

Оценка эффективности применения процесса карбонитрации для упрочнения резьбовых соединений бурильных труб из заготовок зарубежного производства

© 2020

Степанчукова Анна Викторовна^{*1,3}, кандидат технических наук,
ведущий инженер-металловед лаборатории «Металловедение и термическая обработка»
Приймак Елена Юрьевна^{1,2,4}, кандидат технических наук,
заведующий лабораторией «Металловедение и термическая обработка»

¹ОАО «Завод бурового оборудования», Оренбург (Россия)

²Оренбургский государственный университет, Оренбург (Россия)

*E-mail: annastep56@zbo.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1050-3504>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4571-2410>

Аннотация: На сегодняшний день одним из эффективных способов поверхностного упрочнения сталей и сплавов является метод химико-термической обработки – карбонитрация – одновременное насыщение стальной поверхности азотом и углеродом в расплаве солей при температуре 540–580 °С. Данный способ поверхностного упрочнения позволяет обеспечить высокие эксплуатационные характеристики упрочненного слоя, однако влияние карбонитрации на свойства основного металла, неизбежно подвергающегося нагреву в процессе насыщения, остается неизученным. Это особенно актуально для сталей, у которых температурный интервал 540–560 °С реализации технологического процесса совпадает с интервалом проявления отпускной хрупкости. В работе апробирована технология карбонитрации для упрочнения резьбовых соединений бурильных труб для комплексов со съемным керноприемником (ССК). Изучена кинетика формирования карбонитрированного слоя на сталях зарубежных марок Drillmax 950, 4130 и 1541. Рассмотрено влияние процесса карбонитрации на механические свойства исследуемых сталей. Произведен анализ строения изломов сталей Drillmax 950, 4130 и 1541 до и после карбонитрации. Установлено, что влияние карбонитрации в стали Drillmax 950 проявляется более заметно, в виде развития процессов отпускной хрупкости. Произведена оценка зависимости эксплуатационных характеристик готового резьбового соединения от продолжительности процесса карбонитрации. Показано, что высоким уровнем усталостной прочности как до, так и после карбонитрации обладают резьбовые соединения из стали 1541. Сталь марки 1541 рекомендована для изготовления замковых соединений бурильных труб с поверхностным упрочнением резьбы методом карбонитрации.

Ключевые слова: бурильная труба; резьбовое соединение; карбонитрация; ударная вязкость; отпускная хрупкость; циклическая долговечность; предельный момент затяжки.

Благодарности: Статья подготовлена по материалам докладов участников IX Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2019) с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 9–13 сентября 2019 года.

Для цитирования: Степанчукова А.В., Приймак Е.Ю. Оценка эффективности применения процесса карбонитрации для упрочнения резьбовых соединений бурильных труб из заготовок зарубежного производства // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 3. С. 26–37. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-3-26-37.

ВВЕДЕНИЕ

Современный метод бурения труб со съемными керноприемниками (ССК), за рубежом известный как “Wireline”, вытесняет все прочие методы геологоразведки на твердые полезные ископаемые, поскольку в 2,5 раза превосходит по производительности классическое колонковое бурение [1]. Данный факт обусловлен возможностью извлечения керна на поверхность без подъема бурильной колонны и, как следствие, сокращением времени спуско-подъемных операций и увеличением времени чистого бурения. Самым ответственным и в то же время наиболее уязвимым элементом бурильной трубы является резьбовое соединение [2; 3], к которому предъявляются наиболее жесткие требования по его прочности, износостойкости и стойкости к знакопеременным нагрузкам.

В качестве способа поверхностного упрочнения резьбовых соединений бурильных труб на предприятии ОАО «Завод бурового оборудования» (г. Оренбург) уже более 15 лет используется технология жидкостной карбонитрации, разработанная в 1970 году в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством профессора Д.А. Прокошкина. В предыдущей работе была 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 [4]. В работе [5] было изучено влияние карбонитрации на свойства основного металла, в частности на его склонность к хрупкому разрушению. Определена критическая температура

хрупкости сталей марок 30ХГСА, 40ХН2МА, 38ХМА и 40Г2 как в исходном состоянии, так и после воздействия карбонитрации. Показано, что склонность к проявлению отпускной хрупкости в исследуемых сталях различна и в значительной степени зависит от их химического состава [5].

В настоящий момент ОАО «Завод бурового оборудования» изготавливает бурильные трубы для комплексов ССК с приваренными замками методом сварки трением, так как цельной заготовки, удовлетворяющей всем заданным требованиям, на сегодняшний день найти не удалось [3]. Однако создание цельной бурильной трубы по-прежнему остается нерешенной и актуальной задачей. На данный момент российская трубная промышленность не может обеспечить требуемую высокую точность геометрических параметров (кривизна любого участка трубы не более 0,3 мм на 1 м, эксцентриситет не более 5 %), поэтому, опираясь на последние предложения зарубежных производителей, в качестве цельных заготовок были выбраны заготовки Drillmax 950 производства «Salzgitter Mannesmann» (Германия – Франция) и 5130 и 1531 производства «OVAKO» (Япония).

Цель исследования – оценка возможности применения заготовок зарубежного производства для изготовления цельных бурильных труб для комплексов ССК с поверхностным упрочнением резьбы методом карбонитрации.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованию подвергались трубные заготовки Ø89×5,6 мм зарубежных производителей, а именно компании «Salzgitter Mannesmann» (Германия – Франция) – сталь марки Drillmax 950 – и предприятия «OVAKO» – стали марок 5130 и 1541. Сталь Drillmax 950 соответствует российскому аналогу стали марки 20Г2С, сталь 5130 – стали марки 40Х, а сталь 1541 – стали марки 45Г2. Фактический химический состав исследуемых сталей приведен в таблице 1.

Концевые части исследуемых заготовок бурильных труб были подвергнуты объемной индукционной термической обработке предприятием-изготовителем по режиму закалки и высокого отпуска. Фрагменты трубных заготовок из исследуемых сталей подвергались химико-термической обработке – карбонитрации. Термический цикл карбонитрации осуществляли в расплаве солей 80 % K_2CO_3 + 20 % KCNO при температуре 560 °С, продолжительность обработки составляла от 10 до 90 мин [4; 6; 7].

Для металлографического анализа использовали оптический микроскоп «Nikon ECLIPSE MA100» при увеличении в 400 крат. Фрактографический анализ поверхности образцов проводили на растровом электронном микроскопе «JEOL-6000 NeoScope».

Механические свойства при растяжении определяли по ГОСТ 1497-84. Динамические испытания на ударный изгиб проводили на маятниковом копре «RESIL 300J» производства фирмы CEAST при комнатной температуре на образцах размером 5×10×55 мм с U-м концентратором напряжений согласно ГОСТ 9454-78. Перед изготовлением образцов для механических испытаний заготовки протачивали по внешней и внутренней поверхности, снимая карбонитрированный слой, тем самым исключая его воздействие на основные свойства металла.

