

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)

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И СТАРЕНИЯ НА ХЛАДОСТОЙКОСТЬ ТРУБНОЙ СТАЛИ КАТЕГОРИИ ПРОЧНОСТИ К60

В работе исследовано влияние термической обработки и старения на низкотемпературную вязкость трубной стали категории прочности К60, не прошедшей противоблоковую обработку (ПФО). Установлена зависимость между продолжительностью старения горячекатаного толстолистового проката, не прошедшего ПФО, и хладостойкостью. Предложено научное обоснование влияния процесса молизации атомарного водорода при эвтектоидной реакции на хладостойкость стали К60.

Ключевые слова: *сталь К60, хладостойкость, противоблоковая обработка, порог хладноломкости, термическая обработка, старение, атомарный водород, межфазная граница, эвтектоидное превращение, молизация.*

Трубная сталь категории прочности К60 (предел прочности $\sigma_B \geq 600$ МПа) принадлежит к группе малоуглеродистых низколегированных сталей (МНС) феррито-перлитного класса. Марка данной стали довольно хорошо изучена [1]. Как правило, при производстве данной стали не возникает особых проблем с обеспечением необходимых механических свойств по прочности и ударной вязкости, однако из-за высоких требований по σ_B иногда возникает отсортировка по относительному удлинению (δ_5). Основным видом брака при производстве данной стали является отсортировка по хладостойкости [2], на величину которой большое влияние оказывает содержание водорода. Поэтому после разливки сталь подвергают противоблоковой обработке (ПФО), предусматривающей замедленное ее охлаждение до температуры окружающей среды в течение нескольких десятков часов.

Термическая обработка (ТО) листов после ускоренного охлаждения (УО) выполняется, если необходимо повысить пластичность металла. Такую обработку листов, заключающуюся в нормализации горячекатаного толстолистового проката (ГТП), т. е. нагреве в

аустенитное состояние (выше A_{c3}) и дальнейшем охлаждении на воздухе, производят в методических нагревательных печах.

Для изменения хладостойкости данной марки стали к старению металла обычно не прибегают, т. к. при старении наблюдается деградация свойств, а именно повышение прочности и снижение пластичности, величины предела макроупругости и длительности инкубационного периода коррозионного растрескивания.

В работе [3] представлены результаты исследований влияния длительной эксплуатации стали класса прочности К60 на стандартные механические свойства, хладостойкость и характер разрушения металла для магистральных трубопроводов высокого давления (МТВД) из сталей феррито-перлитного класса. Предложена методика моделирования процессов старения и оценки уровня деградации свойств металла, основанная на склонности стали к замедленному разрушению при одновременном воздействии напряжений, коррозионной среды и водорода.

Для трубных сталей класса прочности К60 с феррито-перлитной и феррито-

бейнитной структурой проведено исследование влияния длительной эксплуатации на стандартные механические свойства, температурную зависимость внутреннего трения и склонность к деформационному старению [4]. В ходе длительной эксплуатации происходит деградация свойств в результате протекания процесса деформационного старения, приводящего к охрупчиванию металла.

В работе [5] представлены результаты исследования влияния нагрева при нанесении антикоррозионного покрытия и пластической деформации при изготовлении отводов холодного гнутья на свойства труб К60 с высокой деформационной способностью. Изменение механических свойств металла деформированных зон отводов в поперечном направлении состоит в снижении пластичности, а в продольном — более комплексное и зависит от направления деформации. Высокая деформируемость металла труб после старения достигается благодаря формированию структуры стали с двухфазной матрицей, высокой плотностью свободных дислокаций и выделениями карбидов.

В работе [6] исследованы химический состав, микроструктура, содержание водорода, степень коррозионного повреждения труб, механические свойства при растяжении и ударном изгибе. Показано, что межзеренное разрушение является следствием ослабления когезионной прочности границ зерен феррита и колоний перлита.

