линии стана винтовой прокатки не позволяет производить заготовки в промышленных масштабах из-за низкой производительности и высокой себестоимости за счет большого числа технологических операций;
- в существующей технологии, на этапах калибровки дна и профильной протяжки возникает деформация донной части заготовок, что требует проведения дополнительной обработки резаньем профилированной внутренней поверхности. Это требует поиска методов создания чистовых поверхностей на стадиях прошивки, калибровки и протяжки, что позволит исключить из ТП операцию обработки резаньем внутренней полости;
- принятый способ термообработки, включающий нормализацию за счет промежуточного нагрева, существенно сдерживает производительность и удорожает процесс изготовления цилиндрических заготовок диаметром 20...60 мм с профилированной внутренней поверхностью. Определение режимов термообработки стали 50 до заданной структуры и механических свойств с прокатного нагрева позволит усовершенствовать процесс термообработки и снизить энергетические затраты на ее осуществление.

В соответствии с целью работы, сформулированы основные задачи исследования:

- разработать технологическую схему изготовления цилиндрических заготовок из стали 50 с чистой глухой профилированной полостью на линии стана ПВП с прокатного нагрева;
- разработать подход, позволяющий исследовать НДС и температурное состояние заготовок во время горячей прошивки на стане ПВП и протяжки для определения параметров ТП и инструмента, а также выбора режимов термообработки до требуемой микроструктуры и механических свойств с прокатного нагрева;
- определить режимы термической обработки заготовок из стали 50 для получения заданной структуры и механических свойств с учетом влияния предварительно проведенных операций ОМД.

Глава 2 посвящена КЭ-моделированию процесса прошивки и протяжки на линии стана ПВП и разработке модели тепловой задачи для определения температуры нагрева с целью проведения термообработки до требуемой микроструктуры и механических свойств с прокатного нагрева.

Схема прошивки обусловлена требованием высокого качества внутренней поверхности, на которой не должно быть трещин и волосовин. Для обоснованного выбора схемы прошивки была рассмотрена задача расчета накопленной поврежденности (ресурса пластичности) при прокатке цилиндрических сплошных заготовок на двух- и трехвалковых станах ПВП. Накопленная поврежденность

рассчитывалась на основе феноменологической модели накопления поврежденности (ресурса пластичности) Ψ , предложенной В.Л. Колмогоровым.

$$\Psi = \int_0^t \frac{H}{\Lambda_p(k, \mu_\sigma)} d\tau,$$

где $H = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \sqrt{(\xi_1 - \xi_2)^2 + (\xi_2 - \xi_3)^2 + (\xi_3 - \xi_1)^2}$ – интенсивность скорости деформации сдвига (ξ_i – компоненты тензора скоростей деформации); $\Lambda_p = \int_0^{t_p} H d\tau$ – предельная степень деформации сдвига, определяемая по диаграмме пластичности; μ_σ – показатель Лодэ-Надаи; $k = \frac{\sigma_{ср}}{T}$ – жесткость напряженного состояния.

Для расчета накопленной поврежденности металла заготовки при ПВП была написана макрокоманда на языке APDL (ANSYS Parametric Design Language) для обработки результатов МКЭ-анализа, которая совместно с постпроцессором ANSYS обеспечила расчет изменения функции Ψ во времени для всех КЭ модели прокатываемой заготовки.

Моделирование процесса горячей ПВП прокатки в двух и трех валках заготовки из стали 50 показало, что в двух валках зона разрушения локализована в осевой части, а при прокатке в трех валках – в кольцевой (Рисунок 3).

