

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.79.01

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-479-492>

Обзорная статья

Термические циклы, структура и свойства неразъемных соединений конструкционных сталей при сварке в условиях экстремального холода

Н. И. Голиков^{✉,1}, И. И. Санников¹, С. В. Семёнов¹, М. А. Иванов²

¹Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

✉ n.i.golikov@mail.ru

Аннотация

В статье проведен обзор исследований термических циклов, структуры и свойств сварных соединений низколегированных и низкоуглеродистых сталей в процессе электродуговой сварки при отрицательных температурах окружающего воздуха. Цель данного обзора – изучение ранее выполненных исследований для использования в разработке обоснованных рекомендаций по сварке стальных мостовых конструкций в зимних условиях. Рассмотрены результаты сопоставления экспериментальных измерений термических циклов сварки образцов с разными размерами, выполненных при комнатных и отрицательных температурах окружающего воздуха (до –50 °С). Показано, что в малых пластинах размерами 200×250×10 мм за счет более интенсивного отражения тепла от краев образца, термические циклы сварки при разных температурах существенно не различаются. В более массивных образцах (размерами 450×250×10 мм) наблюдается увеличение скорости охлаждения участка перегрева сварного соединения по сравнению со сваркой при комнатной температуре. Показано, что при сварке в условиях низких температур скорость охлаждения зоны термического влияния в некоторых пределах можно регулировать изменением погонной энергии сварки. Рассмотрено влияние водорода на образование холодных трещин при сварке низколегированных сталей в условиях отрицательных температур. Металлографический анализ показал, что структурные превращения при сварке сталей различных марок существенно различаются и зависят от химического состава стали и параметров термического цикла сварки. Результаты дилатометрических исследований показывают, что даже разница в содержании легирующих элементов в пределах марочного состава существенно влияет на кинетику превращения аустенита. Таким образом, для определения оптимальных технологических режимов сварки при отрицательных температурах окружающего воздуха необходимо учитывать не только особенности распространения тепла в этих условиях, но и кинетику фазовых превращений и ее влияние на структуру и свойства продуктов распада аустенита.

Ключевые слова: сварка, конструкционные стали, сварные соединения, зона термического влияния, участок перегрева, термокинетическая диаграмма, механические свойства

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 24-29-20214), <https://rscf.ru/project/24-29-20214/>.

Для цитирования: Голиков Н.И., Санников И.И., Семенов С.В., Иванов М.А. Термические циклы, структура и свойства неразъемных соединений конструкционных сталей при сварке в условиях экстремального холода. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(3):479–492. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-479-492>

Thermal cycles, structure and properties of welded joints in structural steels during welding in extreme cold conditions

Nicolay I. Golikov^{✉,1}, Igor I. Sannikov¹, Sergey V. Semenov¹, Mikhail A. Ivanov²

¹Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

✉n.i.golikov@mail.ru

Abstract

The article summarizes research on the thermal cycles, structure, and properties of welded joints made from low-alloy and low-carbon steels during arc welding in sub-zero temperatures. This review aims to analyze previous research to create solid recommendations for welding steel bridge structures during winter conditions. The results of a comparison of experimental measurements of thermal cycles of welding samples with different sizes made at room and sub-zero ambient air temperatures (down to minus 50 °C) are considered. It is shown that in small plates with dimensions of 200 × 250 × 10 mm, due to more intense heat reflection from the edges of the specimen, the thermal cycles of welding at different temperatures do not differ significantly. In more massive samples (sized 450 × 250 × 10 mm), an increase in the cooling rate of the overheated welded joint area is observed compared to room temperature welding. The impact of hydrogen on the development of cold cracks in low-alloy steels during welding at temperatures below freezing is examined. Metallographic analysis has revealed that the structural changes that occur during the welding of various steel grades are notably different and are influenced by the steel's chemical composition as well as the thermal cycle parameters of the welding process. Dilatometric studies indicate that variations in the levels of alloying elements within different grades significantly influence the kinetics of austenite transformation. Therefore, to identify the best welding techniques for subzero temperatures, it is essential to consider not just how heat disperses in these conditions, but also the kinetics of phase changes and their effects on the structure and properties of the products resulting from austenite decomposition.

Keywords: welding, structural steels, welded joints, heat-affected zone, overheating area, thermokinetic diagram, mechanical properties

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 24-29-20214), <https://rscf.ru/project/24-29-20214/>.

For citation: Golikov N.I., Sannikov I.I., Semenov S.V., Ivanov M.A. Thermal cycles, structure and properties of welded joints in structural steels during welding in extreme cold conditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(3):479–492. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-479-492>

Введение

При изготовлении крупногабаритных металлоконструкций не обходится без производства сварки на месте строительства, а объемы сварочных работ могут быть значительными. При этом в условиях Крайнего Севера, где среднегодовая температура ниже –10 °C и холодных суток в году более 200 [1], сварочные работы часто производятся при отрицательных температурах окружающего воздуха. При производстве сварочных работ в зимних условиях нормативными документами регламентируются специальные технологии сварки для исключения возникновения значительных сварочных напряжений, дефектов в сварных швах и обеспечения лучших стабильных свойств соединения.

К примеру, при строительстве мостовых конструкций согласно СТО-ГК «Трансстрой»-005-

2018 [2] монтажную сборку и сварку пролетных строений мостов при температуре окружающего воздуха от –20 °C до –30 °C включительно выполняют с применением специальных теплоизолированных защитных укрытий с лицевой и обратной стороны свариваемых элементов, обогреваемых калориферами или теплогенераторами. Монтажная сборка и сварка металлоконструкций пролетных строений мостов при температуре воздуха ниже –30 °C запрещается. В СП 46.13330.2012 [3] также ниже –20 °C сварку следует выполнять с применением защитных укрытий, но при этом отсутствуют запреты по сварке ниже –30 °C. В технологических регламентах предприятий, ведущих строительство мостов в районах Крайнего Севера, на выполнение сварных соединений металлоконструкций мостовых сооружений применение защитных укрытий

предусмотрено уже при температурах -15°C . Таким образом, в нормативных документах монтажной сборки и сварки металлоконструкций в зимний период при отрицательных температурах требования различаются.

Здесь надо отметить, что все вышеуказанные подготовительные работы при производстве сварки на холоде являются энерго- и трудозатратными, а также занимают значительное время. Применение технологических процессов сварки при отрицательных температурах окружающего воздуха без предварительного подогрева и использования специальных теплоизолированных защитных укрытий без ухудшения качества сварного соединения могло бы существенно повысить производительность сварочных работ.

В климатических условиях Крайнего Севера разница $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$ может дать значительный экономический эффект при производстве сварочно-монтажных работ в зимний период. Разброс мнений по производству сварки при низких температурах, видимо, связан с применением разрешенных при строительстве мостовых конструкций разных марок низколегированных сталей, сварочных материалов и способов сварки, а также широким спектром используемого при монтаже листового и фасонного проката с различными толщинами и линейными размерами.

В настоящее время при разработке технологии сварки активно применяются передовые исследовательские установки типа Gleeble 3800. Данное оборудование позволяет проведение физического моделирования термокинетических процессов сварки для установления оптимального диапазона скоростей охлаждения и погонной энергии сварки по критерию структуры, твердости и ударной вязкости. Но для его использования в разработке обоснованных рекомендаций по сварке стальных мостовых конструкций в зимних условиях необходимо провести литературный обзор по ранее выполненным исследованиям в этом направлении, чтобы определить особенности производства сварочных работ при отрицательных температурах.

