

УДК 669.14

Исследование структурообразования и свойств при термоциклической обработке высокопрочной экономнолегированной высокоазотистой стали

Дульнев Константин Владимирович^(*)

dulnev.kv@gmail.com

Севальнёв Герман Сергеевич

sevalnevgs@gmail.com

НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, Москва, Россия

Аннотация. Установлены закономерности влияния термоциклической обработки (ТЦО) на микроструктуру и механические свойства экономнолегированной высокоазотистой стали. Показано, что ТЦО формирует мелкозернистый мартенсит с размером зерна 23–101 мкм. Обработка холодом после ТЦО полностью устраняет остаточный аустенит, незначительно повышая прочность до 2040 МПа, но снижая ударную вязкость на 33 %. Наилучший комплекс свойств ($\sigma_s = 2010$ МПа, $KCV = 24$ Дж/(м·мм²)) достигнут после ТЦО без обработки холодом, что рекомендует данный режим для практического применения.

Ключевые слова: высокоазотистые стали, термическая обработка, ударная вязкость, механические свойства, микроструктура

Study of structure formation and properties during thermal cycling treatment of high-strength economically alloyed high-nitrogen steel

Dulnev Konstantiv Vladimirovich^(*)

dulnev.kv@gmail.com

Sevalnev German Sergeevich

sevalnevgs@gmail.com

Kurchatov Institute — VIAM, Moscow, Russia

Abstract. The study establishes the patterns of the influence of thermal cycling treatment (TCT) on the microstructure and mechanical properties of economical high-nitrogen steel. It is shown that TCT forms a fine-grained martensite with a grain size of 23–101 μm . Subsequent cryogenic treatment completely eliminates retained austenite, slightly increasing the ultimate tensile strength to 2040 MPa but reducing impact toughness by 33 %. The best combination of properties ($\sigma_s = 2010$ MPa, $KCV = 24$ J/(m·mm²)) was achieved after TCT without cryogenic treatment, which recommends this mode for practical applications.

Keywords: high-nitrogen steels, heat treatment, toughness, mechanical properties, microstructure

Введение. Современное машиностроение, энергетика и транспорт предъявляют все более жесткие требования к конструкционным материалам, ключевыми среди которых являются сочетание высокой прочности, вязкости, коррозионной стойкости и сопротивления усталости при одновременной технологичности и экономической эффективности производства. В этом контексте высокоазотистые стали представляют собой перспективный класс ма-

териалов, где азот, как мощный упрочняющий и аустенитообразующий элемент, выступает альтернативой дорогостоящему никелю. Экономнолегированные высокоазотистые стали, легированные преимущественно Mn, Cr и N, позволяют не только снизить себестоимость, но и добиться уникального комплекса механических и физико-химических свойств, недостижимого для традиционных низкоуглеродистых и низколегированных сталей [1].

Однако потенциал данных сталей реализуется в полной мере лишь после оптимизации их структурного состояния методами термической обработки [2, 3]. Стандартные изотермические режимы отжига, закалки и отпуска зачастую не позволяют преодолеть структурную неоднородность, унаследованную от литья или горячей деформации, и в полной мере управлять формой, размером и дисперсностью фазовых составляющих. В этой связи все больший интерес вызывают методы, основанные на кинетических эффектах при фазовых превращениях в неравновесных условиях. Термоциклическая обработка (ТЦО), заключающаяся в многократном циклическом нагреве и охлаждении стали в области фазовых превращений, является мощным инструментом для управления процессами структурообразования. За счет чередования прямого и обратного $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращений происходит интенсивное измельчение зерна, формирование дислокационной субструктуры, растворение и диспергирование избыточных фаз и карбидов, что в конечном итоге ведет к значительной модификации комплекса свойств [4, 5].

Целью настоящего исследования является установление закономерностей формирования микроструктуры и изменения механических свойств экономнолегированной высокоазотистой стали в процессе термоциклической обработки.

Материалы и методы. Для проведения исследований использовали высокопрочную высокоазотистую экономнолегированную конструкционную сталь мартенситного класса системы легирования Cr–Ni–Mo–Mn–Si, с предельной растворимостью азота 0,07% при нормальных условиях (получение слитков при атмосферном давлении). После электрошлакового переплава под избыточным давлением азота и добавлением азотоносителей в процессе переплава содержание азота в стали составило 0,15–0,17 %. Сталь подвергали термоциклической обработке путем трехкратной закалки в масло с температуры 1110 °С с краткосрочной выдержкой при данной температуре, обработке холодом при температуре –75 °С с целью снижения содержания остаточного аустенита, а также низкому отпуску для снятия остаточных напряжений. Также проведен сравнительный анализ ТЦО без обработки холодом.