В работе [7] исследовано качество проката из высокопрочной низкоуглеродистой стали, изготовленного из слябов с применением усовершенствованного сокращенного режима ТО. Применение такого режима ТО, исключая операцию высокого отпуска, при содержании водорода в жидкой стали не более 1,8 ppm обеспечивает качество листового проката на уровне металла валового производства.

Авторами работы [8] выполнена оценка степени обезводороживания листовой стали повышенной прочности. Исследован

способ снижения содержания водорода в стали за счет введения в технологический процесс контролируемой прокатки изотермической выдержки при температурах 450–350 °С и охлаждения от этих температур со скоростью не более 20 °С/ч. Выполнен теоретический расчет содержания водорода в листовой стали повышенной прочности после предложенного режима обработки на основании закона Фика. Получено распределение концентрации водорода по сечению листа стали ЕНЗ6 (близкой по химическому составу к сталям класса прочности К60) после ПФО и показано, что такой технологический прием способствует снижению концентрации водорода по сечению листа от его центра к поверхности в среднем на 2 ppm.

Таким образом, можно отметить, что влияние ТО на свойства металла для МТВД и процессы, протекающие при его старении, достаточно хорошо изучены.

Однако в литературе отсутствуют исследования уровня хладостойкости ГТП трубной стали категории прочности К60, не прошедшего ПФО, а также влияния на этот показатель ТО и старения.

Поэтому основная **цель настоящей работы** заключалась в определении закономерностей влияния ТО и старения на хладостойкость трубной стали категории прочности К60, не прошедшей ПФО.

Объект исследования — процессы структурообразования и механические свойства стали К60.

Предмет исследования — влияние ТО и старения стали К60 на ее хладостойкость.

Задачи исследования:

- установить влияние ТО на хладостойкость стали К60;
- проанализировать влияние старения стали К60 на хладостойкость металла;
- определить порог хладноломкости (T_{50}) для состаренного металла стали К60.

Для решения поставленных в работе задач в условиях действующего производства были исследованы листы одной плавки стали категории прочности К60, выплав-

ленной в кислородном конвертере комбинированного дутья емкостью 300 т и разлитой на двухручьеваой машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на слябы сечением 220×1200 мм. Единственное отличие при производстве данной плавки от стандартной технологии заключалось в том, что ПФО литых слябов не была выполнена. В соответствии с существующей технологией после разлива на МНЛЗ литые слябы сразу складывают в штабеля, состоящие из 20–25 слябов, для последующего медленного охлаждения в течение 72 ч. По причине аварийного отключения электроэнергии и дальнейшей работы на аварийном генераторе все полученные литые слябы были охлаждены в течение суток примерно до 20 °С (зимнее время года). Температура атмосферного воздуха составляла минус 15 °С, а в ККЦ — около минус 5 °С. Так как слябы не были складированы в штабеля, скорость охлаждения в температурном интервале от 950 °С до 20 °С увеличилась в 7–8 раз, тогда как при охлаждении в штабеле средняя скорость охлаждения сляба обычно составляет ~10–15 °С/ч (900 °С/72 ч = 13 °С/ч). На холодном полу ККЦ полученные слябы остыли с 950 °С до 40–50 °С примерно за 10–12 ч, т. е. средняя скорость охлаждения литого сляба составила ~80–100 °С/ч. В дальнейшем литые слябы данной плавки были нагреты в методической печи блюминга и подвергнуты стандартному термомеханическому контролируемому процессу (ТМКП). ТМКП производили на стане «3000» в соответствии с техническими условиями [9]. Определение количества вязкой составляющей (КВС) в образцах проката при испытании падающим грузом (ИПГ) выполняли по ГОСТ 30456-97 при температуре минус 20 °С на копре УМУ-10000, используя стандартные образцы с прессованным надрезом. Определение химического состава образцов выполняли спектральным методом на установке Spectrolab. Для идентификации микроструктур при металлогра-

фическом исследовании применяли оптический микроскоп Neophot-21.