Термические циклы сварки конструкционных сталей при низких климатических температурах

Основное в изучении выполнения сварки при низких климатических температурах – изучение тепловых процессов [4]. Как правило, сварочный процесс предусматривает в основном на-

грев соединяемых деталей. Тепловое воздействие сварки вызывает неблагоприятные изменения в структуре зоны термического влияния (ЗТВ) неразъемного соединения. При этом формируемая гетерогенная структура значительно отличается по своим механическим свойствам от структуры и свойств исходного металла. Структура ЗТВ изменяется в соответствии с величиной параметров термического цикла сварки (ТЦС): максимальной температуры нагрева; длительности пребывания металла при температуре интенсивного роста аустенитного зерна; скорости охлаждения металла. В зависимости от метода и условия производства сварки все указанные параметры ТЦС меняются в весьма широких пределах [5].

Для экспериментальной оценки картины распределения температурных полей сварного соединения используются пирометры, а в последнее время – современная тепловизионная аппаратура [6]. Но в основном для измерения ТЦС активно применяются термоэлектрические преобразователи: хромель-алюмелевые и платинородиевые-платиновые термопары с открытым контактом. Применение данных термопар обусловлено их высоким диапазоном рабочих температур (хромель-алюмелевые до $+1372^{\circ}\text{C}$, платинородиево-платиновые до $+1768^{\circ}\text{C}$) [7]. С многоканальными регистраторами термопары можно расположить на любом расстоянии от свариваемого стыка и тем самым получить полную картину термического цикла участка ЗТВ.

Экспериментальное изучение температурного поля сварных соединений – достаточно трудоемкий процесс, еще более он усложняется при многопроходной сварке. Поэтому при сварке в условиях низких климатических температур наиболее эффективно использование расчетных методов изучения тепловых процессов. В этом направлении большой вклад внес Н.Н. Рыкалин, им получены аналитические решения уравнения теплопроводности для определения температурного поля [8]. В последнее время для более точного решения применяют компьютерные методы в объемной постановке [9–12]. Это позволяет учитывать особенности геометрии заготовок и граничные условия, распределение и форму источника теплоты, изменение теплофизических свойств материалов при изменении температуры.

Сопоставление результатов [4, 13, 14] экспериментального определения тепловых процессов при различных температурах воздуха (при

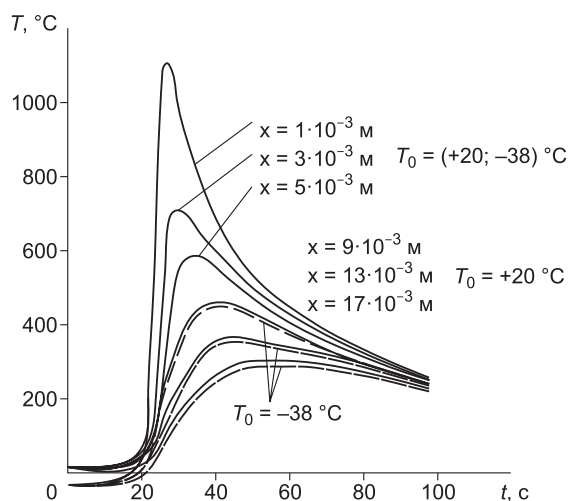


Рис. 1. Термические циклы точек, расположенных на расстояниях 1, 3, 5, 9, 13, 17 мм от линии сплавления для однопроходной сварки стали 14Г2САФ (погонная энергия $q_n = 1092 \pm 54,5$ кДж/м): сплошная – $T_c = 20$ °C, штриховая – $T_c = -38$ °C [14]

Fig. 1. Thermal cycles of points located at distances of 1, 3, 5, 9, 13, 17 mm from the fusion line for single-pass welding of 14G2SAF steel (heat input, $Q = 1092 \pm 54.5$ kJ/m): solid line – $T_w = 20$ °C, dashed line – $T_w = -38$ °C [14]

+20 и –38...50 °C) позволило установить, что существенное влияние на распределение температур при сварке имеет размер образцов. При сварке малоразмерных образцов (200×250×10 мм) термические циклы в точках, расположенных непосредственно вблизи линии сплавления (от 1 до 5 мм), почти совпадают (рис. 1). Заметные расхождения ТЦС начинаются в точках, где максимальная температура около 500 °C. По мере удаления от линии сплавления разность максимальных температур возрастает, достигая 50–55 °C на расстоянии примерно 45 мм (рис. 2). При сварке наибольшее изменение структуры и свойств металла испытывает высокотемпературный участок ЗТВ – участок перегрева [5, 15, 16]. Таким образом, при сварке небольших образцов существенных различий в структуре зон сварных соединений не наблюдается [4].

При увеличении размера свариваемых пластин до 450×250×10 мм различие в кинетике распределения температуры возрастает (рис. 3). Начиная с температур 580–500 °C и ниже локализация в распространении тепла становится более заметной (рис. 4), чем в случае малоразмерных образцов, хотя погонная энергия сварки во втором случае больше примерно на 350 кДж/м (на

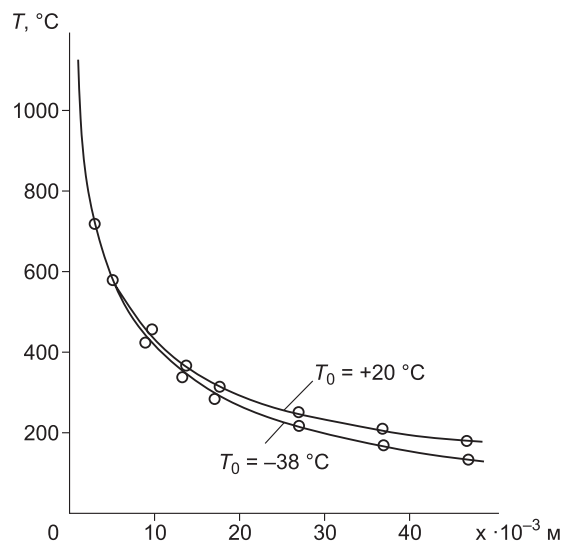


Рис. 2. Распределение максимальных температур в направлении, перпендикулярном линии сплавления, $q_n = 1092 \pm 54,5$ кДж/м [14]

Fig. 2. Distribution of maximum temperatures in the direction perpendicular to the bonding line, $Q = 1092 \pm 54.5$ kJ/m [14]

32 %). Различие скоростей охлаждения участков перегрева ЗТВ в интервале температур 500–600 °C в данном случае достигло ~30 % [14]. В работе [13] изучены ТЦС кольцевых стыков труб диаметром 1220 мм с толщиной стенки 15 мм, погонная энергия сварки корневого шва – 1640 кДж/м. Установлено, что при температуре выполнения сварки –43 °C в интервале температур 600...500 °C скорость охлаждения металла шва увеличивается в среднем на 40 %, а длительность охлаждения металла шва от 300 до 100 °C уменьшается в 2–4 раза.

Таким образом, вид температурного поля в изделии при сварке в условиях отрицательных температур окружающего воздуха существенно зависит от размера (массивности) свариваемых деталей. В малоразмерных пластинах за счет более интенсивного отражения тепла от краев образца ТЦС при отрицательных и положительных температурах существенно не различаются. В более массивных образцах при сварке в условиях отрицательных температур наблюдается увеличение скорости охлаждения участка перегрева сварного соединения по сравнению со сваркой при комнатной температуре.