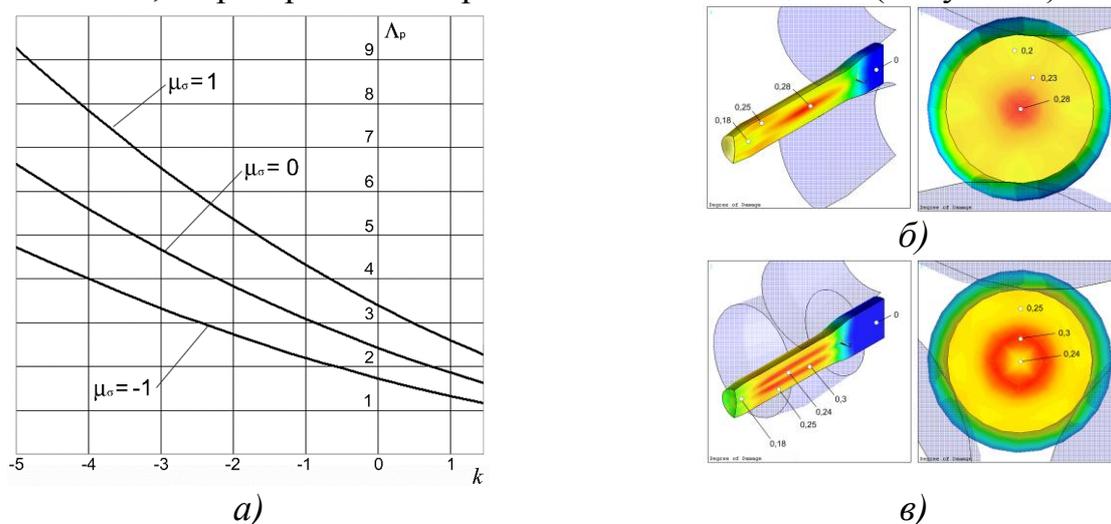


Рисунок 3 – Диаграмма пластичности стали 50 при температуре 1150°C (а), накопленная поврежденность сплошной заготовки из стали 50 при горячей прокатке в двух (б) и трех (в) валках

Установлено, что при прокатке в двух валках, осевая зона разрыхляется под воздействием растягивающих напряжений, и происходит вскрытие осевой полости на оси заготовки даже если прокатка ведется с обжатиями по величине больше критических и без оправки. В этом случае возможно возникновение трещин и волосовин на внутренней поверхности.

Такие проблемы отсутствуют при прокатке в трех валках, когда разрыхление за счет специфического НДС металла заготовки происходит не в осевой зоне, а в кольцевой. Это значит, что формирование внутренней поверхности заготовки происходит без вскрытия осевой полости, и, как следствие, без дефектов на

внутренней поверхности. На основе проведенных расчетов установлено, что для получения внутренней полости заготовки высокого качества прошивку необходимо проводить на трехвалковых станах ПВП.

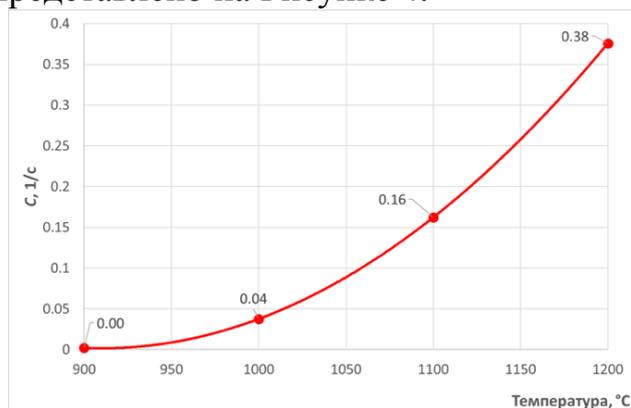
Выбор скорости прошивки осуществляется через оценку мощности прошивки, которая зависит от сопротивления деформации материала.