Химический состав исследуемой плавки (табл. 1) полностью соответствовал требованиям ТУ 14-1-5493-2004.

Для определения зависимостей между исследованными параметрами использовали методы математической статистики. Зависимость между КВС и δ_5 установлена по результатам анализа 2390 образцов для ИПГ, полученных из 161 плавки стали К60, прошедших ПФО, при толщине листа от 8 до 16 мм включительно.

Для определения критических точек Ac_1 и Ac_3 использовали формулы Гольдштейна:

$$Ac_1 = 723 - 7,08 \times Mn + 37,7 \times Si + 18,1 \times Cr + 44,2 \times Mo + 8,95 Ni + 50,1 \times V + 21,7 \times Al + 3,18 \times W + 297 \times S - 830 \times N - 11,5 \times C \times Si - 14 \times Mn \times Si - 3,10 \times Si \times Cr - 57,9 \times C \times Mo - 15,5 \times Mn \times Mo - 5,28 \times C \times Ni - 6,0 \times Mn \times Ni + 6,77 \times Si \times Ni - 0,80 \times Cr \times Ni + 27,4 \times C \times V + 30,8 \times Mo \times V - 0,84 \times Cr^2 - 3,46 \times Mo^2 - 0,46 \times Ni^2 - 28 \times V^2;$$

$$Ac_3 = 912 - 370 \times C - 27,4 \times Mn + 27,3 \times Si - 6,35 \times Cr - 32,7 \times Ni + 95,2 \times V + 190 \times Ti + 72 \times Al + 64,5 \times Nb + 5,57 \times W + 332 \times S + 276 \times P + 485 \times N - 900 \times B + 16,2 \times C \times Mn + 32,3 \times C \times Si + 15,4 \times C \times Cr + 48 \times C \times Ni + 4,32 \times Si \times Cr - 17,3 \times Si \times Mo - 18,6 \times Si \times Ni + 4,8 \times Mn \times Ni + 40,5 \times Mo \times V + 174 \times C^2 + 2,46 \times Mn^2 - 6,86 \times Si^2 + 0,322 \times Cr^2 + 9,9 \times Mo^2 + 1,24 \times Ni^2 + 60,2 \times V^2.$$

Таблица 1
Содержание элементов (%) в стали

C	Mn	Si	S	P	Cr
0,100	1,560	0,420	0,003	0,012	0,013
Ni	Cu	Ti	Al	As	
0,006	0,005	0,0193	0,043	<0,002	
N		Mo		V	
0,0058		0,0019		0,0825	
Nb		Ca		B	
0,0322		0,0021		0,0005	

Расчетные значения температур критических точек A_{c1} и A_{c3} составили 720 °С и 878 °С соответственно.

Из 6 листов толщиной 16 мм по стандартной схеме вырезали опытные образцы для определения хладостойкости, предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и ударной вязкости:

– 6 штук: для определения ударной вязкости KCV^{-20} при минус 20 °С;

– 6 штук: для определения ударной вязкости KCU^{-70} при минус 70 °С;

– 12 штук: для определения ИПГ при минус 20 °С;

– 6 штук: для определения σ_B , σ_T , δ_5 при 20 °С.

В таблице 2 указаны вид и условия испытаний, размеры и количество образцов для ТО.

В процессе термической обработки все образцы нагревались в муфельной печи в течение 30 мин при температуре 915 °С. Затем происходило их охлаждение на воздухе до температуры на 20 °С выше и на 40 °С ниже эвтектоидного превращения A_{c1} , равной 720 °С, т. е. до температур 740 °С и 680 °С соответственно. Далее образцы помещали в муфельные печи и выдерживали по 30 мин при этих температурах. После каждого нагрева и выдержки

образцы охлаждали до комнатной температуры со скоростью 10 °С/мин, 5 °С/мин и 1 °С/мин (табл. 3). Данный эксперимент был проведен с целью определения влияния режимов термической обработки (температуры нагрева и скорости охлаждения) на хладостойкость исследованного металла.