В целом проведенные экспериментальные исследования тепловых процессов при сварке ста-

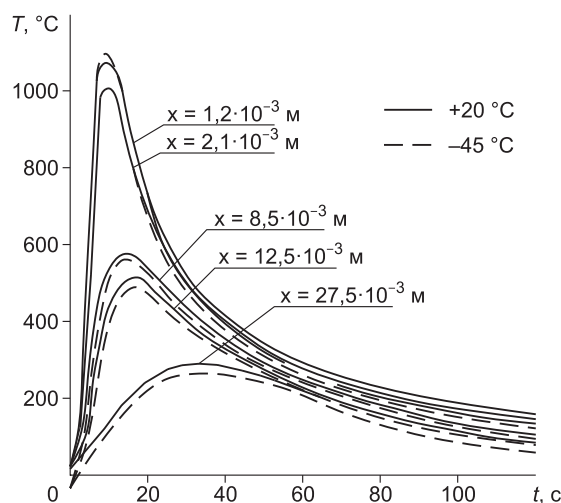


Рис. 3. Термические циклы отдельных точек при сварке пластин, $q_n = 1537 \pm 32$ кДж/м [14]

Fig. 3. Thermal cycles of individual points during welding plates, $Q = 1537 \pm 32$ kJ/m [14]

лей в условиях низких климатических температур позволили установить следующее:

- идентичность теплового баланса в области наплавленного металла и зоны, нагретой выше 600–700 °С, при однократной сварке одинаковыми погонными энергиями в условиях положительных и отрицательных температур окружающего воздуха;

- увеличение от 30 до 57 % скорости охлаждения участка перегрева ЗТВ в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита (600...500 °С) при сварке в условиях низких температур до –50 °С по сравнению со сваркой при +20 °С в диапазоне одинаковых погонных энергий от 800 до 4000 кДж/м [14].

Особенности сварки конструкционных сталей в зимних условиях

При сварке конструкций в зимних условиях рекомендуется увеличить погонную энергию сварки (q_n) для замедления скорости охлаждения (W_o) жидкого металла, улучшения структуры и механических свойств сварного соединения. На каждые 10 °С снижения (начиная с +20 °С) температуры окружающей среды рекомендуют увеличение погонной энергии на 4...8 % [17]. В работе [14] рассмотрено влияние q_n на термические циклы при ручной сварке в условиях отрицательных

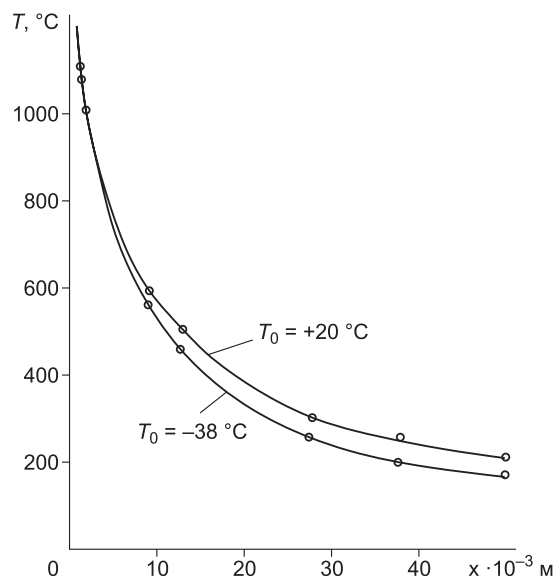


Рис. 4. Распределение максимальных температур в направлении, перпендикулярном линии сплавления, $q_n = 1537 \pm 32$ кДж/м [14]

Fig. 4. Distribution of maximum temperatures in the direction perpendicular to the bonding line, $Q = 1537 \pm 32$ kJ/m [14]

температур пластин 350×250 мм и толщиной 16 и 20 мм (рис. 5). Экспериментально показано снижение W_o в интервале температур 600–500 °С при увеличении q_n , что позволяет уменьшить различия термических циклов сварки пластин. Таким образом, при сварке в условиях низких температур регулировать скорость охлаждения ЗТВ в определенных пределах можно изменением погонной энергии сварки.

Значительная роль в исследовании кинетики фазовых превращений отводится экспериментальным методам, основанным на построении и анализе анизотермических и структурных диаграмм. Такие диаграммы, дополненные данными о механических характеристиках, позволяют прогнозировать оптимальную структуру и свойства сварных соединений и осуществлять выбор обеспечивающих их значений параметров режимов сварочного процесса [18–23]. При разработке технологии сварки при отрицательных температурах окружающего воздуха необходимо учитывать не только особенности распространения тепла в этих условиях, но и кинетику фазовых превращений и ее влияние на структуру и свойства продуктов распада аустенита. Структурные превращения при сварке сталей различных марок существенно различаются и зависят от химического состава стали и параметров ТЦС [24].

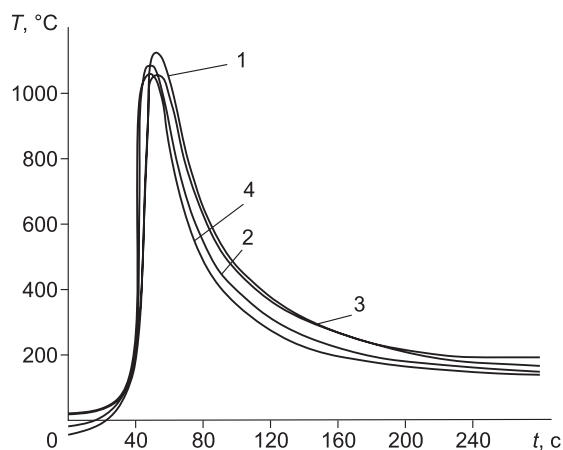


Рис. 5. Термические циклы точек при сварке пластин: 1 – $q_{\text{п}} = 2637,8$ кДж/м, $T_{\text{с}} = 20$ °С; 2 – $q_{\text{п}} = 2932$ кДж/м, $T_{\text{с}} = -25$ °С; 3 – $q_{\text{п}} = 2732$ кДж/м, $T_{\text{с}} = -38$ °С; 4 – $q_{\text{п}} = 2566$ кДж/м, $T_{\text{с}} = 20$ °С [14]

Fig. 5. Thermal cycles of points during welding plates: 1 – $Q = 2637,8$ kJ/m, $T_{\text{w}} = 20$ °С; 2 – $Q = 2932$ kJ/m, $T_{\text{w}} = -25$ °С; 3 – $Q = 2732$ kJ/m, $T_{\text{w}} = -38$ °С; 4 – $Q = 2566$ kJ/m, $T_{\text{w}} = 20$ °С [14]

С ростом скорости охлаждения увеличивается вероятность образования закалочных структур, что может привести к снижению сопротивляемости сварных соединений к хрупким разрушениям [4]. В работах [4, 14, 25] показано, что повышение скорости охлаждения зоны сварки приводит к росту характеристик прочности, твердости, а также снижению показателей пластичности сталей 20ХГ, 20НГМФ, St600, 10ХСНД, 14Х2ГМР и 14Г2САФ, вследствие увеличения количественного содержания закалочных структур – бейнита и мартенсита. В стали марки 09Г2С повышение скорости охлаждения приводит к аналогичным изменениям механических характеристик, вследствие образования бейнита [26]. В работе [4] представлены сравнительные результаты ударных испытаний металла шва и участка зоны термического влияния (по линии сплавления) сварных соединений сталей 20, ВСтЗсп, 09Г2С и 10Г2С1, испытания выполнены при температурах +20 и –45 °С. Ручная дуговая сварка производилась постоянным током обратной полярности электродами УОНИ 13/45, УОНИ 13/55, ОЗС-4, ОЗС-6, МР-3, АНО-7 и АНП-1. Наилучшие результаты с позиции хладостойкости (ударной вязкости) получены при применении стали 09Г2С и электродов марки УОНИ 13/45 и УОНИ 13/55. Аналогичные испытания, только с использованием современных марок отечественных электродов ХОБЭКС-К-54, УОНИ 13/Мороз, LB-52TRU

и импульсно-дуговой сварки, выполнены в работе [27].

Основной целью работ [4, 13, 14, 25–27] было изучение влияния тепловложения на структуру, свойства и напряженное состояние сварных соединений и определение наиболее благоприятного режима сварки с точки зрения обеспечения хладостойкости при выполнении сварочных работ в условиях отрицательных температур. Показано, что для каждого конкретного сочетания основного и присадочного материалов имеют место оптимальные диапазоны уровней погонной энергии сварки, при которых обеспечивается хладостойкость сварного соединения.