Анализ библиотек материалов коммерческих программ показывает, что у вязкопластических моделей зависимость сопротивления деформации от скорости деформации описывается, как правило, моделью упрочнения Купера-Саймондса:

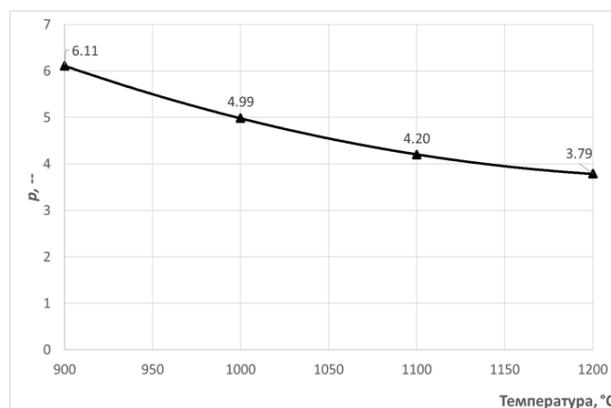
$$\sigma_T^D = \sigma_T \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right],$$

где σ_T^D – динамический предел текучести материала; σ_T – статический предел текучести материала; $\dot{\epsilon}$ – скорость пластического деформирования материала; C, p – параметры модели упрочнения материала Купера – Саймондса.

Обработка данных зависимости сопротивления деформации от скорости деформации стали 50 для интервала температур 900...1200°C и скоростей деформации 0,2...40 1/с показала, что коэффициенты модели Купера-Саймондса в зависимости от температуры изменяются по квадратичному закону, как представлено на Рисунке 4.



$$C = 3,6871 + 0,0081 \cdot T - 4 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$$



$$p = 32,2860 - 0,0451 \cdot T + 2 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$$

Рисунок 4 – Зависимость параметров модели упрочнения Купера-Саймондса для стали 50 от температуры при скоростях деформации 0,2...40 1/с

На основе найденных зависимостей параметров модели упрочнения Купера-Саймондса была определена мощность прошивки заготовок диаметром 20...60 мм из стали 50 в интервале температур 900...1200°C на скоростях, позволяющих обеспечить непрерывность процесса производства на линии стана ПВП.

Установлено, что во всех случаях мощность прошивки меньше установленной суммарной мощности двигателей стана ПВП 90 кВт, в связи с чем возможна прошивка заготовок диаметром 20...60 мм.

Для определения формы прошивной оправки и ее положения относительно пережима валков, формы пуансона протяжки с целью формирования внутренней полости необходимой формы и размеров, было проведено КЭ-моделирование процесса прошивки на стане ПВП и профильной протяжки. В связи с тем, что при решении задачи ожидалось большие (более 30%) деформации исследование проводилось в постановке Эйлера (Рисунок 5).

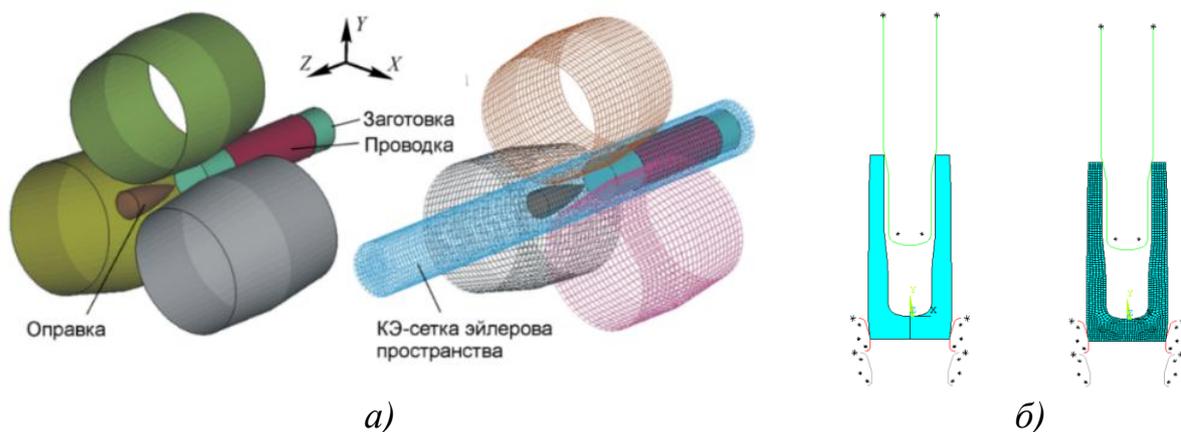


Рисунок 5 – Геометрическая (твердотельная) и КЭ-модели процесса прошивки заготовок на трехвалковом стане ПВП *а)* и профильной протяжки *б)*

