

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ХРОМОМОЛИБДЕНОВОЙ СТАЛИ

Абдурашид Солиевич ХАСАНОВ

профессор

доктор технических наук

Алмалыкский филиал

Национального исследовательского технологического университета

«МИСИС»

Алмалык, Узбекистан

Уткир Мирзакамолович ХАЛИКУЛОВ

доцент

Алмалыкский филиал Национального исследовательского

технологического университета

«МИСИС»

Алмалык, Узбекистан

utkirhm@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются результаты исследований, посвященных термомеханической обработке изделий из хромомолибденовой стали, приближенной к марке 35ХМЛ, но модифицированной модификаторами, в качестве которых участвует ваннадий.

Ключевые слова: хромомолибденовые стали, модификатор, механические свойства, термическая обработка, прочность, ударная вязкость.

ХРОМОМОЛИБДЕН ПЎЛАТИДАН ИШЛАНГАН БУЮМЛАРГА ТЕРМОМЕХАНИК ИШЛОВ БЕРИШ

Абдурашид Солиевич ХАСАНОВ

профессор

техника фанлари доктори

Миллий-тадқиқот технологик университети

«МИСиС»нинг Олмалик филиали

Олмалик, Ўзбекистон

Ўткир Мирзакамолович ХАЛИКУЛОВ

доцент

Миллий-тадқиқот технологик университети

«МИСиС»нинг Олмалик филиали

Олмалик, Ўзбекистон

utkirhm@mail.ru

Аннотация

Мақолада 35ХМЛ маркасига яқинлаштирилган, аммо модификацияловчи модда сифатида ваннадий иштирок этган хромомолибден пўлатдан ишланган буюмларга термомеханик ишлов беришга бағишланган тадқиқотлар натижаси кўриб чиқилган.

Таянч сўзлар: хромомолибден пўлат, модификацияловчи, механик хоссалари, термик ишлов бериш, пишиқлиги, зарбали қайишқоқлиги.

Индустриальный сектор экономики Узбекистана сталкивается с рядом вызовов, требующих использования материалов с уникальным сочетанием характеристик: высокой прочности, коррозионной стойкости, термостойкости и долговечности. В условиях растущей технологической сложности и конкуренции особое место занимают хромомолибденовые стали, сочетающие надежность и универсальность. Эти легированные сплавы обладают выдающимися механическими и эксплуатационными свойствами, что делает их незаменимыми в критически важных отраслях.

Благодаря уникальному химическому составу хромомолибденовые стали находят широкое применение в различных секторах:

Энергетика: используются для изготовления оборудования, работающего в экстремальных условиях, – котлов, теплообменников, трубопроводов и турбинных компонентов. Эти материалы выдерживают высокие температуры, давление и агрессивные среды, обеспечивая длительный срок службы.

Горно-металлургическая промышленность и машиностроение: применяются для производства деталей, подвергающихся значительным нагрузкам, таких как шестерни, валы, оси и корпусные элементы. Их высокая прочность и износостойкость повышают надежность оборудования.

Нефтегазовая отрасль: используются при изготовлении трубопроводов, компрессоров, резервуаров и бурового оборудования, способного выдерживать высокие давления, абразивные воздействия и коррозионные среды.

Химическая и нефтехимическая промышленность: благодаря стойкости к агрессивным веществам применяются для изготовления резервуаров, реакторов и трубопроводов.

Авиация и оборонная промышленность: используются для производства авиационных двигателей и бронированных элементов, выдерживающих высокие температуры и нагрузки.

Одним из способов экономии энергии за счет внедрения технологических процессов непосредственно друг за другом являются процессы прямой кузнечной закалки (DFQ) или прямой термической обработки (DHT), которые снижают потребление тепловой энергии почти на 20% за счет исключения стадии повторного нагрева [1]. Другие примеры подтверждают возможность упрощенной термической обработки сразу после горячейковки [4].

