

Научная статья
УДК 624.072.14
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-488-499>
EDN: MTVTNT



ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ ВЫТЯЖКОЙ СТЕНКИ

Е. В. Кравчук¹, И. Ю. Белуцкий², В. А. Кравчук²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
г. Хабаровск, Россия

²Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ),
г. Хабаровск, Россия

004938@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5419-1365>

000177@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3881-2050>

000415@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4101-1334>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье представлен обобщенный анализ хладостойкости конструктивных элементов существующих стальных строительных конструкций и применение его к оценке хладостойкости стальной балки, предварительно напряженной вытяжкой тонкой стенки. Предмет исследования – стальные строительные конструкции. Объектом исследования является стальная биметаллическая балка, предварительно напряженная без затяжек.

Материалы и методы. Исследование базируется на механике твердых деформируемых тел, изучении механических свойств стали, работе стали в условиях низких температур с учетом влияния концентраторов напряжений и вероятности хрупких разрушений в элементах балки.

Результаты. Проведен анализ ударной вязкости сталей С440 и С245, применяемых в поясных листах и стенке предварительно напряженной балки. Установлено, что хладостойкость элементов балки обеспечивается при эксплуатации конструкции в диапазоне отрицательных температур от -45°C до -55°C . Доказано, что фактические нормальные напряжения в крайних волокнах сечения стенки предварительно напряженной балки ниже допустимых при пластическом деформировании материала стенки, а согласно теории М. Губера, Р. Мизеса и Г. Генки вероятность появления хрупких разрушений в зоне концентраторов напряжений мала. Установлено, что отсутствие ребер жесткости по стенке балки уменьшает пластические деформации, вызванные сваркой, снижает многоэлементность конструкции и повышает хладостойкость ее материала.

Выводы. Высокая степень устойчивости стенки предварительно напряженной балки позволяет проектировать ее достаточно тонкой, при этом повышая ее хладостойкость. Напряженное состояние конструкции, снижение ее массы, уменьшение толщины стенки, отсутствие концентраторов сварочных напряжений, а также снижение многоэлементности свидетельствуют о хладостойкости материала балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: предварительное напряжение, хрупкость, устойчивость, концентратор напряжений, многоэлементность, хладостойкость

БЛАГОДАРНОСТИ: благодарность рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 14.06.2023; одобрена после рецензирования 18.07.2023; принята к публикации 30.08.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Кравчук Е. В., Белуцкий И. Ю., Кравчук В. А. Хладостойкость стальной балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 488-499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-488-499>

© Кравчук Е. В., Белуцкий И. Ю., Кравчук В. А., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-488-499>
EDN: MTVTNT

COLD RESISTANCE OF STEEL BEAM PRESTRESSED BY WALL DRAWING

Evgenii V. Kravchuk¹, Igor Yu. Belutskii², Valerii A. Kravchuk²

¹Far Eastern State Transport University,
Khabarovsk, Russia

²Pacific State University,
Khabarovsk, Russia

004938@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5419-1365>

000177@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3881-2050>

000415@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4101-1334>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the article is a generalized analysis of existing methods for determining of structural steel elements behaviour in extreme conditions of subzero temperatures and their use to assess the cold resistance of steel beams prestressed by drawing of a thin wall. Subject of study is structural steel. Object of study is bimetallic steel beam prestressed without rods.

Materials and methods. The study is based on the mechanics of deformable solid bodies, studies of the mechanical characteristics of steel and its behaviour at considerable subzero temperatures, taking into account stress concentrators and the probability of brittle cracks in the beam elements.

Results. The impact strength analysis of steels C440 and C245 used in the flange plates and wall of prestressed beam was carried out. It is found that during the structure operation in the temperature range from minus 45°C to minus 55°C, cold resistance of the beam elements is ensured. It is proved that actual normal stresses in the extreme fibers of the prestressed beam web section are lower than the allowable stresses during plastic deformation of the wall material and, according to the theory of M. Huber, R. Mises and H. Hencky, the probability of brittle cracks in stress concentrators zone is low. It is found that the absence of stiffeners along the beam wall reduces plastic deformations caused by welding, reduces the number of extra elements in the structure and increases the material's cold resistance.

Conclusions. The high stability of prestressed beam wall enables designing it quite thin and increasing its cold resistance. The stressed state of the structure, reduction of its weight, thinning of wall, absence of welding stress concentrators, and reduction of the number of extra elements in the beam testify to the cold resistance of the material of the beam pre-stressed by wall drawing.

KEYWORDS: prestressing, embrittlement, stability, stress concentrator, extra elements, cold resistance

ACKNOWLEDGEMENTS: We are grateful to the reviewers of the article.

The article was submitted 14.06.2023; approved after reviewing 18.07.2023; accepted for publication 30.08.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Evgeniy V. Kravchuk, Igor Yu. Belutsky, Valerii A. Kravchuk Cold resistance of steel beam prestressed by wall drawing. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (4): 488-499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-488-499>

© Kravchuk E. V., Belutsky I. Yu., Kravchuk V. A., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Известно¹, что более 60% площади России относится к районам Крайнего Севера и приравненным к ним территориям. Низкие температуры в некоторых регионах России (Саха Якутия) доходят до -50°C (СП 20.13330.2017 «Нагрузки и воздействия»). Эксплуатация существующих и проектирование вновь строящихся зданий и сооружений на основе металлических каркасов, выполненных из стали, требуют внимательного изучения поведения данных конструкций, испытывающих различные нагрузки, которые возможны в районах со значительными низкими температурами, поэтому закономерно, что научно-исследовательские и проектные институты России и зарубежных стран занимаются разработкой нормативной литературы, регламентирующей применение стали в разнообразных конструкциях для различных климатических зон. Социальный заказ на требуемую сталь полностью обеспечивается российской металлургической промышленностью. Российским институтом стандартизации разработан действующий в настоящее время ГОСТ 27772–2021 «Прокат для строительных стальных конструкций», в котором определяется область применения строительной стали в различных климатических зонах России.