Для оценки адекватности разработанной модели прошивки был проведен численный эксперимент прошивки заготовок диаметром 36 мм при температуре 1150°C и частоте вращения валков 60 об/мин на существующей остроконечной оправке. Сравнение результатов расчета формоизменения заготовки показало, что расхождение результатов КЭ-моделирования с результатами натурального эксперимента не превышает 0,3% (Рисунок 6). Помимо формоизменения проводилось сравнение мощности прошивки, полученной по результатам КЭ-моделирования с замеренной на двигателе стана. Мощность прошивки заготовок диаметром 36 мм на стане достигла 58 кВт, что на 6% больше мощности, полученной из численного анализа. Однако характер изменения мощности прошивки одинаковый, как при расчете на основе КЭ-анализа, так и по данным натурального эксперимента.

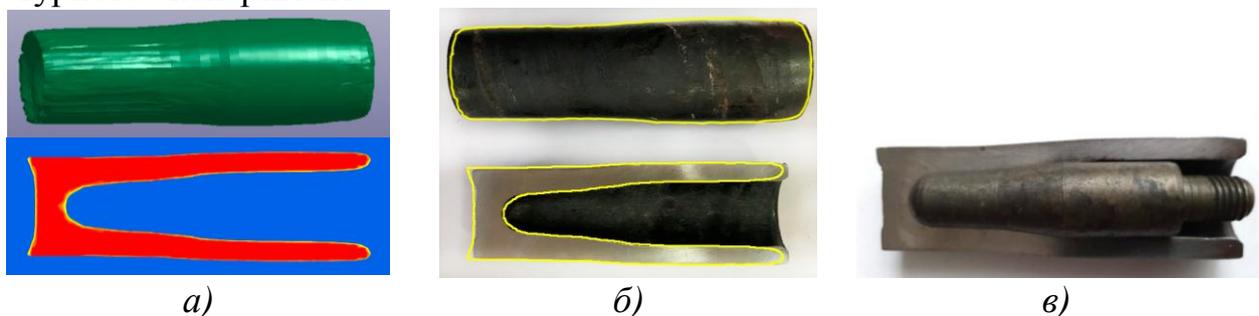


Рисунок 6 – Сечение заготовки после прошивки на существующей оправке на основе КЭ-моделирования *(а)*, сравнение результатов моделирования с натурным экспериментом *(б)* (желтым цветом на рисунке обозначен контур детали, полученный по результатам моделирования) и положение оправки в заготовке во время прошивки *(в)*

На основе этих данных можно сделать вывод, что разработанная КЭ-модель прошивки адекватно описывает процессы как в качественном, так и в количественном отношении. По результатам численного анализа также были определены зависимости результирующих сил, действующих на единичный валок и оправку. Характерно, что при штатной настройке положения остроконечной оправки, изменение сил ступенчатое. Такой характер сил можно объяснить особенностями прошивки на трехвалковых станах без вскрытия осевой полости

при положении оправки, соответствующей двухвалковой прошивке. В трехвалковых прошивных станах необходимо искать альтернативную настройку положения оправки.

На основе КЭ-модели протяжки была разработана процедура расчета тепловой задачи, позволяющая исследовать изменение температурных полей в заготовке на стадиях прошивки, калибровки, протяжки и пауз на линии винтовой прокатки. При решении тепловой задачи учитывался не только теплообмен заготовки с окружающей средой и инструментом, но и разогрев заготовки во время пластической деформации. Начальным условием для тепловой задачи являлась температура заготовки перед прошивкой. Разработанная процедура решения тепловой задачи необходима для установления зависимости температуры заготовки перед термической обработкой после операции протяжки в зависимости от начальной температуры нагрева перед прошивкой.

Глава 3 посвящена разработке профилей прошивной оправки и пуансона протяжки, при которых возможно получение чистой глухой профилированной полости на АЛВП.