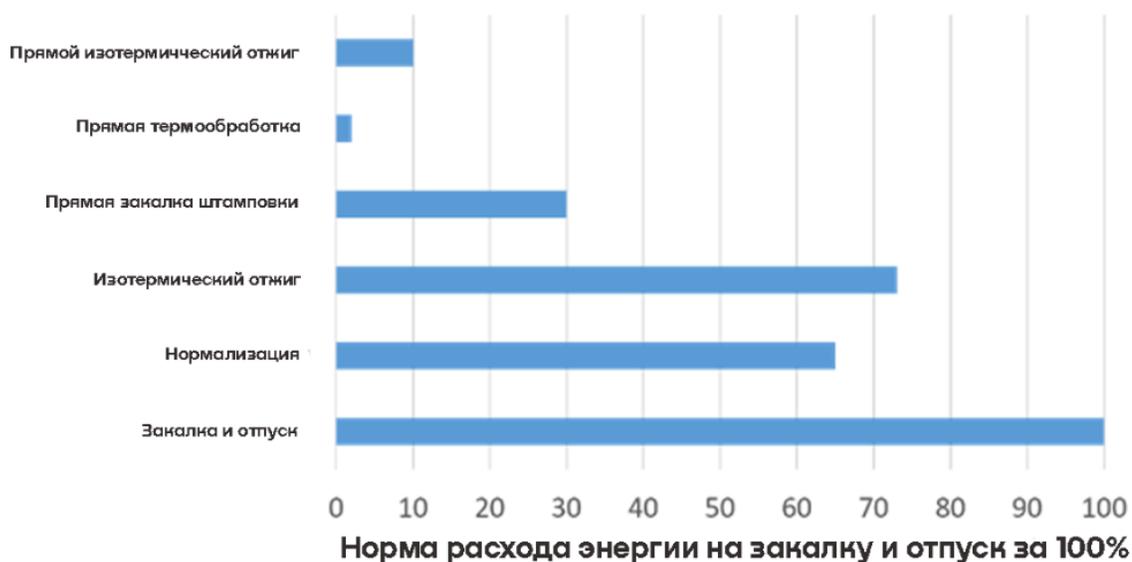


Рис.1. Зависимость энергопотребления от видов термообработки

При этом прямая термическая обработка может значительно снизить потребление энергии. Поэтому проводятся исследования по разработке технологий, сочетающих формование металла с термической обработкой, без охлаждения и повторного нагрева изделий из модифицированной хромомолибденовой стали (рис. 1).

Экономия энергии достигается за счет исключения повторного нагрева изделий из модифицированной хромомолибденовой стали. В традиционном технологическом процессе (рис. 2а) изделия послековки охлаждаются до температуры окружающей среды, затем транспортируются на участок термической обработки, где их вновь нагревают выше температуры A_{c3} . После отжига, при котором структура приобретает однородную аустенитную форму, изделия перемещаются в печь с более низкой температурой для преобразования структуры в ферритно-перлитную. Предполагается, что это превращение завершается полностью, поэтому после извлечения из второй печи структура изделий остается неизменной, независимо от скорости охлаждения.

Метод прямого изотермического отжига (рис. 2б) позволяет упростить процесс. Послековки и обрезки изделия охлаждаются только до температуры отжига, после чего сразу помещаются в печь. Далее процесс обработки идентичен стандартному методу. Такой подход дает возможность использовать всего одну печь, что снижает энергозатраты. Однако его реализация может потребовать размещения печи вблизи кузнечного пресса и обеспечения высокой эффективности термической обработки, которая должна соответствовать эффективности процессаковки.

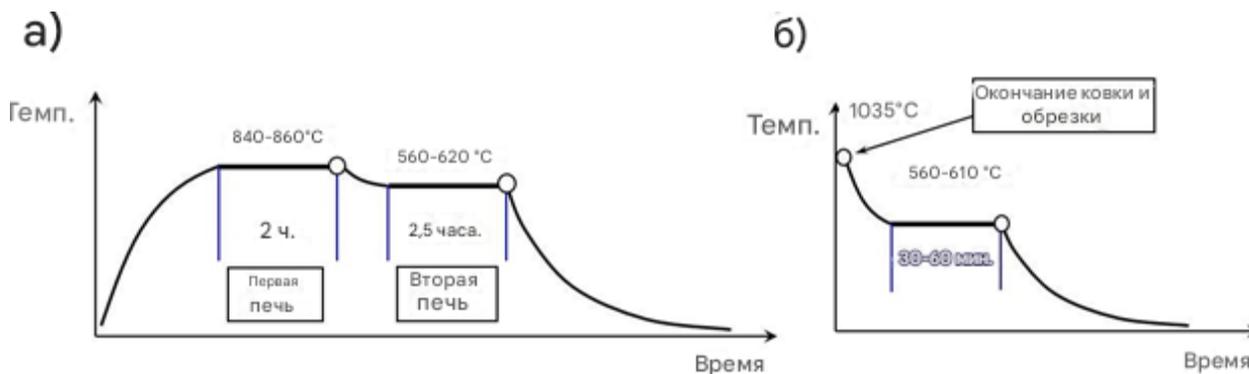


Рис. 2. а) метод термообработки со стандартным изотермическим отжигом; б) метод термообработки изотермическим отжигом непосредственно послековки.

Несмотря на значительные преимущества, хромомолибденовые стали имеют ряд недостатков, требующих дальнейшего совершенствования их состава и технологии производства:

Хрупкость при низких температурах – низкая ударная вязкость ограничивает использование в холодных регионах.

Недостаточная пластичность – снижает адаптивность материала и повышает риск внезапных разрушений.

Склонность к трещинообразованию – микротрещины, возникающие при циклических нагрузках, сокращают срок службы изделий.

Ограниченная коррозионная стойкость – недостаточная устойчивость в агрессивных средах снижает долговечность изделий.

Недостаточная износостойкость – приводит к повышенному износу деталей в условиях трения и абразивных нагрузок.

Сложности обработки – высокая твердость затрудняет механическую обработку, увеличивая производственные затраты.