Исследование микроструктуры проводили методом оптической микроскопии на микрошлифах. Размер зерна после термической обработки определяли после вакуумного травления. Так как обработка холодом и низкий отпуск не влияют на изменение размеров зерна, вакуумное травление проводили непосредственно сразу после закалки. Фазовый состав стали измеряли на магнитной установке по методу Штеблейна. Кроме того, фазовый состав определяли рентгеноструктурным методом.

Анализ твердости проводили по методу Роквелла и Виккерса с нагрузкой 5 кг в соответствии с ГОСТ 9013–59 и ГОСТ 2999–75.

Измерение ударной вязкости с «V»-образным надрезом проводили в процессе испытаний на маятниковом копре. Испытания на статическое растяжение осуществляли на сервогидравлической машине.

Результаты. Исследование микроструктуры методом оптической микроскопии после ТЦО как с обработкой холодом, так и без, показало, что микроструктура стали состоит практически полностью из мартенсита. Крайне редко встречаются избыточные фазы и остаточный аустенит (рис. 1).

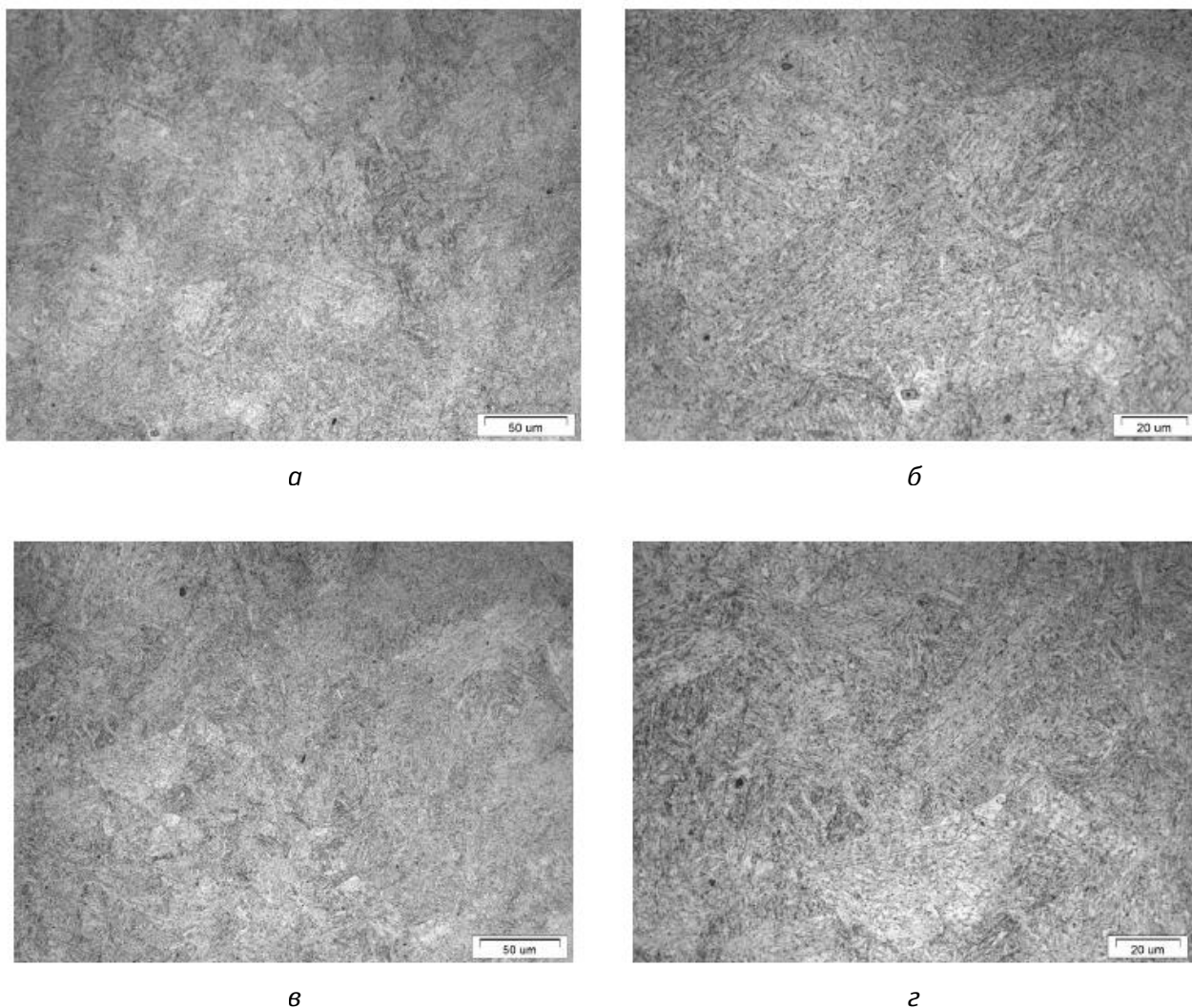


Рис. 1. Микроструктура экономнолегированной высокопрочной высокоазотистой стали после ТЦО с обработкой холодом (а, б) и без (в, г) при увеличении $\times 500$ (а, в) и $\times 100$ (б, г)

Анализ зеренной структуры после вакуумного травления позволило установить, что размер зерен после ТЦО находится в диапазоне от 23 до 101 мкм (рис. 2), что составляет 7 баллов по ГОСТ 5639–82.

Исследования фазового состава магнитным анализом показало, что после ТЦО с обработкой холодом структура высокопрочной высокоазотистой эконо-

номнолегированной конструкционной стали состоит на 99,5 % из мартенсита. Отсутствие обработки холодом приводит к стабилизации в структуре приблизительно 3 % остаточного аустенита (рис. 3, а) Данные результаты также подтверждаются рентгенофазовым анализом (рис. 3, б).

