

УДК 621.774.04

к.т.н. Куберский С. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР),
Великоцкий Р. Е.
(Филиал № 1 «АМК» ООО «ЮГМК», г. Алчевск, ЛНР),
к.т.н. Должиков В. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

ФОРМИРОВАНИЕ ХЛАДОСТОЙКОСТИ СТАЛИ К60 ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКОНЧАНИЯ ЧИСТОВОЙ СТАДИИ ПРОКАТКИ В МЕЖКРИТИЧЕСКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

Исследовано влияние межкритического интервала температур и температуры конца прокатки на хладостойкость стали К60 в зависимости от механизма реализации эвтектоидной реакции. Установлены зависимости между температурой критических точек A_{c1} , A_{c3} , межкритическим интервалом температур и хладостойкостью. Установлено изменение количества вязкой составляющей при увеличении диапазона межкритического интервала температур и температуры критических точек A_{c3} и A_{c1} на 1 °С. Показано влияние углерода в температурном интервале существования δ -железа и перитектической реакции на трансформацию двухфазной области. Рассмотрено влияние механизма молизации атомарного водорода на межфазной границе «феррит/цементит» в процессе первой эвтектоидной реакции на низкотемпературную вязкость.

Ключевые слова: сталь К60, хладостойкость, эвтектоидное превращение, критические точки, межкритический интервал температур, количество вязкой составляющей, испытание падающим грузом, методика О. Г. Касаткина, температура конца прокатки.

Термомеханический контролируемый процесс (ТМКП) направлен на создание в металле мелкозернистого строения с минимальным баллом полосчатости, видманштеттовой структуры и прочих микроструктурных составляющих и фаз, негативно влияющих на хладостойкость стали для магистральных трубопроводов высокого давления (МТВД).

Среди прочих режимов ТМКП достаточно весомую роль в получении высоких механических свойств металла играет температура конца прокатки (ТКП). Как правило, данный технологический параметр стремятся снижать, чтобы окончание прокатки происходило при температуре ниже критической точки A_{c3} , т. е. в двухфазной ($\gamma+\alpha$)-области или межкритическом интервале температур (МИТ). На выбор ТКП влияют степень легирования стали и температура ее эвтектоидного превращения [1].

Авторами работы [2] с использованием электронно-микроскопического метода изу-

чены особенности структуры низколегированных трубных сталей в нормально закаленном состоянии, после дополнительной межкритической закалки и высокого отпуска. Повышение температуры нагрева в МИТ приводит к резкому сокращению протяженности малоугловых границ. Карбиды, выделившиеся на границах между ферритными кристаллами, сдерживают протекание процессов рекристаллизации. Повышение температуры нагрева в МИТ приводит к частичному растворению карбидов, сфероидизации ферритных кристаллов и образованию значительного количества мелких (2–3 мкм) аустенитных зерен, обеспечивающих существенное измельчение продуктов двойной закалки.

Для определения температурных значений критических точек A_{c1} и A_{c3} с учетом влияния на них химического состава стали используются методы М. И. Гольдштейна, О. Г. Касаткина, J. Trzaska, H. Hougardy, N. Kariya, S. Lee и др. [3].

В работе [4] исследовано влияние температур предварительной закалки и закалки из МИТ на ударную вязкость, твёрдость и микроструктуру низколегированной трубной стали. Показана сложная картина структурных и фазовых преобразований при выдержке в МИТ исходно закаленной стали — развивающаяся рекристаллизация α -фазы и образование γ -фазы по двум механизмам: наследственности и неупорядоченного роста.

Зависимости температур фазовых превращений Ag_3 и Ag_1 от содержания в стали основных легирующих элементов с учетом обжатий при прокатке и толщины раскатов установлены в работе [5]. Кроме того, рассмотрены варианты корректировки температурного интервала конца чистовой стадии прокатки при реализации различных стратегий ТМКП.