Чувствительность к термической обработке – требует строгого контроля для предотвращения избыточной хрупкости и остаточных напряжений.

Для устранения указанных недостатков необходимы инновационные подходы к совершенствованию хромомолибденовых сталей. Одним из наиболее перспективных направлений является использование модификаторов, влияющих на микроструктуру материала на уровне зерен. Это позволяет:

- повысить прочность и пластичность стали;
- улучшить фазовый состав и механические характеристики;
- расширить области применения, включая условия экстремальных температур и нагрузок.

Современная промышленность предъявляет повышенные требования к надежности и долговечности материалов. Дальнейшее развитие технологий производства хромомолибденовых сталей позволит устранить существующие

ограничения, повысить их эксплуатационные характеристики и укрепить позиции на рынке промышленных материалов.

Разработка технологии для улучшения механических свойств хромомолибденовых сталей за счет внедрения модификатора, способствующего повышению их прочности, пластичности и других эксплуатационных характеристик.

Цель исследования направлена на создание высокоэффективного материала, который станет основой для производства надежных и долговечных конструкций, востребованных в различных отраслях промышленности.

Хромомолибденовые стали представляют собой одну из ключевых групп легированных сталей, широко применяемых в промышленности благодаря их уникальному сочетанию прочности, термостойкости и коррозионной стойкости. Некоторые исследователи акцентируют внимание на влияние содержания хрома и молибдена на механические свойства стали, так как хром обеспечивает устойчивость к коррозии и формирует защитный оксидный слой, тогда как молибден повышает термостойкость и сопротивление ползучести.

Исследования проводились на изделиях из хромомолибденовой стали марки 35ХМЛ со следующим химическим составом:

Таблица 1.

Химический состав изделий из модифицированной хромомолибденовой стали [%]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
0,34	0,78	0,29	0,011	0,010	1,07	0,12	0,24	0,16	0,022

Требования к сплаву ставилась умеренной твердости в пределах 249-280 НВ, что способствовало облегчению исследовательских задач и механической обработки. Поэтому предпочтительной термической обработкой является изотермический отжиг, который обеспечивает ферритно-перлитную структуру.

Такую структуру легче обрабатывать, чем структуру отпущенного мартенсита после процесса закалки и отпуска с той же твердостью [2].

Для достижения цели исследования – разработки технологии улучшения механических свойств хромомолибденовых сталей путем внедрения модификатора – применялась следующая методология:

Подготовка исходных материалов

Были изготовлены образцы хромомолибденовой стали с тщательно контролируемым химическим составом. Анализ проводился для обеспечения однородности состава и устранения посторонних примесей, способных повлиять на результаты эксперимента.

Добавление модификатора

В ходе эксперимента был выбран модификатор, влияющий на микроструктуру стали. Его введение осуществлялось непосредственно в процесс плавки в оптимальной дозировке, рассчитанной на основе предварительных теоретических данных и литературных источников.

На основе диаграммы (рис. 3) для стали марки 35ХМЛ мы можем определить приблизительный температурный диапазон, при котором должна выполняться обработка для достижения предполагаемой твердости [3]. Температура, до которой нагревается шихтовый материал, намного выше, чем температура образцов, использованных для создания диаграммы; однако можно предположить, что заданная твердость должна быть достигнута в диапазоне от 560°C до 610°C при времени отжига не более чем 60 минут.

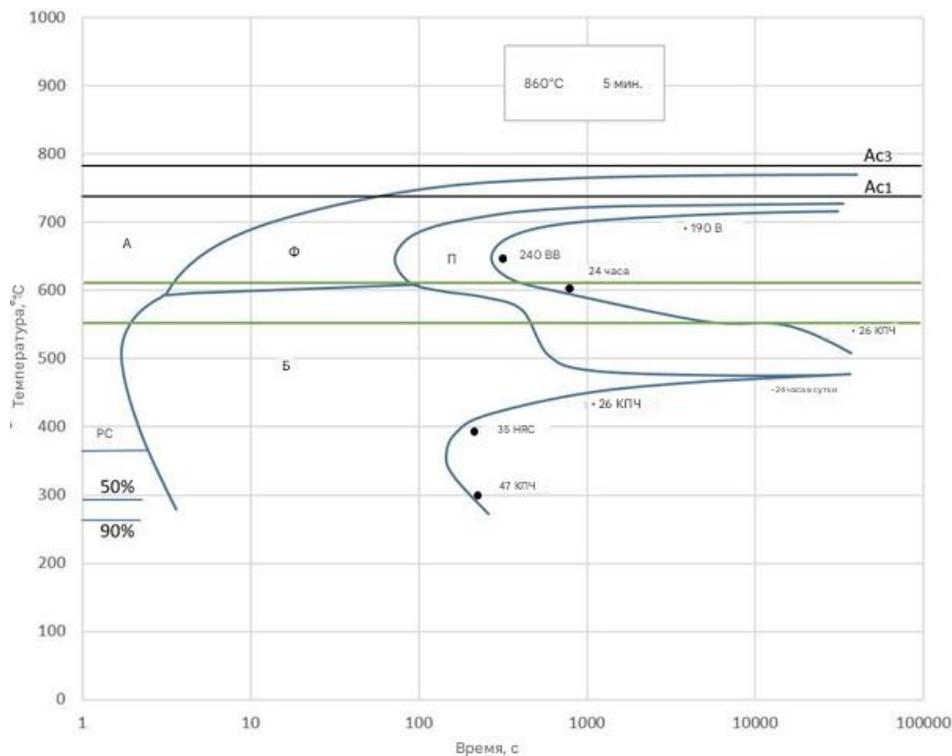


Рис. 3. Диаграмма для стали марки 35ХМЛ.