С интервалом 2–3 недели от даты выплавки исследованной плавки в течение 38 недель проводили определение КВС при ИПГ на 28 образцах, отобранных в соответствии с ТИ 229-067-1-2021 от 14 листов ГТП стали К60, не прошедшей ПФО, которые весь этот период находились на складе металла.

Определение T_{50} выполнили через 38 недель старения при температуре испытания от минус 70 °С до 20 °С с шагом 10 °С (всего 10 испытаний). При определении T_{50} для каждой температуры испытания использовали по 3 образца (всего 30 образцов), отобранных от 15 листов исследованной плавки.

Основной причиной всестороннего анализа данного металла являлась неудовлетворительная хладостойкость исследуемого металла, находившаяся на уровне 5–10 % КВС, при норме ≥ 80 %. Все остальные механические свойства металла были в пределах нормы.

Таблица 2

Образцы, используемые для проведения механических испытаний

Размеры образца Н×В×L, мм	Вид испытания	Температура испытаний, °С	Количество образцов, шт.
16×60×250	КCV	–20	6
16×60×250	КCV	–70	6
16×90×300	ИПГ	–20	12
16×70×320	Растяжение	+20	6

Таблица 3

Режимы ТО образцов для ИПГ

№ режима ТО					
1	2	3	4	5	6
Температура нагрева, °С					
680	740	680	740	680	740
Скорость охлаждения, °С/мин					
10		5		1	

Механические свойства исследованной плавки, полученные после ТО, представлены в таблице 4.

В соответствии с данными таблицы 4, при снижении скорости охлаждения с 10 до 1 °С/мин наблюдается уменьшение временного сопротивления с 525–529 МПа до 478–493 МПа (примерно на 50 МПа), повышение относительного удлинения с 30,5 % до 35 % (на 4–5 %), а ударной вязкости — на 30–70 Дж/см² с 172–195 Дж/см² до 246–255 Дж/см² (KCV⁻²⁰) и с 191–210 Дж/см² до 226–234 Дж/см² (КСУ⁻⁷⁰). Предел текучести практически не изменился.

Необходимо особо отметить, что КВС уменьшилось с 10 до 0–5 % по сравнению с исходным состоянием металла для всех режимов ТО, за исключением режима № 2. После термической обработки металл полностью охрупчился (КВС=0–5 %), однако после режима ТО № 2 количество вязкой составляющей при испытании падающим грузом увеличилось в 2,5 раза: с 10 до 25 % (табл. 4).

Снижение прочностных и повышение пластических свойств металла после выполненной термической обработки, очевидно, является следствием классического отжига, заключающегося в нагреве образцов в однофазной области, выдержке и охлаждении. При уменьшении скорости охлаждения образцов исследованной плавки с 10 до 1 °С/мин наблюдается снижение

прочности, а также повышение пластичности и вязкости металла (табл. 4). Изменение механических свойств после термической обработки, связано, прежде всего, с перекристаллизацией металла и релаксацией остаточных напряжений, являющихся следствием проведенного ранее ТМКП.

Снижение хладостойкости с 10 до 0 % КВС образцов исследованной плавки после проведенной ТО, по нашему мнению, невозможно объяснить существующими в настоящее время представлениями [9] о природе и механизме водородного охрупчивания МНС.

Для всех режимов проведенной ТО отмечено увеличение δ_5 с 21,5 % (исходное состояние металла) до 28,5–35,5 %, т. е. на 7–14 %, но, несмотря на это, повышения КВС не наблюдалось (табл. 4).

По данным работы [10] повышение хладостойкости металла хорошо коррелирует с δ_5 , т. е. имеет место пропорциональная зависимость, когда увеличение относительного удлинения ГТП стали К60 сопровождается повышением значения КВС.

