

УДК 620.178

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-18-26

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ*

А. А. Хлыбов, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Ю. Г. Кабалдин, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

М. С. Аносов, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Д. А. Рябов, аспирант, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

В. И. Сентюрева, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Представлена оценка хладостойкости стали 20ГЛ, которая широко применяется для изготовления ответственных конструкций (в частности, тележек грузовых вагонов), эксплуатирующихся при пониженных температурах.

Для решения поставленной задачи были проведены испытания на ударный изгиб исследуемых металлов в диапазоне температур климатического холода ($-80...-20$ °С) с последующим исследованием изломов металлов, проведена оценка структурного состояния стали, которая подвергалась термической обработке по режиму завода-изготовителя и термоциклической обработке (ТЦО).

Исследования проводились с использованием маятникового копра МК-300, специально разработанного для охлаждения образцов камеры, а также методов оптической (KEYENCE VHX-1000) и электронной микроскопии (JSM-3U), фрактографических исследований. В ходе исследования были получены данные по изменению ударной вязкости, механизмам разрушения металла для широкого диапазона низких температур, а также по температуре вязко-хрупкого перехода. Проведена операция ТЦО сплава 20ГЛ для оценки влияния измельчения зерна на работоспособность при отрицательных температурах.

В результате проведенной работы дана оценка хладостойкости стали 20ГЛ. Установлено, что термическая обработка завода-изготовителя, состоящая из нормализации и высокого отпуска, позволяет обеспечивать надежную эксплуатацию изделий из исследуемой стали до -20 °С, что соответствует температуре вязко-хрупкого перехода (T_{50}). Показано, что измельчение зерна при ТЦО не улучшает хладостойкость стали 20ГЛ, наоборот, происходит смещение температуры вязко-хрупкого перехода в сторону больших температур ($T_{50} = -13$ °С). Однако результаты измерения микротвердости (до ТЦО 1591 МПа, после ТЦО 1911 МПа) показывают улучшение прочностных характеристик исследуемой стали после термоциклической обработки.

Ключевые слова: пониженные температуры, хладоломкость, сталь, ударная вязкость, безопасная эксплуатация.

Введение

Анализ данных произошедших аварий на железнодорожном транспорте показывает, что одной из основных причин их возникновения является разрушение тележек грузовых вагонов [1]. При этом примерно 85 % всех повреждений приходится на изломы, проходящие по радиусу R55 сопряжения верхнего и наклонного поясов боковой рамы во внутреннем угле буксового проема (рис. 1).

Каждый такой излом связан как минимум со сходом вагона или вагонов, а иногда приводит к крушениям.

Тележки грузовых вагонов являются сложными и ответственными узлами, воспринимающими большую часть нагрузок. От надежности тележек зависит безопасность движения вагонов. Для изготовления тележек широко применяется сталь 20ГЛ [2]. Данная сталь также широко применяется для изготовления дисков,

© Хлыбов А. А., Кабалдин Ю. Г., Аносов М. С., Рябов Д. А., Сентюрева В. И., 2019

* Работа выполнена по гранту РНФ №19-19-00332 «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

звездочек зубчатых венцов и других деталей, к которым предъявляются повышенные требования по прочности и вязкости, работающих под действием статических и динамических на-

грузок, а также для ответственных литых деталей арматуры трубопроводов, автосцепного устройства и тележки грузовых вагонов, работающих при температурах до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

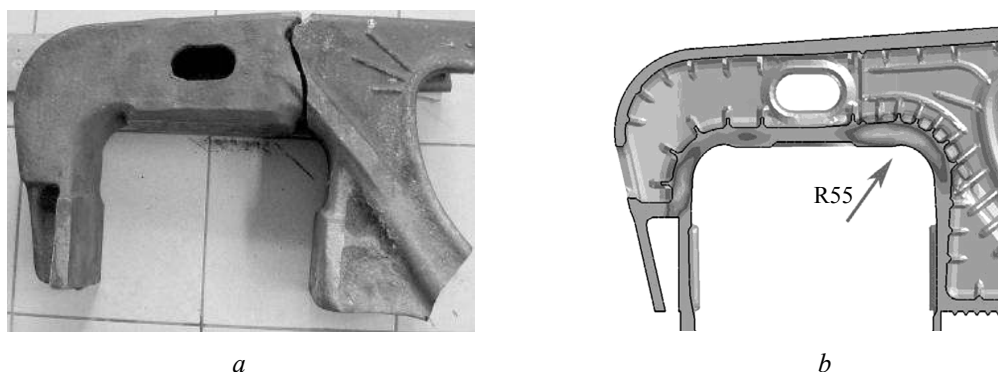


Рис. 1. Место зарождения трещины в районе внутреннего радиуса R55: *a* – разрушение тележки; *b* – область зарождения трещины

Fig. 1. Crack origin in the region of the inner radius R55: *a* - destruction of the bogie; *b* - area of crack initiation

Одним из факторов, существенно влияющих на работоспособность тележек, является низкая температура окружающей среды [3]. Данные статистики показывают, что наибольшее количество аварий и сходов поездов с рельсов приходится на холодное время года, а также на сети железных дорог северных районов России.

Таким образом, проблема обеспечения работоспособности при отрицательных температурах основных элементов железнодорожных вагонов очень важна, требует особого внимания и тщательного исследования проблемы хладноломкости стали. Данная проблема является актуальной, так как исследование поведения материалов при отрицательных температурах [4–6], исследования хладноломкости и последующие предложения по использованию этих данных позволяют повысить безопасность эксплуатации [7, 8].