В этом температурном диапазоне мы должны наблюдать превращения аустенита в феррит и перлит, а также частично в бейнит, количество которого увеличивается с уменьшением температуры изотермического отжига. Помимо температуры, время отжига также важно; в связи с этим экспериментальные материалы, помещенные в печь, были извлечены из нее через 30 и 60 минут.

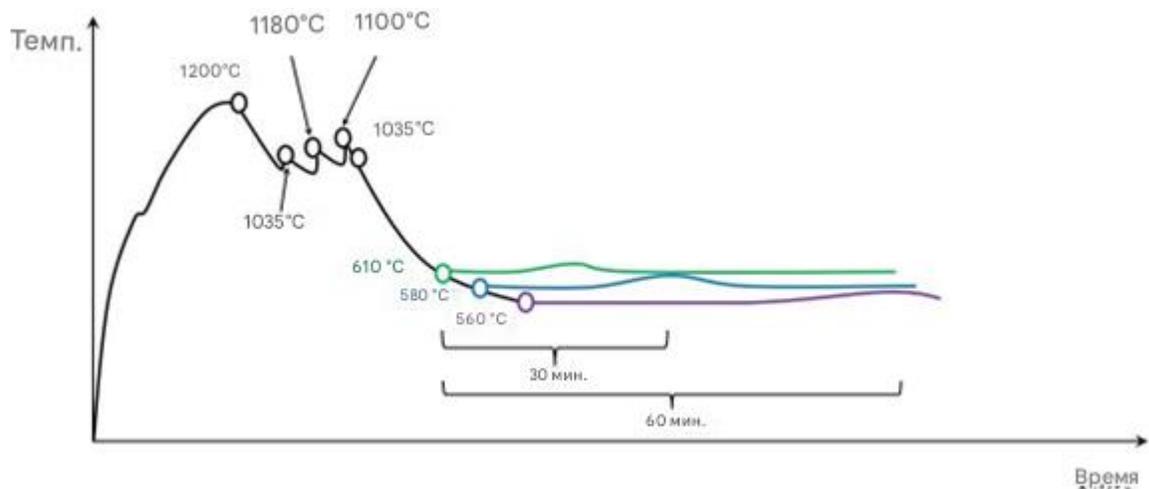


Рис. 4. Зависимость режима температуры и времени во время термомеханической обработки.

На рис. 4 схематично показан температурный режимковки в течение всей термомеханической обработки вместе с точками, в которых была измерена температура. В первой части диаграммы, отмеченной черной линией, показаны изменения температуры во время обработки пластиком с момента начала нагрева, через три операцииковки и обрезкуоплавления до момента помещения изделия в печь. Вторая часть диаграммы, отмеченная цветными линиями, демонстрирует прогнозируемый ход процесса изотермического отжига. Этот курс было невозможно измерить в ходе промышленного процесса. Однако об этом можно судить по сформированной микроструктуре, поскольку во время фазового превращения аустенита в перлит выделяется тепло. Вот почему реальная температура изделий из модифицированной хромомолибденовой стали может отличаться от температуры опытного образца, и эта разница тем больше, чем больше количество перлита, который был выделен во время обработки отжигом. Использование изделий из модифицированной хромомолибденовой стали – пилотной – предназначалось для регулирования температуры в печи; однако из-за высокой тепловой инерции печи повышение температуры не наблюдалось после отжига только двух изделий из модифицированной хромомолибденовой стали.

Формовка и охлаждение

Расплавленная сталь заливалась в литейные формы для получения стандартизированных образцов, после чего проводилось контролируемое охлаждение для минимизации термических напряжений.

Термическая обработка

Для всех образцов (контрольных и модифицированных) применялся единый режим термической обработки:

Закалка: нагрев до температуры аустенитизации с последующим быстрым охлаждением для формирования мартенситной структуры.

– Отпуск: повторный нагрев для снятия внутренних напряжений и увеличения пластичности стали.

Механические испытания

Для оценки улучшений проводились следующие испытания:

- Растяжение: определение предела прочности и текучести.
- Измерение твердости: по методу Роквелла (HRC).
- Испытания на ударную вязкость: на маятниковом копре для оценки сопротивления динамическим нагрузкам.

Микроструктурный анализ

Металлографический анализ проводился с использованием оптического и электронного микроскопа. Исследовались:

- Размер и равномерность распределения зерен.
- Фазовый состав и количество карбидных включений.
- Наличие и распределение дефектов в кристаллической решетке.

