

## ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ КАРБОНИТРАЦИИ НА ПОЛОЖЕНИЕ ПОРОГА ХЛАДНОЛОМКОСТИ В СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ

© 2017

*А.В. Степанчукова*, инженер-металловед лаборатории «Металловедение и термическая обработка»

*Е.Ю. Приймак*, кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией «Металловедение и термическая обработка»  
ОАО «Завод бурового оборудования», Оренбург (Россия)

*И.Л. Яковлева*, доктор технических наук, главный научный сотрудник  
*Н.А. Терещенко*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения  
Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

*Е.Ю. Чирков*, кандидат технических наук,  
специалист II уровня по разрушающему контролю лаборатории «Надежность»  
АНО «Технопарк ОГУ», Оренбург (Россия)

**Ключевые слова:** бурильная труба; карбонитрация; отпускная хрупкость; порог хладноломкости; ударная вязкость; 30ХГСА; 40ХН2МА; 38ХМА; 40Г2; Drillmax 850; ХЈУ850.

**Аннотация:** Последние 10–15 лет в мировой промышленной практике отмечается высокий интерес к процессам низкотемпературного насыщения железных сплавов азотом или совместно азотом и углеродом. Именно таким методом является быстро прогрессирующая технология – карбонитрация. Суть процесса заключается в одновременном насыщении стальной поверхности азотом и углеродом в расплаве солей при температуре 540...580 °С. В результате карбонитрации на поверхности изделия достигается высокая твердость, повышается износостойкость и усталостная прочность, возрастает сопротивление коррозии.

Однако, несмотря на существенные достижения в этом направлении, многие вопросы до настоящего времени не выяснены или остаются предметом дискуссий, в том числе влияние температуры нагрева под карбонитрацию на возможность проявления обратимой отпускной хрупкости в среднеуглеродистых легированных сталях. В статье изучено воздействие карбонитрации на свойства основного металла, в частности на его склонность к хрупкому разрушению. Выявлено изменение положения порога хладноломкости сталей марок 30ХГСА, 40ХН2МА, 38ХМА и 40Г2 как в исходном состоянии, так и после воздействия карбонитрации. Методом фрактографического анализа установлен характер разрушения исследуемых сталей и произведена оценка доли вязкой составляющей в изломе ударных образцов. Показано, что склонность к проявлению отпускной хрупкости в исследуемых сталях различна и в значительной степени зависит от их химического состава. Приведены результаты полевых испытаний бурильных труб с резьбовыми соединениями из стали 30ХГСА, 40ХН2МА, 38ХМА и 40Г2 в различных климатических зонах. Рекомендованы стали для изготовления замковых соединений бурильных труб с поверхностным упрочнением резьбы методом карбонитрации для работы в условиях низких температур.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее прогрессивным методом геологоразведки на твердые полезные ископаемые является метод бурения трубами со съемными керноприемниками (ССК), известный за рубежом как Wireline [1–3]. Самым ответственным элементом труб линейки Wireline является замковое соединение. К этому элементу бурильной трубы предъявляются наиболее жесткие требования по прочности, стойкости к воздействию знакопеременных нагрузок и износостойкости резьбы [4; 5]. С целью поверхностного упрочнения резьбовых соединений бурильных труб на ОАО «Завод бурового оборудования» (г. Оренбург) используют химико-термическую обработку – карбонитрацию [6–11]. В предыдущей работе [12] проведена оценка эффективности применения процесса карбонитрации для поверхностного упрочнения бурильных труб различных марок сталей. Показано, что в среднеуглеродистых легированных сталях формируется слой из карбонитридных фаз, толщина которого определяется системой легирования стали и продолжительностью изотермической выдержки при карбонитрации; резьбовые соединения из них выдерживают более 4–5 млн циклов до разрушения при изгибающем моменте 770 Н·м.

Условия работы бурильных труб в геологоразведочной отрасли включают необходимость эксплуатации при отрицательных температурах [13]. Между тем температура изотермической выдержки при нагреве под карбонитрацию располагается в температурном интервале проявления обратимой отпускной хрупкости среднеуглеродистых легированных сталей [14]. Поэтому термический цикл карбонитрации является дополнительным отпуском, который может оказывать влияние на хладостойкие свойства основного металла трубы.

Цель работы – изучение влияния термического цикла нагрева под карбонитрацию на ударную вязкость и характер разрушения при отрицательных температурах среднеуглеродистых легированных сталей, используемых для изготовления резьбовых соединений бурильных труб.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на среднеуглеродистых сталях 30ХГСА, 40ХН2МА отечественного производства, предназначенных для изготовления замковых соединений бурильных труб, и сталей Drillmax 850 производства Salzgitter Mannesmann (Франция), ХЈУ850 производства Ningbo New-era steel Tube Co. (Китай), которые

использовались для изготовления цельных бурильных труб ввиду высоких механических свойств исходных заготовок до карбонитрации. Сталь Drillmax 850 соответствует российскому аналогу марки 40Г2, а сталь ХЖУ850 – аналогу марки 38ХМА. Химический состав исследуемых сталей приведен в таблице 1.

Термическая обработка сталей 30ХГСА, 40ХН2МА и 38ХМА включала закалку и высокий отпуск. Заготовка из стали 40Г2 подвергалась холодной деформации в несколько проходов с последующим отжигом в проходных печах при температуре 550 °С в течение 10 мин. Часть заготовок подвергалась дополнительной термической обработке, соответствующей режиму карбонитрации. Термический цикл карбонитрации осуществляли в расплаве солей 80 % K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 20 % KCNO при температуре 560 °С в течение 20 мин.

Механические свойства при растяжении определяли по ГОСТ 1497-84 [15]. Твердость измеряли на твердомере ТК-14-250 методом Роквелла [16]. Испытания на ударный изгиб проводили на маятниковом копре RESIL 300J производства фирмы CEAST при температурах 20, 0, -20, -40 и -60 °С на образцах размером 5×10×55 мм с U-надрезом согласно ГОСТ 9454-78 [17]. Образцы из сталей 40Г2 были вырезаны из трубной заготовки диаметром 70 мм и толщиной стенки 5 мм вдоль направления деформации.