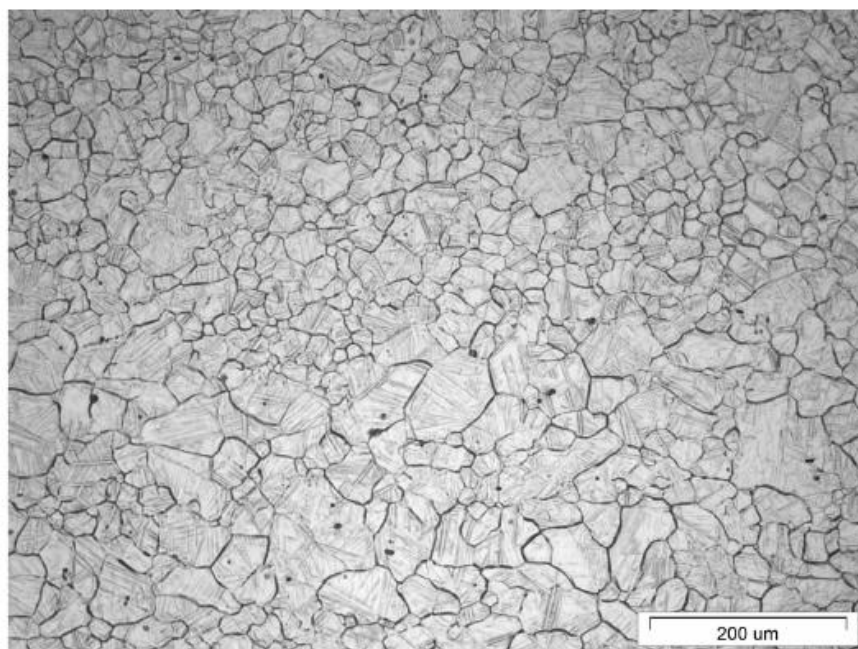


Рис. 2. Зеренная структура стали после ТЦО при увеличении $\times 200$

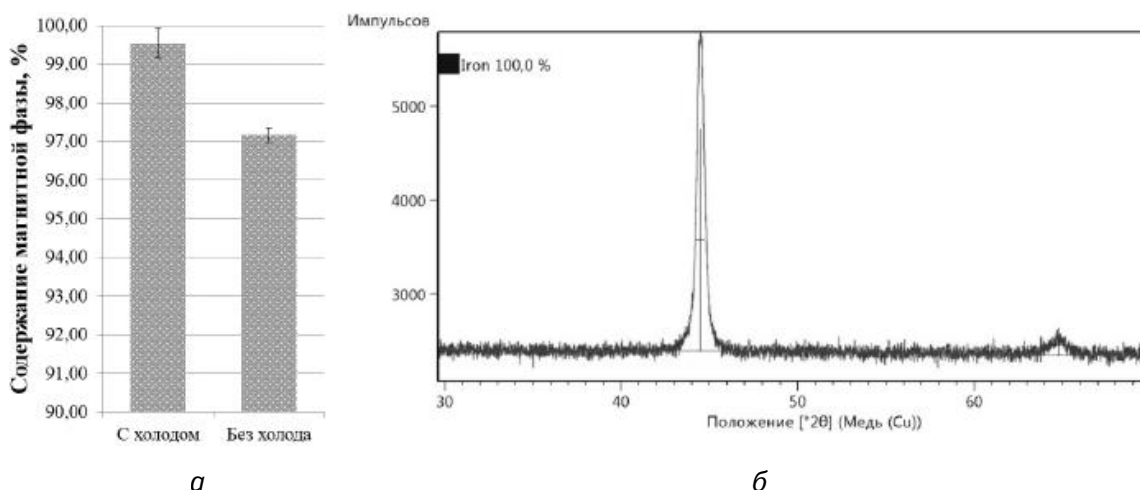


Рис. 3. Исследования фазового состава по методу Штеблена (а) и РФА (б)

Исследование твердости стали после ТЦО с обработкой холодом и без выявили, что влияние обработки холодом крайне незначительное. Однако после ТЦО с обработкой холодом твердость немного выше и составляет 49 HRC и 583 HV₅. Твердость без обработки холодом составляет 48,5 HRC и 577 HV₅. Механические свойства при растяжении также не сильно отличаются.

Временное сопротивление разрыву больше у образцов с обработкой холодом на 30 МПа и составляет 2040 МПа. Однако пластические характеристики выше у образцов без обработки холодом. Относительное удлинение после ТЦО без холода составляет 13 %, что на 2 выше, чем у образцов, подвергавшихся обработке холодом. Ударная вязкость также выше у образцов без обработки холодом (см. таблицу).

**Значения твердости и механических свойств высокопрочной
экономнолегированной конструкционной высокоазотистой стали
после обработки холодом и без нее**

Характеристика	С обработкой холодом	Без обработки холодом
Твердость HRC	49	48,5
Твердость HV ₅	583	577
Временное сопротивление σ_B , МПа	2040	2010
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	1895	1840
Относительное удлинение δ_5 , %	11	13
Относительное сужение ψ , %	55	57
Ударная вязкость KCV, Дж/(м · мм ²)	16	24

Обсуждение. Известно, что наличие избыточных фаз в микроструктуре способно сдерживать рост зерен при нагреве. Так как термоциклирование проводили при достаточно высоких температурах, при которых в сталях данного класса заканчивается растворение избыточных фаз, наблюдается рост зеренной структуры.

ТЦО с обработкой холодом позволила достичь практически 100 % содержания мартенсита в микроструктуре. Обработка холодом образцов после ТЦО приводит к незначительному повышению прочностных свойств, а также снижению пластических характеристик вследствие практически полного снижения содержания остаточного аустенита.