

УДК 621.774.04

к.т.н. Куберский С. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, skuberskiy@yandex.ru),

Великоцкий Р. Е.
(филиал № 1 «АМК» ООО «ЮГМК», г. Алчевск, ЛНР)

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И МИКРОСТРУКТУРЫ ТРУБНОЙ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ К60 НА ЕЕ ХЛАДОСТОЙКОСТЬ

В работе исследовано влияние углерода и микроструктуры на низкотемпературную вязкость трубной стали класса прочности К60. Установлены зависимости между содержанием углерода, морфологией цементита, перитектической реакцией и хладостойкостью. Предложен концентрационный интервал содержания углерода для стабилизации удовлетворительной хладостойкости.

Ключевые слова: сталь К60, хладостойкость, углерод, морфология, цементит, перитектическое превращение, сегрегация, атомарный водород, феррито-перлитная структура, бейнит, коллектор.

Повышенное содержание углерода в малоуглеродистой низколегированной стали высокой категории прочности негативно влияет на её низкотемпературную вязкость, а следовательно, и на хладостойкость [1, 2]. Особенно актуальна эта проблема для сталей, используемых при изготовлении магистральных труб высокого давления [3].

Для стабилизации хладостойкости на уровне $\geq 80\%$ количества вязкой составляющей (КВС) при испытании падающим грузом (ИПГ) рекомендуется снижать в этих сталях содержание ликватов, углерода и карбидообразующих элементов [4]. Процессы дегазации стали в жидком и твёрдом состоянии также являются преобладающими для температурной минимизации порога хладноломкости (T_{50}) [5]. Термомеханический контролируемый процесс (ТМКП) предусматривает создание определенной микроструктуры и фазового состава металла с целью уменьшения размеров действительного зерна, повышения дифференцировки структурных и фазовых составляющих, а также сфероидизации субструктур [6].

Анализируя микроструктуру металла, необходимо отметить, что формирование цементита пластинчатой морфологии фер-

рито-перлитного класса может быть причиной образования низкотемпературных трещин и распространения интеркристаллического типа излома по телу зерна, а сегрегационные процессы по сечению литого сляба усиливаются перитектической реакцией [7].

Поэтому для обеспечения класса прочности трубной стали К65 и выше необходима феррито-бейнитная структура металла, которую обеспечивают дополнительным микролегированием ванадием, молибденом, ниобием и др., что усложняет технологическую схему производства металлопродукции и увеличивает ее себестоимость.

В то же время для обеспечения механических характеристик металла по временному сопротивлению в пределах 590–690 МПа и относительному удлинению не менее 22 % нет необходимости в обеспечении феррито-бейнитного класса стали с дополнительным образованием микроструктур метастабильного состава, формируемых по бейнитному или мартенситному типу.

Как правило, феррито-перлитная структура обеспечивает практически весь комплекс механических характеристик стали К60, за исключением хладостойкости, что позволяет отказаться от использования

микролегирующих добавок с целью управления процессом структурообразования.

Анализ качества толстолистового проката из стали К60 после ТМКП и ускоренного охлаждения в условиях Алчевского металлургического комбината (АМК) показал (табл. 1), что наибольшее количество брака обусловлено отклонениями от установленных норм по хладостойкости и составляет около 5,8 % от объемов произведенной металлопродукции. Поэтому особое внимание при производстве указанных сталей необходимо уделять величине КВС после ИПГ, величина которой должна быть не менее 80 %.

Основная цель настоящей работы предусматривала определение закономерностей влияния углерода, морфологии цементита и перитектической реакции на хладостойкость трубной стали класса прочности К60.

Объект исследования — процессы структурообразования и механические свойства стали К60.

Предмет исследования — влияние содержания углерода и микроструктуры стали К60 на ее хладостойкость.