Циклическую долговечность резьбового соединения определяли на испытательном стенде БП-106 конструкции СКБ НПО «Геотехника» в условиях воздействия знакопеременных нагрузок по схеме изгиба с вращением.

Для испытаний применяли образцы готовых бурильных труб длиной 1,5 м. Трубы свинчивались с предварительным моментом затяжки 1500 Н·м, затем осуществлялось нагружение резьбы. В ходе испытаний на циклическую долговечность определяли количество циклов до разрушения резьбового соединения при массе груза 37 кг, что соответствовало величине изгибающего момента 770 Н·м. База испытаний составила не менее 6 млн циклов.

Испытания на определение предельного крутящего момента проводились на муфтонаверточном станке СМГП-2. Натяг в паре от руки между упорным уступом ниппеля и упорным торцом муфты составил 2,3 мм. Цель испытания – определить максимальный момент затяжки резьбового соединения, при котором произойдет деформация замковых деталей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После проведения процесса карбонитрации на поверхности изделия образуется упрочненный слой, по своей структуре отличающийся от основного металла (рис. 1). Образование такого слоя связано с реакциями, протекающими в расплаве солей и обеспечивающими получение атомарного азота и углерода. В процессе диффузии атомы этих элементов доставляются в поверхностные слои металла, где происходит адсорбция, и протекают реакции, в результате которых атомы

Таблица 1. Химический состав исследуемых сталей, масс. %
Table 1. Chemical composition of steels under the study, mass. %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	S	P	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	V
Drillmax 950	0,20	0,61	1,74	0,590	0,012	0,014	0,290	0,032	0,052	0,036	0,038	0,018
5130	0,37	0,27	0,57	0,780	0,010	0,010	0,028	0,024	0,023	0,011	0,002	0,034
1541	0,41	0,16	1,45	0,011	0,010	0,014	0,008	0,017	0,030	0,100	0,002	0,004

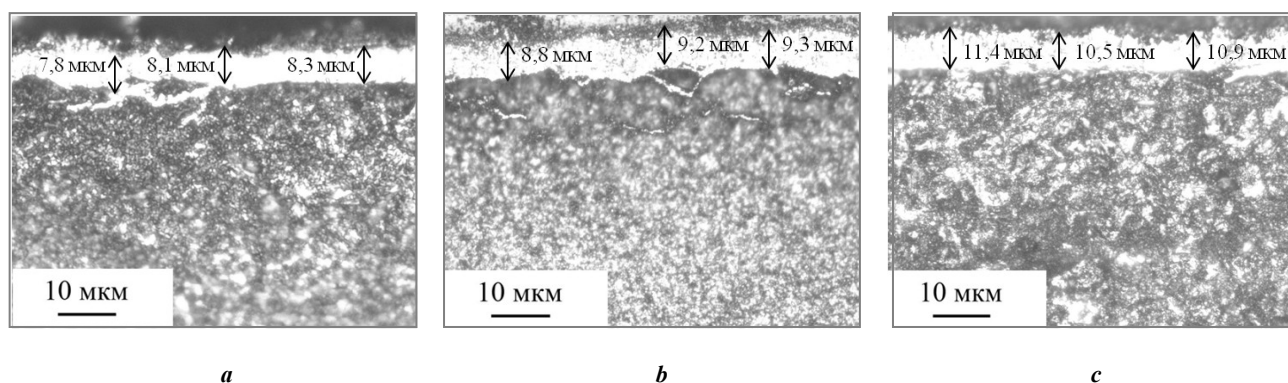


Рис. 1. Микроструктура исследуемых сталей после карбонитрации $t=560\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=40\text{ мин}$:
a – Drillmax 950; *b* – 1541; *c* – 5130

Fig. 1. Microstructure of steels under the study after carbonitriding at $t=560\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=40\text{ min}$:
a – Drillmax 950; *b* – 1541; *c* – 5130

насыщаемых элементов диффундируют вглубь изделия. Основными составляющими, ответственными за особые свойства карбонитрированного слоя, являются $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}(\text{CN})$ и $\gamma\text{-Fe}_4(\text{CN})$ фазы, насыщенные в известной степени азотом и углеродом согласно диаграмме Fe-N [8–10].

Под слоем карбонитридной фазы располагается диффузионная зона сложного гетерофазного строения. Зеренная структура гетерофазного слоя карбонитрированных сталей практически не отличается от структуры основного металла. Структура в этой зоне настолько тонка, что обычным оптическим микроскопом рассмотреть ее не удастся даже при больших увеличениях. Особенность гетерофазной зоны заключается лишь в повышенной травимости границ зерен, что может быть связано с дополнительным выделением карбидов в процессе карбонитрации [11–13].

В работе [14] были установлены основные особенности тонкой структуры диффузионной зоны на приме-

ре стали 38ХМА. Электронно-микроскопические исследования показали, что благодаря повышенной концентрации азота в гетерофазной зоне выделяются мелкодисперсные пластинчатые частицы нитридной фазы Fe_4N , которые располагаются преимущественно вдоль плоскостей $\{100\}$ ОЦК-решетки α -фазы.

Толщина карбонитрированного слоя определяется продолжительностью процесса карбонитрации [15; 16]. Влияние продолжительности насыщения на скорость роста карбонитрированных слоев показано на рис. 2.

Согласно полученным результатам толщина слоя для исследуемых сталей приближается к параболической зависимости от времени. Это свидетельствует о том, что кинетика карбонитрации имеет общий для исследуемых сталей характер и определяется процессами диффузии азота и углерода в металл. При этом у стали 5130 рост карбонитрированного слоя происходит несколько интенсивнее по сравнению с другими исследуемыми сталями, что объясняется особенностями их

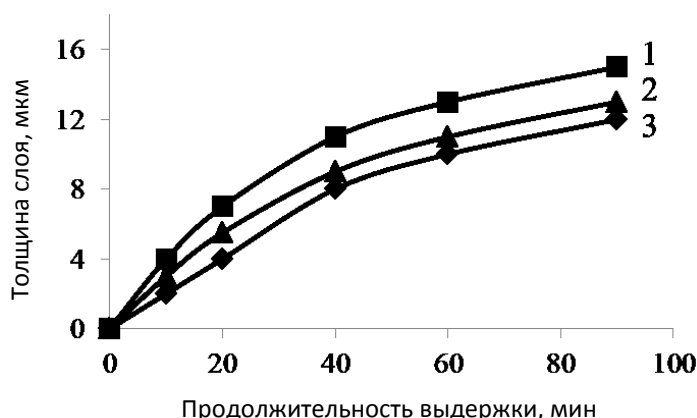


Рис. 2. Толщина карбонитрированного слоя в зависимости от продолжительности выдержки в сталях различного химического состава: 1 – 5130; 2 – 1541; 3 – Drillmax 950

Fig. 2. Carbonitrided layer thickness depending on the duration of holding in steels of various chemical compositions: 1 – 5130; 2 – 1541; 3 – Drillmax 950

химического состава, поскольку толщина карбонитрированного слоя определяется диффузионным потоком атомарного азота и углерода вглубь металла, а легирующие элементы способствуют замедлению их диффузии.