В связи с тем, что при профильной протяжке заготовки, прошитой на существующей остроконечной оправке, происходит деформация донной части, на основе заданного внутреннего профиля готовой детали была рассчитана калибровка оправки для прошивки, при которой отсутствует деформация донной части заготовки на стадии протяжки, что позволило исключить операцию калибровки донной части. Из-за того, что разработанная тупоконечная оправка для прошивки имеет большое заходное сечение носка были проведены численные эксперименты и найдены положения этой оправки при прошивке, при которых процесс протекает стабильно без потери поперечной устойчивости стенки заготовки (Рисунки 7, 8).

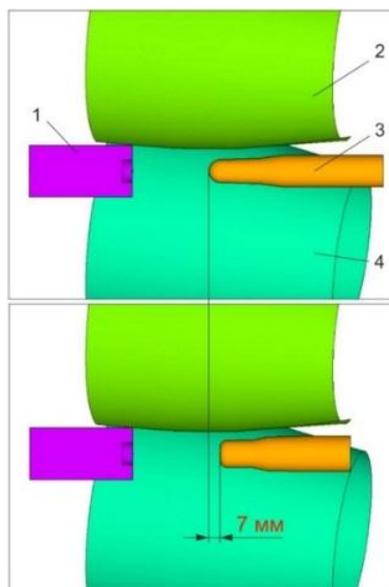


Рисунок 7 – Положение прошивной оправки относительно зоны пережима валков:
1 – заготовка; 2 – прокатный валок; 3 – прошивная оправка; 4 – прокатный валок

В связи с тем, что НДС донной части и стенки заготовок при прошивке и протяжке различное, микроструктура и механические свойства стали 50 в этих частях заготовки также будут различаться. Более того, свойства стали 50 в состоянии поставки не будут определяющими для формирования окончательной микроструктуры и свойств после ГОМД. Было установлено, что после ПВП и протяжки на разработанном инструменте, размер зерна стали 50 соответствует 8 баллам, что наблюдается у горячекатаного подката в состоянии поставки.

Как ожидалось, микроструктура и механические свойства после протяжки не соответствуют требованиям, что приводит к необходимости выбора режимов термообработки заготовок на сорбит, при условии обеспечения заданных механических свойств. Для этого были проведены эксперименты по охлаждению образцов размером 5 мм с начальными температурами 800...1160°C в закалочной жидкости «Термовит-М» по ТУ 2219-045-23763315-2007 с различной концентрацией охлаждающего раствора 3...8% при температуре 20...25°C. На основании полученных результатов были построены регрессионные модели, устанавливающие зависимость предела текучести σ_T , предела прочности σ_B и удлинения образцов δ при разрыве в зависимости от температуры образца и концентрации закалочного раствора:

$$\begin{aligned} \sigma_T &= 77,9526 + 1,2774X_1 - 1,8802X_2 - 14,9761X_1^2, \\ \sigma_B &= 109,6108 + 3,0738X_1 - 14,2587X_1^2 - 2,8728X_1^2X_2 + 1,7794X_1^2X_2^2, \\ \delta &= 27,1671 - 2,7258X_1 + 2,2601X_2 - 10,5941X_1^2 - 2,8728X_1^2X_2 + +1,7374X_1^2X_2^2, \end{aligned}$$

где X_1, X_2 – уровни факторов, значения которых изменялись в соответствии с факторным пространством эксперимента (Таблица 2).

Таблица 2

Уровень X_i	Фактор	
	X_1	X_2
	Температура, °C	Концентрация жидкости, %
+1	1160	8
0	980	5,5
-1	800	3
Интервал варьирования	180	2,5

Совместное решение уравнений регрессии позволило установить, что для обеспечения заданных механических свойств стали 50 после термообработки необходимо обеспечить охлаждение при температуре 835...870°C при концентрации закалочного раствора 5...6%.

Исследование микроструктуры после сорбитизации при данных условиях показало, что в донной части заготовки и стенке формируется требуемая микроструктура сорбита с величиной зерна 10 баллов с необходимыми механическими свойствами (Таблица 3).