Фрактографический анализ изломов проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL-6000 NeoScore производства фирмы JEOL. Долю хрупкой составляющей в изломах оценивали методом эталонной сетки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Механические свойства исследуемых сталей при комнатной температуре приведены в таблице 2. Термическая обработка обеспечивает сталям 30ХГСА, 40ХН2МА, 38ХМА и 40Г2 примерно одинаковый комплекс прочностных и пластических свойств.

На рис. 1 представлены результаты определения величины KCU после испытаний на ударный изгиб. Из

всех исследуемых марок сталей сталь 30ХГСА имеет наиболее высокие значения ударной вязкости при комнатной температуре, равные в среднем KCU=120 Дж/см<sup>2</sup>. Однако с понижением температуры до -60 °С величина ударной вязкости материала уменьшается практически в два раза, достигая значения 65 Дж/см<sup>2</sup>. Воздействие повторного нагрева при карбонитрации не оказывает значительного влияния на ударную вязкость исследуемой стали по сравнению с исходным состоянием (рис. 1 а).

Для сталей 40ХН2МА и 38ХМА характерно сохранение запаса вязкости материала при отрицательных температурах (рис. 1 б, 1 в). Величина ударной вязкости при комнатной температуре находится в интервале 92...117 Дж/см<sup>2</sup>, с понижением температуры испытаний изменяется незначительно (в среднем на 7...10 %) и при -60 °С составляет 81...109 Дж/см<sup>2</sup>. Повторный нагрев, так же как и в стали 30ХГСА, практически не влияет на характер изменения ударной вязкости с температурой.

Иная картина наблюдается со сталью 40Г2. При понижении температуры испытания с +20 до -60 °С величина ударной вязкости в исходном состоянии изменяется довольно значительно (на 20 %), с 89...81 Дж/см<sup>2</sup> до 68...81 Дж/см<sup>2</sup>. Повторный нагрев стали 40Г2 при карбонитрации оказывает наиболее негативное воздействие по сравнению с двумя предыдущими сталями: вне зависимости от температуры испытания значения ударной вязкости уменьшаются на 20–25 % (рис. 1 г).

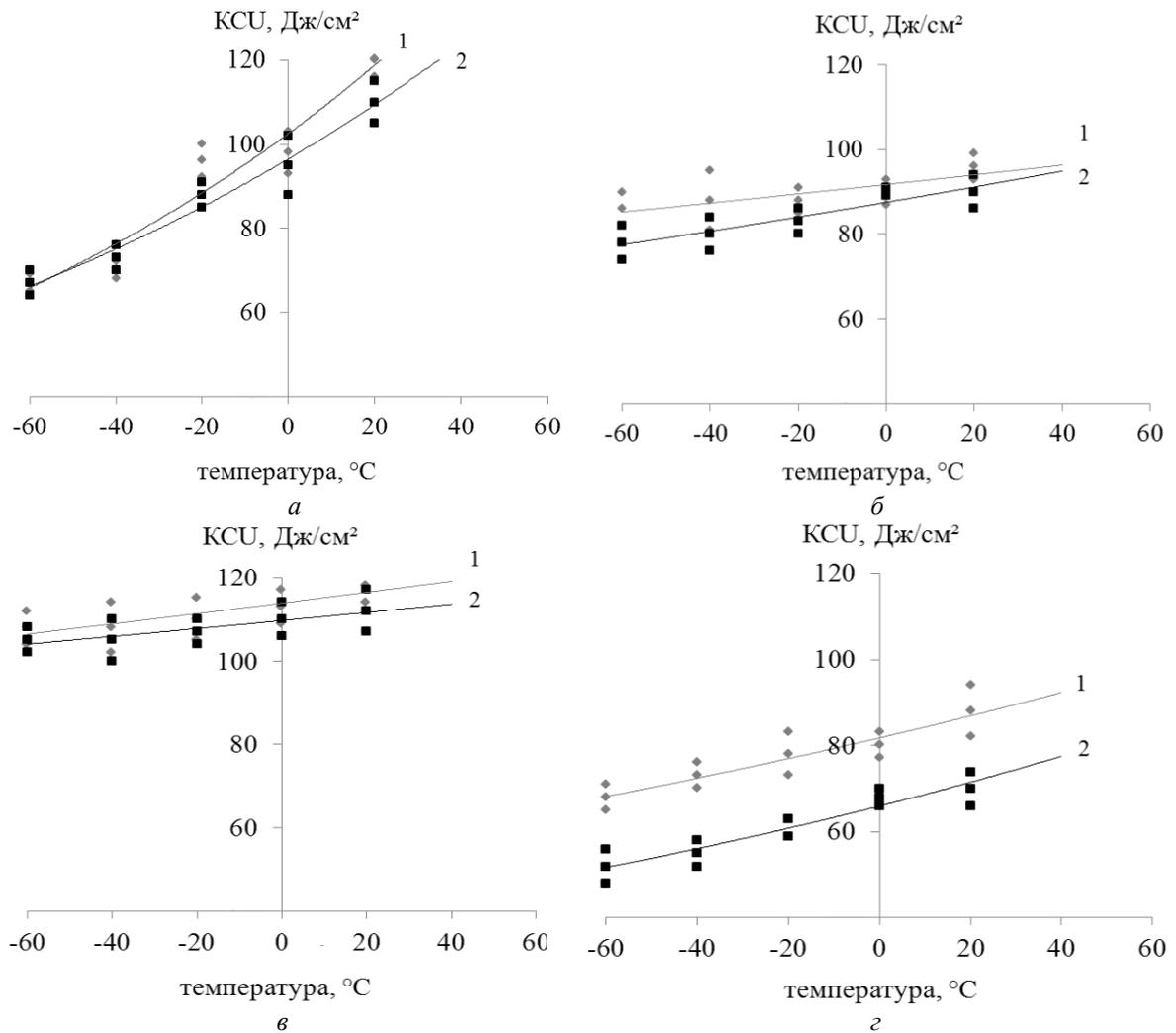
Наиболее детально выявить характер разрушения исследуемых сталей позволяет метод микрофрактографического анализа (рис. 2–5) [18], на основе которого были построены графические зависимости изменения доли вязкой составляющей в изломах от температуры испытаний (рис. 6). Анализ изломов стали 30ХГСА в исходном состоянии показал (рис. 2 а), что при комнатной температуре наблюдается преимущественно вязкий характер (более 90 % от площади). По мере понижения температуры испытания наряду с вязкой составляющей в изломе появляются участки, состоящие из фасеток межзеренного скола (рис. 3 в, 3 д); доля вязкого разрушения уменьшается и составляет 50–55 % и 20–25 %