Цель настоящего исследования – оценка хладостойкости стали 20ГЛ, которая широко применяется для изготовления ответственных конструкций, эксплуатируемых при пониженных температурах

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на вырезанных из боковой рамы тележки грузового вагона образцах типа Шарпи с V-образным концентратором (рабочее сечение 8×10) из стали 20ГЛ, изготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ 9454–78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах». Химический состав стали, %: С – 0,15...0,25; Mg – 1,2...1,6; Si – 0,2...0,4; P – до 0,04; остальное – Fe.

Термическая обработка от завода-изготовителя состояла из нормализации и высокого отпуска по следующему режиму: нагрев до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2 ч), затем плавный нагрев до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1,5 ч), выдержка при этой температуре 4 ч и охлаждение на воздухе, а также высокого отпуска по режиму: нагрев до $670\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3 ч), выдержка при этой температуре 4 ч и охлаждение на воздухе.

Для получения более мелкозернистой структуры была проведена термоциклическая обработка образцов [9] стали 20ГЛ по следующему режиму: нагрев до $920\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 30 мин, затем перенос в другую печь с температурой $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдержка при этой температуре 10 мин. После чего были произведен повторный нагрев до $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с выдержкой 30 мин), закалка в воду и отпуск при $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч с охлаждением на воздухе.

Твердость исходного материала ($\text{HV } 10^{-1}$) = 143...187 МПа. Механические свойства стали 20ГЛ приведены в табл. 1, значения ударной вязкости при различных температурах – в табл. 2.

Склонность металла к хрупкому разрушению определялась с помощью динамических испытаний на ударный изгиб [10]. Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре МК-300 (запас потенциальной энергии копра 450 Дж) с использованием разработанного устройства для охлаждения образцов (рис. 2). В качестве охлаждающей среды использовалась смесь этилового спирта с жидким азотом; соотношение данных компонентов позволяет менять температуру охлаждающей среды.

Таблица 1. Механические свойства стали 20ГЛ при $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ Table 1. Mechanical properties of steel 20GL at $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$

Сортамент	ГОСТ	Термообработка	δ %	ψ %	KCV кДж/м ²	σ_B МПа	σ_T МПа
Отливки	977–88	Нормализация 880...900 °С Отпуск 600...650 °С	18	25	491	540	275
		Закалка 870...890 °С Отпуск 620...650 °С	14	25	383	530	334
Отливки	21357–87	Нормализация	20	35	–	500	300
		Закалка и отпуск	15	30	–	550	400

Таблица 2. Ударная вязкость стали 20ГЛ, кДж/м²Table 2. Impact strength of steel 20GL, kJ/m²

Сортамент	Термообработка	KCV при температурах		
		–60 °С	–20 °С	+20 °С
Отливки	без обработки	354	390	491

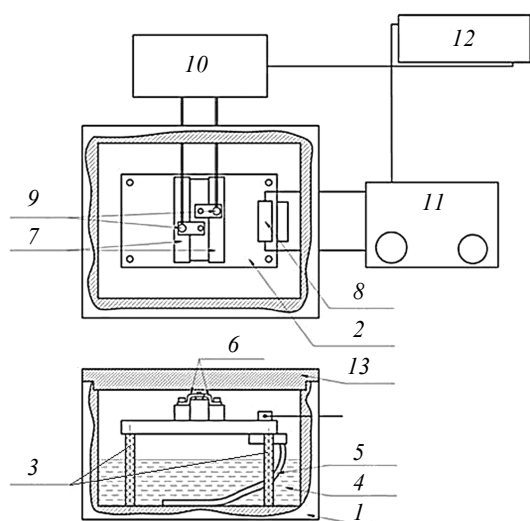


Рис. 2. Устройство для охлаждения образцов при испытании на ударный изгиб: 1 – корпус камеры; 2 – медная платформа; 3 – установочные стержни; 4 – хладагент; 5 – хладопровод; 6 – прижимы; 7 – образцы для испытания; 8 – резистор; 9 – датчики рt100; 10 – блок замера и контроля температуры; 11 – источник постоянного тока; 12 – ПК со специальным ПО; 13 – крышка камеры

Fig. 2. Device for cooling samples during impact bending testing: 1 - chamber body; 2 - copper platform; 3 - installation rods; 4 - refrigerant; 5 - cold line; 6 - clamps; 7 - samples for testing; 8 - resistor; 9 - pt100 sensors; 10 - block measuring and temperature control; 11 - a direct current source; 12 - PC with special software; 13 - camera cover

Для регистрации температуры в процессе охлаждения образцов использовался датчик рt100 (контактного типа), диапазон измеряемых температур $-196...+100\text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$). Общий диапазон температур испытаний составил $-80...+20\text{ }^\circ\text{C}$.

С использованием разработанной камеры (см. рис. 2) осуществлялось охлаждение образцов до температуры испытания и выдержка не менее 15 мин, после чего образцы испытывали на маятниковом копре с определением величин

ударной вязкости (KCV). Подготовка к испытаниям, проведение испытаний и обработка результатов производились по ГОСТ 9454–78.

Фрактографический анализ проводился с применением растрового электронного микроскопа JSM-3U. Доля вязкой и хрупкой составляющих определялась согласно ГОСТ Р ИСО 148-1–2013 «Материалы металлические. Испытание на ударный изгиб на маятниковом копре по Шарпи. Часть 1. Метод испытания».

Для выявления микроструктуры образцов было проведено травление в 4%-й азотной кислоте, время травления 20 сек. Микроструктура опытных образцов исследовалась на оптическом микроскопе KEYENCE VHX-1000. Контроль микротвердости осуществлялся с использованием микротвердомера ПМТ-3.