Аналогичная зависимость была получена и в результате проведенных нами исследований образцов проката из стали К60, произведенной по существующей на предприятии технологии, предусматривающей ПФО непрерывнолитых слябов (рис. 1).

Таблица 4

Механические свойства проката после ТО

Механические свойства	Исходное состояние	Скорость охлаждения, °С/мин					
		10		5		1	
		Температура нагрева, °С					
		680	740	680	740	680	740
		№ режима ТО					
	1	2	3	4	5	6	
КВС, %	10	5	25	5	0	5	0
σ_B , МПа	659	525	529	515	519	493	478
σ_T , МПа	557	345	350	361	368	366	342
δ_5 , %	21,5	30,5	30,5	29,5	28,5	35,5	34
KCV ⁻²⁰ , Дж/см ²	194	172	195	197	140	246	255
КСУ ⁻⁷⁰ , Дж/см ²	218	191	210	193	238	234	226

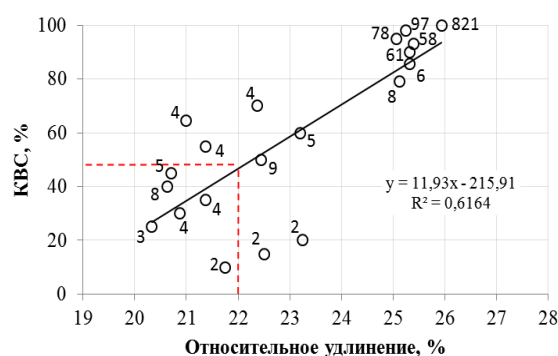


Рисунок 1 Зависимость между КВС и относительным удлинением

В соответствии с данными, представленными на рисунке 1, удовлетворительные значения относительного удлинения (норма для $\delta_5 \geq 22\%$) наблюдаются при КВС $\geq 50\%$, что соответствует порогу хладноломкости.

Исходя из этого, можно заключить, что один из основных критериев хладостойкости — пластичность металла — не является объективной, а также единственной характеристикой низкотемпературной вязкости металла МНС.

Также недостаточно понятны причины резкого увеличения КВС образцов после режима ТО № 2 в сравнении с остальными режимами термообработки. Поэтому для определения возможной связи между микроструктурой и механическими свойствами и, в частности, с хладостойкостью стали К60 после выполненной ТО, были проанализированы основные характеристики её микроструктуры (рис. 2, 3; табл. 5).

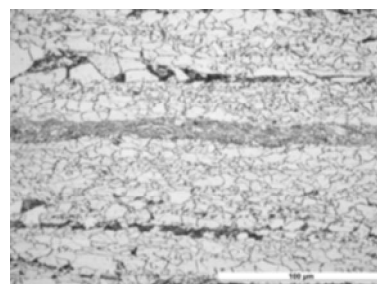
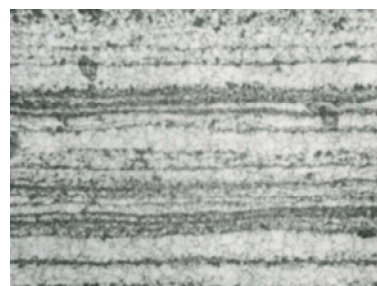


Рисунок 2 Микроструктура стали К60 в исходном состоянии (до ТО), ($\times 500$)



а



б

Рисунок 3 Микроструктура образцов, отобранных с поверхности (а) и середины (б) листа, после ТО по режимам № 1 и № 2 ($\times 500$)

Таблица 5

Характеристики микроструктур стали К60 после термической обработки

Место отбора образцов	Показатель микроструктуры	Режим ТО					
		1	2	3	4	5	6
Поверхность листа	Балл зерна	8–9	7–9	6–8	7–9	6–9	7–9
	БВС	2	2	–	–	–	–
	Балл перлита	2–3	2–3	4	2–3	3–4	1–2
Середина листа	Балл зерна	7–9	7–9	7–8	7–9	6–9	7–9
	БВС	2	2	–	–	–	–
	Балл перлита	5	5	5	5	5	5