Таблица 1. Химический состав исследуемых сталей, масс. %

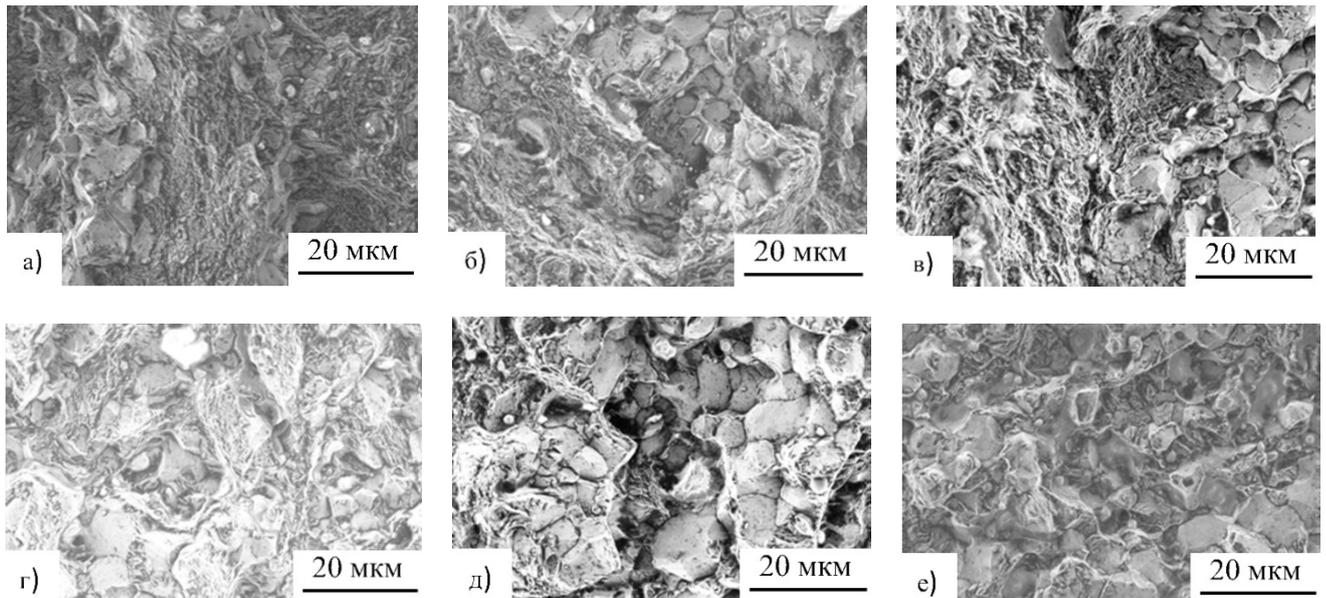
Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	Ni
30ХГСА	0,31	1,20	1,10	1,10	–	0,004	0,008	<0,03
40ХН2МА	0,39	0,22	0,65	0,69	0,17	0,013	0,009	1,29
38ХМА	0,38	0,25	0,53	0,93	0,21	0,009	0,011	0,05
40Г2	0,40	0,25	1,65	0,18	0,02	0,004	0,008	0,03

Таблица 2. Механические свойства сталей в исходном состоянии при температуре испытания +20 °С

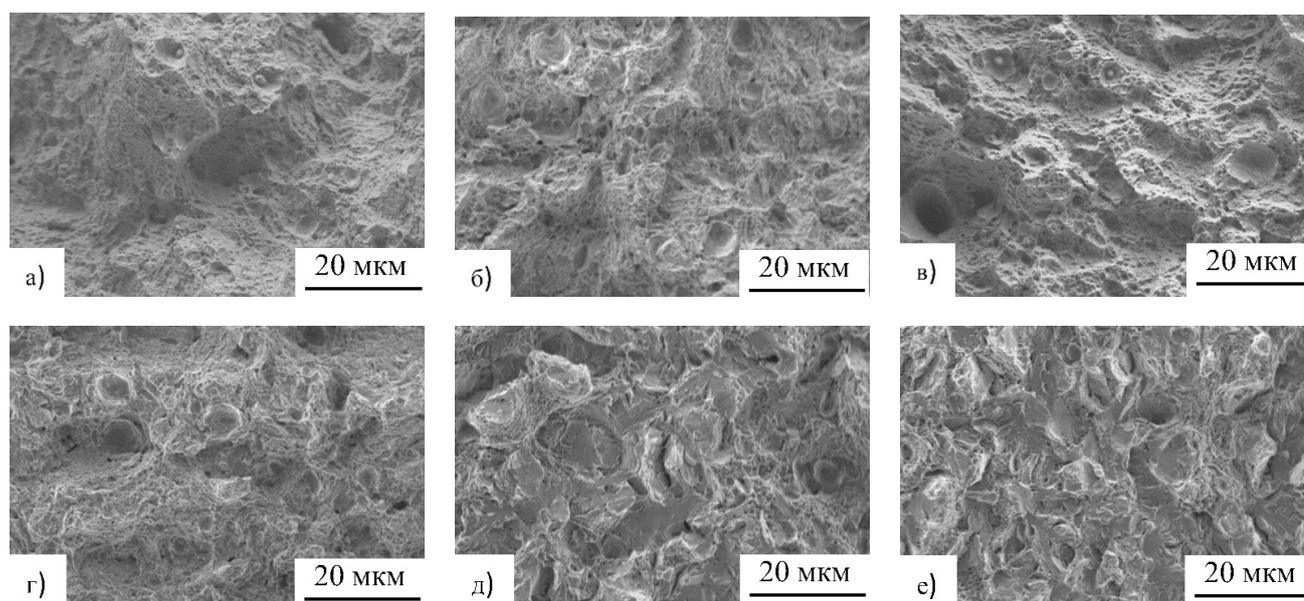
Марка стали	Термическая обработка	HRC	σ <sub>02</sub> , МПа	σ <sub>B</sub> , МПа	δ <sub>5</sub> , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
30ХГСА	закалка 890 °С/масло, отпуск 600 °С/вода	32	900	1010	11	120
40ХН2МА	закалка 850 °С/масло, отпуск 580 °С/вода	36	1140	1250	9	92
38ХМА	закалка 850 °С/вода, отпуск 580 °С/воздух	33	950	1019	10	117
40Г2	отжиг 550 °С (10 мин)	30	1050	1130	12	89