На рис. 3 представлены результаты определения величины KCU после испытаний на ударный изгиб. Анализируя полученные данные, можно отметить, что наиболее высоким уровнем значений ударной вязкости после всех режимов обработки обладает сталь 5130, при этом за 20 мин выдержки значения увеличиваются от 150 до 185 Дж/см². Таким образом, можно предположить, что в течение первых 20 мин происходит дополнительный отпуск стали. После 20 мин выдержки величина ударной вязкости материала снижается (до 173 Дж/см²), что свидетельствует о его охрупчивании в процессе карбонитрации.

У сталей Drillmax 950 и 1541 наблюдается общая тенденция к снижению ударной вязкости с увеличением длительности выдержки при карбонитрации, причем у стали Drillmax 950 это становится заметным уже после 20 мин выдержки, а у стали 1541 – после 40 мин. При этом общее снижение KCU за 90 мин процесса колеблется в пределах от 25 до 30 % по сравнению с исходным состоянием.

Рассмотрим фрактографические особенности изломов исследуемых образцов. В исходном состоянии все исследуемые стали имеют все признаки вязкого разрушения: поверхность изломов матовая, имеет волокнистое строение, наблюдаются ярко выраженные следы пластической деформации в виде утяжки по краям. С увеличением времени выдержки при карбонитрации наблюдается постепенное исчезновение следов пластической деформации образцов и исчезновение утяжки. После карбонитрации в течение 60 и 90 мин у всех образцов утяжка отсутствует, поверхность изломов перпендикулярна направлению распространения трещины.

Наиболее полно оценить влияние карбонитрации на склонность к хрупкому разрушению исследуемых сталей позволяет метод микрофрактографического анализа

разрушенных образцов. В исходном состоянии без воздействия карбонитрации поверхность разрушения образцов из стали 5130 однородна и образована неглубокими ямками разных размеров (рис. 4 а). Очагом зарождения крупных ямок являются частицы неметаллических включений. После воздействия карбонитрации в течение 10 и 20 мин характер разрушения изменяется в сторону более энергоемкого, о чем свидетельствует увеличение глубины ямок (рис. 4 б, 4 с). После карбонитрации в течение 40 мин и более происходит увеличение неоднородности поверхности излома, появляются вторичные микротрещины в виде глубоких впадин, нарушающих сплошность металла (рис. 4 d, 4 е, 4 f). Из этого следует, что в процессе карбонитрации стали 5130 в течение первых 20 мин происходит ее дополнительный отпуск, сопровождающийся увеличением вязкости разрушения. При дальнейшем увеличении времени карбонитрации в объеме металла развиваются процессы, нарушающие сплошность границ зерен, вследствие чего образуются вторичные микротрещины, вызывающие снижение ударной вязкости материала. Как предположение, эти процессы могут быть объяснены с позиции отпускной хрупкости материала.

В исходном состоянии и после карбонитрации вплоть до 40 мин выдержки поверхность разрушения образцов из стали 1541 образована мелкочечным микрорельефом, свидетельствующим о достаточно энергоемком разрушении (рис. 5 а, 5 б, 5 с, 5 d). В некоторых местах на поверхности излома наблюдаются признаки образования микротрещин. При увеличении времени выдержки при карбонитрации до 90 мин количество и глубина микротрещин существенно увеличиваются, что приводит к снижению величины ударной вязкости материала (рис. 5 е, 5 f).

На рис. 6 представлены микрофрактограммы поверхности разрушения стали Drillmax 950. Анализ изломов образцов в исходном состоянии показал наличие на поверхности участков хрупкого разрушения в виде фасеток транскристаллитного скола, в которых произошло

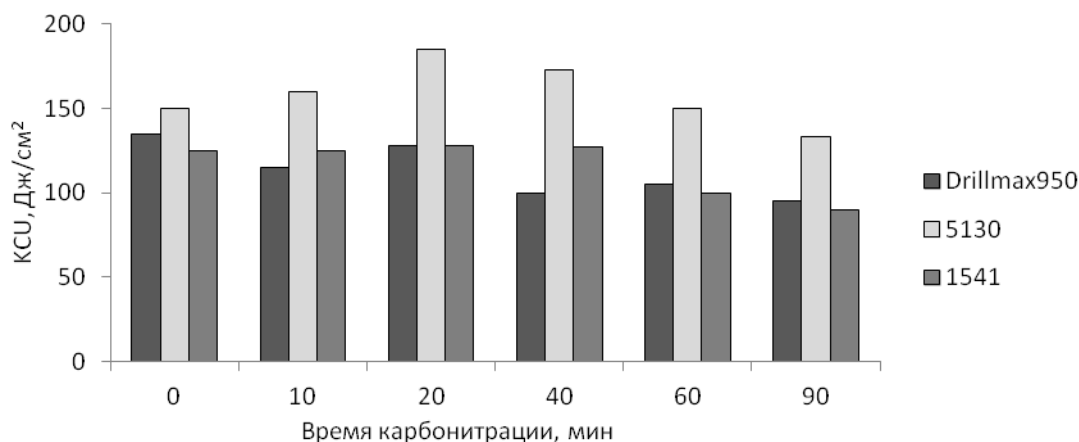


Рис. 3. Изменение ударной вязкости исследуемых сталей с увеличением продолжительности насыщения при карбонитрации

Fig. 3. Change in the impact strength of steels under the study with the increase of duration of saturation when carbonitriding