В работе [6] показаны основные процессы изменения структуры стали при термообработке, исследованные с использованием диаграммы изотермического распада аустенита и математического моделирования. Проведен анализ влияния легирующих элементов на положение критических точек, при которых происходят микроструктурные и фазовые превращения.

Необходимость исследования влияния режимов ТМКП на формирование структуры и свойств трубной стали К60 обоснована в работе [7], а также проведено физическое моделирование и исследование процесса ТМКП трубной стали класса прочности К60 при различной степени деформации, температуре и продолжительности нагрева.

В работе [8] определено влияние значительных никелевого ($Ni_{экв}$) и хромового ($Cr_{экв}$) эквивалентов исследованных составов стали на типы кристаллизации (перитектический или однофазный механизм с образованием δ -феррита), температуры критических точек и области существования различных фаз (δ -феррит, γ -аустенит, α -феррит). Показано, что увеличение содержания аустенитообразующих элементов, прежде всего ни-

келя, понижает нижнюю границу интервала температур обратного ($\alpha+\gamma$)-превращения и формирования в структуре стабилизированного аустенита. Химическая неоднородность двухфазной ($\delta+\gamma$)-структуры, образовавшаяся при кристаллизации, сохраняется при комнатной температуре. Определены режимы термообработки, связанные с нагревом в нижнюю половину двухфазной ($\alpha+\gamma$)-области, при которых в структуре стали при комнатной температуре фиксируется стабилизированный аустенит, оказывающий позитивное влияние на хладостойкость.

Таким образом, проведённые ранее исследования, направленные на изучение структурообразования в металле для МТВД, в зависимости от условий ТМКП в МИТ, показывают многообразие образующихся структур и фаз по диффузионному, промежуточному и сдвиговому механизмам. В частности, для создания необходимых свойств стали К60 следует учитывать комплексное влияние на них химического и фазового состава, МИТ, положения критических точек, ТКП и процесса молизации атомарного водорода на межфазной границе (МФГ) «феррит/цементит» в процессе первой эвтектоидной реакции.

Основной *целью* настоящей работы являлось определение закономерностей влияния МИТ и ТКП на хладостойкость стали К60 в зависимости от количества водорода, молизованного на МФГ «феррит/цементит» в процессе первой эвтектоидной реакции.

Объект исследования — процессы структурообразования и молизации атомарного водорода.

Предмет исследования — влияние МИТ и ТКП стали К60 на её хладостойкость.

Задачи исследования:

- установить влияние МИТ на НТВ стали К60;
- установить зависимость между содержанием углерода в стали К60 и МИТ;
- проанализировать комплексное влияние ТКП и температуры эвтектоидной реакции на хладостойкость стали К60;

– расширить научные представления о влиянии механизма молизации атомарного водорода на МФГ «феррит/цементит» в процессе первой эвтектоидной реакции.

Сталь К60 выплавляли в кислородном конвертере комбинированного дутья емкостью 300 т и разливали на двухручьева машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) Алчевского металлургического комбината (АМК) на слябы сечением 220×1200 мм. ТМКП производили на стане «3000» в соответствии с техническими условиями [9]. Определение количества вязкой составляющей (КВС) образцов из стали К60 выполняли при испытании падающим грузом (ИПГ) стандартных образцов с прессованным надрезом по ГОСТ 30456-97 при температуре –20 °С на копре УМУ-10000. Определение химического состава образцов горячекатаного толстолистового проката (ГТП) стали К60 выполняли спектральным методом на установке SPECTROLAB.

МИТ определяли как разницу между температурами критических точек Ac_3 и Ac_1 , ΔT — как разницу между ТКП и температурой критической точки Ac_1 .

При сравнительном анализе методик Касаткина и Гольдштейна была использована аппроксимация связи КВС и МИТ линейными функциями, которые описываются уравнениями регрессии (1) и (2) соответственно:

$$y = -5,0232x + 056,4, \quad R = 0,65, \quad (1)$$

$$y = -3,2186x + 574,41, \quad R = 0,49. \quad (2)$$

Анализируя полученные коэффициенты корреляции, можно утверждать, что зависимость (1) более точно описывает линейную связь между рассматриваемыми параметрами. Поэтому в ходе дальнейших исследований использовали значения критических точек Ac_1 и Ac_3 , полученных по методике О. Г. Касаткина с использованием формул (3) и (4) [9].