Анализ представленных данных показывает, что качественных отличий в микроструктуре образцов до и после ТО, а также по баллу зерна не наблюдается. При скорости охлаждения $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в микроструктуре наблюдается видманштеттова структура 2 балла (БВС). Полосчатость образцов, отобранных с поверхности листа, в основном составляет 2–3 балла (рис. 3, а), а для образцов, отобранных со средней части, соответствует 5-му баллу (рис. 3, б).

Установлено, что изменение механических свойств и микроструктуры после проведённой ТО полностью согласуются с классическими представлениями о влиянии температуры и скорости охлаждения МНС на прочность, пластичность и ударную вязкость металла, характерными для отжига, за исключением резко увеличившегося КВС при ИПГ образцов, обработанных по режиму № 2 (табл. 4).

Результаты исследований КВС при ИПГ после старения горячекатаного толстолистного проката исследуемой плавки в течение 38 недель представлены на рисунке 4.

Представленную на рисунке 4 кривую можно условно разбить на 4 участка, характерных для различных периодов старения.

В течение первых 20 суток после ТМКП хладостойкость металла увеличилась с 10 до 20 % КВС (участок А–В на рис. 4). Скорее всего, это свидетельствует о незавершённой и продолжающейся диффузии атомарного водорода из феррита и его дальнейшей адсорбции, в результате чего давление мо-

лекулярного водорода в коллекторах снижается и, как следствие, приводит к повышению КВС примерно на 10 %.

В течение последующих 12 недель старения (участок В–С на рис. 4) наблюдается снижение КВС с 20 до 0 %. По-видимому, водородная хрупкость металла на втором участке определяется не давлением молекулярного водорода, сегрегированного в коллекторах, и не средней концентрацией атомарного водорода, растворённого в решётке феррита, а увеличением концентрации молекулярного водорода и др. газов в зоне максимальных объёмных напряжений кристаллической решётки.

Начиная с 15-й недели старения (участок С–D на рис. 4) наблюдается повышение хладостойкости с 0 до 85 % КВС. Данное резкое повышение хладостойкости, вероятнее всего, является следствием релаксации микрообластей в приграничной зоне межфазной границы цементит/феррит, что приводит к последующей стабилизации хладостойкости на удовлетворительном уровне в результате старения термически, деформационно и фазово напряжённого металла (напряжения II и III рода).

Примерно после 33-й недели старения металл приобретает хладостойкость на уровне 85 % КВС (участок D–E на рис. 4), что очевидно свидетельствует о завершении процессов релаксации микрообластей в приграничной зоне межфазной границы цементит/феррит, обусловленных напряжениями II и III рода.