Министерством черной металлургии разработан ГОСТ 9454–78 «Методы испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах».

Министерством строительства и коммунального хозяйства РФ был разработан свод правил СП 16.13330–2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП П – 23–81*», устанавливающих требования, распространяющиеся на проектирование и расчет стальных строительных конструкций

зданий и сооружений различного назначения, работающих при температуре не выше 100°C и не ниже -60°C .

ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова в 1989 г. разработал «Руководство по расчету стальных конструкций на хрупкую прочность», в котором изложил особенности эксплуатации стальных конструкций при хрупких разрушениях.

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко в 1989 г. подготовил «Пособие по проектированию металлических конструкций», являющееся дополнением к СНиП П – 23–81*, в котором изложены новые на тот момент теоретические разработки в области расчета и проектирования стальных конструкций.

Большой вклад в исследования работы различных материалов, работающих в упругой и упругопластической областях и при отрицательных температурах с учетом наличия концентраторов напряжений, вносят творческие коллективы проектных и научно-исследовательских институтов и учебных заведений России.

Исследование хладостойкости стали при плоском напряженном состоянии и начальных напряжениях изучено в работе [1]. Склонность строительной стали к хладоломкости и их классификация по этому признаку изложены в работе². Хладостойкость стальных конструкций детально изучена в монографии³. Повышение надежности стальных конструкций, эксплуатируемых при низких температурах, рассмотрено в работе⁴, влияние конструктивной формы на хладостойкость стальных конструкций рассмотрено в статье [2]. Прочность элементов стальных конструкций в температурном интервале их квазихрупкого разрушения изложена в работе [3]. Вопросы строительства на Севере отражены в монографии⁵, в которой⁶ рассмотрены проблемы, касающиеся деформацион-

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 16.11.2021 № 1946 «Об утверждении перечня районов Крайнего Севера и местностей, приравненных к районам Крайнего Севера, в целях предоставления государственных гарантий и компенсаций для лиц, работающих и проживающих в этих районах и местностях, признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации и признании не действующими на территории Российской Федерации некоторых актов Совета Министров СССР» // Собрание законодательства РФ. 22.11.2021. № 47. Ст. 7853.; Крайний Север. [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.wikipedia.org> Крайний Север (дата обращения: 08.06.2023).

² Балдин В.А. и др. О склонности к хладоломкости строительных сталей и классификация сталей по этому признаку. Проектирование сварных конструкций. Киев: Наукова думка. 1965. 383 с.

³ Бирюлев В.В., Кошин И. И., Крылов И. И., Сильвестров А. В. Проектирование металлических конструкций. Специальный курс. Ленинград: Стройиздат. 1990. 432 с.

⁴ Сильвестров А. В. Повышение надежности стальных конструкций, эксплуатирующихся при низких температурах. Новосибирск: НИСИ. 1977. 72 с.

⁵ Солодарь М.Б., Плишкин Ю.С., Кузнецова М.Н. Металлические конструкции для строительства на Севере. Ленинград: Стройиздат. 1981. 206 с.

⁶ Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

ных критериев разрушения и расчета элементов конструкций на прочность.

Серьезное влияние на хладостойкость стальных конструкций оказывают сварные соединения. Данной проблеме посвящены многочисленные работы российских и зарубежных ученых. В монографии⁷ описаны хрупкие разрушения сварных конструкций, анализ концентрации напряжений⁸. Влияние низких температур на работу комбинированных сварных соединений с лобовыми и фланговыми швами рассмотрено в работе [4].

Активную исследовательскую работу по изучению хладостойкости стальных конструкций ведут ученые из Китая. Обзор низкотемпературной хрупкости и механизм разрушения конструкционной стали выполнены в работе [5], работа [6] посвящена испытанию элементов конструкций из сталей высокой прочности, эксплуатируемых в условиях низких температур, исследование влияния низких температур на работу конструкций железных дорог Китая отражено в статье [7]. Анализ факторов, влияющих на вязкость металлов при низких температурах, проведен в работе [8]. Инженерные просчеты и меры по предотвращению хрупкого разрушения стальных конструкций описаны в статье [9].

В настоящее время ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко ведет активную работу по расширению сортамента для строительных металлических конструкций, делая упор на исследование хладостойкости, огнестойкости и коррозионной стойкости толстолистового металла [10,11]. Влияние циклического нагружения на микроструктуру и хладоломкость металла ЗТВ стали 10Г2ФБ исследовано в работе [12]. Оценка ресурсных показателей автодорожных мостов на основе анализа структурных изменений и накопления повреждений в конструктивных элементах изложена в работе [13]. Влияние низких температур на состояние мостовых конструкций описано в публикации [14]. В статье [15] представлен подробный анализ новых решений в металлургии высокопрочных хладостойких конструкционных сталей, рекомендуемых для применения в машиностроении и строительстве. Развитие Севера России инициировало разработку новых сортов сталей «северного» исполнения. Новые стали для строительства в экстремальных

условиях Севера предложены в работах [16, 17, 18, 19]. В работе [20] рассмотрено влияние химического состава и структурных факторов (перлит, включения различного состава) на коэффициент анизотропии ударной вязкости. Исследована связь значения этого коэффициента с появлением зависимости ударной вязкости поперек проката. В статье [21] выполнен анализ существующих взглядов на природу замедленного хрупкого разрушения стали. Влияние содержания углерода, циркония и ванадия на характеристики сопротивления хрупкому разрушению атмосферостойкой стали 14ХГНДЦ исследовано в работе [22].