Основные результаты и обсуждение

Анализ влияния микроструктуры на значение ударной вязкости

Микроструктура стали после термической обработки приведена на рис. 3. Видно, что после нормализации и высокого отпуска она представляет собой феррито-перлитную структуру (при $\times 100$). При более крупном увеличении было обнаружено небольшое количество неметаллических включений.

Полученные в ходе работы результаты испытаний на ударный изгиб представлены на рис. 4. За порог хладноломкости принимается температура T_{50} , при которой в изломе обнаруживается 50 % вязкой и 50 % хрупкой составляющих [11]. Температура T_B означает, что в изломе находится 90 % волокна и ударная вязкость имеет высокое значение, а T_H соответствует 10 % волокна в изломе. С помощью графика на рис. 4, а и фрактографических исследований можно определить температуру вязко-хрупкого перехода, верхнюю и нижнюю температуры (рис. 4, б).

Исходя из графика можно сказать, что температуре $0\text{ }^\circ\text{C}$ соответствует 90 % волокнистой составляющей в изломе. При $-40\text{ }^\circ\text{C}$ волокнистая составляющая значительно уменьшается и составляет 10 %, излом будет хрупким. При

температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается 50 % волокнистой и 50 % хрупкой составляющей. Это и есть температура, при которой происходит переход из вязкого состояния в хрупкое. Можно сделать вывод, что, начиная с этой темпе-

ратуры, значительно повышается опасность хрупкого разрушения, что может послужить разрушению боковой рамы тележки грузового вагона при его эксплуатации в реальных условиях [12–14].

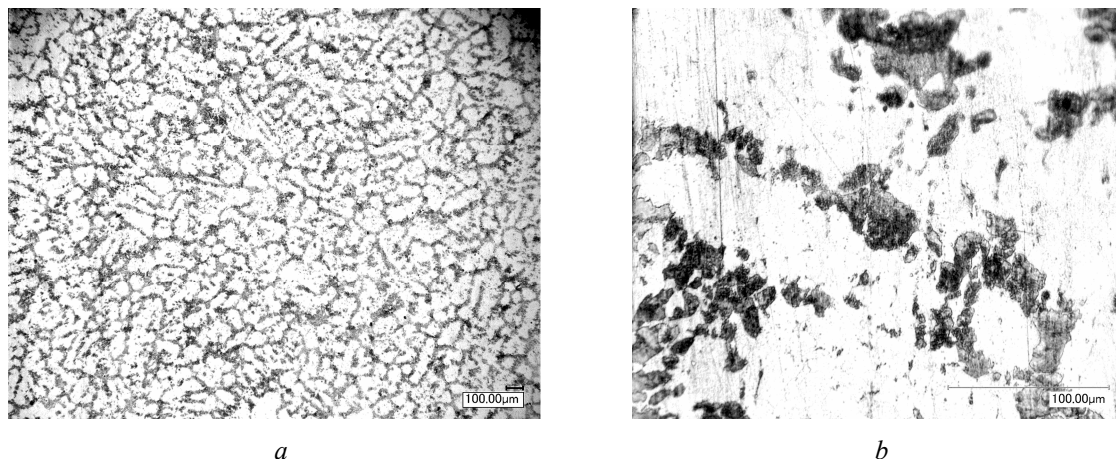


Рис. 3. Микроструктура стали 20ГЛ после нормализации и высокого отпуска: $a - \times 100$, $b - \times 1000$

Fig. 3. The microstructure of steel 20GL after normalization and high tempering: $a - \times 100$, $b - \times 1000$

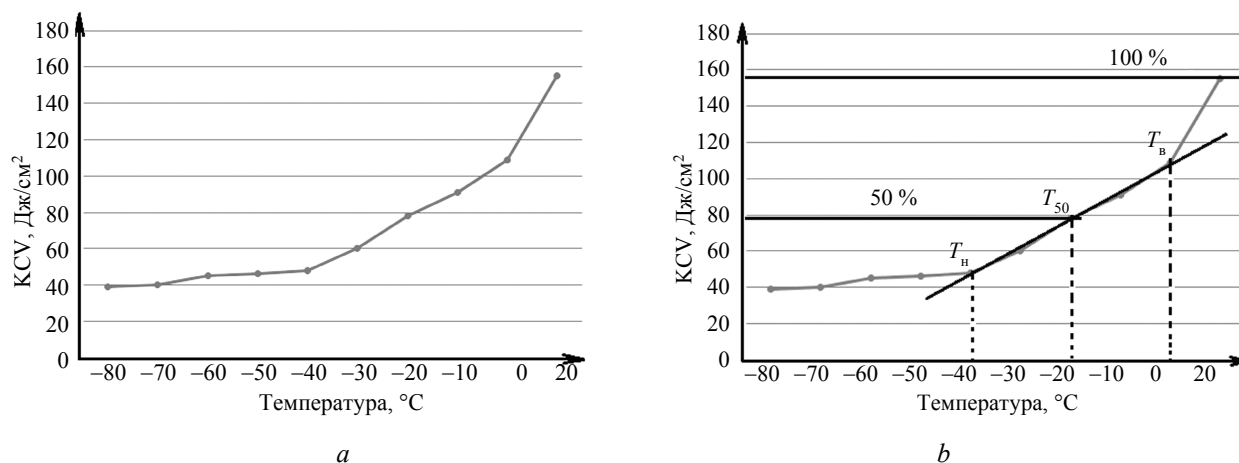


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости стали 20ГЛ после нормализации и высокого отпуска от температуры (а) и определение T_{50} (б)

Fig. 4. The dependence of the toughness of steel 20GL after normalization and high tempering on temperature (a) and the definition of T_{50} (b)

Известно, что у мелкозернистой структуры хладостойкость выше, чем у крупнозернистой, следовательно, температура вязко-хрупкого перехода должна быть ниже [15, 16]. Для получения мелкозернистой структуры была проведена термоциклическая обработка. На рис. 5 приведена микроструктура стали 20ГЛ после ТЦО. Микроструктура после термоциклической обработки стала более мелкозернистой, чем после нормализации и высокого отпуска. Структуру отчетливо можно увидеть при увеличении $\times 1000$.