Для определения зависимостей между исследованными параметрами использовали методы математической статистики.

Зависимости между режимами ТМКП и хладостойкостью стали К60, а также между температурой эвтектоидного превращения, критической точкой Ac_3 , МИТ и хладостойкостью для ГТП стали К60 при толщине листа (Н) 16 мм устанавливали на основании анализа 255 образцов, полученных из 41 плавки. Зависимость между МИТ и КВС установлена по результатам анализа 2390 образцов для ИПГ, полученных из 161 плавки стали К60, при толщине листа от 8 мм до 16 мм включительно.

$$\begin{aligned} Ac_3 = & 912 - 27,4 \times Mn + 27,3 \times Si - \\ & 6,35 \times Cr - 32,7 \times Ni + 95,2 \times V + \\ & 190 \times Ti + 72 \times Al + 64,5 \times Nb + \\ & 5,57 \times W + 332 \times S + 276 \times P + \\ & 485 \times N - 900 \times B + 16,2 \times C \times Mn + \\ & 32,3 \times C \times Si + 15,4 \times C \times Cr + \\ & 48 \times C \times Ni + 4,32 \times Si \times Cr - \\ & 17,3 \times Si \times Mo - 18,6 \times Si \times Ni + \\ & 4,8 \times Mn \times Ni + 40,5 \times Mo \times V + \\ & 174 \times C^2 + 2,46 \times Mn^2 - \\ & 6,86 \times Si^2 + 0,322 \times Cr^2 + \\ & 9,9 \times Mo^2 + 1,24 \times Ni^2 + 60,2 \times V^2. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Ac_1 = & 723 - 7,08 \times Mn + 37,7 \times Si + \\ & 18,1 \times Cr + 44,2 \times Mo + 8,95 \times Ni + \\ & 50,1 \times V + 21,7 \times Al + 3,18 \times W + \\ & 297 \times S - 830 \times N - 11,5 \times C \times Si - \\ & 14 \times Mn \times Si - 3,1 \times Si \times Cr - \\ & 57,9 \times C \times Mo - 15,5 \times Mn \times Mo - \\ & 5,28 \times C \times Ni - 6 \times Mn \times Ni + \\ & 6,77 \times Si \times Ni - 0,8 \times Cr \times Ni + \\ & 27,4 \times C \times V + 30,8 \times Mo \times V - \\ & 0,84 \times Cr^2 - 3,46 \times Mo^2 - \\ & 0,46 \times Ni^2 - 28 \times N^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Зависимость между МИТ и КВС при ИПГ представлена на рисунке 1.

Зависимость имеет обратно пропорциональный характер, т. е. увеличение МИТ вызывает снижение КВС, а следовательно, и хладостойкости. Максимальные значе-

ния величины КВС (95–100 %) наблюдаются для МИТ ≤ 193 °С (рис. 1). Увеличение МИТ на 7 °С, т. е. с 192 до 199 °С, приводит к снижению КВС со 100 до 20 %, или примерно на 11 %/°С (рис. 1). Для МИТ более 194 °С сталь К60 характеризуется неудовлетворительными значениями КВС (рис. 1), т. к. в соответствии с большинством ТУ на данные стали КВС должно быть ≥ 80 %.

Обратно пропорциональная зависимость между температурой критической точки A_{c3} и КВС при ИПГ (рис. 2) свидетельствует о том, что увеличение A_{c3} способствует снижению КВС, а максимальные значения этого параметра (95–100 %) имеют место при температуре критической точки A_{c3} менее 911 °С.

Повышение температуры критической точки A_{c3} на 9 °С, т. е. с 911 до 920 °С, приводит к снижению КВС при ИПГ со 100 до 20 %, или на 9 %/°С (рис. 2). Для обеспечения уровня хладостойкости, соответствующего действующим ТУ (КВС при ИПГ ≥ 80 %), необходимо, чтобы температура критической точки A_{c3} была менее 913 °С (рис. 2).