Изучена сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин при сварке в условиях низких климатических температур [28–31]. Известно, что водород является необходимым фактором в процессах протекания замедленного разрушения сварных соединений сталей при образовании холодных трещин. Показано, что при сварке в условиях отрицательных температур окружающего воздуха замедляется диффузия водорода в сварном соединении, а сопротивляемость образованию холодных трещин снижается до 40 %. Установлено, что изменение содержания водорода в шве от 8 до 1 см³/100 г повышает сопротивляемость стали 17Г1С холодным трещинам примерно в 2 раза. Повышение содержания водорода в наплавленном металле от 5 до 8 см³/100 г приводит к снижению минимального разрушающего напряжения сварных соединений сталей 17Г1С, 10ХСНД, 10Г1С1 на 10–20 %. При снижении количества водорода в наплавленном металле до уровня ниже 5 см³/100 г сопротивляемость сталей холодным трещинам возрастает на 50–60 %. Было установлено, что при сварке сталей повышенной прочности марок 10ХСНД, 17Г1С и 14Г2САФ холодные трещины не появляются, если содержание водорода в шве меньше 3 см³/100 г. В связи с этим для получения сварных соединений без холодных трещин необходимо применять низководородистые сварочные материалы. Также отмечается, что при многопроходной сварке существенно увеличивается время нахождения сварного соединения выше температуры 100 °С, что способствует выделению диффузионного водорода из сварного соединения. В работе [32] для снижения концентрации водорода рекомендует-ся послесварочный подогрев до +200 °С.

Изменение погонной энергии сварки позволяет регулировать скорость охлаждения металла шва выше 500 °С, но действие ее в низкотемпературной области не существенно. Подогрев позволяет регулировать низкотемпературную область ТЦС. Склонность сварных соединений жестких проб к образованию холодных трещин при отрицательных температурах уменьшается пропорционально длительности охлаждения металла шва от 300 до 100 °С [4, 13]. При этом подогрев устраняет образование холодных трещин в жестких пробах, если содержание водорода в металле шва ниже критического. В связи с этим температуру подогрева образцов при сварке в условиях низких температур рекомендуют увеличивать на 70–80 % по сравнению с их сваркой при 20 °С [29]. В работе [33] установлены режимы предварительного подогрева, обеспечивающие высокое металлургическое качество металла шва и требуемые механические свойства металла во всех зонах сварного соединения при выполнении кольцевых стыков магистральных трубопроводов из труб класса прочности К56 при низких температурах окружающей среды.

В то же время, влияние предварительного подогрева на хладостойкость сварных соединений стали марки 09Г2С неоднозначно [4]. Испытания показали, что на механические свойства сварных соединений предварительный подогрев не оказывает существенного влияния. Металлографический анализ не выявил наличия в металле шва и ЗТВ закаленных структур. Результаты испытаний на ударную вязкость показывают, что в случае сварки с предварительным подогревом порог хладноломкости металла шва и ЗТВ смещается в сторону положительных температур. Показано, что предварительный подогрев до +150 °С при ручной дуговой сварке с применением электродов типа УОНИ и автоматической сварке проволокой Св-10ГС под флюсом АН-348А в условиях отрицательных температур окружающего воздуха приводит к усилению склонности металла шва к хрупкому разрушению по сравнению со случаями сварки без предварительного подогрева [34]. В работе [30] авторы сходятся во мнении, что многопроходная сварка электродами после высокотемпературной проковки и сварка с предварительной наплавкой кромок существенно повышают технологическую прочность, что позволяет исключить предварительный подогрев при сварке тавровых соединений из низколегирован-

ных высокопрочных сталей толщиной 16 мм при низких температурах.

Таким образом, в пределах одного метода сварки термический цикл может также подвергаться значительным изменениям в зависимости от параметров источника нагрева, условий дополнительного теплового воздействия за счет подогрева или охлаждения изделия, свариваемого материала и его толщины и других факторов.

Структурные превращения и свойства металла ЗТВ сварных соединений мостовой стали 10ХСНД

Далее для планируемой нами разработки рекомендаций по сварке в зимний период сосредоточимся на рассмотрении определенной марки стали, применяемой в мостостроении. В условиях огромных расстояний и экстремального климата для районов Крайнего Севера строительство автодорог и мостов имеют особое значение для развития транспортной инфраструктуры и экономического потенциала дальневосточных регионов. При этом основным технологическим процессом, используемым при строительстве мостовых конструкций, является сварка. В связи с этим одними из требований к сталям, применяемым при строительстве сварных мостов, являются хорошая свариваемость и достаточная вязкость металла околошовной зоны [35]. Кроме того, для районов с холодным климатом используемые стали должны обладать повышенным сопротивлением развитию трещины и пониженной критической температурой хрупкости [36].

По результатам сравнительного анализа мостовых сталей авторы в работе [37] пришли к выводу, что сталь марки 10ХСНД является наиболее перспективной для строительства несущих элементов конструкций мостов, к которым предъявляются требования повышенной прочности, коррозионной стойкости, низкой чувствительности к концентраторам напряжений. Кроме того, данная сталь имеет высокие характеристики ударной вязкости, что позволяет сопротивляться хрупкому разрушению. Низколегированная конструкционная сталь 10ХСНД широко применяется в производстве тяжелой техники, при строительстве зданий и мостов, работающих при температуре от –70 до 450 °С [38]. По ГОСТ 6713-2021 прокат из стали марки 10ХСНД в зависимости от вида термообработки изготавливается трех категорий: 1 – без термообработки; 2 – в нормализованном состоянии; 3 – в тер-

Таблица 1

**Механические свойства
низколегированной стали 10ХСНД,
толщина проката 4-50 мм,
для всех категорий поставки (ГОСТ 6713-2021)**

Table 1

Mechanical properties of low-alloy steel 10HSND

Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %
530–685	Не менее 390	Не менее 19

мически улучшенном состоянии после закалки и высокого отпуска. Согласно СТО-ГК «Трансстрой»-012-2018 к сталям для мостостроения предъявляются особые требования с учетом работы основных несущих конструкций пролетных строений и опор на статические, динамические и вибрационные нагрузки в любых климатических зонах с расчетной минимальной температурой воздуха до -40°C включительно – обычное исполнение (применяется сталь 10ХСНД 1 категории), ниже -40°C до -50°C включительно – северное исполнение А (применяется сталь 10ХСНД 2 категории) и ниже -50°C – северное исполнение Б (применяется сталь 10ХСНД 3 категории).

В табл. 1 представлены механические свойства, в табл. 2 приведен химический состав листовой стали 10ХСНД по ГОСТ 6713-2021. Микроструктура состоит из полигонального феррита и перлита, характерных для низколегированных сталей. Свариваемость стали 10ХСНД характеризуется как без ограничений [38].

В работе [39] представлена термокинетическая диаграмма анизотермического превращения аустенита в стали 10ХСНД (рис. 6), построенная по данным дилатометрических и металлографических исследований с температуры 900°C . По диаграмме видно, что при скоростях охлаждения $W_0 = 1,6 \dots 5^\circ\text{C/s}$ наблюдается ферритное и бейнитное превращение, а при $W_0 = 8,5 \dots 20^\circ\text{C/s}$ – ферритное, бейнитное и мартенситное. В диапазоне скоростей охлаждения $W_0 = 36 \dots 100^\circ\text{C/s}$ протекают бейнитное и мартенситное превращения. Твердость образцов, охлажденных со скоростями 5 и $8,5^\circ\text{C/s}$, составляет $HV\ 201$ и 213 соответственно. При $W_0 = 5^\circ\text{C/s}$ образуется 70 % бейнита и 30 % феррита, а при $W_0 = 8,5^\circ\text{C/s}$ образцы имеют 20 % феррита, 70 % бейнита и 10 % мартенсита. Феррит наблюдается в виде светлых выделений по границам зерен с преобладающей бейнитной структурой. Бейнит клас-

Таблица 2

**Химический состав низколегированной стали
10ХСНД (по ГОСТ 6713-2021), %**

Table 2

Chemical composition of low-alloy steel 10HSND

C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe
<0,12	0,8–1,1	0,5–0,8	0,5–0,8	0,6–0,9	0,4–0,6	ост.