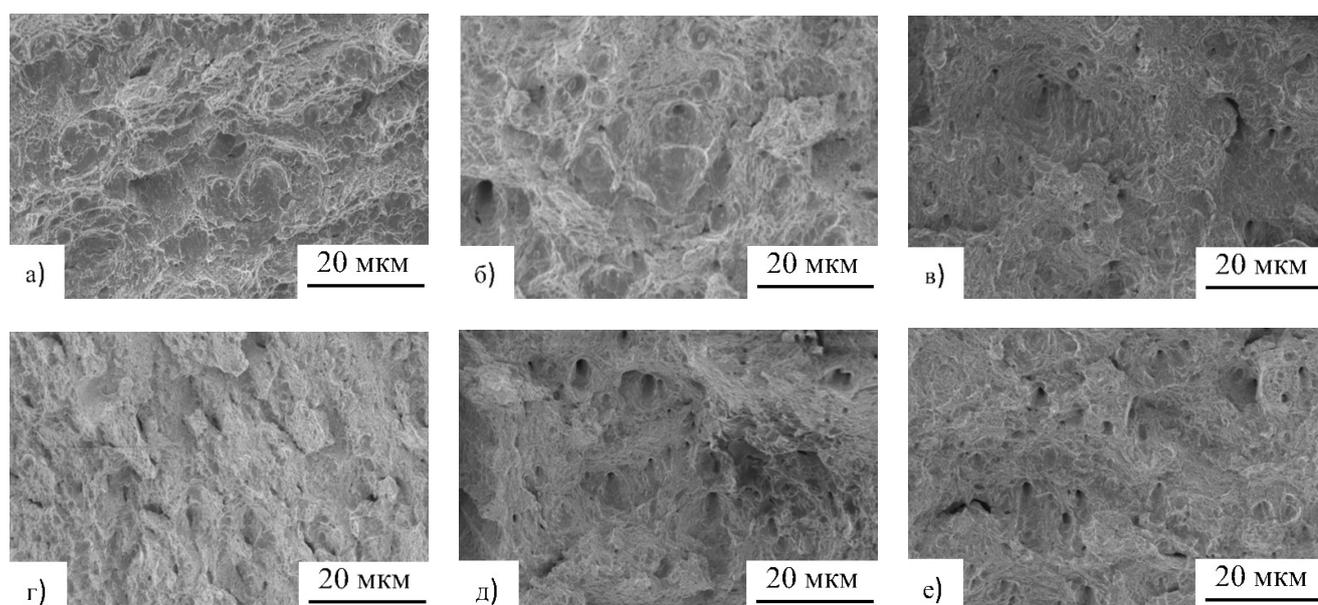
**Рис. 1.** Ударная вязкость исследуемых сталей после испытаний на ударный изгиб в интервале температур +20...-60 °С: а – 30ХГСА; б – 40ХН2МА; в – 38ХМА; г – 40Г2 (1 – без карбонитрации; 2 – карбонитрация 20 мин)



**Рис. 2.** Микрофрактограммы поверхности разрушения стали 30ХГСА в исходном состоянии (а, в, д) и после карбонитрации (б, г, е): а, б –  $t_{исп} = 20$  °С; в, г –  $t_{исп} = -20$  °С; д, е –  $t_{исп} = -60$  °С



**Рис. 3.** Микрофрактограммы поверхности разрушения стали 40XH2MA в исходном состоянии (а, в, д) и после карбонитрации (б, г, е): а, б –  $t_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; в, г –  $t_{исп}=-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; д, е –  $t_{исп}=-60\text{ }^{\circ}\text{C}$



**Рис. 4.** Микрофрактограммы поверхности разрушения стали 38ХМА в исходном состоянии (а, в, д) и после карбонитрации (б, г, е): а, б –  $t_{исп}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; в, г –  $t_{исп}=-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; д, е –  $t_{исп}=-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно (рис. 6 а). Поскольку при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  доля хрупкого разрушения составляет примерно 50 %, эту температуру можно принять за порог хладноломкости стали 30ХГСА в исходном состоянии [19]. После карбонитрации данной стали при всех температурах испытания доля хрупкого разрушения по границам зерен увеличивается (рис. 2 б, 2 г, 2 е). Так, при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  вязкое разрушение занимает 30–35 % поверхности излома, что свидетельствует о повышении порога хладноломкости исследуемой стали в сравнении с исходным состоянием. При температуре испытания  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  доля вязкого разрушения достигает 25 % (рис. 6 б).

Процесс разрушения образцов из стали 40ХН2МА и 38ХМА (рис. 3, рис. 4) сопровождается возникнове-

нием ямочного микрорельефа при температурах испытания от комнатной до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  включительно. При температуре  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в изломе начинают появляться хрупкие участки площадью порядка 30–35 %. После нагрева под карбонитрацию характер разрушения исследуемой стали остается прежним, при  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  доля вязкой составляющей на поверхности излома составляет более половины (65–70 %). Следовательно, положение порога хладноломкости данных сталей как в исходном состоянии, так и после нагрева под карбонитрацию находится при более низких криогенных температурах (рис. 6 а, 6 б).