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует высокую эффективность термоциклической обработки (ТЦО) для управления структурой и свойствами экономнолегированной высокоазотистой стали. Установлено, что трехкратная закалка с температуры 1110 °С приводит к формированию однородной мартенситной структуры с размером зерна в интервале 23–101 мкм. Применение ТЦО с обработкой холодом позволяет минимизировать количество остаточного аустенита и избыточных фаз, что является критически важным для достижения высоких прочностных характеристик.

Было выявлено, что последующая обработка холодом, хотя и обеспечивает практически полное устранение остаточного аустенита (до 99,5 % мартенсита), оказывает неоднозначное влияние на комплекс механических свойств. Ее применение приводит к незначительному приросту прочности

($\sigma_B = 2040$ МПа, твердость = 49 HRC) и предела текучести, но сопровождается ощутимым снижением пластичности и, что наиболее важно, ударной вязкости (с 24 до 16 Дж/(м · мм²).

Список источников

- [1] Рашев Ц.В. *Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением*. София, Изд-во Проф. Марин Дринов, 1995, 272 с.
- [2] Севальнёв Г.С., Анцыферова М.В., Дульнев К.В., Севальнёва Т.Г., Власов И.И. Влияние концентрации азота на структуру и свойства экономнолегированной конструкционной стали. *Авиационные материалы и технологии*, 2020, № 2, с. 10–16. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16>
- [3] Востриков А.В., Севальнев Г.С., Банных И.О., Власов И.И., Романенко Д.Н., Дульнев К.В. Эволюция микроструктуры, твердости и триботехнических свойств экономнолегированной стали мартенситного класса со сверхравновесным содержанием азота. *Труды ВИАМ*, 2022, № 9 (115), с. 3–14.
- [4] Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. *Термоциклическая обработка металлов и деталей машин*. Ленинград, Машиностроение, 1989, 255 с.
- [5] Шматов А.А. Методы термоциклической обработки для объемного упрочнения стальных инструментов. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2021, № 7, с. 56–60. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13249> (дата обращения 08.09.2025).