Однако к настоящему моменту работы, связанные с изучением хладостойкости материала предварительно напряженных стальных конструкций не представлены должным образом, именно поэтому в данной статье мы попытаемся частично восполнить этот пробел.

Работа посвящена изучению влияния конструктивного решения стальной биметаллической балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки, на хладостойкость конструкции.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Балка представляет собой биметаллическую конструкцию, ее оптимальное проектирование предполагает, что верхний и нижний поясные листы следует изготовить из высокопрочной стали, расчетное сопротивление которой должно быть в два раза выше расчетного сопротивления стенки, выполненной из малоуглеродистой стали. Для поясов принята сталь С440 с расчетным сопротивлением $R_y = 43 \text{ kH} / \text{cm}^2$, а для стенки – С245 ($R_y = 24 \text{ kH} / \text{cm}^2$). Решая вопрос о хладостойкости предварительно напряженной балки, следует говорить о работе высокопрочных и малоуглеродистых сталей при отрицательных температурах.

Несомненное достоинство стали как строительного материала заключается в ее пластичности – способности испытывать значительные остаточные напряжения перед разрушением, а также вязкости – свойстве поглощать механическую энергию без снижения прочности.

⁷ Хрупкие разрушения сварных конструкций: пер. с англ. У. Дж. Холл, Х. Кихара, В. Зут, А. А. Уэллс. (ред. засл. деят. науки и техники РСФСР, д-р техн. наук, проф. И. В. Кудрявцев и канд. техн. наук Д. М. Шур). М.: Машиностроение, 1974. 320 с.

⁸ Нейбер Г. Концентрация напряжений: пер. с нем. Н. Н. Лебедева; под. ред. проф. А. И. Лурье. М.; Ленинград: Гостехиздат. 1947 (Ленинград: тип.им. Евг. Соколовой). 204 с.

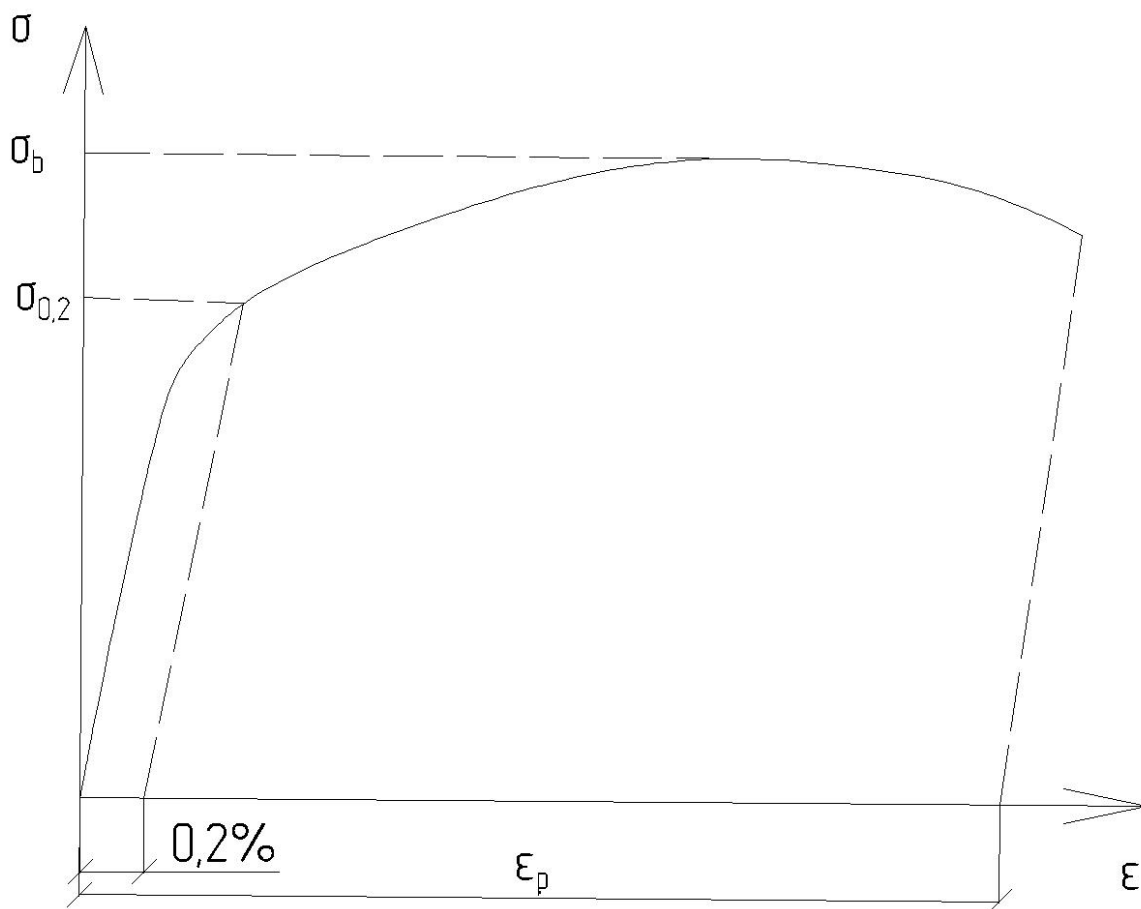


Рисунок 1 – Диаграмма одноосного растяжения низколегированной стали
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Diagram of uniaxial stretching of low-alloy steel
 Source: compiled by the authors.