сифицируется как игольчатый. При $W_0 = 8,5^\circ\text{C/s}$ мартенсит наблюдается в виде маленьких «облачков» в бейнитном поле. По результатам исследований стали 10ХСНД авторами установлен диапазон допустимых скоростей охлаждения – $W_0 = 2,5 \dots 50^\circ\text{C/s}$ при сварке. В данном диапазоне образуются ферритные включения, которые создают мягкую прослойку, что облегчает локальное деформирование материала, а следовательно, повышается пластичность участка перегрева ЗТВ сварного соединения. Необходимо, отметить, что для более точного анализа сопротивляемости образованию холодных трещин металла сварного соединения необходимо построить термокинетическую диаграмму с температуры 1350°C , которая наблюдается на участке перегрева ЗТВ сварного соединения. Дело в том, с повышением температуры нагрева металла изменяется кинетика распада переохлажденного аустенита и увеличивается доля фаз, образовавшихся по сдвиговому механизму.

В работе [40] выполнено сопоставление данных, полученных при имитации ТЦС для построения термокинетических диаграмм, а также исследование количественных соотношений между структурными составляющими и механическими свойствами стали 10ХСНД различного химического состава (в пределах марочного). Изучены термокинетические диаграммы стали 10ХСНД, полученные в Ростовском университете (Германия), ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, Институте электросварки (ИЭС) им. Е.О. Патона (г. Киев) и Институте физико-технических проблем Севера (г. Якутск). В диаграмме, построенной в Ростовском университете, M_n (температура начала мартенситного превращения) равна $450 \dots 400^\circ\text{C}$, интервал температур ферритного превращения составляет $750 \dots 550^\circ\text{C}$, бейнитное превращение происходит при $650 \dots 450^\circ\text{C}$. В диаграмме ИФТПС точка M_n равна $450 \dots 420^\circ\text{C}$, фер-

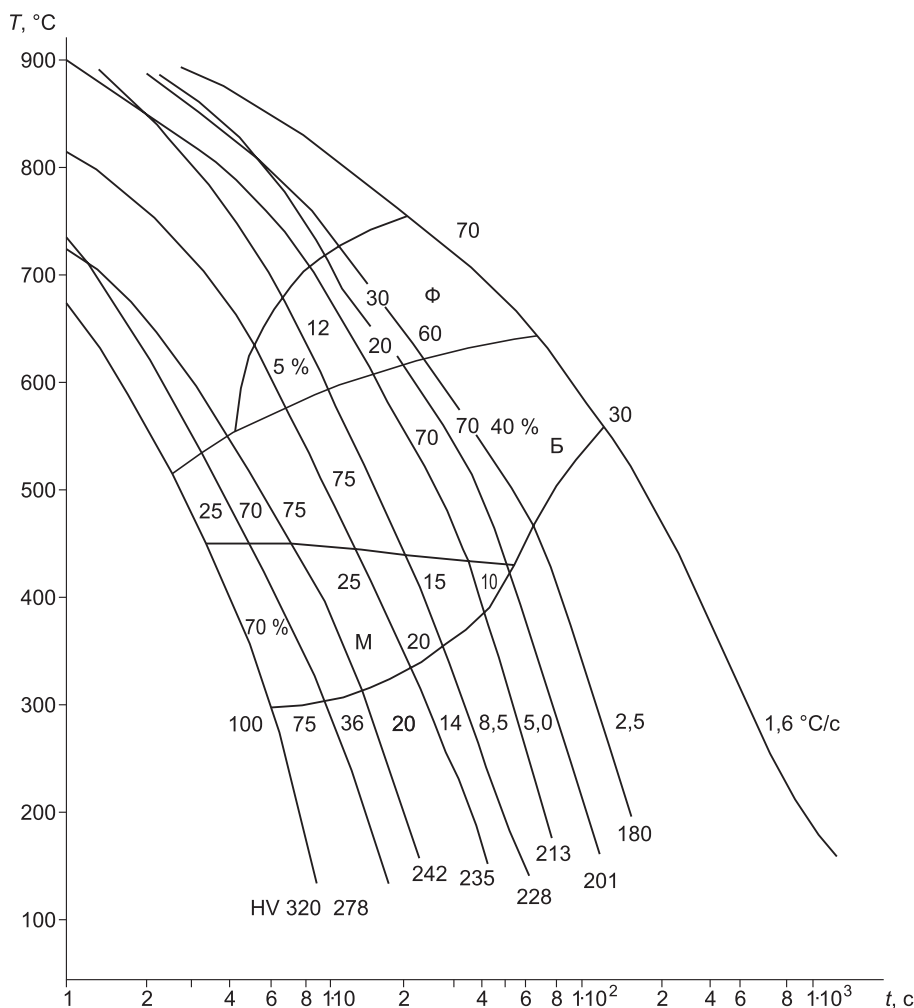


Рис. 6. Термокинетическая диаграмма анизотермического превращения в стали 10ХСНД: Ф – феррит; Б – бейнит; М – мартенсит [39]

Fig. 6. Thermokinetic diagram of anisothermal transformation in 10HSND steel: Ф – ferrite; Б – bainite; М – martensite [39]

ритное превращение происходит при 750...550 °С, бейнитное превращение – при 650...420 °С. В диаграмме ИЭС температуры начала и конца бейнитного превращения при малых скоростях составляют 580 и 380 °С. Результаты дилатометрических исследований показывают, что разница в содержании легирующих элементов в пределах марочного состава существенно влияет на кинетику превращения аустенита. Аналогичные результаты для других марок сталей показаны и в работе [24].

На рисунках 7 и 8 представлены механические свойства металла ЗТВ, исследованного в Ростовском университете, и сварного соединения стали 10ХСНД, исследованного в ИЭС [40]. В Ростовском университете механические свойства определяли на дилатометрических образ-

цах толщиной 2 мм после имитации на них ТЦС. В ИЭС их определяли непосредственно на сварных соединениях. Наиболее высокие значения работа удара (A) имеет при длительности охлаждения скорости 8...45 с ($W_o = 8...40$ °С/с) (см. рис. 7). В ИЭС ударную вязкость (a_n) находили на стандартных образцах сечением 10×10 мм с U-образным надрезом (см. рис. 8). Значения ударной вязкости при +20 °С отличаются от значений a_n , полученных в Ростовском университете на дилатометрических образцах, но находятся в допустимых пределах. Полученные данные позволили авторам выбрать допустимый диапазон скоростей охлаждения $W_o = 3,5...55$ °С/с.