Таблица 3

Параметр / Место вырезки образца	На расстоянии		Требования НТД
	5 мм от дна заготовки	10 мм от верхнего торца заготовки	
Предел прочности σ_B , МПа	990	1039	-
Предел текучести σ_T , МПа	657	716	≥ 635
Относительное удлинение δ , %	21	22	≥ 14
Относительное сужение, Ψ , %	29	32	20...35
Микроструктура, величина зерна, балл	Сорбит, 10 баллов		10
Условия термообработки	Сорбитизация в закалочной жидкости 5,5% температура 840°C		-

На Рисунке 11 показаны микроструктуры стали 50 после сорбитизации при температуре 840°C в охлаждающей жидкости с концентрацией раствора 5,5%.

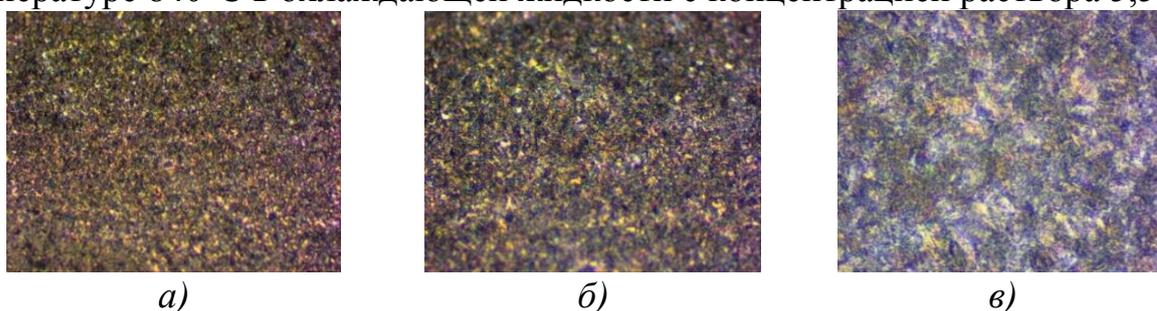


Рисунок 11 – Микроструктура заготовки после охлаждения в закалочной среде: а) кратность увеличения $\times 100$; б) кратность увеличения $\times 200$; в) кратность увеличения $\times 500$

В Главе 5 приводятся результаты работ по совершенствованию технологической оснастки, инструмента и технологии для промышленного изготовления цилиндрических заготовок с чистой глухой профилированной полостью.

Предложенная на основе моделирования и экспериментальных исследований модернизация прошивной оправки и пуансона протяжки, а также найденные условия охлаждения заготовок для формирования заданной структуры сорбита и требуемого комплекса механических свойств позволили исключить недостатки технологии получения цилиндрических заготовок с профилированной внутренней полостью из стали 50 в серийном производстве.

Проблемы, связанные с деформацией донной части заготовок после калибровки дна и профильной протяжки, удалось решить с помощью:

- разработки тупоконечной прошивной оправки с большим заходным сечением носка и определения положения этой оправки относительно зоны пережима валков, при которых процесс прошивки протекает стабильно без потери поперечной устойчивости стенки заготовки;

- разработки пуансона протяжки с малым углом конусности и плоским торцом, соответствующего профилю внутренней поверхности готовой детали.

Для повышения стойкости пуансона протяжки, было разработано устройство внутреннего охлаждения пуансона, которое позволило устранить основную причину выхода пуансонов протяжки из строя – интенсивный износ рабочей

поверхности. На Рисунке 12 представлен общий вид разработанного пуансона протяжки с внутренним охлаждением для заготовок диаметром 36 мм. Повышение износостойкости пуансонов привело к снижению разностенности заготовок благодаря симметричному распределению нагрузки на инструмент в процессе протяжки.



Рисунок 12 – Пуансон профильной протяжки с внутренним охлаждением (а) и заготовки после профильной протяжки (б)

Применение контролируемого охлаждения после прошивки и протяжки позволило получить микроструктуру пластинчатого перлита со структурой сорбита, в связи с чем обеспечиваются необходимые механические свойства с прокатного нагрева.