Снижение пластичности и вязкости сталей может быть вызвано большим количеством конструктивно-технологических несовершенств, которые могут спровоцировать возникновение различных концентраторов напряжений. Структура поля напряжений, где концентрируются напряжения, превышающие расчетное сопротивление материала, имеет несколько другую кристаллическую решетку, снижающую пластичность и вязкость стали. Сталь теряет свои пластические свойства, но становится более упругой. Известно, что при отрицательной температуре во всех сортах стали повышается модуль упругости E , вре-

менное сопротивление разрыву $R_{ин}$ и предел текучести R_{ym} .

Снижение пластичности стали негативно сказывается при ее работе в климатической зоне, характеризующейся значительными отрицательными температурами. При этом надежность стальной конструкции снижается и возникает вероятность хрупкого разрушения стали. Пластические свойства стали и ее вязкость рассчитываются методами сопротивления материалов. Относительная деформация малоуглеродистой стали $\epsilon_p = \Delta l_p / l_0$ (Δl_p – абсолютное удлинение образца с расчетной длиной l_0). Вязкость стали $a_p \approx 0,67 \cdot R_{ym} \epsilon_p \cdot (R_y -$

расчетное сопротивление материала стенки балки). В легированных сталях условный предел текучести устанавливается по остаточному удлинению, равному 0,2% (рисунок 1).

Нельзя не отметить, что на пластичность сталей оказывают большое влияние остаточные сварочные напряжения, изменение структуры при термическом воздействии при сварке и газовой резке, различие в масштабах между стандартными образцами и элементами конструкций. По этой причине в инженерной практике существуют специальные методы оценки пластичности и вязкости сталей. Одним из них является проверка склонности металла к сопротивлению хрупкому разрушению и чувствительности к концентраторам напряжений при ударных воздействиях на металл, т.е. проверка ударной вязкости. Температура, при которой происходит спад ударной вязкости, либо температура, когда ударная вязкость опускается ниже 0,34 МДж / м² принимается за порог хладоломкости.

Заметим, что на основании СП16.13330.2016 (таблица В.3) ударная вязкость малоуглеродистой стали с пределом текучести $R_{yn} = 24,5 \text{ kH} / \text{cm}^2$, примененной для стенки предварительно напряженной балки, а также высокопрочной стали с пределом текучести $R_{yn} = 44 \text{ kH} / \text{cm}^2$, использованной для поясных листов балки, равняется 34 Дж / см² в случае эксплуатации конструкции во всех температурных зонах Российской Федерации. Это дает основание для утверждения о том, что сталь, отобранная для изготовления предварительно напряженной балки, обладает высокой хладостойкостью. Порог хладоломкости для малоуглеродистой стали, по заключению А. В. Сильвестрова [2, 3, 4], может быть определен по зависимости

$$T_{hl} = (-10 + 18 C - 37 Mn - 149 Si - 285 Al)^\circ C, \quad (1)$$

где C, Mn, Si, Al процентное содержание углерода, марганца, кремния и алюминия.

В соответствии с ГОСТ 27772-88 в стали С245 содержится углерода $C = 0,22\%$, марганца $Mn \leq 0,65\%$, кремния $Si = 0,05 - 0,14\%$. Косвенно оценивая порог хладоломкости малоуглеродистой стали по таблице В.3 СП

16.13330.2016 и учитывая ударную вязкость 0,34 МДж / м², можно предположить, что порог хладоломкости малоуглеродистой стали $T_{hl} \approx -45^\circ C$, а у высокопрочной стали С440 он равен $T_{hl} \approx -50^\circ C$.

Как следует из работы В.А. Кравчука «Стальные стержни, предварительно напряженные без затяжек» (М., АСВ, 2015), в балках оптимального сечения максимальные нормальные напряжения в поясных листах равны расчетному сопротивлению высокопрочной стали С440:

$$\sigma_{fv}^s = \sigma_{fn}^s = R_{yv} = 43 \text{ kH} / \text{cm}^2, \quad (2)$$

в зоне стенки, примыкающей к верхнему поясу, суммарные напряжения равны расчетному сопротивлению малоуглеродистой стали С245:

$$\sigma_{wv}^s = R_y = 24 \text{ kH} / \text{cm}^2, \quad (3)$$

а в нижней зоне стенки суммарные напряжения превышают расчетное сопротивление материала стенки:

$$\begin{aligned} \sigma_{wn}^s &= R_y \frac{3K + 2}{2K + 1} = \\ &= 24 \frac{3 \cdot 1,1754 + 2}{2 \cdot 1,1754 + 1} = 39,56 \text{ kH} / \text{cm}^2, \end{aligned} \quad (4)$$

т.е. в указанной области допускается развитие пластических деформаций.

В выражении (4) K коэффициент асимметрии сечения предварительно напряженной балки, $K = 1,1754$. График суммарных нормальных напряжений показан на рисунке 2.

Поскольку при работе предварительно напряженной балки в предельном состоянии нижняя область стенки в зоне максимального изгибающего момента находится в пластическом состоянии, уместно определить вероятность возникновения хрупкого разрушения материала стенки.