Обзор литературы показал, что 1970–1990-х годах сотрудниками Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

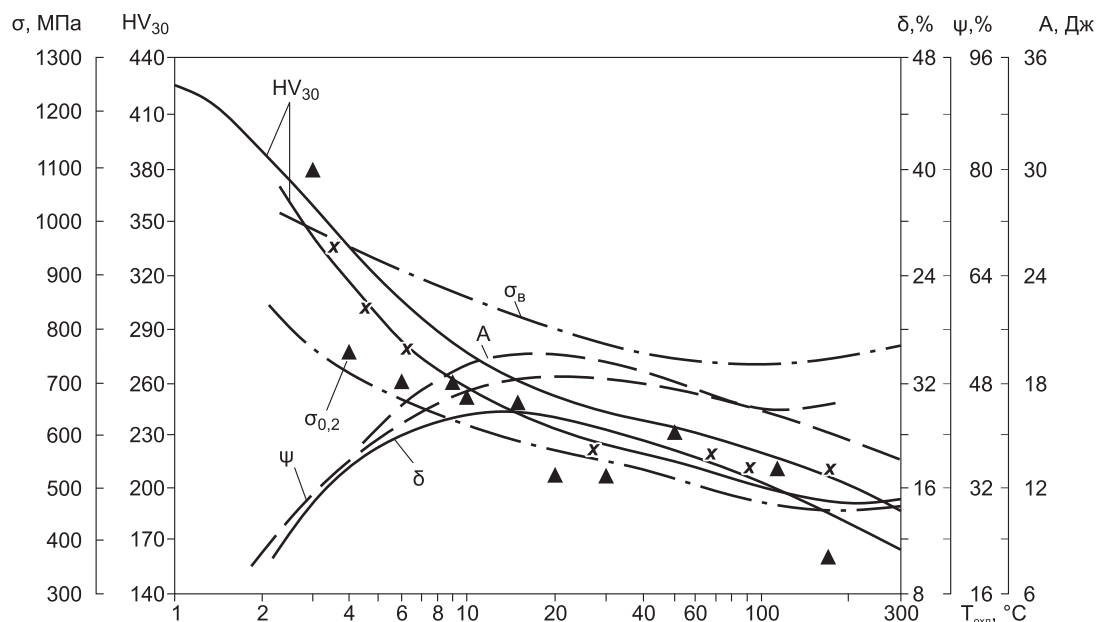


Рис. 7. Механические свойства металла ЗТВ стали 10ХСНД (в интервале охлаждения 850...500 $^{\circ}\text{C}$), исследованной в Ростокском университете: х – твердость проката стали 10ХСНД, исследованной в ИЭС; ▲ – то же, в ИФТПС; А – работа удара [40].

Fig. 7. Mechanical properties of the HAZ metal of 10HSND steel (in the cooling range of 850...500 $^{\circ}\text{C}$), studied at the University of Rostock: x – the hardness of rolled 10HSND steel, as studied at the E.O. Paton Electric Welding Institute; ▲ – is the same, as at the ¹Institute of Physical and Technical Problems of the North; A – the impact work [40].

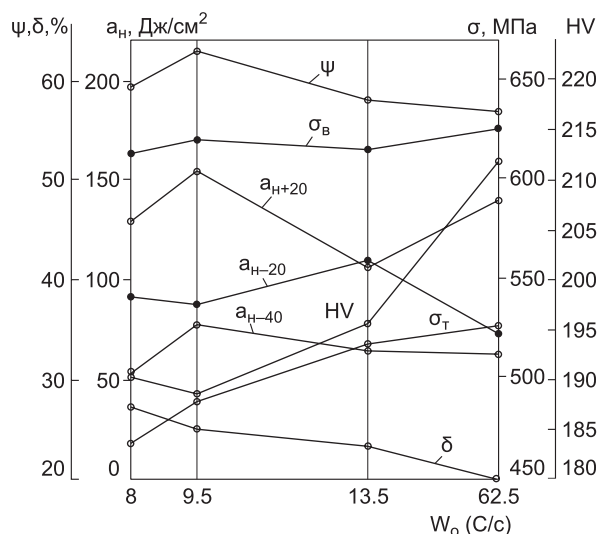


Рис. 8. Механические свойства сварных соединений стали 10ХСНД, исследованной в ИЭС [40]

Fig. 8. Mechanical properties of welded joints of 10HSND steel were studied at the E.O. Paton Electric Welding Institute [40]

(г. Якутск) совместно с коллегами из Института электросварки (ИЭС) им. Е.О. Патона (г. Киев) и Ростокского университета (Германия) были получены значимые экспериментальные результаты в области свариваемости и технологической

прочности сварных соединений сталей при сварке в условиях низких климатических температур. Результаты данных исследований являются тем фундаментом знаний, опираясь на которые, необходимо развивать научные основы обеспечения работоспособности сварных соединений металлоконструкций северного и арктического исполнения.

Закключение

Проведенные экспериментальные исследования сопоставления тепловых процессов при сварке сталей в условиях отрицательных температур (до -50°C) и положительной ($+20^{\circ}\text{C}$) позволили установить, что распределение температурного поля в изделии при сварке в разных температурах окружающего воздуха существенно зависит от размера (массивности) свариваемых деталей. В малоразмерных пластинах за счет более интенсивного отражения тепла от краев образца термические циклы сварки при разных температурах существенно не различаются. Увеличение от 30 до 57 % скорости охлаждения участка перегрева ЗТВ сварного соединения в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита (600...500 $^{\circ}\text{C}$) по сравнению со сваркой при

+20 °C наблюдаются в достаточно массивных образцах.

С ростом скорости охлаждения увеличивается вероятность образования закалочных структур, что может привести к снижению сопротивляемости сварных соединений к хрупким разрушениям. Одним из способов замедления скорости охлаждения является увеличение погонной энергии сварки. Экспериментально показано, что при сварке в условиях низких температур скорость охлаждения ЗТВ в установленных пределах можно регулировать изменением погонной энергии сварки. Другим способом замедления скорости охлаждения в процессе сварки является предварительный и сопутствующий подогрев. Влияние предварительного подогрева на хладостойкость сварных соединений низколегированных сталей неоднозначно, к примеру для стали 09Г2С обнаружено снижение хладостойкости. К тому же подогрев в зимнее время очень энергоемкий процесс из-за сильного теплоотвода. Поэтому перспективна разработка технологии сварки без предварительного подогрева в условиях низких температур окружающего воздуха.

Увеличение скорости охлаждения в интервале температур от 300 до 100 °C при сварке в условиях отрицательных температур замедляет диффузию водорода, что повышает содержание водорода в шве и, соответственно, вероятность образования холодных трещин. Для получения сварных соединений без холодных трещин необходимо применять низководородистые сварочные материалы, оптимальные уровни погонной энергии сварки и соответствующие режимы подогрева.

Структурные превращения при сварке сталей различных марок существенно различаются и зависят от химического состава стали и параметров термического цикла сварки. Результаты дилатометрических исследований показывают, что даже разница в содержании легирующих элементов в пределах марочного состава существенно влияет на кинетику превращения аустенита. Поэтому при разработке технологии сварки при отрицательных температурах окружающего воздуха необходимо учитывать не только особенности распространения тепла в этих условиях, но и кинетику фазовых превращений и ее влияние на структуру и свойства продуктов распада аустенита. Поэтому для разработки рекомендаций по сварке конструкционных сталей при отрицательных температурах (до –60 °C) необходимо иметь термокинетические диаграммы распада переох-

лажденного аустенита с температуры 1350 °C, которая является более показательной для оценки сопротивляемости образованию холодных трещин металла сварного соединения.

Таким образом, перспективным является проведение физического моделирования термокинетических процессов сварки на Gleeble 3800 для установления оптимального диапазона скоростей охлаждения и погонной энергии сварки по критерию структуры, твердости и ударной вязкости для разработки технологии сварки стали 10ХСНД при температурах окружающего воздуха до –60 °C без подогрева.