Зависимость между температурой эвтектоидного превращения и КВС (рис. 3) также имеет обратную пропорциональный характер.

Максимальные значения КВС при ИПГ (95–100 %) и удовлетворяющие действующим ТУ наблюдаются при температуре эвтектоидного превращения около 718 и 718,7 °С соответственно. Повышение температуры эвтектоидного превращения на 2,5 °С приводит к снижению КВС со 100 до 20–40 % КВС, или примерно на 30 %/°С.

По-видимому, решающими факторами, непосредственно влияющими на управление процессом распада аустенита и эвтектоида, являются химический состав стали, а также степень и температура деформации аустенитно-ферритной матрицы, поэтому дальнейшие исследования были направлены на изучение закономерностей влияния химического состава исследуемой стали и, в частности, содержания в ней углерода на процессы аустенизации.

Данные об изменении КВС в испытанных образцах стали К60 при увеличении МИТ, температуры эвтектоидного превращения и критической точки A_{c3} на 1 °С, а также значения этих параметров для обеспечения величины КВС на уровне 95–100 % и удовлетворяющем действующим ТУ систематизированы в таблице 1.

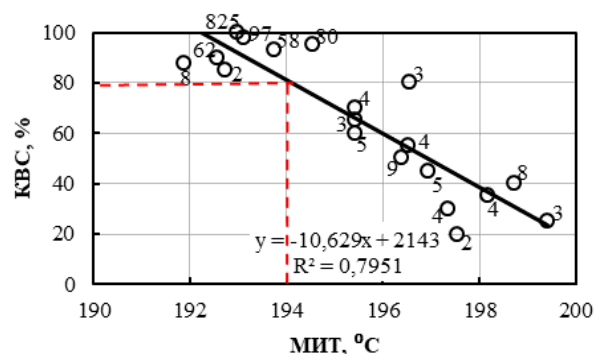


Рисунок 1 Влияние МИТ на КВС

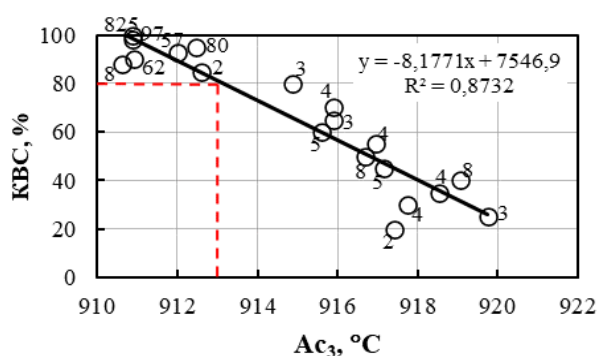
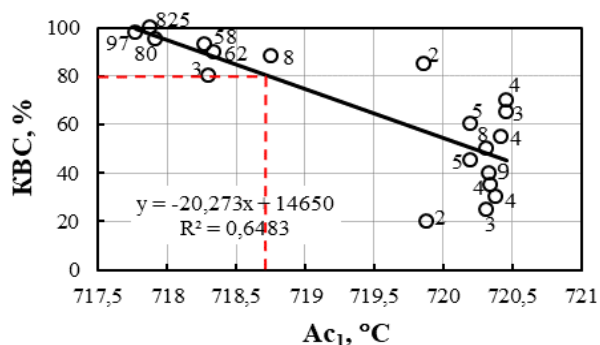
Рисунок 2 Влияние температуры критической точки A_{c3} на КВС

Рисунок 3 Влияние температуры эвтектоидного превращения на КВС

Таблица 1

Влияние МИТ и температур критических точек на КВС при ИПГ

Параметр	Уменьшение КВС (%/°C) при увеличении МИТ, Ас ₃ , Ас ₁	Температуры (°C) МИТ, Ас ₃ , Ас ₁ , обеспечивающие КВС на уровне	
		95–100 %	≥80 % КВС
МИТ	11	<193	<194,0
Ас ₃	9	<911	<913,0
Ас ₁	30	<718	<718,7

Анализ данных, представленных на рисунке 4, свидетельствует о том, что увеличение содержания углерода расширяет двухфазную ($\alpha+\gamma$)-область и, в соответствии с рисунком 1, приводит к снижению КВС.