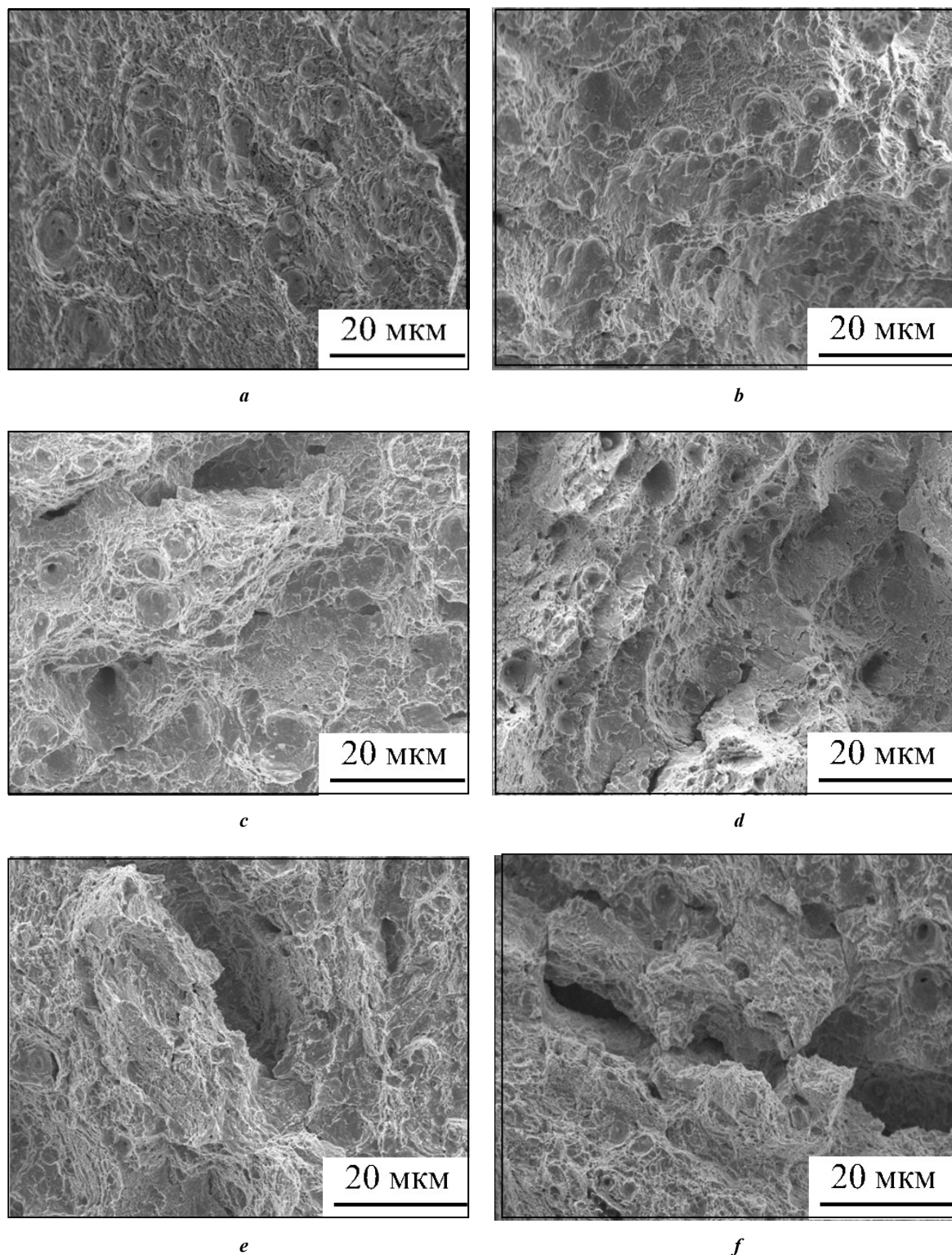


Рис. 4. Микрофрактограммы поверхности разрушения стали 5130 в исходном состоянии (а) и после карбонитрации (b–f):

a – без карбонитрации; **b** – 10 мин; **c** – 20 мин; **d** – 40 мин; **e** – 60 мин; **f** – 90 мин

Fig. 4. Microfractographs of fracture surface of 5130 steel in initial state (a) and after carbonitriding (b–f):

a – without carbonitriding; **b** – 10 min.; **c** – 20 min.; **d** – 40 min.; **e** – 60 min.; **f** – 90 min