Список литературы / References

1. Гаврилова М.К. *Климаты холодных регионов земли*. Якутск: Изд-во СО РАН; 1998. 206 с.
Gavrilova M.K. *Climates of cold regions of the Earth*. Yakutsk: Publishing House SB RAS; 1998. 206 p. (In Russ.)
2. *Стандарт организации*. СТО-ГК «Трансстрой»-005-2018. Стальные конструкции мостов. Технология монтажной сварки. М.: АО ЦНИИС; 2019. 148 с.
Organizational standard. Transstroj-005-2018. Steel bridge constructions. On-site welding techniques. Moscow: TSNIIS Publ.; 2019. 148 p. (In Russ.)
3. *СП 46.13330.2012. Мосты и трубы*. Актуализированная редакция СНиП 3.06.04-91. М.: Минрегион России; 2012. 142 с.
Russian regulation SP 46.13330.2012. *Bridges and pipes*. Revised edition of SNiP 3.06.04-91. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2012. 142 p.
4. Ларионов В.П. *Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении*. Новосибирск: Наука; 1986. 253 с.
Larionov V.P. *Electric arc welding of structures in the northern region*. Novosibirsk: Nauka; 1986. 253 p. (In Russ.)
5. Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Вышемирский Е.М. и др. *Традиционные и перспективные стали для строительства магистральных газонефтепроводов*. М.: Логос; 2011. 316 с.
Efimenko L.A., Elagina O.Yu., Vyshemirskii E.M., et al. *Traditional and advanced steels for the construction of gas and oil trunk pipelines*. Moscow: Logos Publ.; 2011. 316 p. (In Russ.)
6. Павлов Н.В., Чинахов Д.А., Крюков А.В. Исследование экспериментального и теоретического распределения температурных полей при сварке плавлением. *Тяжелое машиностроение*. 2010;(8):25–27.
Pavlov N.V., Chinahov D.A., Krjukov A.V. Study of experimental and theoretical temperature field distributions during fusion welding. *Tyazheloye Mashinostroyeniye*. 2010;(8):25–27. (In Russ.)
7. Гарсия В. Измерение температуры: теория и практика. *Современные технологии автоматизации*. 1999;(1):82–87.

- Garsiya V. Temperature measurement: theory and practice. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*. 1999;(1): 82–87. (In Russ.)
8. Рыкалин Н.Н. *Расчеты тепловых процессов при сварке*. М.: Машгиз; 1951. 296 с.
- Rykalin N.N. *Calculations of thermal processes during welding*. Moscow: Mashgiz Publ.; 1951. 296 p. (In Russ.)
9. Макаров Э.Л., Королев С.А., Штрикман М.М., Кашук Н.М. Моделирование тепловых процессов при frictionной сварке. *Сварка и диагностика*. 2010;(3): 21–25.
- Makarov E.L., Korolev S.A., Shtrikman M.M., Kashchuk N.M. Modeling of thermal processes during friction welding. *Svarka i diagnostika (Welding and Diagnostics)*. 2010;(3):21–25. (In Russ.)
10. Arora H., Singh R., Brar G.S. Thermal and structural modelling of arc welding processes: A literature review. *Measurement and Control*. 2019;52(7-8):955–969. <https://doi.org/10.1177/0020294019857747>
11. Meyghani B., Awang M.B., Emamian S.S., et al. A comparison of different finite element methods in the thermal analysis of friction stir welding (FSW). *Metals*. 2017.7(10):450. <https://doi.org/10.3390/met7100450>
12. Andrade D.G., Leitão C., Dialami N., et al. Modelling torque and temperature in friction stir welding of aluminium alloys. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;182:105725. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105725>
13. Слепцов О.И. *Технологическая прочность сварных соединений при низких температурах*. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние; 1984. 102 с.
- Sleptsov O.I. *Technological strength of welded joints at low temperatures*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 102 p. (In Russ.)
14. Аммосов А.П. *Термодеформационные процессы и разрушение сварных соединений*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1988. 136 с.
- Ammosov A.P. *Thermal deformation processes and destruction of welded joints*. Yakutsk: YaSC SB AS USSR; 1988. 136 p. (In Russ.)
15. Николаев Г.А. *Сварка в машиностроении: справочник в 4-х томах*. М.: Машиностроение; 1978. Т. 1. 504 с.
- Nikolaev G.A. *Welding in mechanical engineering: reference book*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1978. Volume 1. 504 p. (In Russ.)
16. Степанов П.П. Исследование ударной вязкости трубных сталей после имитации термических циклов сварки и сварных соединений труб большого диаметра. *Сталь*. 2022;(10):42–49.
- Stepanov P.P. Study of impact toughness of pipe steel after simulation of thermal cycles of welding and welded joints of large diameter pipes. *Steel Transl*. 2022;52:987–995. <https://doi.org/10.3103/S0967091222100126>
17. *Правила технической эксплуатации резервуаров*. М.: АО «НК «РОСНЕФТЬ»; 2004. 111 с.
- Guidelines for the technical operation of tanks*. Moscow: ROSNEFT; 2004. 111 p. (In Russ.)
18. Шоршоров М.Х., Белов В.В. *Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке: Атлас*. М.: Наука; 1972. 220 с.
- Shorshorov M.Kh., Belov V.V. *Phase transformations and changes of steel properties in welding: Atlas*. Moscow: Nauka; 1972. 220 p. (In Russ.)
19. Попова Л.Е., Попов А.А. *Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: справочник*. М.: Металлургия; 1991. 503 с.
- Popova L.E., Popov A.A. *Diagrams of transformation of austenite in steels and beta solution in titanium alloys: a reference book*. Moscow: Metallurgiya; 1991. 503 p. (In Russ.)
20. Емелюшин А.Н., Шекшеев М.А. Исследование влияния термических циклов на структуру основного металла при сварке стали категории прочности К56. В кн.: *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы докладов 69-й международной научно-технической конференции, Т. 1*. Магнитогорск; 2011. С. 150–153.
- Emelyushin A.N., Sheksheev M.A. Study of the influence of thermal cycles on the structure of the base metal when welding steel of strength category K56. In: *Current problems of modern science, technology and education: Abstracts of the 69th International Scientific and Technical Conference, Vol. 1*. Magnitogorsk; 2011, pp. 150–153. (In Russ.)
21. Arya H., Singh K., Singh S. Cooling rate effect on microhardness for SAW welded Mild steel plate. *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME)*. 2013;2(2):71–77.
22. Ефименко Л.А., Капустин О.Е., Шкапенко А.А. и др. Формирование структуры сварных соединений высокопрочных сталей при автоматической сварке в защитных газах. *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. 2012;32(4):34–42.
- Efimenko L.A., Kapustin O.E., Shkapenko A.A., et al. Welded joints high-strength steels structure formation at protective gases automatic welding. *Truboprovodnyi transport: teoriya i praktika*. 2012;32(4):34–42. (In Russ.)
23. Zhang W., Elmer J., Debroy T. Kinetics of ferrite to austenite transformation during welding of 1005 steel. *Scripta Materialia*. 2002;46(10):753–757. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00040-4)
24. Шоршоров М.Х. *Металловедение сварки стали и сплавов титана*. М.: Наука; 1965. 336 с.
- Shorshorov M.Kh. *Metal science of welding steel and titanium alloys*. Moscow: Nauka; 1965. 336 p. (In Russ.)
25. Федотова М.А., Аммосов А.П., Ларионов В.П. *Структурные превращения и свойства материалов при сварке: препринт*. Якутск: Якутский науч. центр СО АН СССР; 1991. 28 с.
- Fedotova M.A., Ammosov A.P., Larionov V.P. *Structural transformations and properties of materials during welding: Preprint*. Yakutsk: YaSC SB AS USSR; 1991. 28 p. (In Russ.)
26. Аммосов А.П., Зайффарт П.И., Васильев В.Г., Довженко В.А. Структурные превращения и хладо-

стойкость соединений стали 09Г2С, выполненных дуговой сваркой. *Автоматическая сварка*. 1993;(2):12–15.

Ammosov A.P., Zaifart P.I., Vasil'ev V.G., Dovzhenko V.A. Structural transformations and cold resistance of 09G2S steel joints made by arc welding. *The Paton Welding Journal*. 1993;(2):12–15. (In Russ.)

27. Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Сидоров М.М. и др. Поисковые исследования повышения надежности сварных металлоконструкций ответственного назначения, эксплуатируемых в условиях Севера. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2017;77(4):30–42. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2017-4-30-42>

Saraev Yu.N., Golikov N.I., Sidorov M.M., et al. Exploratory research of reliability improvement of high-duty welded metal constructions operated under the conditions of the North. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*. 2017;77(4):30–42. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2017-4-30-42> (In Russ.)