В исходном состоянии при комнатной температуре разрушение образцов из стали 40Г2 развивается преимущественно по вязкому механизму (рис. 5 а). При

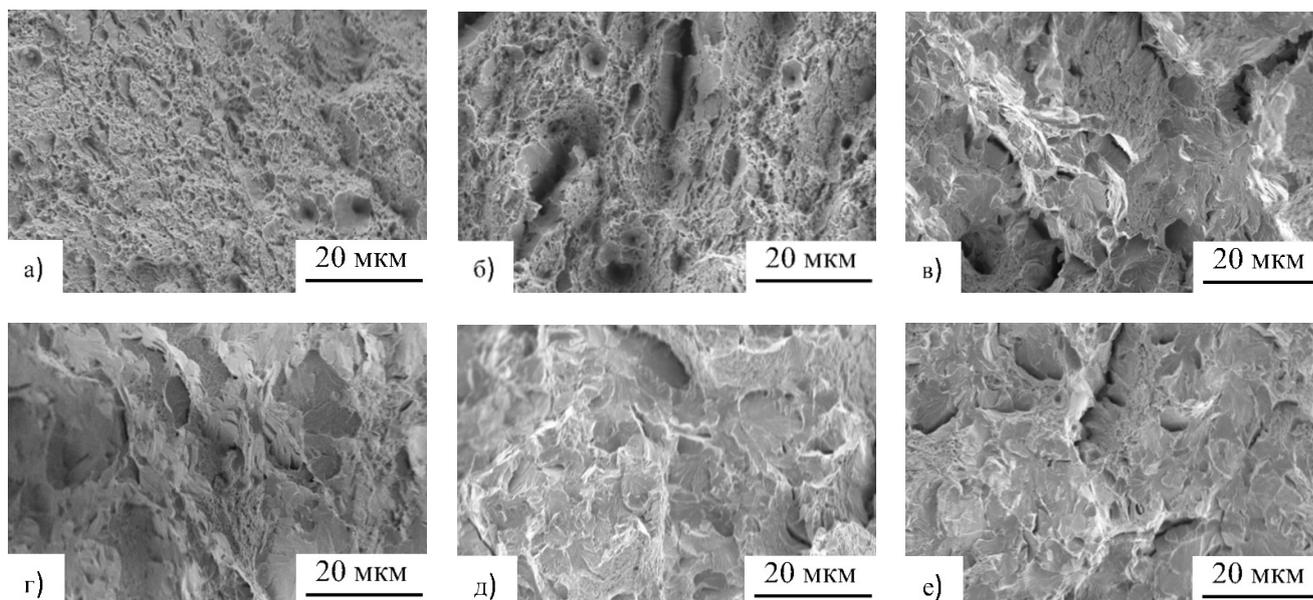


Рис. 5. Микрофрактограммы поверхности разрушения стали 40Г2 в исходном состоянии (а, в, д) и после карбонитрации (б, г, е): а, б –  $t_{исп} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; в, г –  $t_{исп} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; д, е –  $t_{исп} = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$

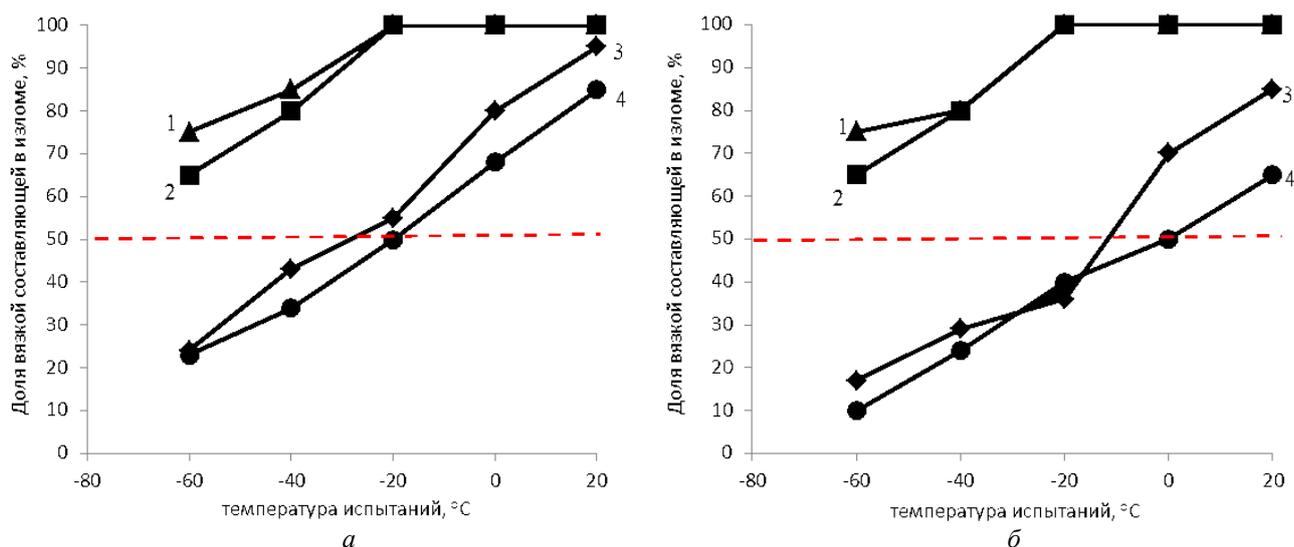


Рис. 6. Зависимость доли вязкой составляющей в изломе от температуры испытаний: а – без карбонитрации; б – карбонитрация 20 мин (1 – 38ХМА; 2 – 40ХН2МА; 3 – 30ХГСА; 4 – 40Г2)

температуре испытания  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  характер разрушения исследуемой стали смешанный (рис. 5 в), при этом доля хрупкого разрушения в изломе составляет 45–50 %, что соответствует порогу хладноломкости. С понижением температуры до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  излом практически полностью хрупкий (85–90 %) (рис. 5 д, рис. 6 а).