НТВ на уровне 100 % КВС, соответствующая МИТ, равному 192,2 °C (рис. 1), обеспечивается [C]=0,1 % (рис. 4), что хорошо согласуется с ранее полученными результатами исследований о негативном влиянии перитектической реакции и развития ликвационных процессов на хладостойкость исследуемой стали [10].

Повышение содержания углерода на 0,01 % приводит к увеличению МИТ примерно на 1,2 °C (рис. 4) и снижению КВС на 13,2 % (табл. 1), что будет способствовать повышению порога хладноломкости.

Характер влияния ТКП на хладостойкость листа толщиной 16 мм из стали К60 представлен на рисунке 5 и свидетельствует о том, что удовлетворительная хладостойкость (КВС ≥ 80 %) формируется в температурном интервале конца прокатки 713–770 °C (участок *a–b*), а неудовлетворительная — в диапазоне 733–780 °C (участок *c–d*). Причем для металла с неудовлетворительной хладостойкостью увеличение ТКП сопровождается повышением КВС, а для образцов с удовлетворительной такое влияние практически отсутствует. Исходя из этого, можно заключить, что величина ТКП не оказывает решающего влияния на обеспечение требуемого уровня хладостойкости, который зависит от целого ряда дополнительных физических и/или технологических факторов.

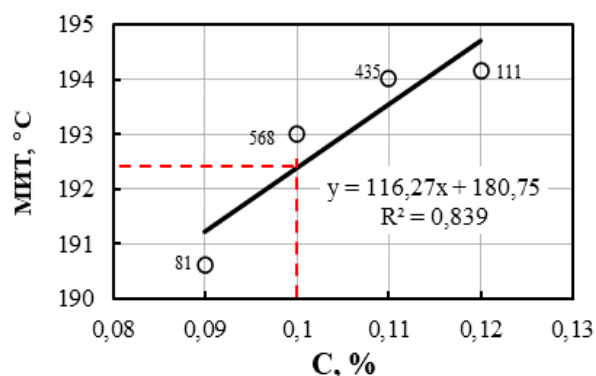


Рисунок 4 Зависимость между содержанием углерода и МИТ

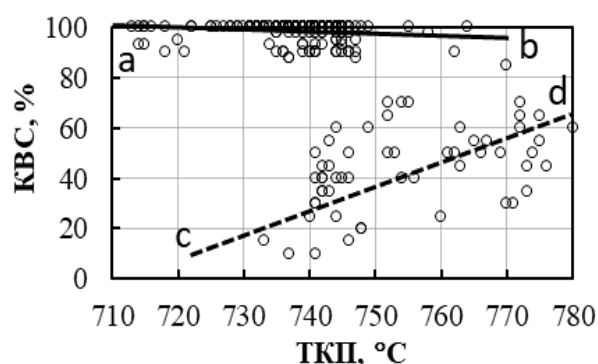


Рисунок 5 Характер влияния ТКП на хладостойкость ГТП стали К60

Как правило, для обеспечения высокого балла действительного зерна необходимо уменьшать значение ТКП ниже критической точки Ас₃. В то же время до сих пор недостаточно изучено влияние на хладостойкость ΔT как одного из ключевых факторов.

Согласно рисунку 6, на линейной зависимости между ТКП и ΔT можно выделить три участка: *a–b*, *b–c*, *c–d*.