28. Слепцов О.И., Михайлов В.Е., Петушков В.Г. и др. *Повышение прочности сварных конструкций для Севера*. Новосибирск: Наука; 1989. 223 с.

Sleptsov O.I., Mikhailov V.E., Petushkov V.G., et al. *Strength improvement of welded structures for the North*. Novosibirsk: Nauka; 1989. 223 p. (In Russ.)

29. Харбин Н.Н., Слепцов О.И., Сивцев М.Н., Винокуров Г.Г. Оценка влияния водорода на замедленное разрушение сварных соединений высокопрочных низколегированных сталей. *Автоматическая сварка*. 2012;(6):15–17.

Kharbin N.N., Sleptsov O.I., Sivtsev M.N., Vinokurov G.G. Assessment of the influence of hydrogen on the delayed destruction of welded joints of high-strength low-alloy steels. *The Paton Welding Journal*. 2012;(6):15–17. (In Russ.)

30. Слепцов О.И., Сивцев М.Н., Слепцов Г.Н., Харбин Н.Н. Оценка склонности сварных узлов конструкций северного исполнения к образованию холодных трещин. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018;20(4-1(84)):13–17.

Sleptsov O.I., Sivtsev M.N., Sleptsov G.N., Kharbin N.N. Estimation tendency of welded units designs of northern execution to formation of cold cracks. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018;20(4-1(84)):13–17. (In Russ.)

31. Михайлов В.Е., Лепов В.В., Алымов В.Т., Ларионов В.П. *Замедленное разрушение металлоконструкций*. Новосибирск: Издательство СО РАН; 1999. 224 с.

Mihajlov V.E., Lepov V.V., Alymov V.T., Larionov V.P. *Delayed fracture of metal structures*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 1989. 224 p. (In Russ.)

32. Стручкова Г.П. Перераспределение водорода при выборе рациональной технологии сварки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 1996. 16 с.

Struchkova G.P. Hydrogen redistribution in selecting of the rational welding procedure: Diss. ... Cand. Sci., Yakutsk. 1996. 16 p. (In Russ.)

33. Гончаров Н.Г., Нестеров Г.В., Юшин А.А. Технология сварки кольцевых стыков магистральных трубопроводов из труб класса прочности К56 при низких температурах окружающей среды. *Безопасность труда в промышленности*. 2018;(8):42–47. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2018-8-42-47>

Goncharov N.G., Nesterov G.V., Yushin A.A. Technology of welding of annular joints of the trunk pipelines from the pipes of strength class K56 at low ambient temperatures. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2018;(8):42–47. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2018-8-42-47>. (In Russ.)

34. Ларионов В.П., Ковальчук В.А. *Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений*. Новосибирск: Наука; 1976. 206 с.

Larionov V.P., Koval'chuk V.A. *Cold resistance and wear of machine parts and welded joints*. Novosibirsk: Nauka; 1976. 206 p. (In Russ.)

35. Голи-Оглу Е.А. Толстолистовые низкоуглеродистые микролегированные стали для корпусных и функциональных элементов мостов большегрузного транспорта. *Сталь*. 2020;(8):56–62.

Goli-Oglu E.A. Heavy plate low carbon microalloyed steel for axles' hull and functional parts of heavy loaded vehicles. *Steel Transl*. 2020;(8):56–62. (In Russ.)

36. Москвичев В.В., Махутов Н.А., Шокин Ю.И. и др. *Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем*. Новосибирск: Наука; 2021. 796 с.

Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Shokin Yu.I., et al. *Applied problems of structural strength and fracture mechanics of technical systems*. Novosibirsk: Nauka; 2021. 796 p. (In Russ.)

37. Молева Д.А., Белозор М.Ю. Обоснование применения сталей для изготовления конструкций мостов. *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2012;2(4):28–31.

Moleva D.A., Belozor M.Yu. Rationale for the use of steels for the manufacture of bridge structures. *Cherepovets State University Bulletin*. 2012;2(4):28–31. (In Russ.)

38. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. *Марочник сталей и сплавов*. 2-е изд. доп. и испр. М.: Машиностроение; 2003. 784 с.

Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskii Yu.V., et al. *Types of steel and alloy brands*. Moscow: Mashinostroenie, 2003. 784 p. (In Russ.)

39. Федотова М.А., Аммосов А.П., Васильев В.Г. Склонность зоны перегрева сварного соединения стали 10ХСНД к пластическому локальному деформированию. *Автоматическая сварка*. 1988;(8):71–72.

Fedotova M.A., Ammosov A.P., Vasil'ev V.G. Tendency of the overheating zone of the welded joint of 10KhSND steel to plastic local deformation. *The Paton Welding Journal*. 1988;(8):71–72. (In Russ.)

40. Зайффарт П.И., Гросс Х.Г., Довженко В.А. и др. Структурные превращения и свойства металла ЗТВ сварных соединений стали 10ХСНД. *Автоматическая сварка*. 1991;(8):12–16.

Zaiffart P.I., Gross Kh.G., Dovzhenko V.A., et al. Structural transformations and properties of the HAZ metal of welded joints of 10HSND steel. *The Paton Welding Journal*. 1991;(8):12–16. (In Russ.)

Об авторах

ГОЛИКОВ Николай Иннокентьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-9209-1592>, ResearcherID: Q-4976-2017, Scopus Author ID: 14623831600, SPIN: 8799-5600, e-mail: n.i.golikov@mail.ru

САННИКОВ Игорь Иннокентьевич, ведущий инженер, <https://orcid.org/0009-0005-4650-0291>, Scopus Author ID: 57060367400, SPIN: 8952-3740, e-mail: i.i.sannikov@mail.ru

СЕМЕНОВ Сергей Владимирович, ведущий инженер, аспирант, <https://orcid.org/0000-0002-6639-9195>, ResearcherID: ADZ-1535-2022, Scopus Author ID: 57226794277, SPIN: 3322-4584, e-mail: s1789@mail.ru

ИВАНОВ Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0002-5207-0049>, ResearcherID: G-9806-2019, Scopus Author ID: 57143617000, SPIN: 2947-5293, e-mail: ivanovma@susu.ru

Вклад авторов

Голиков Н.И. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта; **Санников И.И.** – проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, визуализация; **Семенов С.В.** – ресурсное обеспечение исследования, визуализация; **Иванов М.А.** – верификация данных, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

GOLIKOV, Nikolay Innokentievich, Dr. Sc. (Eng.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9209-1592>, ResearcherID: Q-4976-2017, Scopus Author ID: 14623831600, SPIN: 8799-5600, e-mail: n.i.golikov@mail.ru

SANNIKOV, Igor Innokentievich, Engineer, <https://orcid.org/0009-0005-4650-0291>, Scopus Author ID: 57060367400, SPIN: 8952-3740, e-mail: i.i.sannikov@mail.ru

SEMENOV, Sergey Vladimirovich, Engineer, Post-Graduate Student, <https://orcid.org/0000-0002-6639-9195>, ResearcherID: ADZ-1535-2022, Scopus Author ID: 57226794277, SPIN: 3322-4584, e-mail: s1789@mail.ru

IVANOV, Mikhail Alexandrovich, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Department, <https://orcid.org/0000-0002-5207-0049>, ResearcherID: G-9806-2019, Scopus Author ID: 57143617000, SPIN: 2947-5293, e-mail: ivanovma@susu.ru

Authors' contribution

Golikov N.I. – conceptualization, methodology, validation, investigation, review & editing, supervision, project administration; **Sannikov I.I.** – investigation, resources, data curation, original draft, visualization; **Semenov S.V.** – resources, visualization; **Ivanov M.A.** – validation, review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 25.07.2024

Поступила после рецензирования / Revised 09.08.2024

Принята к публикации / Accepted 14.08.2024