Анализ коррозионной стойкости

Модифицированные образцы подвергались испытаниям на коррозию в агрессивной среде для оценки их устойчивости к химическим воздействиям.

8. Обработка результатов

На рис. 5 показаны результаты испытаний на микротвердость, выполненных для исследуемых поперечных сечений с помощью метода Виккерса с нагрузкой 10Н. Черной пунктирной линией обозначен диапазон требуемой твердости, который после пересчета равен от 265HV до 305HV. Для образцов, отожженных при 610°C в течение 1 часа, большинство результатов измерений находятся в пределах требуемого диапазона. Результаты для оставшихся образцов обычно выше требуемой твердости, за исключением замеров, сделанных непосредственно на поверхности поковки.

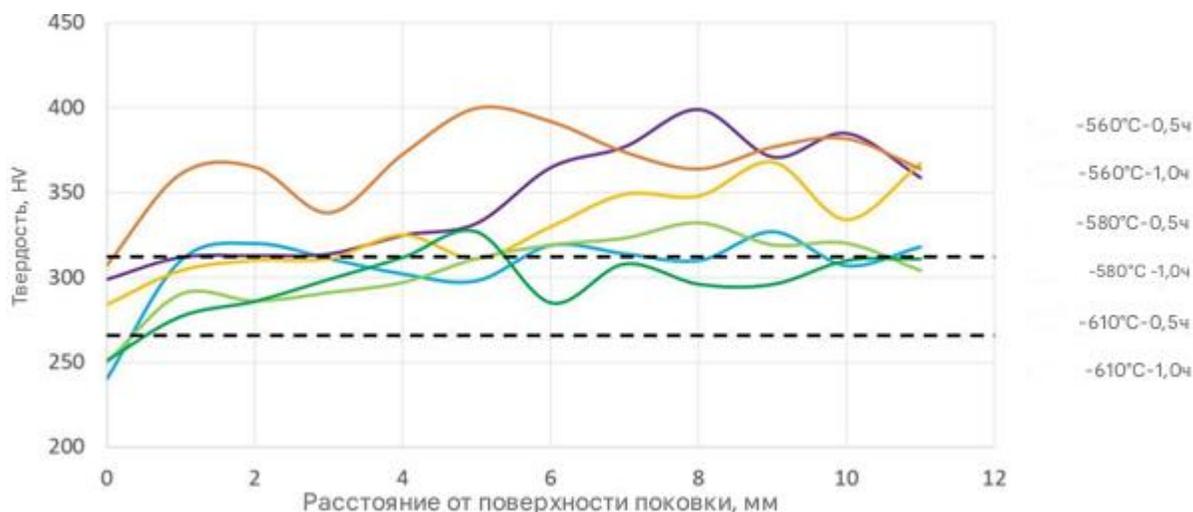


Рис. 5. Изменения твердости HV в поперечном сечении в выбранной плоскости измерения для изотермически отожженного образца.

Проведенные испытания образцов хромомолибденовой стали показали, что внедрение модификатора существенно улучшает их механические свойства. Сравнение контрольных и модифицированных образцов демонстрирует следующие результаты:

1. Прочность на разрыв (МПа):
 - Контрольные образцы: 850 МПа
 - Модифицированные образцы: 970 МПа (+14%)
2. Ударная вязкость (Дж/см²):
 - Контрольные образцы: 30 Дж/см²
 - Модифицированные образцы: 45 Дж/см²
3. Твердость (HRC):
 - Контрольные образцы: 25 HRC
 - Модифицированные образцы: 32 HRC
4. Коррозионная стойкость (баллы):
 - Контрольные образцы: 3 балла
 - Модифицированные образцы: 1 балл (улучшение стойкости к коррозии)

Микроструктурный анализ

Исследование микроструктуры подтвердило положительное влияние модификатора:

- Образование мелкозернистой структуры, повышающей пластичность и ударную вязкость.

- Уменьшение размеров зерен и равномерное распределение карбидных включений, что улучшает износостойкость материала.

Области применения улучшенной стали

Усовершенствованные хромомолибденовые стали могут применяться в следующих отраслях:

- Энергетика: трубы и сосуды под высоким давлением и температурой.

- Горнодобывающая промышленность: детали машин, футеровки шаровых мельниц, ковши экскаваторов.

- Нефтегазовая промышленность: трубопроводы для агрессивных сред.

- Авиа- и автопром: детали двигателей и трансмиссий.

- Строительство: конструкции для работы при низких температурах.

Влияние модификаторов на свойства стали

Модификаторы оказывают комплексное воздействие на микроструктуру стали, обеспечивая:

1. Рафинирование зерновой структуры – измельчение зерен повышает прочность и предотвращает хрупкие разрушения.

2. Стабилизацию фазового состава – равномерное распределение карбидных фаз увеличивает износостойкость.

3. Снижение дефектов кристаллической решетки – уменьшение остаточных напряжений предотвращает трещинообразование.