Задачи исследования:

– определить содержание углерода в исследуемой стали, при котором обеспечиваются стабильные значения низкотемпературной вязкости (НТВ) и удовлетворительная хладостойкость;

– проанализировать влияние перитектической реакции на развитие сегрегационных процессов в металле литого сляба и, как следствие, на хладостойкость;

– охарактеризовать влияние морфологии цементита на процесс водородного охрупчивания стали.

В работе представлены результаты исследований, основанные на корреляционно-регрессионном анализе и микроструктурных исследованиях.

Для выполнения поставленных в работе задач было проанализировано 210 плавок стали К60 (1000 листов, 1230 слябов), произведенных на АМК в течение 10 лет.

Таблица 1

Процент отбраковки по механическим свойствам толстого листа из стали К60

σ_B	σ_T	KCV ⁻²⁰	ИПГ	σ_T/σ_B	P _{см}
0,4	1,7	0	5,8	0,1	0

Исследуемую сталь выплавляли в кислородном конвертере комбинированного дутья емкостью 300 т и разливали на двухручьева МНЛЗ на слябы сечением 220×1200 мм. ТМКП производили на стане «3000» в соответствии с техническими условиями «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» (ТУ 14-1-5493–2004).

Определение КВС выполняли при ИПГ стандартных образцов из стали К60 с пресованным надрезом по ГОСТ 30456–97 при температуре –20 °С на копре УМУ-10000.

Определение химического состава образцов горячекатаной толстолистовой стали К60 выполняли спектральным методом на установке Spectrolab. Для идентификации микроструктур при металлографическом исследовании применяли оптический микроскоп Neophot-21.

Микроструктуру протравленных шлифов исследуемой стали анализировали с использованием растрового электронного микроскопа Ultra 55 фирмы Carl Zeiss.

Влияние углерода на балл центральной сегрегации в непрерывнолитых слябах, оценивали по критерию Маннесманна (ЦСМ).

Исследование качества стали К60 показало, что весь брак по хладостойкости наблюдается при содержании углерода в диапазоне 0,10–0,12 %, а при содержании углерода 0,09 % отбраковка стали по этому параметру отсутствовала (рис. 1).

На рисунке 2 представлены зависимости между содержанием углерода в исследуемой стали и величиной КВС при ИПГ, свидетельствующие об ухудшении хладостойкости с увеличением содержания углерода.

Это можно объяснить перитектическим превращением, которое имеет место при

содержании углерода $\geq 0,1$ % и негативно влияет на хладостойкость. Причем данные рисунка 1 свидетельствуют о том, что практически 70 % брака приходится на содержание углерода 0,1 %, при котором как раз и начинается перитектическая реакция, способствующая увеличению доли перлита и размера зерна.

Предложенная гипотеза подтверждается результатами металлографических исследований, которые позволили установить, что увеличение содержания углерода в стали К60 феррито-перлитного класса с 0,09 % до 0,12 %, характеризуется снижением балла зерна (с 11–12 до 9–10 балла) и увеличением объёмной доли перлита, негативно влияющего на хладостойкость (рис. 3).

Поэтому для снижения брака по хладостойкости необходимо иметь содержание углерода в стали К60 менее 0,1 %, которое находится левее точки *H* на диаграмме состояния Fe–C [8].