Испытанные на ударный изгиб при отрицательных температурах образцы после ТЦО по-

казали следующие результаты: при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в изломе обнаружено 90 % волокнистой составляющей. При температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ излом будет на 90 % хрупким. При температуре $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ в стали наблюдается переход из вязкого состояния в хрупкое (50 % волокнистой и 50 % хрупкой составляющей в изломе).

Фрактографический анализ изломов образцов из стали 20ГЛ

С понижением температуры испытания изменяются размеры и соотношение площадей зон в изломах. На рис. 6 представлены фотографии изломов образцов при нормализации и высоком

отпуске. Зоны зарождения трещины по размерам близки у всех образцов, что задано наличием V-образного концентратора. Зона распространения трещин увеличивается по мере понижения температуры и при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ занимает практически всю площадь излома.

Фотографии зон зарождения трещины у образцов при нормализации и высоком отпуске при разных температурах приведены на рис. 7.

Зона распространения трещины у образцов при нормализации и высоком отпуске приведена на рис. 8.

В табл. 3 приведена интерпретация полученных данных.

Фотографии изломов образцов после термоциклической обработки представлены на рис. 9.

Зоны зарождения трещины по размерам близки у всех образцов, что задано наличием V-образного концентратора. Зона распространения трещин увеличивается по мере понижения тем-

пературы испытания и при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ занимает практически всю площадь излома.

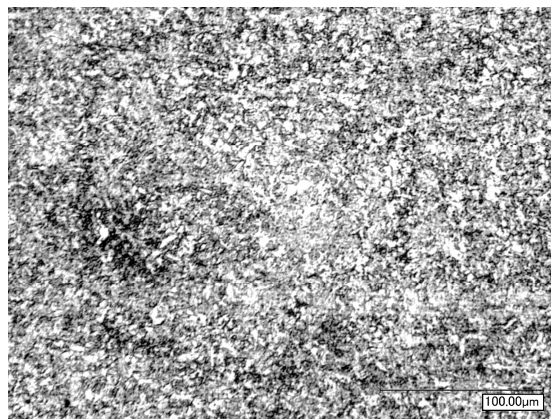
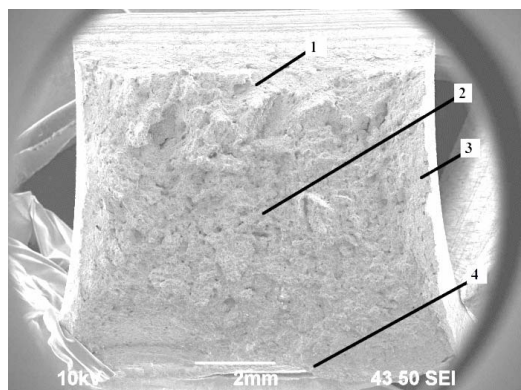
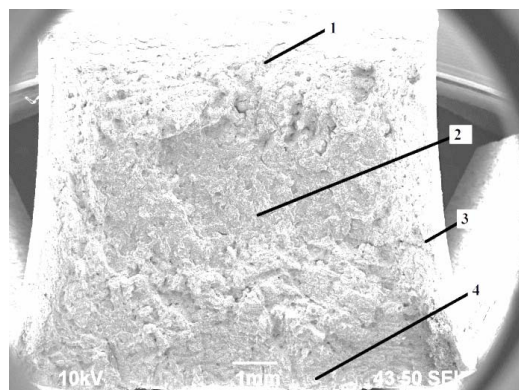


Рис. 5. Микроструктура образца стали 20ГЛ после ТЦО, $\times 1000$

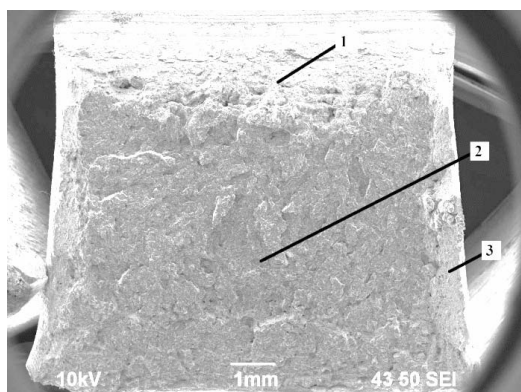
Fig. 5. The microstructure of a sample of steel 20GL after TCP, $\times 1000$



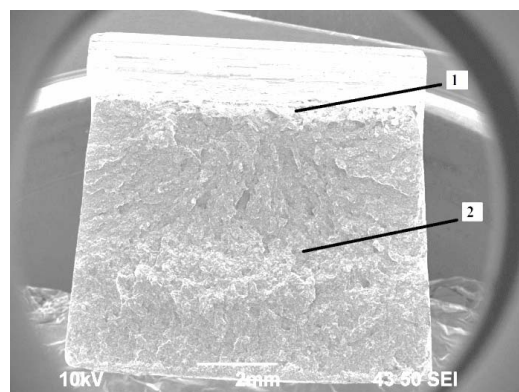
a



b



c



d

Рис. 6. Изломы образцов после испытания на ударную вязкость стали 20ГЛ после нормализации и высокого отпуска: *a* – $T_{\text{исп}} = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$; *b* – $T_{\text{исп}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; *c* – $T_{\text{исп}} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$; *d* – $T_{\text{исп}} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$. На всех фотографиях: 1 – это зона зарождения трещины; 2 – зона распространения трещины; 3 – зона утяжки; 4 – зона долома