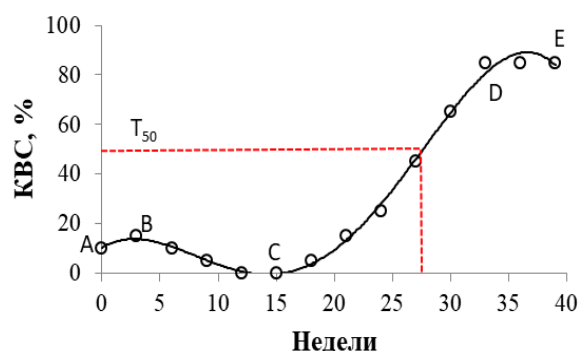


Рисунок 4 Изменение КВС в процессе старения образцов, не прошедших ПФО

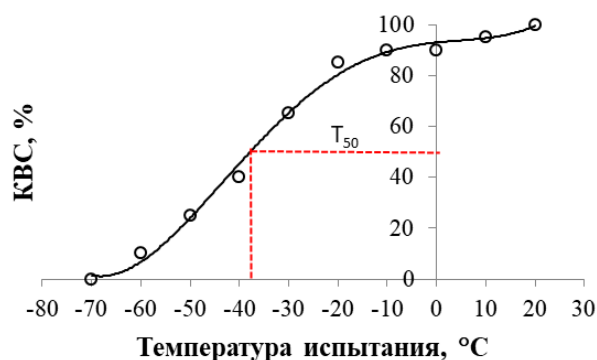


Рисунок 5 Характер изменения КВС для различных температур при ИПГ

Порог хладноломкости или переходная температура для стали К60 наблюдается примерно через 28 недель после старения (рис. 4).

Характер изменения КВС для различных температур при ИПГ образцов толстолистового проката через 38 недель их старения представлен на рисунке 5.

Представленные на рисунке 5 данные свидетельствуют о том, что порог хладноломкости соответствует температуре минус 38 °С, а полностью хрупкое состояние металла наблюдается при минус 70 °С. Удовлетворительная хладостойкость (≥ 80 % КВС) наблюдается при температуре испытания минус 20 °С, что соответствует требованиям ТУ 14-1-5493-2004. Хладостойкость, соответствующая 100 % КВС, наблюдается при 20 °С и выше.

На основании проведенных исследований и их результатов можно сделать следующие основные выводы:

- нарушение технологии производства трубной стали категории прочности К60, обусловленное отсутствием ПФО (замедленного охлаждения) непрерывнолитых слябов, не позволяет получить требуемую хладостойкость толстолистового проката;

- термическая обработка такой стали показала, что при снижении скорости охлаждения с 10 до 1 °С/мин предел прочности несколько уменьшается, а относительное удлинение и ударная вязкость возрастают. Качественных отличий в микроструктуре образцов до и после термической обработки не наблюдается. КВС для экспе-

риментальных образцов снизилось с 10 до 0–5 % для всех режимов термической обработки, за исключением режима ТО № 2, после которого КВС возросло до 25 %;

- впервые установлен нелинейный характер изменения КВС на протяжении 38 недель старения не прошедшего ПФО металла и показано, что увеличение и уменьшение величины данного параметра в процессе старения связано с диффузией атомарного водорода из феррита и его дальнейшей адсорбцией, концентрацией молекулярного водорода и др. газов в зоне максимальных объемных напряжений в кристаллической решётке, релаксацией микрообластей в приграничной зоне межфазной границы цементит/феррит;

- порог хладноломкости исследованного металла после 38 недель старения соответствует температуре минус 38 °С, полностью хрупкое состояние наблюдается при минус 70 °С, а хладостойкость, соответствующая 100 % КВС, наблюдается при 20 °С.

- установлено, что после 33-й недели старения металл приобретает хладостойкость на уровне, удовлетворяющем большинству существующих в настоящее время стандартов, что, очевидно, свидетельствует о завершении процессов релаксации микрообластей в приграничной зоне межфазной границы феррит/цементит, обусловленных напряжениями II и III рода.

- показано, что процесс старения может использоваться производителями для обеспечения необходимых требований по хладостойкости в случае невозможности

проведения предусмотренного технологией замедленного охлаждения непрерывнолитых слябов.

В процессе последующих исследований предполагается проанализировать влияние

температуры окончания чистой стадии ТМКП в межкритическом интервале температур на формирование хладостойкости трубной стали категории прочности К60.