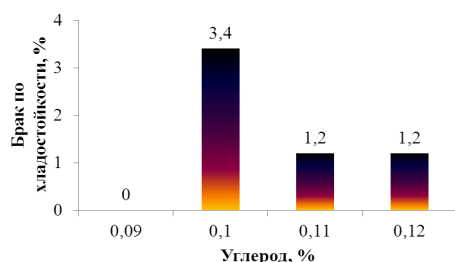
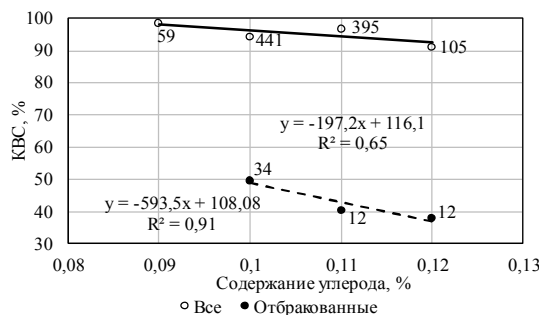
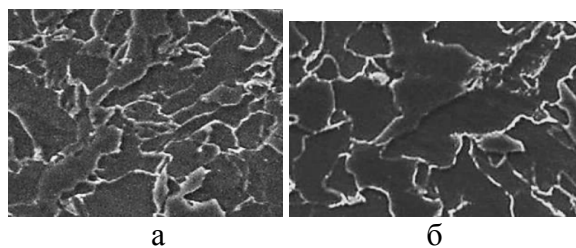


Рисунок 1 Брак по хладостойкости в зависимости от содержания углерода



Цифры у точек — количество исследованных образцов

Рисунок 2 Влияние содержания углерода на хладостойкость стали



а — [C]=0,09 %; б — [C]=0,12 %

Рисунок 3 Влияние содержания углерода на микроструктуру стали К60

Как было отмечено выше, увеличение дисперсности и сфероидизации карбидов за счёт ускоренного охлаждения после окончания ТМКП повышает уровень КВС при ИПГ, а также смещает интервал хрупкости в сторону более низких температур.

Микроструктурный анализ 50-ти плавок стали К60, имеющих удовлетворительную хладостойкость, показал, что для их микроструктуры характерна сфероидизация карбидных фаз (рис. 4) и, в частности, изменение морфологии цементита с пластинчатой на зернистую (бейнит реечного типа).

Исследованные в работе образцы стали К60, в которых преобладали цементитные сфероидизированные фазы, имели КВС при ИПГ на уровне 95–100 %, а в случае пластинчатой морфологии, свойственной отбракованному металлу, эта величина была ниже 80 %.

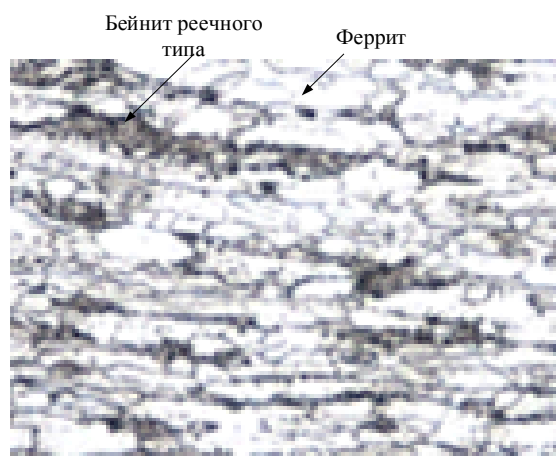


Рисунок 4 Микроструктура стали К60

Негативное влияние перитектического превращения связано с развитием ликвационных процессов (дендритной и зональной ликвации) по телу литого сляба, обусловленных усилением сегрегации ликватов, газов, неметаллических включений в междендритном и межзёренном пространстве (по границам зерен), а также захватом атомарного водорода межфазными границами «феррит/цементит» в перлите.

При содержании углерода менее 0,1 % балл ЦСМ в литых слябах снижается примерно в 1,5 раза (рис. 5), что, безусловно, свидетельствует о негативном влиянии перитектической реакции на хладостойкость стали.

В настоящее время для многих производителей металлопродукции характерна тенденция значительного снижения содержания углерода (~0,03–0,06 %) в трубных сталях высокого класса прочности (X70 и выше), что обусловлено, прежде всего, стремлением подавить эвтектоидное превращение, идущее по диффузионному механизму, во избежание получения в структуре стали цементита пластинчатой морфологии. Это, безусловно, имеет некоторые преимущества, связанные с увеличением пластичности и вязкости металла, но прочность стали снижается. Поэтому для устранения негативного влияния углерода на хладостойкость стали К60 феррито-перлитного класса и обеспечения ее требуемой прочности достаточно снижение концентрации углерода до 0,08 %.