4. Улучшение коррозионной стойкости – формирование защитного слоя повышает сопротивляемость агрессивным средам.

5. Повышение термостойкости – материал сохраняет свойства при высоких температурах.

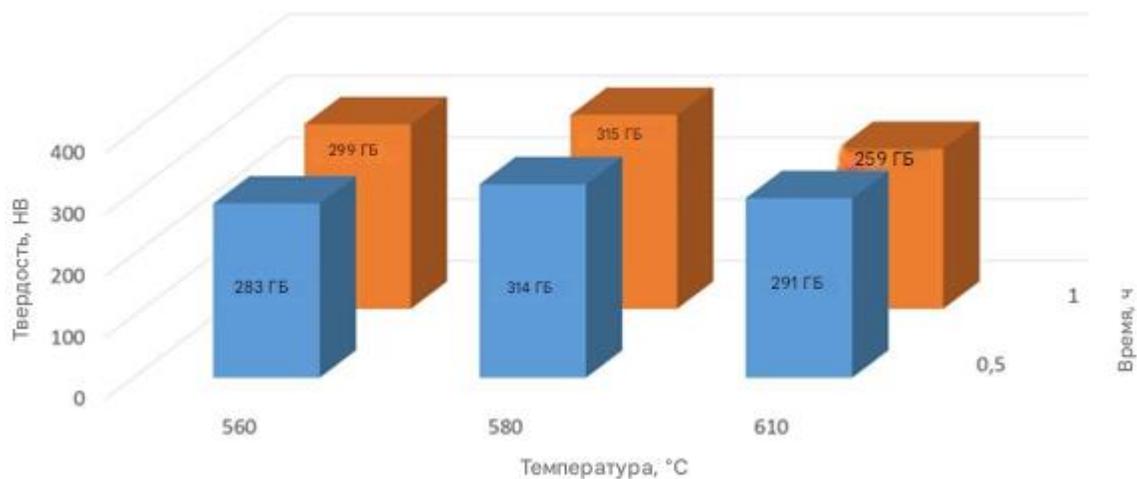


Рис. 6. Результаты испытаний по методу Бринелля средней твердости изделий из модифицированной хромомолибденовой стали для различных времен изотермического отжига и температур.

Только образец, отожженный при 610°C в течение 60 минут (рис. 6), демонстрирует твердость в требуемом объеме 249-280НВ. Следует также отметить, что наибольшую твердость получили поковки, отожженные при 580°C, а не при 560°C, как можно было ожидать.

Итоговые результаты

Экспериментальные исследования показали, что использование модификатора позволяет достичь:

- Увеличения прочности на 10-15%.
- Повышения ударной вязкости на 20–25%.
- Снижения износа при трении на 30%.
- Продления срока службы оборудования на 40–50%.

Таким образом, применение модификатора значительно улучшает свойства хромомолибденовой стали, расширяя возможности ее использования в промышленности и повышая надежность конструкций.

Стандартная термическая обработка изделий из модифицированной хромомолибденовой стали состоит из закалки и высокотемпературного отпуска. После отжига при температуре 860°C хромомолибденовой стали быстро охлаждаются в масле до температуры окружающей среды (рис. 7). Затем их

очищают от масла и нагревают до температуры отпуска. Изменение твердости модифицированной хромомолибденовой стали происходит после закалки. Поскольку в таком случае нет необходимости выполнять немедленный отпуск изделий, первый отпуск может быть выполнен на другом участке или в той же печи через определенное время, необходимое для изменения температуры. Такой способ термической обработки обеспечивает эластичность продукции, однако это связано с высоким энергопотреблением.

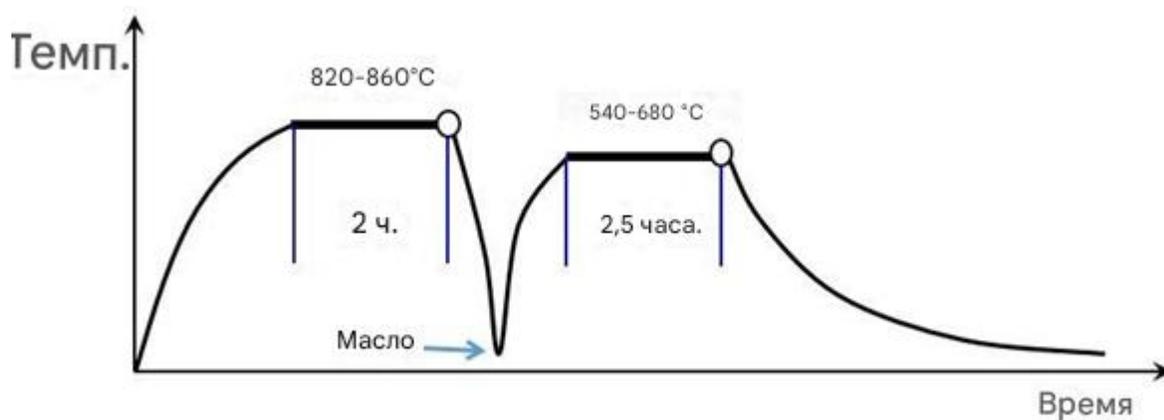


Рис. 7. Схема термической обработки, состоящей из закалки в масле и высокотемпературного отпуска.