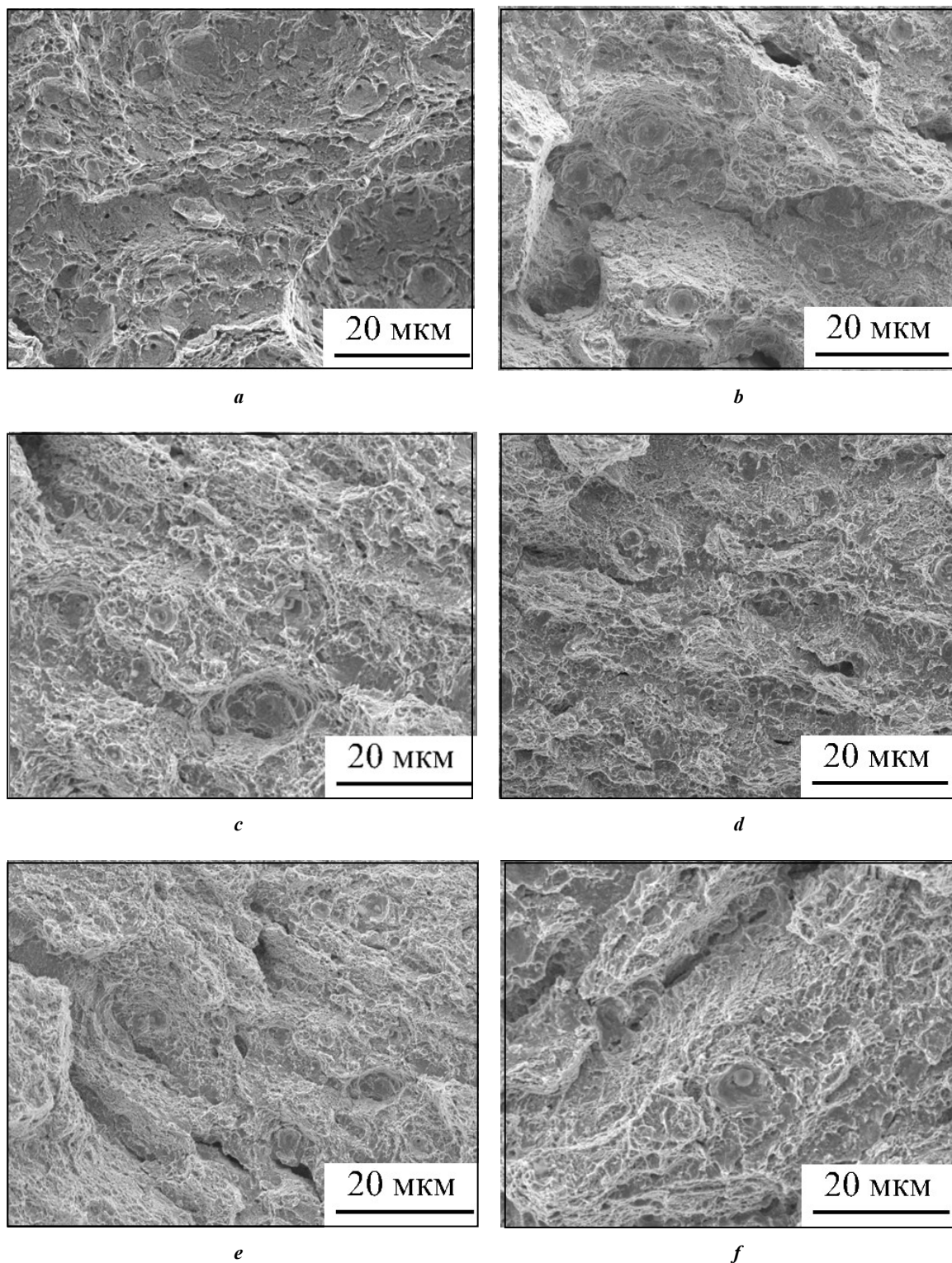


Рис. 5. Микрофрактограммы поверхности разрушения стали 1541 в исходном состоянии (a) и после карбонитрации (b–f):

a – без карбонитрации; b – 10 мин; c – 20 мин; d – 40 мин; e – 60 мин; f – 90 мин

Fig. 5. Microfractographs of fracture surface of 1541 steel in initial state (a) and after carbonitriding (b–f):

a – without carbonitriding; b – 10 min.; c – 20 min.; d – 40 min.; e – 60 min.; f – 90 min

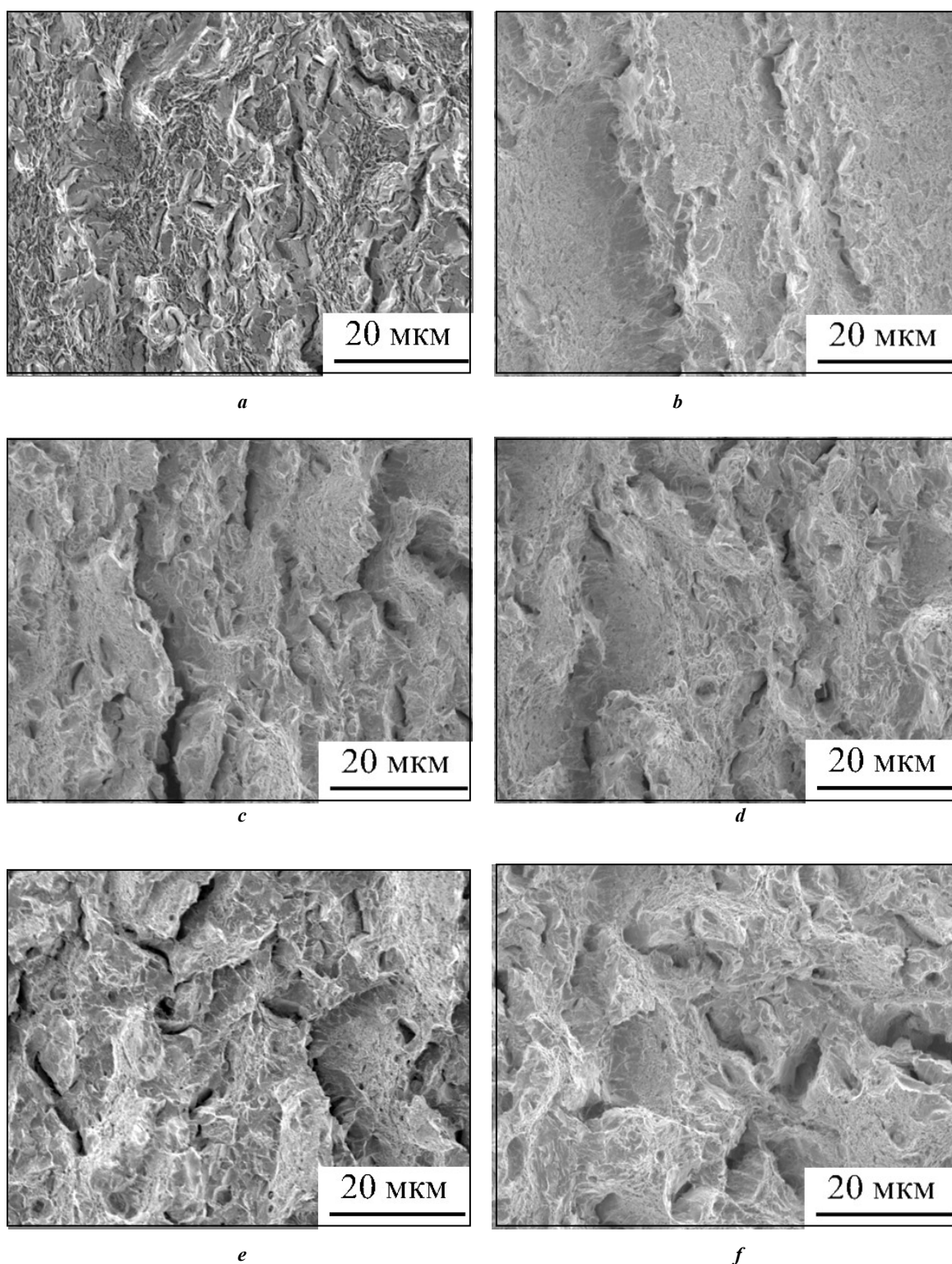


Рис. 6. Микрофрактограммы поверхности разрушения стали Drillmax 950 в исходном состоянии (а) и после карбонитрации (б-ф):

а – без карбонитрации; **б** – 10 мин; **с** – 20 мин; **д** – 40 мин; **е** – 60 мин; **ф** – 90 мин

Fig. 6. Microfractographs of fracture surface of Drillmax 950 steel in initial state (a) and after carbonitriding (b-f):

a – without carbonitriding; **b** – 10 min.; **c** – 20 min.; **d** – 40 min.; **e** – 60 min.; **f** – 90 min

образование глубоких микротрещин (рис. 6 а). Образование микротрещин, имеющих зернограничную траекторию, указывает на тот факт, что после объемной термической обработки трубной заготовки, полученной методом холодного волочения, выявилась структурная наследственность строчечности ее исходной структуры. Такой характер разрушения является заведомо нежелательным с позиции обеспечения высокой надежности материала. После воздействия карбонитрации в течение 10 мин площадь участков хрупкого разрушения и количество образованных в них микротрещин постепенно снижается (рис. 6 б). Данное обстоятельство указывает на тот факт, что температура предшествующего отпуска материала была ниже температуры последующего объемного нагрева при карбонитрации, вследствие чего произошел дополнительный отпуск и исчезновение признаков хрупкого разрушения. При дальнейшем увеличении времени карбонитрирования доля хрупкой составляющей в изломе постепенно возрастает, наряду с этим в изломе резко увеличивается количество образованных вторичных микротрещин, распространяющихся по границам зерен вглубь металла (рис. 6 с, 6 д, 6 е, 6 ф). Таким образом, влияние карбонитрации в данной стали проявляется более заметно, в виде развития процессов, ослабляющих прочность границ зерен, что, вероятнее всего, связано с отпускной хрупкостью материала [17; 18].