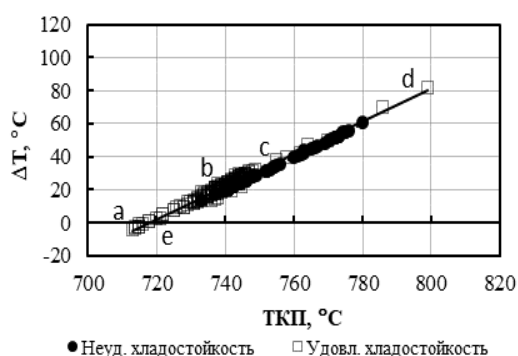


Рисунок 6 Зависимость между ТКП и ΔT для металла с различной хладостойкостью

Линии трендов для удовлетворительной и неудовлетворительной хладостойкости описываются уравнениями регрессии (5) и (6) соответственно:

$$y = 0,9927x - 712,81, R^2 = 0,98; \quad (5)$$

$$y = 0,9951x - 716,57, R^2 = 1. \quad (6)$$

Для этих участков характерны следующие значения ТКП и ΔT (рис. 6): *a-b* — 714–732 °C ($\Delta T = -2,44$ –12 °C), *b-c* — 733–749 °C ($\Delta T = 12$ –30 °C), *c-d* — 750–780 °C ($\Delta T = 30$ –60 °C).

На участке *a-b* наблюдается только удовлетворительная хладостойкость металла, на участке *b-c* формируется смешанная (удовлетворительная и неудовлетворительная) хладостойкость, на участке *c-d* — преимущественно неудовлетворительная хладостойкость (рис. 6).

Особо можно выделить дополнительный участок *a-e* (рис. 6), т. к. значения ΔT находятся в отрицательном интервале температур, т. е. ТКП ниже температуры эвтектоидного превращения, при котором начинают формироваться коллекторы, заполняемые молекулярным водородом. Для данного участка характерна только удовлетворительная хладостойкость. Поэтому для обеспечения наилучшей хладостойкости рассматриваемой стали можно рекомендовать ТКП, обеспечивающую отрицательную величину ΔT .

При увеличении масштаба рисунка 6 в температурном интервале ТКП от 733 до

749 °C (ΔT — 12–33 °C) чётко различимы две линейные зависимости удовлетворительной и неудовлетворительной хладостойкости (рис. 7), которые описываются уравнениями регрессии (5) и (6).

Анализ этих зависимостей свидетельствует о том, что практически для всех образцов, имеющих удовлетворительную хладостойкость, характерно более высокое значение ΔT (примерно на 3 °C) в сравнении с образцами, характеризующимися неудовлетворительной величиной этого важного показателя качества. На наш взгляд, при увеличении ΔT количество искажений кристаллической решётки, структуры и межфазных границ после ТМКП уменьшается, что снижает вероятность образования коллекторов. Поэтому можно предположить, что корректировка величины ΔT по прогнозируемым значениям ТКП и рассчитанной в зависимости от химического состава величине A_{c1} может обеспечить значительное снижение брака стали К60 по хладостойкости.

Существенное увеличение отсортировки по хладостойкости исследуемой стали наблюдается для листов толщиной 16 мм (рис. 8), что, вероятнее всего, является причиной увеличения расстояния от центра листа к поверхности. При этом затрудняется пластическая деформация внутренних слоев листа и количество водорода, удаляющегося из металла диффузионным путем, что не исключает образования коллекторов, заполненных молекулярным водородом.

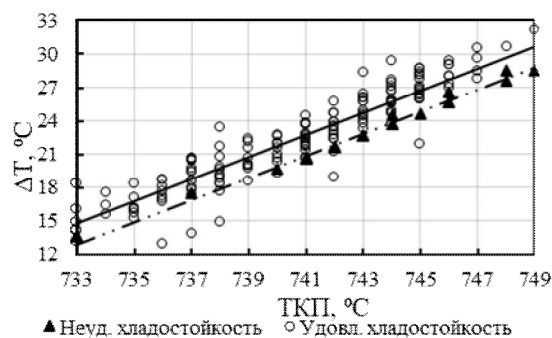


Рисунок 7 Зависимость между ТКП и ΔT для металла с удовлетворительной и неудовлетворительной хладостойкостью