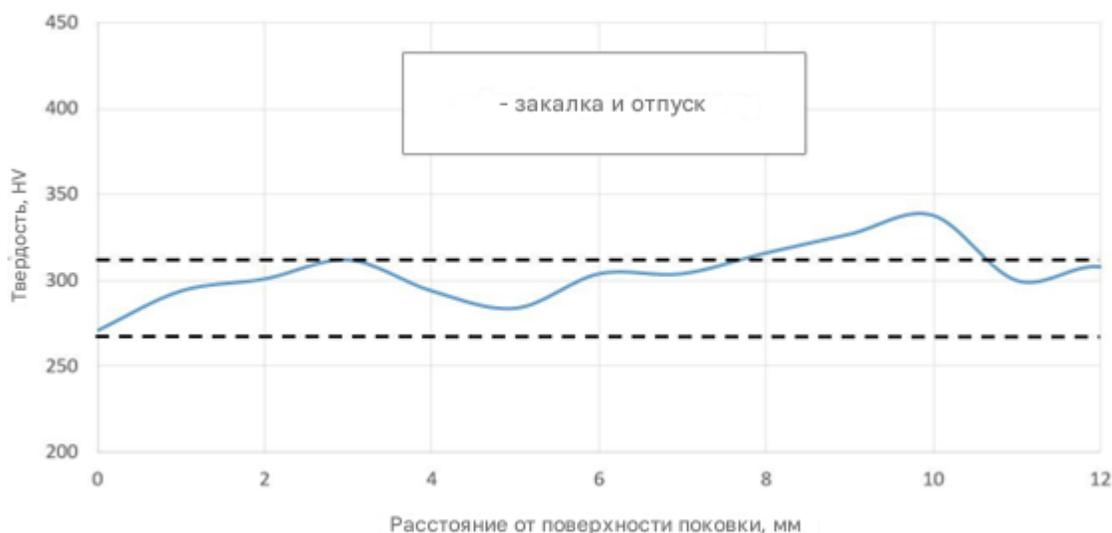


Рис. 8. Изменения твердости (HV) в поперечном сечении в выбранной плоскости измерения для изделия, закаленного в масле и отпущенного.

Испытания также были проведены на микротвердость с помощью метода Виккерса с нагрузкой 10Н (рис. 8). Из диаграммы можно сделать вывод, что большинство точек измерения находятся в пределах требуемого диапазона твердости. Для проверки того, соответствует ли поковка требованиям, также было проведено испытание на твердость по методу Бринелла в соответствии с требованиями заказчика, описанными ранее. Результаты измерений подтвердили, что исследованная поковка приобрела твердость 275 НВ, и таким образом, она была в требуемом объеме 249-280 НВ.

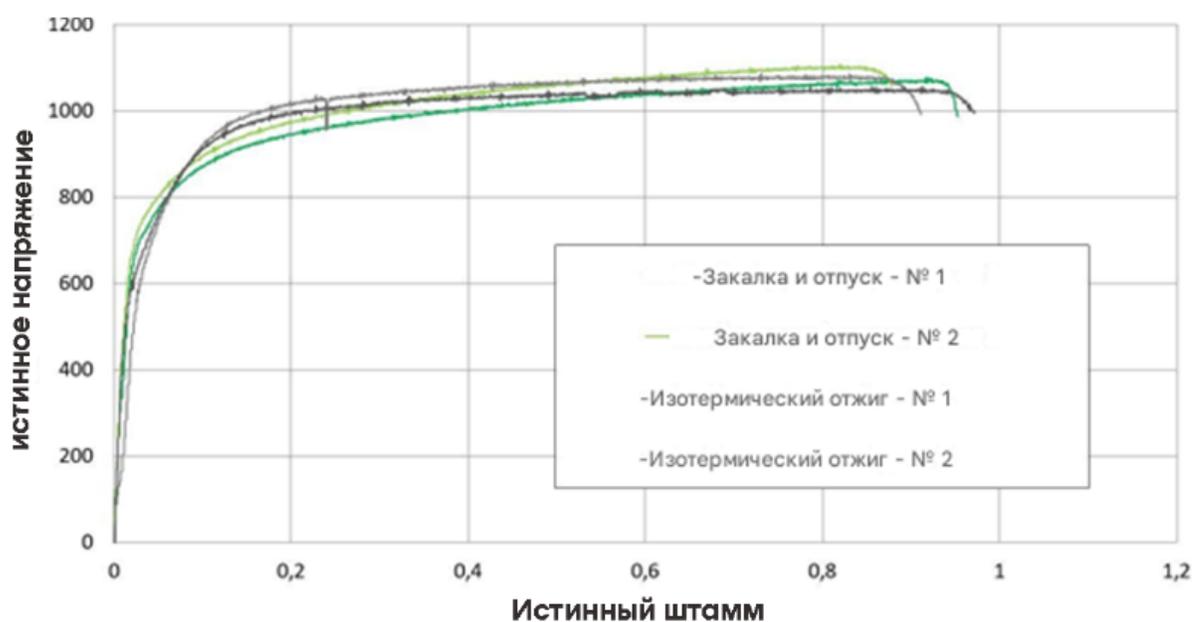


Рис. 9. Кривая напряжения-деформации образцов, вырезанных из закаленного изделия и изделия, подвергнутого изотермическому отжигу при 610°C в течение 60 минут.