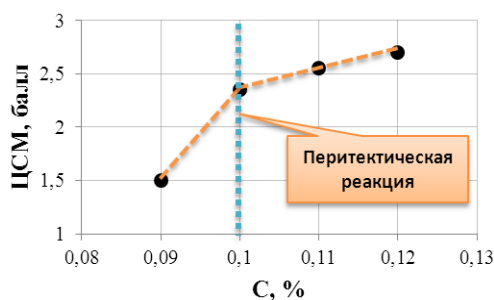


Рисунок 5 Влияние [C] на балл ЦСМ в непрерывнолитых слябах стали К60

Пластинчатая морфология цементита (рис. 6) выступает в роли коллекторов или скопления атомарного, а затем молекулярного водорода и метана на межфазной границе «твёрдый раствор α -Fe — Fe_3C ».

До начала эвтектоидного превращения водород находится преимущественно в виде атомов с обобществлёнными электронами (металлический вид связи). Скорее всего, при абсорбции водорода между атомами железа, а также легирующими элементами возникают силы металлической связи, вызванные коллективизацией валентных электронов, где часть электронов водорода заполняет дырки в валентных зонах γ -Fe (*d*-зоне).

В температурном интервале от солидус (~1490 °C) до реализации эвтектоидной реакции (~720 °C) атомарный водород адсорбируется к поверхности сляба из аустенита однофазной области, а также из феррита — в двухфазной области. На межфазной границе «феррит/цементит» образуется скопление метана, называемое коллектором. С появлением карбида железа (Fe_3C) оставшийся в металле атомарный водород молизуется, создавая коллекторы, а также гидрируясь в метан. Образование метана происходит непосредственно при формировании цементитной пластины по диффузионному механизму. Давление метана в коллекторе постоянно растёт в связи с образованием новых порций CH_4 , что вызывает в металле на границе коллектора с металлической матрицей напряжения II, а также III рода, которые в дальнейшем инициируют резкое снижение низкотемпературной вязкости. По-видимому, давление газа в коллекторах, превышающее модуль упругости, ещё больше искажает кристаллическую решётку в приграничной зоне «коллектор/металлическая матрица», повышая напряжения металла, и, как следствие, способствует охрупчиванию стали.

Таким образом, после реализации в стали эвтектоидного превращения водород находится преимущественно в молизованном и гидрированном состоянии, располагаясь в микрообъёмах (коллекторах), на межфазной границе «цементит/феррит» (рис. 7).