Оценка механических характеристик исследуемых сталей до и после карбонитрации представлена в таблице 2.

Полученные данные показывают, что выдержка в среде карбонитрации практически не оказывает влияния на механические свойства стали Drillmax 950. Небольшое снижение прочностных характеристик (порядка 7–10 %) наблюдается у стали 1541. У стали 5130 наблюдается значительное снижение прочностных и пластичных характеристик (порядка 30 %).

Существенное значение для эксплуатации бурильных труб имеет величина предела текучести материала замковой части. Чем выше $\sigma_{0,2}$, тем больше допустимый вращающий момент и линейные нагрузки, которые способны выдерживать резьбовое соединение, и, соответственно, тем больше глубина бурения скважины [19; 20]. На рис. 7 представлена гистограмма изменения предела текучести в зависимости от времени выдержки при карбонитрации.

Для сталей Drillmax 950 и 1541 предел текучести после воздействия карбонитрации остается на достаточно высоком уровне и составляет от 900 до 960 МПа. Однако для стали 5130 отмечается существенное снижение данной характеристики до уровня 735 МПа за 20 мин процесса, что, вероятнее всего, связано с дополнительным отпуском стали, температура предшествующего отпуска которой была ниже температуры карбонитрации.

Важной эксплуатационной характеристикой бурильных труб является сопротивление усталости резьбового соединения. В таблице 3 приведены результаты испытаний на циклическую долговечность резьбовых соединений исследуемых сталей, прошедших весь цикл обработки. Время карбонитрации – 10 мин. База испытаний составила не менее 6 млн циклов.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком сопротивлении усталости резьбовых соединений из исследуемых сталей, не подвергнутых карбонитрации, при изгибающем моменте 770 Н·м. Все образцы выдержали заданную нагрузку без поломок. После карбонитрации сопротивление усталости резьбовых соединений из сталей Drillmax 950 и 5130 несколько снижается, о чем свидетельствует разрушение образцов при заданной нагрузке при прохождении от 0,365 до 3,021 млн циклов. У резьбовых соединений из стали 1541 снижение усталостной прочности после карбонитрации при нагрузке 37 кг не наблюдается. База испытаний успешно пройдена, поломки отсутствуют.

Таблица 2. Механические свойства исследуемых сталей до и после карбонитрации
Table 2. Mechanical properties of steels under the study before and after carbonitriding

Материал заготовок	Время карбонитрации	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Твердость, HRC
Drillmax 950	Без карбонитрации	953–960	1045–1075	11,8–12	30–32
	10 мин	950–960	1050–1060	11–11,5	30–31
	20 мин	950–960	1050–1070	10,5–11	30–31
5130	Без карбонитрации	1017–1019	1117–1122	10–10,5	31–33
	10 мин	754–780	862–895	10,3–10,7	29–31
	20 мин	735–755	842–855	11–11,5	28–30
1541	Без карбонитрации	964–1078	1113–1116	10,3–10,8	31–33
	10 мин	921–935	1038–1055	10,5–10,8	31–33
	20 мин	901–920	1009–1025	10,5–10,8	30–32

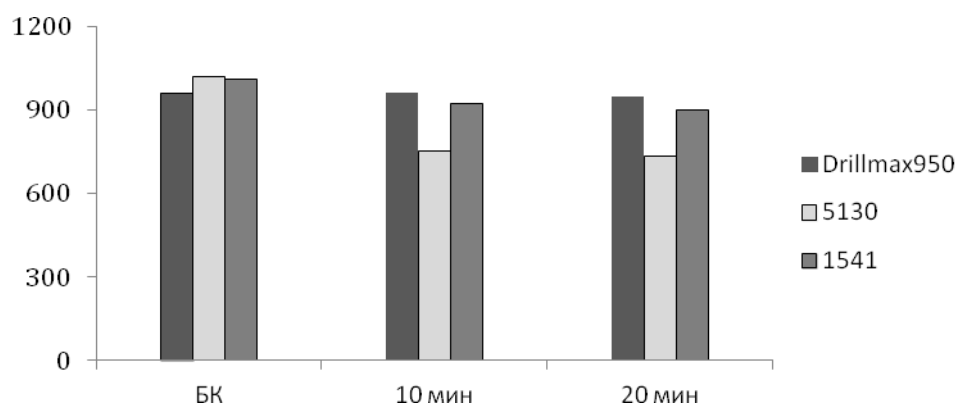


Рис. 7. Влияние карбонитрации на механические свойства ($\sigma_{0,2}$) основного металла. БК – без карбонитрации
Fig. 7. The influence of carbonitriding on the mechanical properties ($\sigma_{0,2}$) of basis metal. БК – without carbonitriding

Таблица 3. Результаты испытаний на циклическую долговечность и предельный момент затяжки исследуемых резьбовых соединений
Table 3. The results of tests for cyclic durability and tightening limit moment of threaded joints under the study

Марка стали		Вес груза, кг	$M_{изг}, H \cdot m$	Количество циклов до разрушения	Наличие поломки	$M_{пред}, H \cdot m$
5130	без К	37	770	6,04–6,53 · 10 ⁶	нет	7090
	К			0,365–0,397 · 10 ⁶	поломка по ниппелю	4355
1541	без К			6,05–6,42 · 10 ⁶	нет	6415
	К			6,68–6,03 · 10 ⁶	нет	5090
Drillmax 950	без К			6,024–6,045	нет	5444
	К			2,03–3,021 · 10 ⁶	поломка по ниппелю	4267

Примечание. К – карбонитрация.

Еще одним важным свойством замковых соединений буровых труб является предельный момент затяжки резьбового соединения, характеризующий появление видимых признаков пластической деформации резьбовой части. Чем выше предельный момент затяжки, тем меньше вероятность преждевременной деформации резьбы при эксплуатации во время аварийных ситуаций в скважине, и тем больше глубина бурения [21]. Результаты определения данной характеристики показали (таблица 3), что без карбонитрации резьбовые соединения из сталей 5130 и 1541 обладают уровнем значений, существенно превышающих требуемое (≥ 5030 Н·м – величина предельного момента затяжки серийной буровой трубы, выпускаемой ОАО «Завод бурового оборудования»). После карбонитрации наблюдается снижение величины предельного момента затяжки резьбы из стали 5130 на 13,5 % ниже требуемого. Отмечается снижение данной характеристики для резьбовых соединений из стали 1541,

но при этом полученные значения остаются на уровне предъявляемых требований.