Для более точного сравнения механических свойств были также проведены пластометрические исследования образцов, вырезанных из поковки. Результаты показывают, что кривые упрочнения проходят очень схоже (рис. 9) как для изделий из модифицированной хромомолибденовой стали, подвергнутых изотермическому отжигу непосредственно после процессаковки, так и для изделий из модифицированной хромомолибденовой стали серийного

производства, подвергнутых закалке с высокотемпературным отпуском. В данном случае представленные образцы получены из поковки, которая ранее была признана наиболее соответствующей требованиям, то есть из поковки, отожженной при температуре 610°C в течение 60 минут. Максимальные реальные напряжения перед разрушением образца достигли значений в диапазоне от 1050 МПа до 1100 МПа для обеих изделий из модифицированной хромомолибденовой стали.

На основании проведенных исследований можно заключить, что термическая обработка, выполняемая непосредственно при температурековки, обеспечивает изделиям из модифицированной хромомолибденовой стали необходимые свойства, сопоставимые с результатами стандартной термической обработки. Сравнение предлагаемой технологии с текущими производственными процессами подтверждает соответствие полученных характеристик требованиям заказчика. Несмотря на формирование ферритно-перлитной микроструктуры, твердость поковки оказалась сравнимой с твердостью, достигнутой после закалки и последующего высокого отпуска. Это способствует упрощению дальнейшей обработки, снижая ее трудоемкость. Кроме того, анализ кривых «напряжение-деформация» показал, что механические свойства поковок, полученных в серийном производстве, и изделий, подвергнутых изотермическому отжигу сразу послековки, имеют схожее поведение.

Применение изотермического отжига демонстрирует важность не только температуры, но и продолжительности процесса. Это создает определенные сложности при внедрении технологии в промышленное производство, поскольку время отжига ограничивается длиной линии и минимально допустимой скоростью ее работы. Более того, изотермический отжиг представляет собой непрерывный процесс, в ходе которого невозможно оперативно контролировать его результаты. Это кардинально отличает его от

традиционной закалки и отпуска, где на основе измерения твердости после закалки можно с высокой точностью подобрать оптимальную температуру отпуска. Поэтому важно тщательно определить параметры процесса еще до его запуска.

В автомобильной промышленности ковка, как правило, выполняется на кривошипных прессах, кинематические характеристики которых заложены конструктивно и не могут изменяться в ходе работы. Это существенное отличие от таких методов обработки металла, как прокатка, где можно регулировать степень и скорость деформации на каждом этапе процесса, что позволяет управлять параметрами термомеханической обработки и достигать прогнозируемых результатов. При промышленной ковке изменяющиеся условия термомеханического воздействия значительно усложняют точное прогнозирование эволюции микроструктуры.

Предложенная технология термообработки имеет и определенные недостатки. Один из них – необходимость инвестиций в новую высокоэффективную линию термообработки, сопоставимую по производительности с оборудованием дляковки. Более того, такая линия должна располагаться непосредственно рядом с кузнечным или обрезным прессом. В условиях такой организации производства становится невозможным вносить корректировки в свойства поковок на промежуточных стадиях, поэтому перед запуском серийного производства требуется проведение экспериментальных исследований на различных плавках одной и той же марки стали. Полученные данные позволят разработать промышленную технологию термомеханической обработки изделий из модифицированной хромомолибденовой стали с использованием остаточного теплаковки, что обеспечит значительную экономию энергоресурсов. При соответствующей конструкции технологической линии тепло, выделяемое в ходе структурных превращений, может быть использовано для поддержания рабочей

температуры, что позволит минимизировать энергозатраты на эксплуатацию оборудования.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузнечные и прямые процессы термообработки и технологии, в разделе: Термообработка. Чугуны, стали, ASM International, 2014: стр. 241-252. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v04d.a0005994>.
2. Нейлор Д.Дж. Обзор международной деятельности в области микролегированных инженерных сталей. Ironmak. Steelmak. (1989).
3. Подвысоцкий В., Опара Я., Врожина А., Залецкий В., Кузяк Р. Моделирование термомеханических процессов при горячей ковке и прогнозирование механических свойств изделий. Вычисл. Методы Mater. Sci. 11 (2011) 229-236.
4. Фунатани К. Термическая обработка автомобильных компонентов: текущее состояние и будущие тенденции, пер. Индийский институт (2004).