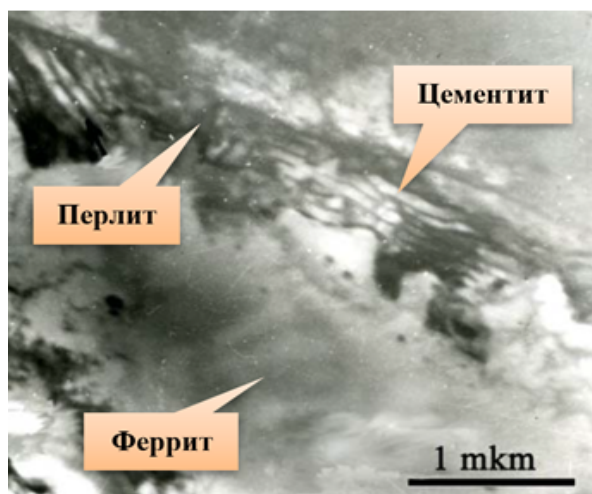


Рисунок 6 Цементит пластинчатой морфологии на границе феррита стали К60

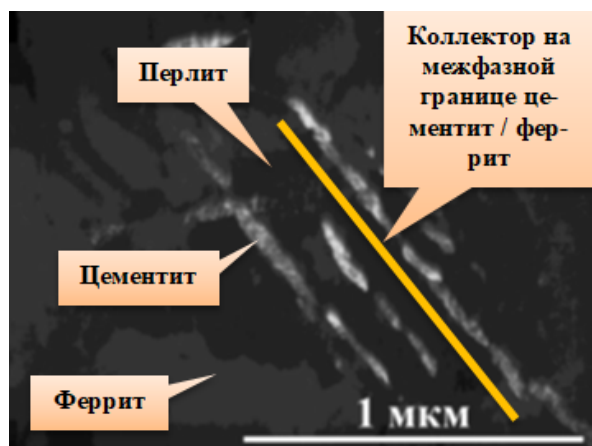


Рисунок 7 Коллектор на межфазной границе «цементит/феррит» в стали К60

Поэтому с точки зрения микроструктуры стали необходимо обеспечивать ее феррито-перлитную морфологию за счет ограничения содержания углерода и противодиффузионной обработки.

Существенное влияние на хладостойкость магистральных труб высокого давления оказывает соотношение Mn/C [3]. По мнению авторов работы [1], для низкоуглеродистых ($[C] < 0,2\%$) среднемарганцевых сталей наивысшая хладостойкость обеспечивается при величине $Mn/C = 8-10$.

На рисунке 8 показано влияние отношения Mn/C на КВС после ИПГ для исследованного массива данных стали К60,

имеющих удовлетворительную хладостойкость и отбракованных по этому показателю. Величина отношения Mn/C находилась в пределах 12,92–17,56, что значительно выше значений, рекомендованных работой [1]. Тем не менее, в этом диапазоне отношения Mn/C находятся как удовлетворительные по хладостойкости образцы, так и отбракованные.

Поэтому можно утверждать, что увеличение отношения Mn/C позитивно влияет на хладостойкость, но не является основным фактором, обеспечивающим значение этого параметра на уровне $\geq 80\%$.

Исходя из установленных закономерностей о влиянии углерода на хладостойкость, можно предложить технологические рекомендации, заключающиеся в ограничении концентрации углерода в стали К60 феррито-перлитного класса на уровне $< 0,1\%$, т. к. более высокое его содержание оказывает негативное влияние на балл зерна и объёмную долю перлитной составляющей (рис. 4), что обусловлено протеканием перитектической реакции.

Внедрение в производство результатов исследований по влиянию углерода, морфологии цементита и перитектической реакции на хладостойкость позволило устранить брак по количеству вязкой составляющей при испытании падающим грузом, а также стабилизировать хладостойкость стали К60 феррито-перлитного класса на уровне 80–100 % КВС.

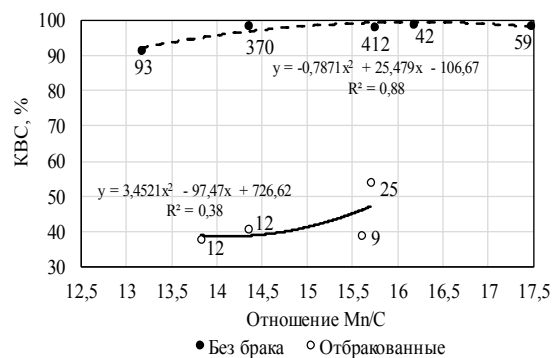


Рисунок 8 Зависимости между Mn/C и КВС

Выполненные в работе исследования позволили сделать следующие основные **выводы**:

1. Впервые показано, что негативное влияние на хладостойкость стали К60 феррито-перлитного класса углерод оказывает при его содержании 0,10–0,12 %. Причем наибольшее количество брака по этому параметру характерно содержанию углерода 0,1 %, при котором начинается реакция перитектического превращения. В этих условиях получают развитие ликвационные процессы, обусловленные увеличением микросегрегации ликватов, газов и неметаллических включений, а также захватом атомарного водорода на межфазной границе «цементит/феррит» в перлите.