У резьбовых соединений из стали Drillmax 950 в состоянии без карбонитрации предельный момент затяжки находится на уровне предъявляемых требований, а после карбонитрации – ниже требуемого на 15 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Исходя из результатов проведенных исследований, можно заключить, что в ходе карбонитрации на поверхности исследуемых сталей образуется упрочненный слой, кинетика образования которого определяется параболической зависимостью от времени. При этом после 20 мин выдержки в насыщающей среде величина слоя карбонитрации у стали 5130 становится несколько выше, что объясняется особенностями химического состава исследуемых сталей, поскольку толщина карбонитрированного слоя определяется диффузионным

потоком атомарного азота и углерода вглубь металла, а легирующие элементы способствуют замедлению их диффузии.

Оценка влияния карбонитрации на склонность к хрупкому разрушению исследуемых сталей показала, что повторный нагрев заготовок при карбонитрации оказывает влияние на ударную вязкость и характер разрушения при ударе, связанных с образованием вторичных микротрещин, в различной степени: с увеличением времени карбонитрации происходит снижение величины КСЧ и увеличение количества микротрещин в объеме металла. Вместе с тем существенного негативного влияния после карбонитрации в течение 10 мин для всех исследованных сталей не обнаруживается, поэтому рекомендуемым временем карбонитрации следует считать 10 мин.

Оценка влияния карбонитрации на механические свойства исследуемых сталей показала, что для сталей Drillmax 950 и 1541 их существенного изменения под воздействием процесса в течение 10 мин не происходит: снижение предела текучести находится в пределах от 5 до 10 %, однако для стали 5130 наблюдается существенное падение прочностных характеристик порядка 30 %.

Оценка эксплуатационных свойств замковых соединений из исследуемых сталей показала, что сталь 1541 как в состоянии без карбонитрации, так и после обладает требуемым уровнем эксплуатационных характеристик. В то же время у сталей 5130 и Drillmax 950 в результате воздействия карбонитрации наблюдается снижение усталостной прочности и предельного момента затяжки резьбы ниже уровня предъявляемых требований.

Таким образом, сталь марки 1541 может быть рекомендована для изготовления бурильных труб для комплексов ССК с упрочнением резьбы методом карбонитрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусанов А.А. Совершенствование бурения скважин алмазными коронками. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 60 с.
2. Музапаров М.Ж. Направленное бурение. Т. 4: Детерминированная технология. Снаряды со съемными керноприемниками. Алматы: КазНТУ, 2011. 204 с.
3. Приймак Е.Ю. Характеристика бурильных труб и обзор трубных заготовок, применяемых в современном геологоразведочном бурении // Черная металлургия. 2017. № 2. С. 70–76.
4. Приймак Е.Ю., Степанчукова А.В., Яковлева И.Л., Терещенко Н.А. Применение карбонитрации для упрочнения резьбовых соединений бурильных труб из среднеуглеродистых легированных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 2. С. 38–44.
5. Степанчукова А.В., Приймак Е.Ю., Яковлева И.Л., Терещенко Н.А., Чирков Е.Ю. Оценка воздействия карбонитрации на положение порога хладноломкости в среднеуглеродистых легированных сталях // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 4. С. 141–148.
6. Цих С.Г., Гришин В.И., Лисицкий В.Н., Глебова Ю.А. Современные российские технологии химико-термической обработки в машиностроении // Труды ГОСНИТИ. 2011. Т. 107. № 2. С. 114–117.
7. Pang H., Lv G.-H., Chen H., Wang X.-Q., Zhang G.-L., Yang S.-Z. Microstructure and corrosion performance of carbonitriding layers on cast iron by plasma electrolytic carbonitriding // Chinese Physics Letters. 2009. Vol. 26. № 8. P. 086805.
8. Surface hardening of steels; understanding the basics / ed. J.R. Davis. USA: ASM International, 2002. 364 p.
9. Cho Y.-W., Kang Y.-J., Baek J.-H., Woo J.-H., Cho Y.-R. Investigation of microstructure, nanohardness and corrosion resistance for oxi-nitrocarburized low carbon steel // Metals. 2019. Vol. 9. № 2. P. 190.
10. Ladyanov V.I., Goncharov O.Y., Malenko P.I., Leonov A.Y., Relmasira K.D. Influence of manufacturing conditions of carbonitriding on formation of surface layers and protective properties of hot-work structural steel // Inorganic Materials: Applied Research. 2016. № 4. P. 610–617.
11. Костин Н.А. Повышение эксплуатационных свойств штамповой стали 5Х2ГФ путем создания карбонитридных слоев химико-термической обработкой // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 8. С. 19–22.
12. Fares M.L., Touhami M.Z., Belaid M., Bruyas H. Surface characteristics analysis of nitrocarburized (Tenifer) and carbonitrided industrial steel AISI02 types // Surface and Interface Analysis. 2009. Vol. 41. № 3. P. 179–186.
13. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 518 с.
14. Яковлева И.Л., Терещенко Н.А., Степанчукова А.В., Приймак Е.Ю., Чирков Ю.А. Структура и износостойкость карбонитрированных среднеуглеродистых сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2017. № 10. С. 25–31.
15. Цих С.Г., Корнеев А.А., Сонц А.В. Исследование кинетики изменения приповерхностных слоев металла при карбонитрации // Научное обозрение. 2013. № 1. С. 84–90.
16. Беласс 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.
17. Тихонцева Н.Т., Софрыгина О.А., Жукова С.Ю., Пышминцева И.Ю., Битюков С.М. Исследование обратимой отпускной хрупкости современных конструкционных сталей // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. № 5. С. 60–64.
18. Устиновщиков Ю.И., Шабанова И.Н., Сапунин В.А., Тапезников В.А. Охрупчивание легированных сталей при отпуске // Физика металлов и металловедение. 1977. Т. 44. № 2. С. 336–344.
19. Бучковский Е.В. Повышение эффективности бурения глубоких разведочных скважин с применением КССК-76 // Разведка и охрана недр. 2012. № 3. С. 55–58.
20. Белинин Д.С., Казанцев А.В., Морев И.М., Овчинников И.П., Хомутинин И.С. Повышение

эксплуатационных характеристик замков бурильных труб // *Master's Journal*. 2019. № 2. С. 7–11.

21. Мокронос Е.Д. Повышение надежности бурильных труб // *Деловой журнал Neftegaz.RU*. 2016. № 3. С. 26–27.