Согласно четвертой энергетической теории прочности Губера, Мизеса и Генки, пластичная сталь начнет разрушаться тогда, когда приведенное напряжение σ_i достигнет значений, определяемых выражением (5):

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = R. \quad (5)$$

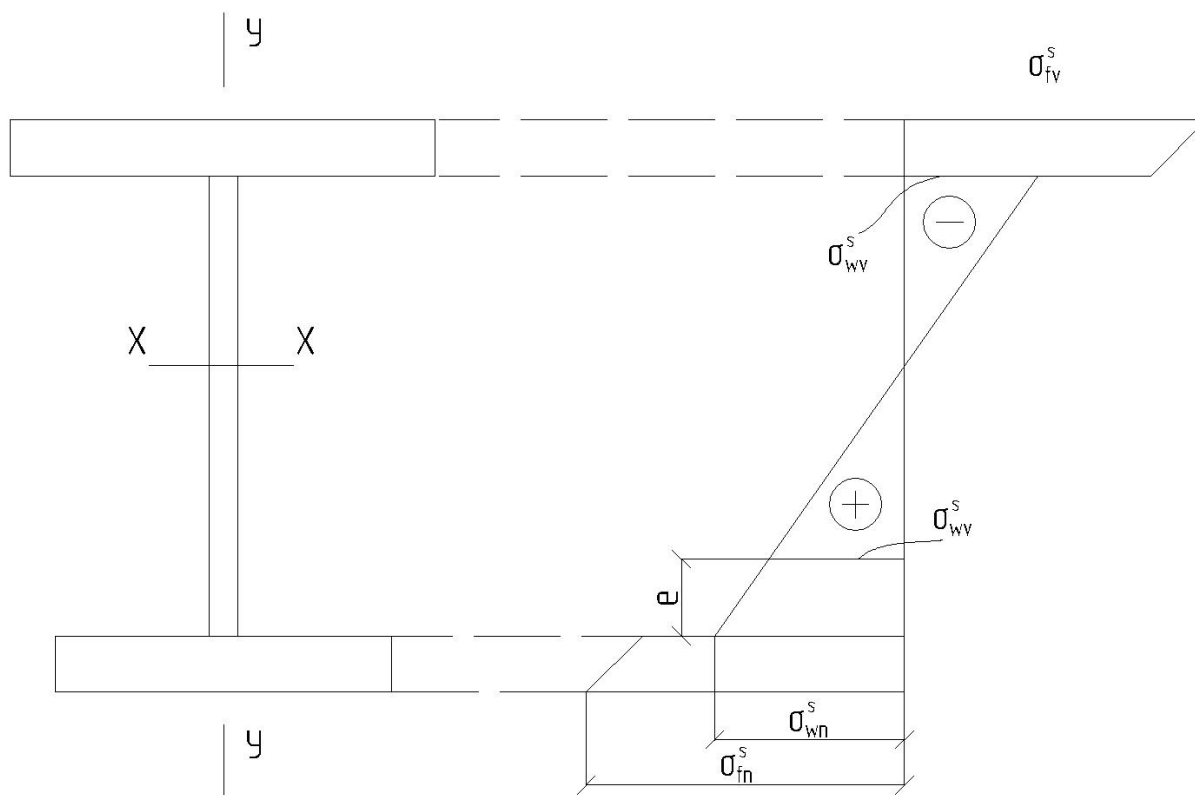


Рисунок 2 – Нормальные напряжения в балке, предварительно напряженной вытяжкой стенки
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Normal stresses in the beam, prestressed by wall drawing
 Source: compiled by the authors.

Здесь R предельное напряжение. В выражении (5) $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Очевидно, что пояса и стенка балки будут работать при плоском напряженном состоянии. В таком случае выражение(5) трансформируется в виде

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2)} = R \quad (6)$$

Как известно, траектория главных напряжений в зоне максимального изгибающего

момента такова, что вектор нормальных напряжений в балке будет совпадать с вектором главных напряжений. Следовательно, нормальные напряжения в указанной зоне равны главным напряжениям. Будем считать, что главные напряжения в нижней зоне стенки равны напряжениям по зависимости (4). Учитывая физический смысл коэффициента Пуассона, можно записать, что $\sigma_2 = 0,25\sigma_1$. В таком случае приведенное напряжение

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2]} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2[\sigma_{wn}^{s2} + (0,25 \cdot \sigma_{wn}^s)^2 - \sigma_{wn}^s \cdot 0,25 \cdot \sigma_{wn}^s]} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2[39,56^2 + (0,25 \cdot 39,56)^2 - 0,25 \cdot 39,56^2]} = 36,9 \text{ kH/cm}^2 < R_u = 57,5,0 \text{ kH/cm}^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку фактические приведенные напряжения σ_i меньше временного сопротивления стали R_u , хрупкие трещины в нижней зоне стенки предварительно напряженной балки будут отсутствовать.

Что же касается вероятности хрупкого разрушения стали без концентраторов напряжений, то она ничтожно мала. А. Н. Сильвестров в своей работе «Повышение надежности стальных конструкций, эксплуатирующихся при низких температурах» (Новосибирск. НИСИ. 1977. 72 с.), а также статье [3] отмечает: «...хрупкое разрушение стали как разрушение поликристаллического материала без предшествующих пластических деформаций теоретически возможно лишь в гипотетическом случае всестороннего однородного растяжения при главных напряжениях $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ ». Это означает, что поясным листам и стенке хрупкое разрушение не угрожает.

Изучение природы хрупких разрушений стали [5, 6, 7] показало, что при отсутствии концентраторов напряжений в отдельных элементах балки уровень разрушающих напряжений может превышать временное сопротивление стали. При наличии же концентраторов напряжений разрушение материала возможно при условии:

– хрупкое разрушение

$$\sigma_1 = R_0 \text{ и } \tau_{\max} < R_s; \quad (8)$$

– вязкое разрушение

$$\sigma_1 < R_0 \text{ и } \tau_{\max} = R_s, \quad (9)$$

где R_0 и R_s сопротивление соответственно отрыву и сдвигу.