2. Установлено, что увеличение соотношения Mn/C позитивно влияет на хладостойкость но не является основным факто-

ром, обеспечивающим значение этого параметра на уровне ≥ 80 %.

3. Пластинчатая морфология цементита выступает в роли коллекторов на межфазной границе «твёрдый раствор ОЦК–Fe — Fe₃C». Поэтому изменение морфологии цементита с пластинчатой на зернистую (бейнит реечного типа) будет способствовать повышению хладостойкости.

4. Использование результатов исследований при производстве трубной стали К60 в условиях АМК обеспечило величину КВС при ИПГ ≥ 80 % и позволило устранить брак по хладостойкости.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния содержания микродобавок в стали К60 на ее хладостойкость, а также эвтектоидного превращения на механизм молизации атомарного водорода после приобретения металлом необратимой водородной хрупкости.

Библиографический список

1. Шульте, Ю. А. Хладостойкие стали [Текст] / Ю. А. Шульте. — М. : Металлургия, 1970. — С. 224.
2. Носоченко, А. О. Исследование влияния углерода на центральную химическую и структурную неоднородность и комплекс свойств низколегированных трубных сталей [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Носоченко Александр Олегович. — Москва, 2003. — 25 с.
3. Матросов, Ю. И. Сталь для магистральных газопроводов [Текст] / Ю. И. Матросов, Д. А. Литвиненко, С. А. Голованенко. — М. : Металлургия, 1989. — 288 с.
4. Вышемирский, Д. Е. Обоснование критического значения эквивалента углерода на основе оценки свариваемости сталей для труб класса прочности К65 и К70 [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.10 / Вышемирский Дмитрий Евгеньевич. — Москва, 2017. — 28 с.
5. Смирнов, Л. И. Диффузия и закономерности поведения водородной подсистемы в системах металл — водород [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.07 / Смирнов Леонид Иванович. — Москва, 2003. — 38 с.
6. Соловьёв, Д. М. Влияние способа формовки нефтегазопроводных труб большого диаметра класса прочности К60 на процессы деформационного старения и сопротивления разрушению [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Соловьёв Дмитрий Михайлович. — М. : ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», 2015. — 27 с.
7. Кузнеченко, Я. С. Центральная сегрегационная неоднородность и сопротивление водородному растрескиванию листов из трубных сталей. Часть I. Влияние химического состава [Текст] / Я. С. Кузнеченко, И. П. Шабалов, А. А. Холодный // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2017. — № 2. — С. 45–57.
8. Семенюк, П. П. Металловедческие закономерности влияния углерода, марганца и кремния на хладостойкость трубной марки стали К60 [Текст] / П. П. Семенюк, Е. В. Кумуржи, Р. Е. Великоцкий, А. Г. Кравченко, Н. А. Румянцева // Чёрная металлургия : бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2017. — № 4. — С. 80–85.

© Куберский С. В.

© Великоцкий Р. Е.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В.,
начальником ЦЛК филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» Швец Д. В.*

Статья поступила в редакцию 04.10.2021.

PhD in Engineering Kuberskiy S. V. (*DonSTI, Alchevsk, LPR, skuberskiy@yandex.ru*),
Velikotskiy R. E. (*branch № 1 “Alchevsk Iron-and-Steel Works” ООО “Southern Mining and
Metallurgical Enterprise”*)

**INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE OF PIPE STEEL
STRENGTH CLASS K60 ON ITS COLD RESISTANCE**

The paper investigated the effect of carbon and microstructure on the low-temperature viscosity of pipe steel strength class K60. Dependences between carbon content, morphology of cement carbide, peritectic reaction and cold resistance are determined. A concentration range of carbon content is proposed to stabilize a satisfactory cold resistance.

Key words: *K60 steel, cold resistance, carbon, morphology, cement carbide, peritectic transformation, segregation, atomic hydrogen, ferrite-pearlite structure, bainite, collector.*