Для определения температуры нагрева заготовки перед прошивкой на стане ПВП на основе разработанного численного метода расчета полей температур в заготовке, представленного во второй главе настоящей работы, исследовалось влияние условий теплообмена на стадиях ОМД, междеформационных пауз и конечной температуры перед сорбитизацией.

Результаты расчета показали, что перед сорбитизацией возникает неравномерность температур по сечению заготовки, и эта неравномерность тем больше, чем выше температура нагрева в печи. Было установлено, что для проведения сорбитизации стали 50 с температуры прокатного нагрева достаточно нагреть заготовку в печи до 1050°C (Рисунок 13).

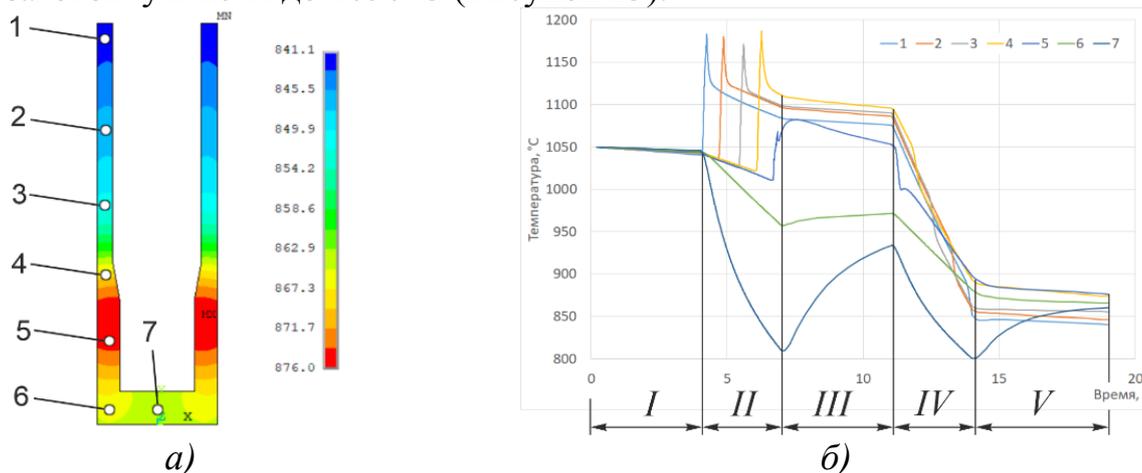


Рисунок 13 – Температурные поля в заготовке перед сорбитизацией (а) и изменение температуры в характерных точках заготовки во времени (б) при температуре нагрева 1050°C: *I* – передача заготовки от печи к стану ПВП; *II* – прошивка на стане ПВП; *III* – передача заготовки от стана ПВП к калибровочному прессу; *IV* – протяжка; *V* – передача заготовки на сорбитизацию