Воздействие нагрева под карбонитрацию проявляется в том, что доля хрупкой составляющей в изломе заметно увеличивается уже при комнатной температуре испытания (рис. 5 б) и занимает примерно треть поверхности разрушения. При  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  эта величина составляет 60 %, следовательно, порог хладноломкости сместился в сторону более высоких температур (рис. 6 б). При  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  признаки пластической деформации в изломе практически отсутствуют, доля вязкой составляющей близка к нулю; поверхность разрушения образована фасетками межзеренного скола, разделен-

ными многочисленными вторичными микротрещинами (рис. 5 г, 5 е).

При обобщении результатов измерения ударной вязкости и данных микрофрактографического анализа можно отметить, что среди исследуемых сталей обратимой отпускной хрупкости подвержены стали марки 30ХГСА и 40Г2, проявление которой усиливается после нагрева под карбонитрацию. Известно [14; 20], что данное явление обусловлено сегрегацией фосфора по границам зерен и сопровождается увеличением доли хрупкой составляющей в изломе при фиксированной температуре испытания и повышением температуры вязко-хрупкого перехода. В исследуемых сталях массовое содержание фосфора практически одинаково и не превышает 0,009 %, поэтому основным фактором, определяющим проявление отпускной хрупкости, является легирование такими элементами, как марганец и кремний [21].

**Таблица 3.** Температура вязко-хрупкого перехода сталей  $T_k$  после различных обработок, °С

Марка стали	В исходном состоянии	После нагрева под карбонитрацию
30ХГСА	-20	$-20 < T_k < 20$
40ХН2МА	$T_k < -60$	$T_k < -60$
38ХМА	$T_k < -60$	$T_k < -60$
40Г2	-20	$-20 < T_k < 20$

В исследуемых сталях отчетливо проявляется различная склонность к отпускной хрупкости в зависимости от системы легирования при почти равном содержании фосфора (таблица 3). Температура вязко-хрупкого перехода  $T_k$  сталей 30ХГСА и 40Г2 повышается от  $-20$  °С в исходном состоянии до  $-20$  °С  $< T_k < 20$  °С после нагрева под карбонитрацию, в то время как  $T_k$  для сталей 40ХН2МА и 38ХМА после всех обработок находится ниже  $-60$  °С.

Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты соответствуют известным представлениям о природе отпускной хрупкости [14]. Легирование сталей 30ХГСА и 40Г2 кремнием и марганцем повышает степень обогащения границ зерен фосфором и усиливает проявление обратимой отпускной хрупкости. Одной из возможных причин взаимосвязанного охрупчивающего влияния кремния, марганца и фосфора может быть повышение энергии взаимодействия атомов фосфора с границами зерен в присутствии на границах марганца или кремния. Еще одна причина охрупчивающего действия хрома и марганца – кинетическая: эти элементы могут, не изменяя равновесную концентрацию примесей типа фосфора на границах зерен, ускорять ее достижение во времени [22; 23]. Применительно к исследуемым сталям 30ХГСА и 40Г2, для которых продолжительность изотермической выдержки при нагреве под карбонитрацию невелика (20 мин), это причина представляется значимой. Негативное влияние фосфора в сталях 40ХН2МА и 38ХМА ослаблено наличием в ее химическом составе молибдена [23].

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Исходя из результатов проведенных исследований, можно заключить, что воздействие карбонитрации, как финишной операции, применяемой для упрочнения резьбы буровых труб, может оказывать влияние на свойства основного металла ввиду развития процессов отпускной хрупкости. Особенно заметно это наблюдается на примере стали 40Г2, в которой происходит дополнительное снижение величины ударной вязкости и образование участков межзеренного хрупкого разрушения. В стали 30ХГСА воздействие нагрева под карбонитрацию также заметно, несмотря на высокие показатели значений ударной вязкости в интервале температур от 20 до  $-20$  °С, в изломах наблюдаются участки хрупкого межзеренного микрорельефа, свидетельствующие об ослаблении границ, усиливающимся вследствие выдержки в среде карбонитрации.

Применительно к сталям 40ХН2МА и 38ХМА нагрев под карбонитрацию на характер разрушения влияния не оказал; данная сталь после всех циклов обработки демонстрирует удовлетворительные показатели ударной вязкости и благоприятную картину вязкого

разрушения без признаков охрупчивания вплоть до температуры  $-60$  °С.

Полевые испытания труб показали, что в зимний период на территории России буровые трубы из стали 40Г2 были отбракованы ввиду преждевременного образования продольных трещин, в то время как в условиях тропически жаркого климата в странах Юго-Западной Азии они успешно эксплуатируются. По результатам полевых испытаний в районах Крайнего Севера на территории России было отбраковано около 30 % от партии буровых труб из стали 30ХГСА ввиду внезапного разрушения резьбовой части, при этом преждевременных поломок буровых труб с замковыми соединениями из стали 40ХН2МА и 38ХМА выявлено не было.

Таким образом, стали 40ХН2МА и 38ХМА могут быть рекомендованы для изготовления замковых соединений буровых труб, применяемых в условиях глубокого Севера, а сталь 30ХГСА – в условиях климатического холода не ниже  $-20$  °С при условии ее карбонитрации в течение 20 мин. Буровые трубы из стали 40Г2 рекомендуется использовать исключительно в летний период, ввиду высокого порога хладноломкости.