Условие перехода от вязкого разрушения к хрупкому можно представить зависимостью

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_1} = \frac{R_s}{R_0}. \quad (10)$$

Так как условие оптимального напряженного состояния предварительно напряженных балок предполагает обеспечение напряженного состояния в верхнем и нижнем поясных листах (см. рисунок 2)

$$\sigma_{fv}^s = \sigma_{fn}^s \leq R_{yv}, \quad (11)$$

R_{yv} – расчетное сопротивление высокопрочной стали С440, $R_{yv} = 43 \text{ кН/см}^2$, а в крайней верхней зоне стенки

$$\sigma_i = K_i \sigma_T = 0,277 \cdot R_{yv} = 0,277 \cdot 24,5 = 6,795 \text{ кН/см}^2 \ll R_{yv} = 24,5 \text{ кН/см}^2. \quad (17)$$

$$\sigma_{wv}^s \leq R_y, \quad (12)$$

не превышающего расчетных сопротивлений материала стенки, то хрупкое и вязкое разрушение материала балки в зоне упругих деформаций стали исключены.

Считаем уместным еще раз вернуться к вопросу влияния пластических деформаций, образующихся в крайней нижней зоне стенки, на возможные хрупкие разрушения стали. Так как стенка балки присоединяется к поясному листу из высокопрочной стали, в соответствии с принципом неразрывности деформации, деформации стенки будут находиться в стесненном состоянии. Налицо реализуется не сама пластическая деформация материала стенки балки, а лишь готовность материала к такой деформации. По утверждению [5, 6] величина локального предела текучести может превышать значение предела текучести при одноосном напряженном состоянии конструкции в 2...3 раза.

Значение локального предела текучести может быть определено зависимостью

$$\sigma_l = K_i \sigma_T. \quad (13)$$

Здесь K_i коэффициент жесткости напряженного состояния

$$K_i = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(1-\alpha)^2 + (\alpha-\beta)^2 + (\beta-1)^2}}, \quad (14)$$

где $\alpha = \sigma_1/\sigma_2$ и $\beta = \sigma_3/\sigma_1$; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения по осям X, Y, Z ;

σ_T – предел текучести при одноосном напряжении.

Учитывая, что стенка и поясные листы предварительно напряженной балки находятся в состоянии плоского деформирования, при котором главное напряжение $\sigma_3 = 0$, выражение жесткости напряженного состояния K_i преобразится к виду

$$K_i = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(1-\alpha)^2 + \alpha^2 + 1}}. \quad (15)$$

$$\text{С учетом } \alpha = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\sigma_{wv}^s}{0,25\sigma_{wv}^s} = 4,0$$

$$K_i = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(1-4)^2 + 4^2 + 1}} = 0,277. \quad (16)$$

Следовательно, локальный предел текучести на основании зависимости (13):

Полученный результат подтверждает вывод об ограниченных пластических деформациях стенки в зоне максимального момента от внешних нагрузок и малой вероятности хрупких разрушений в этой области, снижающих хладостойкость применяемых сталей.

Весьма важным условием при расчете ресурса конструкции по критерию хладостойкости является выяснение факторов, в наибольшей степени способствующих развитию хрупких трещин в зонах возможных концентраторов напряжений. Исследования ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, Института электросварки АН Украины, Института проблем Севера АН РФ и высших учебных заведений показали, что наиболее весомым доводом в проблематике хрупкого разрушения является чувствительность стали к надрезам (20,6%). Остаточные сварочные напряжения (13,5 %), старение и наклеп стали (11,1%) также являются источниками хрупкости стали. Только 6,9% отказов относятся к конструкциям из легированных сталей. Рассматриваемая совокупность отказов свидетельствует о том, что 34% из них составляют отказы листовых сварных конструкций (резервуары, газгольдеры и т.п.), 48% – решетчатые изгибаемые фермы и только лишь 19% сплошностенчатые балки. Это лишний раз подтверждает тезис о том, что для строительства зданий и сооружений в экстремальных районах Сибири и Дальнего Востока предпочтительными являются балки.

Свод правил СП 16.13330.2016 (таблица 37) выделяет характерные зоны и конструктивные решения сварных соединений, в пределах которых существует наибольшая вероятность появления хрупких разрушений. Заметим, что из многообразия конструктивных решений ребра жесткости балок являются одними из самых значимых источников появления остаточных сварочных напряжений, где возможно возникновение хрупких разрушений стали.

Способ предварительного напряжения стальных балок основан на вытяжке стенки с последующим присоединением ее к анкерному верхнему поясу. Предельное напряженное состояние балок не допускает появления в верхней зоне стенки сжимающих нормальных напряжений, превышающих расчетное сопротивление материала стенки (см. рисунок 2). Следовательно, местная устойчивость стенки будет всегда обеспечена. Именно это обстоятельство позволяет не ставить ребра жесткости в зоне максимальных нормальных напряжений и зоне их совместного действия

с касательными напряжениями. Отсутствие ребер жесткости в предварительно напряженных балках исключает вероятность появления в стенке остаточных сварочных напряжений и хрупких разрушений в материале стенки балки.

В упомянутой выше работе В.А. Кравчука «Стальные стержни предварительно напряженные без затяжек» установлено, что местная устойчивость стенки предварительно напряженной балки по сравнению со стенкой обычных балок повышается в 5 раз.