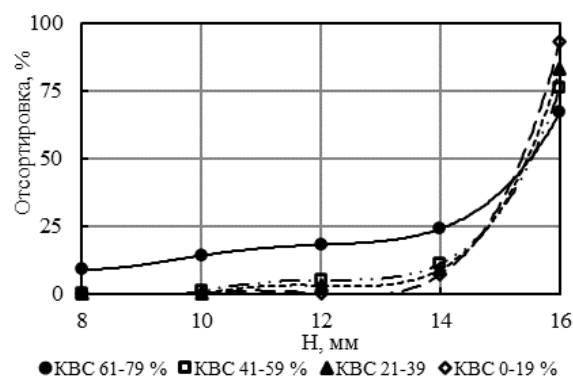


Рисунок 8 Отсортировка по хладостойкости листов различной толщины

При завершении пластической деформации металла ниже эвтектоидной реакции, скорее всего, создаются условия, препятствующие формированию коллекторов и наполнению их водородом (рис. 6). В процессе горячей пластической деформации ГТП, осуществляемой в однофазной (γ) и двухфазной ($\alpha+\gamma$) области и особенно в феррито-перлитной области, т. е. ниже температуры эвтектоидного превращения, когда начинается рост перлитных колоний, феррит деформируется. Постоянная деформация феррита, в частности около растущей цементитной пластины, очевидно, приводит к системному нарушению возникающей МФГ «феррит/цементит». В результате пластической деформации возникают дополнительные структурные неоднородности, которые заполняются водородом из исходных коллекторов. В итоге физический процесс наполнения исходных коллекторов водородом в нестабильно существующей области между фазой цемента и феррита замедляется, что препятствует возникновению критических значений давления водорода в них.

Выполненные в работе исследования позволили сделать следующие основные выводы:

– с использованием метода О. Г. Касаткина рассчитаны температуры МИТ, A_{c3} и

A_{c1} и установлено их обратно пропорциональное влияние на хладостойкость;

– показано, что повышение содержания углерода в стали вызывает снижение КВС и неблагоприятно влияет на порог хладноломкости. Поэтому для повышения качества целесообразно обеспечивать содержание углерода в готовой стали ближе к нижнему пределу требуемого химического состава;

– установлено, что величина ТКП не оказывает решающего влияния на обеспечение требуемого уровня хладостойкости, более сильно зависящего от других факторов;

– выдвинута гипотеза, что увеличение ΔT способствует уменьшению дефектов микроструктуры и снижает вероятность образования коллекторов. Поэтому для обеспечения удовлетворительной хладостойкости стадию чистовой прокатки необходимо заканчивать при температуре ниже эвтектоидной реакции;

– показано, что для более толстых листов затрудняется проработка их внутренних слоев и диффузия водорода к поверхности, что способствует образованию коллекторов, росту давления молекулярного водорода в них и возникновению напряжений в приграничной области между коллектором и металлической матрицей;

– для снижения уровня отсортировки ГТП стали К60 по хладостойкости необходимо усовершенствование режима ТМКП с учетом комплексного влияния на этот параметр химического состава стали, ТКП, температуры эвтектоидного превращения и ΔT .

В процессе последующих исследований предполагается проанализировать влияние химического и фазового состава, режимов ТМКП — и, в частности, степени деформации в последнем проходе в зависимости от величины ΔT — на формирование хладостойкости трубной стали категории прочности К60.