*Работа выполнена при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» («Фонд содействия инновациям») в рамках конкурсной программы «УМНИК-2016» (договор № 12274ГУ/2017).*

*Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке проекта УРО РАН 15-15-2-16.*

*Статья подготовлена по материалам докладов участников VIII Международной школы «Физическое материаловедение» с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 3–12 сентября 2017 г.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приймак Е.Ю., Зеленин А.П., Степанчукова А.В. Опыт применения карбонитрации для повышения долговечности резьбовых соединений буровых труб в условиях ОАО «Завод бурового оборудования» // Технология упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: материалы 15-й Международ. науч.-практ. конференции. СПб., 2013. С. 245–250.
2. Мусанов А.А. Совершенствование бурения скважин алмазными коронками. Саарбрюккен: LAP LAMBERT, 2016. 60 с.
3. Музапаров М.Ж. Направленное бурение. Т. 4. Детерминированная технология. Снаряды со съёмными керноприемниками. Алматы: КазНТУ, 2011. 204 с.
4. Семин В.И. Поверхностное упрочнение замковой резьбы методом карбонитрации // Нефтяное хозяйство. 2004. № 12. С. 104–106.
5. Приймак Е.Ю. Характеристика буровых труб и обзор трубных заготовок, применяемых в современном

- геологоразведочном бурении // Черная металлургия. 2017. № 2. С. 70–76.
6. Прокошкин Д.А. Химико-термическая обработка металлов – карбонитрация. М.: Металлургия, 1984. 240 с.
  7. Чаттерджи-Фишер Р., Эйзелл Ф.-В., Хоффманн Р., Лидтке Д., Малленер Х., Рембгес В., Шрайнер А., Велкер Г. Азотирование и карбонитрирование. М.: Металлургия, 1990. 280 с.
  8. Прженосил Б. Нитроцементация. Л.: Машиностроение, 1969. 212 с.
  9. Цих С.Г., Гришин В.И., Супов А.В., Лисицкий В.Н., Глебова Ю.А. Развитие процесса карбонитрации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 9. С. 7–12.
  10. Приймак Е.Ю., Шеин Е.А., Степанчукова А.В. Сравнительный анализ структуры и свойств замковых соединений бурильных труб, упрочненных посредством закалки ТВЧ и карбонитрации // Технология металлов. 2015. № 5. С. 18–26.
  11. Беллас Л., Кастро Ж., Мера Л., Миер Д.Л., Гарсия А., Варела А. Влияние карбонитрации в соляной ванне по схеме QPQ на микроструктуру и служебные свойства нержавеющей стали 321 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 6. С. 58–65.
  12. Приймак Е.Ю., Степанчукова А.В., Яковлева И.Л., Терешенко Н.А. Влияние карбонитрации для упрочнения резьбовых соединений бурильных труб из среднеуглеродистых легированных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 2. С. 38–44.
  13. Стрик Ю.Н., Ильяш В.В. Бурение разведочных скважин. Воронеж: ВГУ, 2004. 62 с.
  14. Утевский Л.М., Гликман Е.Э., Карк Г.С. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. М.: Металлургия, 1987. 222 с.
  15. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 1986. 22 с.
  16. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. М.: Изд-во стандартов, 1991. 10 с.
  17. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. М.: Изд-во стандартов, 1990. 10 с.
  18. Герасимова Л.П., Гук Ю.П. Контроль качества конструкционных материалов. М.: Интернет Инжиниринг, 2010. 848 с.
  19. Штремель М.А. Разрушение. Кн. 2. Разрушение структур. М.: МИСиС, 2015. 975 с.
  20. Брайент К.Л., Бенерджи С.К. Межзеренное разрушение сплавов железа в неагрессивных средах // Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов. М.: Металлургия, 1988. С. 29–58.
  21. Устиновщиков Ю.И., Шабанова И.Н., Сапухин В.А., Тапезников В.А. Охрупчивание легированных сталей при отпуске // Физика металлов и металловедение. 1977. Т. 44. № 2. С. 336–344.
  22. Smith J.F., Reynolds J.H., Southworth H.N. Role of Mn in the temper embrittlement of A3,5Ni-Cr-Mo-V steel // Acta Metallurgica. 1980. Vol. 28. № 11. P. 1555–1564.
  23. Yu J., McMahon C.J. The effect of composition and carbide precipitation on temper embrittlement of 2,25Cr-1Mo Steel: Part 1. Effects of P and Sn // Metallurgical Transactions A. 1980. Vol. 11. № 2. P. 277–289.
  24. Дробышевская И.С., Ковалев А.И., Сергеева Т.К., Литвиненко Д.А. Сегрегация примесей, отпускная хрупкость и водородное охрупчивание стали 30ХНМА с различным содержанием молибдена // Металловедение и термическая обработка металлов. 1995. № 5. С. 21–24.

## REFERENCES

1. Priymak E.Yu., Zelenin A.P., Stepanchukova A.V. The experience of application of carbonization to improve the durability of threaded connections of drill pipes in the conditions of ZBO Drill Industries. *Materiyaly 15-oy Mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii "Tekhnologiya uprochneniya, naneseniya pokrytiy i remonta: teoriya i praktika"*. Sankt Petersburg, 2013, pp. 245–250.
2. Musanov A.A. *Sovershenstvovanie bureniya skvazhin almaznymi koronkami* [Improving the drilling of holes with diamond crowns]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Publ., 2016. 60 p.
3. Muzaparov M.Zh. *Napravlennoe burenie. T. 4. Determinirovannaya tekhnologiya. Snaryady so s'emnymi kernopriemnikami* [Directional drilling. Vol. 4. Deterministic technology. Shells with removable core receivers]. Almaty, KazNTU Publ., 2011. 204 p.
4. Semin V.I. Surface hardening of tool-joint thread by a method of carbonitration. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2004, no. 12, pp. 104–106.
5. Priymak E.Yu. Characteristics of drill pipes and an overview of pipe billets used in modern geological prospecting. *Chernaya metallurgiya*, 2017, no. 2, pp. 70–76.
6. Prokoshkin D.A. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov – karbonitratsiya* [Chemical-thermal treatment of metals – carbonitration]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 240 p.
7. Chatterjee-Fischer R., Eysell F.-W., Hoffmann R., Liedtke D., Mallener H., Rembges W., Schreiner A., Welker G. *Azotirovanie i karbonitrirovanie* [Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen. Nitrieren und Nitrocarburieren]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 280 p.
8. Przhenosil B. *Nitrotsementatsiya* [Nitrocarburization]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1969. 212 p.
9. Tsikh S.G., Lisitskii V.N., Glebova Y.A., Grishin V.I., Supov A.V. Advancement of the process of carbonitriding. *Metal Science and Heat Treatment*, 2011, vol. 52, no. 9-10, pp. 408–412.
10. Priymak E.Yu., Dhein E.A., Stepanchukova A.V. Comparative analysis of structure and properties of lock joints of drill pipes strengthened by method of induction hardening and carbonitriding. *Tekhnologiya metallov*, 2015, no. 5, pp. 18–26.
11. Bellas L., Castro G., Mera L., Mier J.L., Garcia A., Varela A. Effect QPQ salt bath nitrocarburizing on the microstructure and performance of stainless steel 321. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2016, no. 6, pp. 58–65.
12. Priymak E.Yu., Stepanchukova A.V., Yakovleva I.L., Tereshchenko N.A. Use of carbonitriding for strengthening threaded joints of drill pipes from medium-carbon