Значительное повышение местной устойчивости стенки предварительно напряженной балки позволяет проектировать ее из тонколистового металла. Тонкость стенки балки является еще одним фактором снижения вероятности появления в ней хрупких трещин, поскольку сводит к минимуму масштабный (объемный) фактор напряженного состояния.

В.А. Балдин и другие в работе «О склонности к хладоломкости строительных сталей и классификация сталей по этому признаку // Проектирование сварных конструкций». Киев: Наукова думка, 1965. 383 с.), а также еще ранее Н.Н. Давиденков [1] считают, что многоэлементность конструкции является еще одним фактором, влияющим на развитие хрупких разрушений в металле. Каждый элемент может быть источником появления концентраторов напряжений, и чем больше их, тем интегрально больше вероятность возникновения трещин. Безотказность многоэлементной конструкции может быть выражена зависимостью

$$P_c = P_1 P_2 P_3 \dots P_n \quad (18)$$

Здесь P_i вероятность безотказной работы i -го элемента. Нетрудно заметить, что чем больше элементов с вероятностью безотказной работы, например 0,95, тем быстрее уменьшается суммарная вероятность безотказной работы конструкции. Выше указано, что предварительное напряжение балки посредством вытяжки стенки позволяет исключить из конструкции промежуточные ребра жесткости. Следуя требованиям СП 16.13330.2016 (п. 8.5), касающимся расстановки ребер жесткости по длине балки, в зависимости от условной гибкости стенки $\lambda_w = \frac{h_w}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ (h_w, t_w – высота и толщина стенки балки), исключается не менее 8 – 10 парных ребер жесткости. Учитывая, что в любой балке применяется всего 10 – 12 ребер (включая опорные), то можно утверждать, что очаги пластических дефор-

маций от остаточных сварочных напряжений в предварительно напряженной балке снижаются до 85 %.

Сравнивая конструктивные решения изгибаемых элементов, применяемых для строительства зданий и сооружений, особенно в северных районах страны, предпочтение следует отдавать предварительно напряженным балкам как более хладостойким конструкциям.

ВЫВОДЫ

Стальная биметаллическая балка, предварительно напряженная вытяжкой стенки, обладает повышенной хладостойкостью и может применяться в каркасах промышленных зданий и сооружений, эксплуатирующихся при отрицательных температурах в диапазоне от -45°C до -55°C .

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Давиденков Н. Н., Витман Ф. Ф. Исследование хладостойкости стали при плоском напряженном состоянии и начальных напряжениях // Журнал технической физики. 1946. Т.16. Вып. 11. С. 1217 – 1222 с.
2. Сильвестров А. В., Горбачев В. М., Беспалов В. М. Влияние конструктивной формы на хладостойкость стальных конструкций // Промышленное строительство. № 7. С.30–32.
3. Сильвестров А. В. [и др.] Расчетная оценка прочности элементов стальных конструкций в температурном интервале квазихрупкого их разрушения // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. 1983. № 6. С.14 – 19.
4. Сильвестров А. В., Шахмардинов Р. М. Влияние низких температур на работу комбинированных сварных соединений с лобовыми и фланговыми швами // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. 1972. № 9. С. 6 – 13.
5. Wang Ziyu. Overview of low temperature cold brittleness and fracture mechanism of structural steel [J]. Science and Technology Information. 2010. 18:166.
6. Su Renquan, Wang Wanzhen. High-strength steel notched plate fracture test at low temperature [J]. Cryogenic Engineering. 2011. 5:23-26.
7. Zhang Yuling, Pan Jiyan. A review of the research on the effect of low temperature on the properties of steel and its components [J]. China Railway Science. 2003. 24(2): 89-96.
8. Ye Weijiand, Zhang Youyu. Analysis of factors affecting low temperature toughness of metals [J]. Natural Gas and Petroleum, 1997. 1:32 – 36.
9. Liu Qu, Liu Zhongming, Liu Yingxue. Engineering hazards and prevention of brittle fracture of steel structure [J]. Low Temperature Construction Technology. 1999. 1:74 – 75.
10. Ведяков И. И., Одесский П. Д. Современные отечественные стандарты и вопросы расширения применения металлических конструкций в строительстве // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 3 (21). С. 42 – 53.

11. Одесский П. Д. Современные стали для строительства металлических конструкций и вопросы экономической эффективности // Сталь. 2018. № 12. С. 56 – 60.

12. Поздняков В. Д., Маркашова Л.И., Максименко А.А. [и др.] Влияние циклического нагружения на микроструктуру и хладостойкость металла ЗТВ стали 10Г2ФБ // Автоматическая сварка. 2014. № 5/10. С. 3 – 11.

13. Майстренко И. Ю., Зиннуров Т. А., Егорова И. Ю. [и др.] Оценка ресурсных показателей автодорожных мостов на основе анализа структурных изменений и накопления повреждений в конструктивных элементах // Известия КГАСУ. 2019. № 4 (50). С. 444 – 454.

14. Кочкин И. В. Влияние низких температур на геометрические параметры конструкции моста и его элементов. Эксплуатация и ремонт машин и оборудования // Механика XXI века. 2008. № 7. С. 247 – 252.

15. Хлусова Е. И., Сыч О. В., Орлов В. В. Хладостойкие стали, структура, свойства, технологии // Физика металлов и металловедение. 2021. Т. 6, № 6. С. 621 – 657.