Библиографический список

1. Организация производства листового проката класса прочности К60, предназначенного для электросварных труб газопроводов и газораспределительных систем заводов по производству сжиженного газа [Текст] / А. А. Придеин, С. П. Зубов, Л. В. Прокопенко [и др.] // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. — 2019. — Т. 75. — № 1. — С. 68–80.
2. Куберский, С. В. Влияние химического состава и микроструктуры трубной стали класса прочности К60 на её хладостойкость [Текст] / С. В. Куберский, Р. Е. Великоцкий // *Сб. науч. тр. ДонГТИ*. — 2021. — № 24 (67). — С. 54–60.
3. Закономерности изменения механических свойств конструкционных сталей в ходе длительной эксплуатации и моделирование процессов старения [Текст] / В. Н. Зикеев, Г. А. Филиппов, И. П. Шабалов [и др.] // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. — 2014. — № 4. — С. 74–82.
4. Влияние длительной эксплуатации на температурную зависимость внутреннего трения и склонность к деформационному старению низколегированных сталей [Текст] / Г. А. Филиппов, В. Н. Зикеев, И. П. Шабалов [и др.] // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. — 2017. — № 1. — С. 49–55.
5. Изменение свойств труб класса прочности К60 с повышенной деформационной способностью при изготовлении отводов холодного гнутья [Текст] / И. П. Шабалов, В. Я. Великоднев, С. Ю. Настич [и др.] // *Инновации и импортозамещение в трубной промышленности (Трубы — 2016) : труды XXII международной научно-практической конференции ; под ред. И. Ю. Пышминцева*. — Челябинск : ОАО «РосНИТИ», 2016. — С. 42–52.
6. Горицкий, В. М. Восстановленные нефтегазопроводные трубы повторного применения для конструкций четвертой группы [Текст] / В. М. Горицкий, Г. Р. Шнейдеров // *Промышленное и гражданское строительство*. — 2021. — № 2. — С. 24–33.
7. Оптимизация режима термической обработки кованных слябов из высокопрочной низкоуглеродистой стали [Текст] / В. В. Цуканов, В. Г. Милоуц, О. Э. Нигматулин [и др.] // *Металлург*. — 2017. — № 9. — С. 63–66.
8. Рябичева, Л. А. Оценка степени обезводородживания листовой стали повышенной прочности при контролируемой прокатке [Текст] / Л. А. Рябичева, В. И. Алимов, Ю. С. Колчина, Е. Э. Павлюченко // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении*. — 2019. — № 3 (28). — С. 18–26.
9. Влияние способа изготовления проката из стали типа 10Г2ФБ на микроструктуру, механические свойства и хладостойкость после отжига при температурах полной и неполной фазовой перекристаллизации [Текст] / П. Г. Мартынов, М. Ю. Матросов, А. Б. Григорьева [и др.] // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. — 2016. — № 3. — С. 80–87.
10. Матросов, Ю. И. Сталь для магистральных газопроводов [Текст] / Ю. И. Матросов, Д. А. Литвиненко, С. А. Голованенко. — М. : Металлургия, 1989. — 288 с.

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

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

Статья поступила в редакцию 06.10.2022.

PhD in Engineering Kuberskiy S. V. (*DonSTI, Alchevsk, LPR*), **Velikotskiy R. E.** (*Branch № 1
“Alchevsk Iron-and-Steel Works” ООО “YuGMK”, Alchevsk, LPR*), **PhD in Engineering**

Dolzhiikov V. V. (*DonSTI, Alchevsk, LPR*)

**EFFECT OF HEAT TREATMENT AND AGING ON THE COLD RESISTANCE OF PIPE
STEEL, STRENGTH CATEGORY K60**

The paper investigates the effect of heat treatment and aging on the low-temperature viscosity of pipe steel, strength category K60, which has not undergone antifloken treatment (AFT). The dependence between the duration of aging of hot-rolled thick-rolled products that have not passed the AFT and cold resistance has been determined. The scientific substantiation of influence of the atomic hydrogen molization is proposed, during the eutectoid reaction, on the cold resistance of K60 steel.

Key words: *K60 steel, cold resistance, antifloken treatment, cold breaking threshold, heat treatment, aging, atomic hydrogen, interfacial boundary, eutectoid transformation, molization.*