- alloy steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2015, no. 2, pp. 38–44.
13. Strik Yu.N., Ilyash V.V. *Burenie razvedochnykh skvazhin* [Drilling of exploratory wells]. Voronezh, VGU Publ., 2004. 62 p.
  14. Utevskiy L.M., Glikman E.E., Kark G.S. *Obratimaya otpusknaya khrupkost stali i splavov zheleza* [Reversible temper brittleness of steel and iron alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 222 p.
  15. GOST 1497-84. *Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie* [Metals. Methods of tension test]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1986. 22 p.
  16. GOST 9013-59. *Metally. Metod izmereniya tverdosti po Rokvellu* [Metals. Method of measuring Rockwell hardness]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1991. 10 p.
  17. GOST 9454-78. *Metally. Metod ispytaniya na udarniy izgib pri ponizhennykh, komnatnoy i povyshennykh temperaturakh* [Metals. Methods for testing the impact strength at low, room and high temperature]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1990. 10 p.
  18. Gerasimov L.P., Guk Yu.P. *Kontrol kachestva konstruktsionnykh materialov* [Quality control of construction materials]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2010. 848 p.
  19. Shtremel M.A. *Razrushenie. Kn. 2. Razrushenie struktur* [Destruction. Book 2. Destruction of structures]. Moscow, MISiS Publ., 2015. 975 p.
  20. Brayent K.L., Benerjee S.K. Intergranular destruction of iron alloys in non-corrosive media. *Okhrupchivanie konstruktsionnykh staley i splavov*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988, pp. 29–58.
  21. Ustinovschikov Y.I., Shabanova I.N., Sapukhin V.A., Trapeznikov V.A. Embrittlement of alloy steels during tempering. *Physics of metals and metallography*, 1977, vol. 44, no. 2, pp. 91–99.
  22. Smith J.F., Reynolds J.H., Southworth H.N. Role of Mn in the temper embrittlement of A3,5Ni-Cr-Mo-V steel. *Acta Metallurgica*, 1980, vol. 28, no. 11, pp. 1555–1564.
  23. Yu J., McMahon C.J. The effect of composition and carbide precipitation on temper embrittlement of 2,25Cr-1Mo Steel: Part 1. Effects of P and Sn. *Metallurgical Transactions A*, 1980, vol. 11, no. 2, pp. 277–289.
  24. Drobyshevskaya I.S., Kovalev A.I., Sergeeva T.K., Litvinenko D.A. Impurity segregation, temper brittleness and hydrogen embrittlement of steel type 30HkNMA with various molybdenum contents. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1995, no. 5, pp. 21–24.

#### THE ASSESSMENT OF IMPACT OF CARBONITRIDING ON THE LOCATION OF COLD-BRITTLENESS THRESHOLD IN THE MEDIUM-CARBON ALLOY STEELS

© 2017

**A.V. Stepanchukova**, engineer-metallurgist of Laboratory “Metallurgical science and heat treatment”

**E.Yu. Priymak**, PhD (Engineering), Head of Laboratory “Metallurgical science and heat treatment”

*ZBO Drill Industries Inc., Orenburg (Russia)*

**I.L. Yakovleva**, Doctor of Sciences (Engineering), chief researcher

*N.A. Tereshchenko*, PhD (Engineering), senior researcher

*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*

**E.Yu. Chirkov**, PhD (Engineering), level II destructive testing specialist of Laboratory “Reliability”

*ANO “Technopark of OSU”, Orenburg (Russia)*

**Keywords:** drill pipe; carbonitriding; temper embrittlement; cold-brittleness threshold; impact strength; 30CrMnSi(high quality); 40CrNi2Mo(high quality); 38CrMo(high quality); 40Mn2; Drillmax 850; XJY850.

**Abstract:** Last 10–15 years, in the world industrial practice, a great interest for the processes of low-temperature saturation of iron alloys with the nitrogen or with the nitrogen and carbon is observed. The galloping technology – carbonitriding – is one of such methods. The key point of the process is in the simultaneous saturation of steel surface with the nitrogen and carbon in the molten salts at a temperature of 540...580 °C. In the result of carbonitriding, high hardness is achieved on the product surface, and the wear-resistance, fatigue strength and stain-resistance increase.

However, despite the significant achievements in this direction, many issues are still not clarified or remain a subject of discussions, including the influence of heating temperature for carbonitriding on the possibility of the reversible temper brittleness manifestation in the medium-carbon alloy steels. In this paper, the impact of carbonitriding on the properties of base metal, in particular, its tendency to brittle fracture was studied. The authors determined the change of location of cold-brittleness threshold in the 30CrMnSi(high quality), 40CrNi2Mo(high quality), 38CrMo(high quality), and 40Mn2 steels both in the initial condition and after carbonitriding. Using the method of fractographic analysis, the authors determined the nature of fracture of steel study specimens and evaluated the shear area fraction of impact specimens. It is shown, that the tendency to temper embrittlement in the study steels is different and depends significantly on their chemical composition. The paper presents the results of field tests of drill pipes with screw joints made of 30CrMnSi(high quality), 40CrNi2Mo(high quality), 38CrMo(high quality), and 40Mn2 steels in various climatic zones. The authors recommend steels to produce tool joints for drill pipes using the carbonitriding methods for the thread face-hardening for the operation at low temperatures.