В этом случае, с учетом всех тепловых потерь и нагрева от пластической деформации, перед сорбитизацией температура в стенке будет равна 841°C, а в донной части – 876°C, т.е. разница температур по сечению будет составлять 35°C. Это значит, что при охлаждении заготовки в закалочной жидкости с концентрацией охлаждающего раствора 5,5% будет получена структура сорбита и заданные механические свойства в стенке и донной частях заготовки. При прошивке на частоте вращения валков 60 об/мин и температуре 1050°C мощность прошивки заготовок диаметром 36 мм будет находиться на уровне 57 кВт, что не превышает установленную мощность стана ПВП.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований процессов прошивки на стане ПВП, протяжки и термообработки заготовок из среднеуглеродистых сталей с глухой профилированной полостью усовершенствована технология и оборудование получения заготовок на линии винтовой прокатки массой 0,5...3 кг диаметром 20...60 мм длиной 100...200 мм, что позволило получать заготовки заданного профиля и размеров внутренней полости без обработки резаньем с требуемым комплексом механических свойств с прокатного нагрева.
2. Разработанная КЭ-модель на основе вязкопластической модели материала заготовки, упрочняющейся на основе закона Купера-Саймондса, позволяет моделировать процессы горячей ПВП заготовок из среднеуглеродистых сталей и предсказывать место и время начала возможного разрушения.
3. Разработанная математическая модель упрочнения стали 50 в зависимости от скорости деформации и температуры позволила определить коэффициенты модели упрочнения Купера-Саймондса для стали 50 при ГОМД.
4. Экспериментальная проверка подтвердила адекватность разработанной математической модели. Для всех исследованных вариантов ТП горячей прошивки заготовок из стали 50 на стане ПВП формоизменение заготовок и энергетические параметры прошивки соответствуют натурным экспериментам. Во всех случаях геометрические показатели различаются на величину не более 0,3%.
5. На основе численного моделирования процесса прошивки и протяжки заготовок на линии винтовой прокатки и экспериментов разработаны прошивная оправка и пуансон для профильной протяжки с целью изготовления заготовок с чистой глухой профилированной полостью с прокатного нагрева с требуемым уровнем механических и функциональных свойств.
6. По результатам численного и натурального эксперимента выявлено, что значения сил, действующих на валки и оправку, во время прошивки заготовок на разработанной тупоконечной оправке с большим заходным сечением носка, совпадают с силами при прошивке на остроконечной оправке малого заходного сечения носка, однако характер изменения сил различный.
7. Установлено, что микроструктура стали 50 после прошивки и протяжки в донной части заготовок, где $\varepsilon \cong 1$, представляет собой феррито-перлитную структуру с зерном перлитной составляющей микроструктуры величиной 8 баллов,

что соответствует микроструктуре стали 50 в состоянии поставки в виде горячекатаного подката.

8. Построенная путем математической обработки результатов эксперимента регрессионная модель, позволяет определить механические характеристики стали 50 в зависимости от условия проведения термообработки и оценить степень влияния каждого фактора на механические свойства.

9. На основе регрессионной модели, найдены условия проведения термообработки на сорбит заготовок из стали 50 с прокатного нагрева для достижения необходимого уровня механических и функциональных свойств.

10. Предложенные практические рекомендации позволили использовать технологию ПВП в серийном производстве и по сравнению с ТП холодной штамповки снизили трудоемкость изготовления деталей, количество используемого оборудования и рабочих мест в 2 раза, количество технологических операций в 3 раза, повысили производительность труда в среднем в 2 раза.

Основное содержание диссертационной работы отражено в публикациях:

1. Культешова В.В. Технология горячей прокатки экономичных заготовок корпусов осколочно-фугасных снарядов // Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавателей. Тула. 2018. С. 636-640. (0,85 п.л.).

2. Культешова В.В., Иванов А.В., Завора И.В. Численное исследование процесса горячей поперечно-винтовой прокатки полых заготовок с дном малого диаметра // *Металлург*. 2020. №8. С. 89-94. (1,33 п.л. / 0,80 п.л.).

3. Поперечно-винтовая прокатка заготовок корпусов малокалиберных осколочно-фугасных снарядов / Культешова В.В. [и др.] // *Боеприпасы и спецхимия*. 2020. №3. С. 85-89. (1,00 п.л. / 0,70 п.л.).

4. Kulteshova V.V., Ivanov A.V., Zavora I.V. Numerical study of the process of hot helical rolling of hollow billets with a small-diameter bottom // *Metallurgist*. 2020. Vol. 64, № 7-8. P. 839-847. (0,96 п.л. / 0,58 п.л.).

5. Структура и механические свойства горячекатаных полых заготовок для корпусных деталей из среднеуглеродистых сталей после прошивки, калибровки и сорбитизации / Культешова В.В. [и др.] // *Металлург*. 2021. №6. С. 37-42. (1,67 п.л. / 1,17 п.л.).

6. Structure and mechanical properties of hot rolled hollow billets for body components of medium-carbon steels after piercing, calibration and sorbitization / Kulteshova V.V. [et al.] // *Metallurgist*. 2021. Vol. 65. P. 624-632. (1,04 п.л. / 0,73 п.л.).