Библиографический список

1. Горбатенко, В. П. Особенности влияния химического состава на механические свойства трубных сталей категории прочности К60 в зависимости от температуры чистой прокатки листов [Текст] / В. П. Горбатенко, С. В. Петрущак // *Сталь*. — 2018. — № 2. — С. 37–42.
2. Спивак, Л. В. Калориметрия фазовых превращений в углеродистых сталях в межкритическом интервале температур [Текст] / Л. В. Спивак, Н. Е. Щепина // *Металлы*. — 2020. — № 3. — С. 88–94.
3. Касаткин, О. Г. Расчетные модели для определения критических точек стали [Текст] / О. Г. Касаткин, Б. Б. Винокур, В. Л. Пилюшенко // *Металловедение и термическая обработка*. — 1984. — № 1. — С. 20–22.
4. Влияние температуры нагрева в межкритический интервал на формирование субзеренной структуры в предварительно закаленных низколегированных сталях [Текст] / С. В. Беликов, К. И. Сергеева, М. С. Карабаналов [и др.] // *Современные проблемы науки и образования*. — 2013. — № 2. — С. 184.
5. Формирование структуры низколегированной трубной стали при нагреве в межкритическом интервале температур [Текст] / А. Н. Маковецкий, Т. И. Табатчикова, И. Л. Яковлева [и др.] // *Физика металлов и металловедение*. — 2012. — Т. 113. — № 7. — С. 744.
6. Лобанова, Л. А. Моделирование оптимальных химического состава и температурного интервала горячей деформации для низкоуглеродистой высокопрочной трубной стали [Текст] / Л. А. Лобанова, С. В. Данилов, М. Л. Лобанов // *Актуальные проблемы развития технических наук : сборник статей участников XXIV областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки» / Министерство образования и молодежной политики Свердловской области ; ГАУ СО «Дом молодежи» ; ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»*. — Екатеринбург : УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2021. — С. 5–9.
7. Исследование влияния режимов контролируемой прокатки трубной стали на структурное состояние горячедеформированного аустенита [Текст] / П. П. Полецков, М. С. Гуцина, Д. Ю. Алексеев [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. — 2018. — Т. 16. — № 3. — С. 67–77.
8. Особенности фазовых превращений в сталях мартенситного класса для высокопрочных коррозионноустойчивых труб нефтяного сортамента [Текст] / Д. А. Пумпянский, И. Ю. Пышминцев, С. М. Битюков [и др.] // *Металлург*. — 2021. — № 11. — С. 35–42.
9. ТУ 14-1-5493-2004. Прокат толстолистовой из низколегированной стали классов прочности К52-К60 и Х56-Х70 для электросварных труб на рабочее давление от 5,4 до 7,4 МПа.
10. Куберский, С. В. Влияние химического состава и микроструктуры трубной стали класса прочности К60 на её хладостойкость [Текст] / С. В. Куберский, Р. Е. Великоцкий // *Сборник научных трудов ДонГТИ*. — 2021. — № 24 (67). — С. 54–60.

© Куберский С. В.
© Великоцкий Р. Е.
© Должиков В. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТИ Денищенко П. Н.,
первым заместителем управляющего,
главным инженером Филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» Сбитневым С. А.**

Статья поступила в редакцию 15.12.2022.

PhD in Engineering Kuberskiy S. V., Velikotskiy R. E., PhD in Engineering Dolzhikov V. V.
(DonSTI, Alchevsk, LPR, skuberskiy@yandex.ru)

FORMATION OF COLD RESISTANCE OF K60 STEEL UNDER THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AT THE END OF THE ROLLING FINISHING STAGE IN THE INTERCRITICAL TEMPERATURE RANGE

The influence of the intercritical temperature range and the temperature of the end of rolling on the cold resistance of K60 steel, depending on the mechanism of the eutectoid reaction, is investigated. The dependences between the temperature of the critical points Ac_1 , Ac_3 , the intercritical temperature interval and the cold resistance are established. A change in the amount of the viscous component was found with an increase in the range of the intercritical temperature interval and the temperature of the critical points Ac_3 and Ac_1 by 1 °C. The influence of carbon in the temperature range of existence δ -iron and peritectic reaction on the transformation of the two-phase area is shown. The effect of the mechanism of atomic hydrogen molization on the ferrite/cementite interface during the first eutectoid reaction on low-temperature viscosity is considered.

Key words: K60 steel, cold resistance, eutectoid transformation, critical points, intercritical temperature interval, amount of viscous component, falling load test, O. G. Kasatkina methodology, temperature of the end of rolling.