Fig. 6. Fractures of samples after impact testing of steel 20GL after normalization and high tempering: *a* – $T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$; *b* – $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; *c* – $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$; *d* – $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$. In all photographs: 1 is the crack initiation zone; 2 - crack propagation zone; 3 - a zone of tightening; 4 - dolom zone

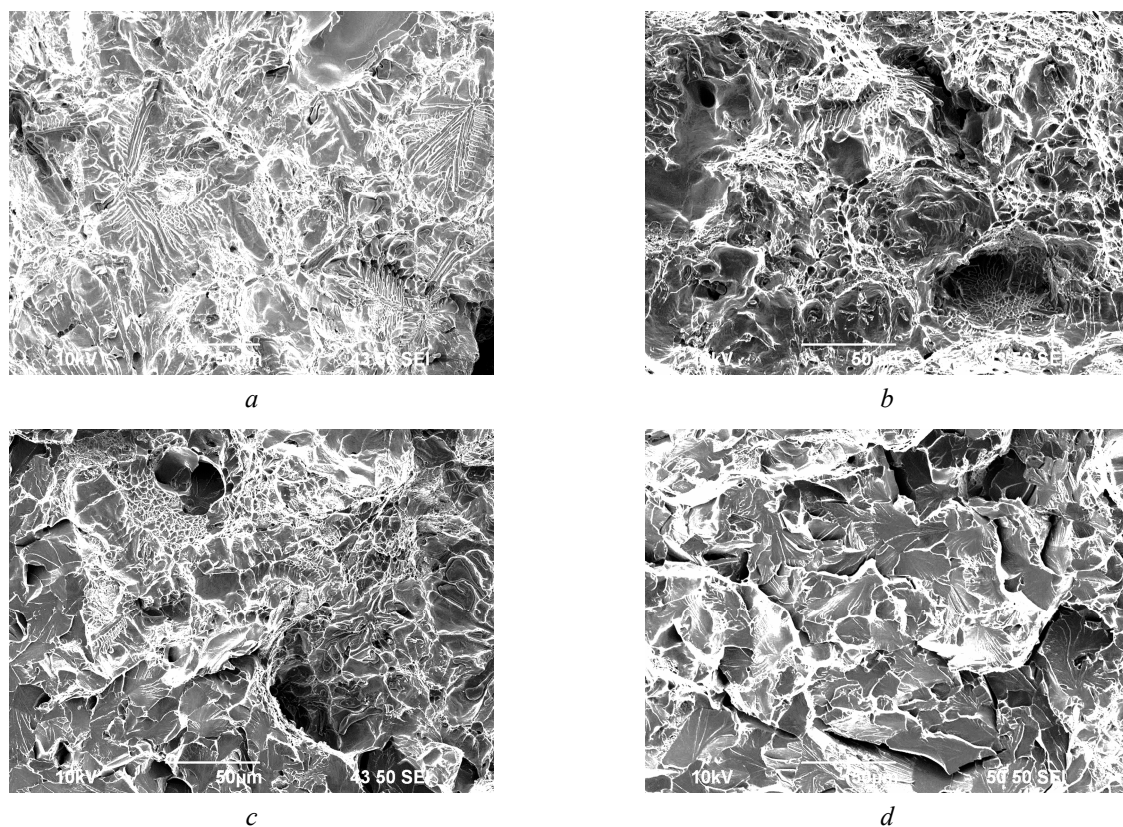


Рис. 7. Зона зарождения трещины, $\times 500$: $a - T_{исп} = +20 \text{ }^\circ\text{C}$; $b - T_{исп} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $c - T_{исп} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$; $d - T_{исп} = -40 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 7. Crack nucleation zone, $\times 500$: $a - T = +20 \text{ }^\circ\text{C}$; $b - T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $c - T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$; $d - T = -40 \text{ }^\circ\text{C}$