REFERENCES

- Musanov A.A. *Sovershenstvovanie bureniya skvazhin almaznymi koronkami* [Improving the drilling of holes with diamond crowns]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Publ., 2016. 60 p.
- Muzaparov M.Zh. *Napravlennoe burenie. Tom 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.
- 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.
- 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.
- Stepanchukova A.V., Priymak E.Yu., Yakovleva I.L., Tereshchenko N.A., Chirkov E.Yu. The assessment of impact of carbonitriding on the location of cold-brittleness threshold in the medium-carbon alloy steels. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 4, pp. 141–148.
- Tsikh S.G., Grishin V.I., Lisitsky V.N., Glebova Yu.A. Modern Russian technologies of chemical-thermal treatment in mechanical engineering. *Trudy GOSNITI*, 2011, vol. 107, no. 2, pp. 114–117.
- Pang H., LvG.-H., Chen H., Wang X.-Q., Zhang G.-L., Yang S.-Z. Microstructure and corrosion performance of carbonitriding layers on cast iron by plasma electrolytic carbonitriding. *Chinese Physics Letters*, 2009, vol. 26, no. 8, p. 086805.
- Davis J.R., ed. *Surface hardening of steels; understanding the basics*. ASM International, 2002. 364 p.
- Cho Y.-W., Kang Y.-J., Baek J.-H., Woo J.-H., Cho Y.-R. Investigation of microstructure, nanohardness and corrosion resistance for oxi-nitrocarburized low carbon steel. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 2, p. 190.
- Ladyanov V.I., Goncharov O.Y., Malenko P.I., Leonov A.Y., Relmasira K.D. Influence of manufacturing conditions of carbonitriding on formation of surface layers and protective properties of hot-work structural steel. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2016, no. 4, pp. 610–617.
- Kostin N.A. Raising the operating properties of die steel 5Kh2GF by creating carbonitride layers by thermochemical treatment. *Metal Science and Heat Treatment*, 2016, vol. 58, no. 7-8, pp. 466–469.
- Fares M.L., Touhami M.Z., Belaid M., Bruyas H. Surface characteristics analysis of nitrocarburized (Tenifer) and carbonitrided industrial steel AISI102 types. *Surface and Interface Analysis*, 2009, vol. 41, no. 3, pp. 179–186.
- Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. *Struktura i iznosostoykost' azotirovannykh konstruktsionnykh staley i splavov* [Structure and wear resistance of nitrided structural steels and alloys]. Moscow, MGITU im. N.E. Bauman Publ., 2014. 518 p.
- Yakovleva I.L., Tereshchenko N.A., Stepanchukova A.V., Priymak E.Yu., Chirkov Yu.A. Structure and wear resistance of carbonitrided medium-carbon steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 2018, vol. 59, no. 9-10, pp. 630–636.
- Tsikh S.G., Korneev A.A., Sonts A.V. Studying the kinetics of the change of near-surface layers of metal during carbonitration. *Nauchnoe obozrenie*, 2013, no. 1, pp. 84–90.
- Bellas L., Castro G., Mera L., Mier J.L., Garcia A., Varela A. Effect of carbonitriding in a salt bath by a QPQ scheme on stainless steel 321 microstructure and service properties. *Metal Science and Heat Treatment*, 2016, vol. 58, no. 5-6, pp. 369–375.
- Tikhontseva N.T., Sofrygina O.A., Zhukova S.Yu., Pyshmintsev I.Yu., Bityukov S.M. Reversible tempering brittleness of structural steel. *Steel in Translation*, 2012, vol. 42, no. 5, pp. 415–418.
- Ustinovshchikov Yu.I., Shabanova I.N., Sapukhin V.A., Tapeznikov V.A. Embrittlement of alloy steels during tempering. *Physics of metals and metallography*, 1977, vol. 44, no. 2, pp. 91–99.
- Buchkovsky E.V. Increase the efficiency of drilling deep wells of exploration stations KSSK-76. *Razvedka i okhrana nedr*, 2012, no. 3, pp. 55–58.
- Belinin D.S., Kazantsev A.V., Morev I.M., Ovchinnikov I.P., Khomutinin I.S. Performance enhancement of drill pipe locks. *Master's Journal*, 2019, no. 2, pp. 7–11.
- Mokronosov E.D. Improving drill pipe reliability. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU*, 2016, no. 3, pp. 26–27.

The assessment of the efficiency of carbonitriding process application for hardening of the threaded joints of drill pipes made of foreign blank parts

© 2020

Anna V. Stepanchukova^{*1,3}, PhD (Engineering),
leading engineer-metallurgist of the Laboratory "Metallurgy and Heat Treatment"
Elena Yu. Priymak^{*1,2,4}, PhD (Engineering),
Head of the Laboratory "Metallurgy and Heat Treatment"

¹ZBO Drill Industries, Inc., Orenburg (Russia)

²Orenburg State University, Orenburg (Russia)

*E-mail: annastep56@zbo.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1050-3504>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4571-2410>

Abstract: Currently, one of the effective methods of surface hardening of steels and alloys is chemical heat treatment (ChHT) – carbonitriding – simultaneous saturation of steel surface with nitrogen and carbon in molten salts at the temperature of 540–580 °C. This method of surface hardening allows achieving high performance of a hardened layer; however, the influence of carbonitriding on the properties of the base metal, which is inevitably exposed to heating during the saturation process, remains unexplored. It is particularly topical for steels, in which temperature interval of technological process implementation of 540–560 °C coincides with the interval of temper embrittlement manifestation. In this work, the authors tested the carbonitriding technology to strengthen the threaded joints of drill pipes for the complexes with removable core receivers, studied the kinetics of the carbonitrided layer formation on the Drillmax 950, 4130 and 1541 grades of steels. The paper considers the influence of the carbonitriding process on the mechanical properties of steels under the study. The authors carried out the analysis of the structure of fractures of Drillmax 950, 4130, and 1541 steel before and after carbonitriding and identified that the influence of carbonitriding in the Drillmax 950 steel is more visible in the form of development of the temper embrittlement processes. The authors estimated the dependence of the performance characteristics of a finished threaded connection on the duration of the carbonitriding process. The study shows that the threaded connections of 1541 steel have a high level of fatigue resistance. The authors recommended 1541 steel to produce the locking joints of drill pipes with the thread surface hardening by carbonitriding.

Keywords: drill pipe; threaded joints; carbonitriding; impact strength; temper embrittlement; cyclic durability; tightening limit moment.

Acknowledgements: The paper was written on the reports of the participants of the IX International School of Physical Materials Science (SPM-2019) with elements of a scientific school for young adults, Togliatti, September 9–13, 2019.

For citation: Stepanchukova A.V., Priymak E.Yu. The assessment of the efficiency of carbonitriding process application for hardening of the threaded joints of drill pipes made of foreign blank parts. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 3, pp. 26–37. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-3-26-37.