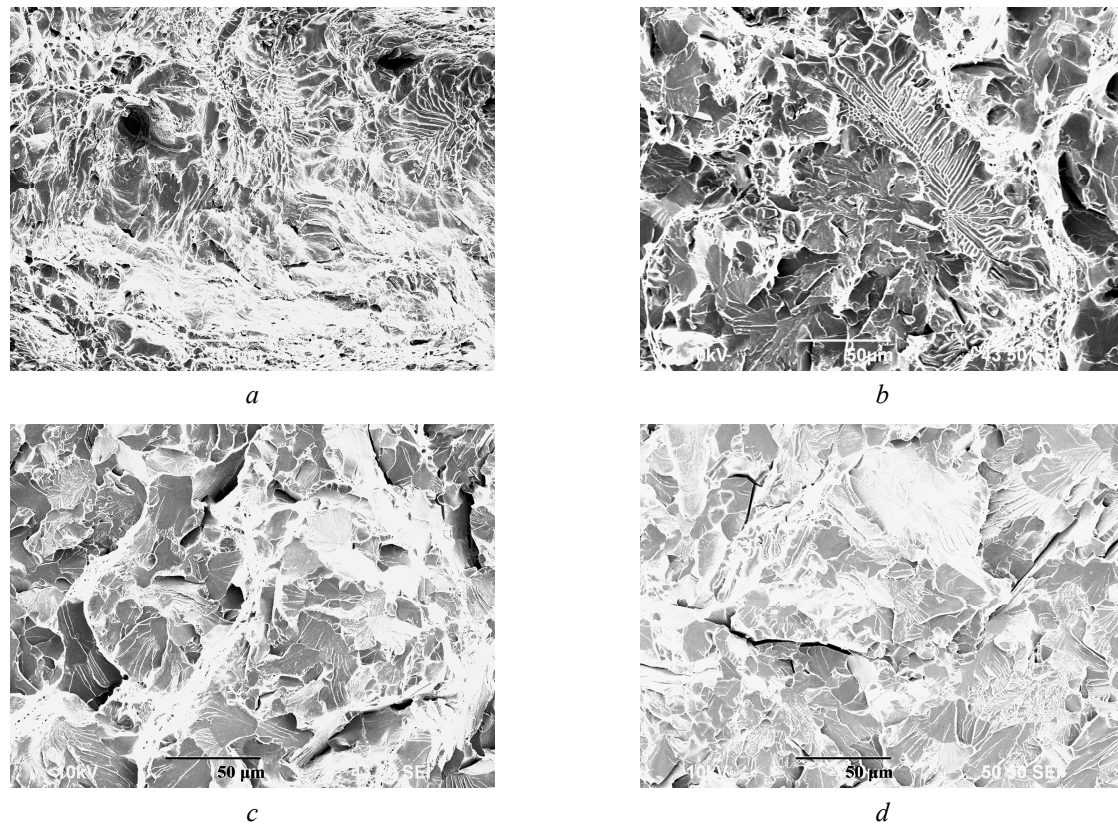


Рис. 8. Зона распространения трещины, $\times 500$: $a - T_{исп} = +20 \text{ }^\circ\text{C}$; $b - T_{исп} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $c - T_{исп} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$; $d - T_{исп} = -40 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 8. The zone of propagation of the crack, $\times 500$: $a - T = +20 \text{ }^\circ\text{C}$; $b - T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $c - T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$; $d - T = -40 \text{ }^\circ\text{C}$

Таблица 3. Фрактографические особенности зон изломов при нормализации и высоком отпуске

Table 3. Fractographic features of fracture zones during normalization and high tempering

№ образца	Зона зарождения трещины	Зона распространения трещины
<i>a</i>	Ямочная структура (равноосные ямки) – вязкое разрушение; присутствует дендритный излом	Ямочная структура (вытянутые ямки) – вязкое разрушение; присутствует дендритный излом
<i>b</i>	Ямочная структура (равноосные ямки) – вязкое разрушение; присутствует дендритный излом	Ямки и фасетки скола – смешанное разрушение; присутствует дендритный излом
<i>c</i>	Ямки и фасетки скола – смешанное разрушение	Фасетки скола – хрупкое разрушение
<i>d</i>	Скол и фасетки скола – хрупкое разрушение	Скол и фасетки скола – хрупкое разрушение

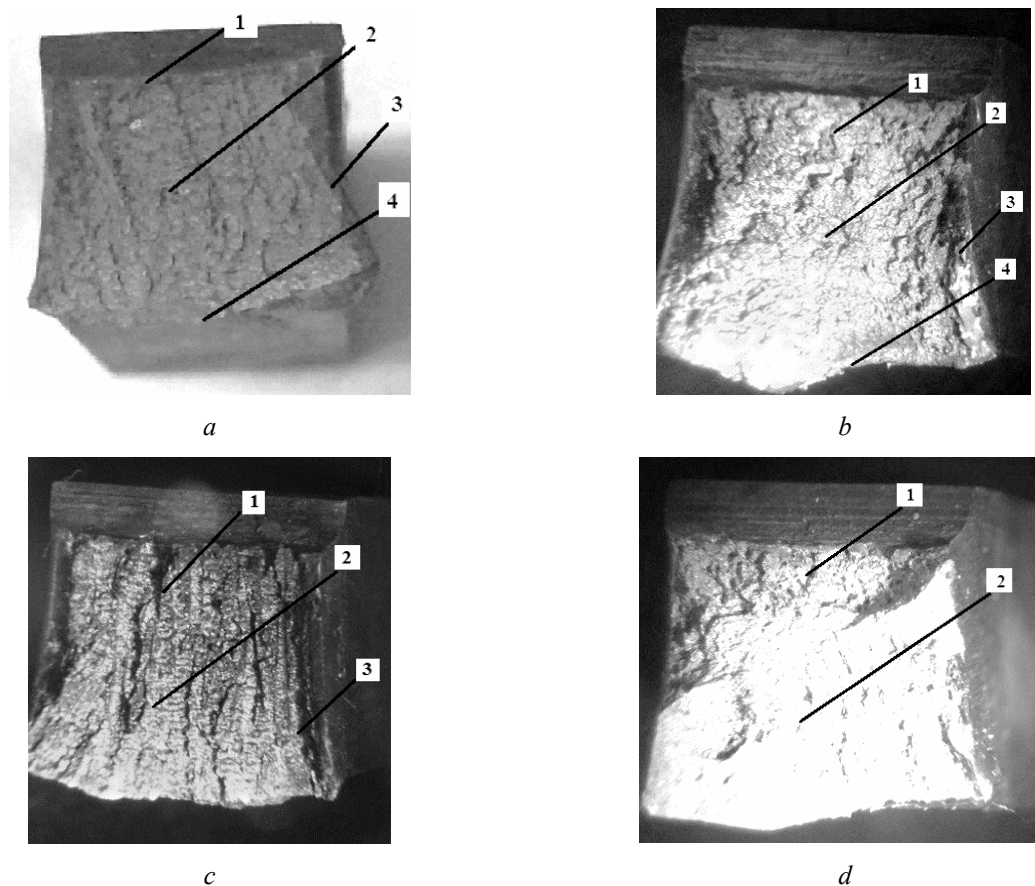


Рис. 9. Изломы образцов после испытания на ударную вязкость стали 20 ГЛ после ТЦО: *a* – $T_{исп} = +20$ °С; *b* – $T_{исп} = 0$ °С; *c* – $T_{исп} = -30$ °С; *d* – $T_{исп} = -60$ °С. На всех фотографиях: 1 – зона зарождения трещины; 2 – зона распространения трещины; 3 – зона утяжки; 4 – зона долома

Fig. 9. Fractures of samples after impact testing of steel 20GL after TCP: *a* – $T = +20$ °С; *b* – $T = 0$ °С; *c* – $T = -30$ °С; *d* – $T = -60$ °С. In all photographs 1 is the crack initiation zone; 2 – crack propagation zone; 3 – a zone of tightening; 4 – dolom zone

Результаты визуального осмотра поверхности изломов

Очаги разрушения не выявлены. Характерные дефекты строения изломов не обнаружены. На поверхности изломов образцов характерно наличие трех зон – зоны зарождения трещины, ее распространения и зоны долома, имеются утяжки.

Контроль микротвердости

Значение микротвердости после нормализации и высокого отпуска составляло 1591 МПа, а после ТЦО повысилось до 1911 МПа.

Выводы

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что работоспособность при низких температурах стали 20ГЛ после нормализации и высокого отпуска выше, чем после ТЦО, так как ниже температура вязко-хрупкого перехода T_{50} . Структура после ТЦО стала более мелкозернистой, чем до обработки, о чем свидетельствуют полученные изображения микроструктур исследуемого сплава.

Создание такой структуры подразумевало повышение ударной вязкости, прочности и дол-

говечности. Но при испытаниях на ударную вязкость было выявлено, что уже при $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ сталь после ТЦО переходит из вязкого состояния в хрупкое, и при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ излом состоит на 10 % из волокнистой составляющей. У исходной структуры $T_{50} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а 90 % хрупкой составляющей наблюдается при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Данные по микротвердости также изменились. Микротвердость сплава после нормализации и высокого отпуска составляла 1591 МПа, а после ТЦО твердость повысилась до 1911 МПа. Это связано с тем, что структура стала более мелкозернистой.

Библиографические ссылки

1. Огневой В. Я. Работоспособность боковых рам тележек вагонов // Ползуновский альманах. 2008. № 5. С. 39–42.

2. Шульте Ю. А. Хладнстойкие стали. М. : Металлургия, 1970. 300 с.

3. Корнев В. М. Охрупчивание материала стальных конструкций при низких температурах и катастрофическое разрушение // Физическая мезомеханика. 2018. Т. 21, № 2. С. 45–55. DOI: 10.24411/1683-805X-2018-12005.

4. Анализ хладостойкости металлов с различным типом кристаллического строения / Ю. Г. Кабалдин, А. А. Хлыбов, М. С. Аносов, Д. А. Шатагин, Д. А. Рябов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 48–55. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-48-55.

5. Liu Zhu. Brittle Analysis of Steel Structure in Extremely Cold Environment. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 2017, vol. 32, no. 7, pp. 90-95.

6. Benac D.J., Shaffer D., Wood D. Managing Cold Temperature and Brittle Fracture Hazards in the Ammonia-Related Industries. *AIChE 60th Annual Safety in the Ammonia Plants & Related Facilities Symposium (August 30 - September 3, 2015)*.

7. Горицкий В. М. Диагностика металлов. М. : Metallurgizdat, 2004. 408 с.

8. Ларионов В. П., Семенов Я. С. Физические основы вязкохрупкого перехода низколегированных сталей и сплавов железа. Новосибирск : Наука, 1992. 171 с.

9. Огневой В. Я., Гурьев А. М., Огневая Г. Л. Термоциклическая обработка литых сталей для автоцепных устройств грузовых вагонов // Ползуновский альманах. 2008. № 3. С. 33–34.

10. Большаков А. М., Бурнашов А. В., Ефимов В. М. Мониторинг ударной вязкости материала магистрального газопровода, длительно эксплуатирующегося в условиях Севера // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. № 6. С. 64–68.

11. О природе низкотемпературной хрупкости сталей с ОЦК-структурой / В. Е. Панин, Л. С. Деревягина, Н. М. Лемешев, А. В. Корзников, А. В. Панин, М. С. Казаченок // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16, № 6. С. 5–12.

12. Чернов В. М., Кардашев Б. К., Мороз К. А. Хладноломкость и разрушение металлов с разными кристаллическими решетками – дислокационные механизмы // Журнал технической физики. 2016. № 7. С. 57–64.

13. Финкель В. М. Физика разрушения. М. : Металлургия, 1970. 367 с.

14. Попова Л. Б., Ярцев В. П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. М. : Машиностроение-1, 2005. 244 с.

15. Конрад Х. Модель деформационного упрочнения для объяснения влияния величины зерна на напряжение течения материалов. Сверхмелкое зерно в металлах. М. : Металлургия, 1973. С. 206–219.

16. Физическое материаловедение. Т.1. Атомное строение металлов и сплавов : пер. с англ. / под ред. Р. У. Кана и П. У. Хаазена. М. : Металлургия, 1987. 640 с.

References

1. Ognevoy V.Ya. [Efficiency of the side frames of wagon trolleys]. *Polzunovskii al'manakh*, 2008, no. 5, pp. 39-42 (in Russ.).

2. Schulte Yu.A. *Khladnostoykiye stali* [Cold-resistant steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, 300 p. (in Russ.).

3. Kornev V.M. [Embrittlement of material of steel structures at low temperatures and catastrophic destruction]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 45-55 (in Russ.). DOI 10.24411/1683-805X-2018-12005.

4. Kabaldin Yu.G., Khlybov A.A., Anosov M.S., Shatagin D.A., Ryabov D.A. [Analysis of cold resistance of metals with various types of crystalline structure]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 48-55 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-48-55.

5. Liu Zhu. Brittle Analysis of Steel Structure in Extremely Cold Environment. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 2017, vol. 32, no. 7, pp. 90-95

6. Benac D.J., Shaffer D., Wood D. Managing Cold Temperature and Brittle Fracture Hazards in the Ammonia-Related Industries. *AIChE 60th Annual Safety in the Ammonia Plants & Related Facilities Symposium (August 30 - September 3, 2015)*.

7. Goritsky V.M. *Diagnostika metallov* [Diagnostics of metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2004. 408 p. (in Russ.).

8. Larionov V.P., Semenov Ya.S. *Fizicheskie osnovy vyazkokhрупkogo perekhoda nizkolegировannykh staley i splavov zheleza* [The physical basis of the visco-brittle transition of low alloy steels and iron alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992, 171 p. (in Russ.).

9. Ognevoy V.Ya., Guryev A.M., Ognevaya G.L. [Thermocyclic treatment of cast steels for couplers of freight cars]. *Polzunovskii al'manakh*, 2008, no. 3, pp. 33-34 (in Russ.).

10. Bolshakov A.M., Burnashov A.V., Efimov V.M. [Monitoring the impact toughness of a gas pipeline material that has been operating for a long time in the North].

Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov, 2019, no. 6, pp. 64-68 (in Russ.).

11. Panin V.E., Derevyagina L.S., Lemeshev N.M., Korznikov A.V., Panin A.V., Kazachenok M.S. [About the nature of low-temperature brittleness of steels with a bcc structure]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2013, vol. 16, no. 6, pp. 5-12 (in Russ.).

12. Chernov V.M., Kardashev B.K., Moroz K.A. [Cold brittleness and fracture of metals with different crystal lattices - dislocation mechanisms]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2016, no. 7, pp. 57-64 (in Russ.).

13. Finkel V.M. *Fizika razrusheniya* [Physics of Destruction]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, 367 p. (in Russ.).

14. Popova L.B., Yartsev V.P. *Mekhanika materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii* [Mechanics of materials in a complex stress state]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 244 p. (in Russ.).

15. Konrad H. *Model' deformatsionnogo uprochneniya dlya ob'yasneniya vliyaniya velichiny zerna na napryazhenie techeniya materialov. Sverkhmelkoe zerno v metallakh* [Strain hardening model to clarify the effect of grain size on stress flow of materials. Ultrafine grain in metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973, pp. 206-219 (in Russ.).

16. Kan R.U., Khaazen P.U. (eds.). *Atomnoe stroenie metallov i splavov* [Atomic structure of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 640 p. (in Russ.).

Problems of Ensuring Safe Operation of Freight Wagon Trolleys at Low Temperatures

A.A. Khlybov, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Yu.G. Kabaldin, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

M.S. Anosov, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Ryabov, Post-graduate, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

V.I. Sentyureva, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

The purpose of this study is to evaluate the cold resistance of 20GL steel, which is widely used for the manufacture of critical structures (in particular, freight carriage trolleys) operating at low temperatures.

To achieve this goal, tests were carried out on the shock bending of the studied metals in the temperature range of climatic cold (-80 ... -20 °C), followed by study of metal fractures, an assessment of the structural state of steel, which was subjected to heat treatment according to the manufacturer's mode and thermocyclic processing (TCP).

The studies were carried out using the MK-300 pendulum specially designed for cooling camera samples, as well as optical methods (KEYENCE VHX-1000) and electron microscopy (JSM-3U), fractographic studies. During the study, data were obtained on the change in toughness, metal fracture mechanisms for a wide range of low temperatures, as well as the temperature of the viscous-brittle transition. An operation was performed for a 20GL alloy to evaluate the effect of grain refinement on working capacity at low temperatures.

As a result of the work, an assessment of the cold resistance of 20GL steel is given. It was found that the heat treatment of the manufacturer, consisting of normalization and high tempering, makes it possible to ensure reliable operation of products from the studied steel up to -20 °C, which corresponds to the temperature of the viscous-brittle transition (T50). It was established that grain refinement during TCP does not improve the cold resistance of 20GL steel, but, on the contrary, the temperature of the viscous-brittle transition shifts toward higher temperatures (T50 = -13 °C). However, the results of microhardness measurements (up to TCP 1591 MPa, after 1911 MPa) show an improvement in the strength characteristics of the steel under study after TCP.

Keywords: low temperatures, cold brittleness, steel, toughness, safe operation.

Получено 21.10.2019

Образец цитирования

Проблемы обеспечения безопасной эксплуатации тележек грузовых вагонов при отрицательных температурах / А. А. Хлыбов, Ю. Г. Кабалдин, М. С. Аносов, Д. А. Рябов, В. И. Сентюрева // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 4. С. 18–26. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-18-26.

For Citation

Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Sentyureva V.I. [Problems of Ensuring Safe Operation of Freight Wagon Trolleys at Low Temperatures]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 18-26 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-18-26.