16. Таланов О. П., Нстич С. Ю., Никитин В. Н., Денисов С. В., Ширяев О. П., Кудряков Е. А., Богач Д. И., Траино А. И., Кураш В. С. Освоение производства высокопрочной износостойкой свариваемой стали с пределом текучести более 950 Н/мм² для несущих металлоконструкций // Металлург. 2013. № 1. С. 62 – 66.

17. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315-750 Мпа для Арктики. Часть 1. Принципы легирования и требования к структуре листового проката // Вопросы материаловедения. 2018. № 3 (95). С. 22 – 47.

18. Сыч О. В., Хлусова Е. И. Стали для Арктики // Neftgaz. RU. 2020. № 5. С. 50 – 55.

19. Сыч О. В., Хлусова Е. И., Пазилова У. А., Яшина Е. А. Структура и свойства зоны термического влияния низколегированных хладостойких сталей для арктического применения // Вопросы материаловедения. 2018. № 2 (49). С. 30 – 51.

20. Горицкий В. М., Шнейдеров Г. Р. О необходимости учета анизотропии ударной вязкости в инженерной практике // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 10. С. 39 – 47.

21. Желкашиев С. А. Влияние примесей на прочность стали // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник). 2022. № 4. С. 102 – 104.

22. Горицкий В. М., Шнейдеров Г. Р. Характеристики сопротивления хрупкому разрушению атмосферостойкой стали 14ХГНДЦ // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 9. С. 35 – 38.

REFERENCES

1. Davidenkov N. N., Vitman F. F. Issledovaniye khladostoykosti stali pri ploskom ostrom sostoyanii i nachal'nykh napryazheniyakh [Investigation of the cold resistance of steel under plane stress and initial stresses]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1946; T.16. Vyp. 11:1217 – 1222 s chert. (in Russ.)

2. Sil'vestrov A.V., Gorbachev V. M., Bespalov V. M. Izmeneniye konstruktivnoy formy na khladostoykost' stal'nykh konstruksiy [Influence of the constructive form on the cold resistance of steel structures]. *Promyshlennoye stroitel'stvo*. 1975;7: 30 – 32. (in Russ.)
3. Sil'vestrov A.V., i dr. Raschetnaya otsenka prochnosti elementov stal'nykh konstruksiy v temperaturnom intervale kvazirazrushayushchego ikh razrusheniya [Calculation assessment of the strength of steel structure elements in the temperature range of their quasi-brittle fracture]. *Izv.vuzov. ser. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1983; 6: 14 – 19. (in Russ.)
4. Sil'vestrov A. V., Shakhmardinov R. M. Vliyaniye temperatury na rabotu kombinirovannykh svarnykh soyedineniy s lobovymi i flangovymi shvami [Influence of low temperatures on the operation of combined welded joints with frontal and flank seams]. *Izv. vuzov. ser. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1972; 9: 6 – 13. (in Russ.)
5. Wang Ziyu. Overview of low temperature cold brittleness and fracture mechanism of structural steel [J]. *Science and Technology Information*. 2010, 18:166.
6. Su Renquan, Wang Wanzhen. High-strength steel notched plate fracture test at low temperature [J]. *Cryogenic Engineering*. 2011; 5:23 – 26.
7. Zhang Yuling, Pan Jiyan. A review of the research on the effect of low temperature on the properties of steel and its components [J]. *China Railway Science*. 2003; 24(2): 89 – 96.
8. Ye Weijiand, Zhang Youyu. Analysis of factors affecting low temperature toughness of metals [J]. *Natural Gas and Petroleum*. 1997, 1:32 – 36.
9. Liu Qu, Liu Zhongming, Liu Yingxue. Engineering hazards and prevention of brittle fracture of steel structure [J]. *Low Temperature Construction Technology*. 1999; 1:74 – 75.
10. Vedyakov I. I., Odesskiy P. D. Sovremennyye otechestvennyye standarty i voprosy primeneniya metallicheskih konstruksiy v stroitel'stve [Modern domestic standards and issues of expanding the use of metal structures in construction]. *Vestnik NITS «Stroitel'stvo»*. 2019;3(21): 42 – 53. (in Russ.)
11. Odesskiy P. D. Sovremennyye dlya stroitel'stva metallicheskih konstruksiy i voprosy ekonomicheskoy effektivnosti [Modern steels for the construction of metal structures and issues of economic efficiency]. *Stal'*. 2018;12: 56 – 60. (in Russ.)
12. Pozdnyakov V. D., Markashova L. I., Maksimenko A. A. i dr. Primneniye tsiklicheskogo nagruzheniya na mikrostrukturu i khladostoykost' metalla ZTV stali 10G2FB [Influence of cyclic loading on the microstructure and cold resistance of the HAZ metal of steel 10G2FB]. *Avtomaticheskaya svarka*. 2014; 5/10: 3 – 11. (in Russ.)
13. Maystrenko I. YU., Zinnurov T. A., Yegorova I. YU., i dr. Otsenka resursnykh pokazateley avtorozhnykh mostov na osnove analiza strukturnykh izmeneniy i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktivnykh elementakh [Assessment of resource indicators of road bridges based on the analysis of structural changes and damage accumulation in structural elements]. *Izvestiya KGASU*. 2019; 4 (50): 444 – 454 (in Russ.)
14. Kochkin I.V. V zavisimosti ot temperatury i geometricheskikh parametrov konstruksii mosta i yego elementov. Ekspluatatsiya i remont mashin i oborudovaniya [Influence of low temperatures on the geometric parameters of the construction of the bridge and its elements. Operation and repair of machines and equipment]. *Mekhaniki XXI veku*. 2008; 7: 247 – 252. (in Russ.)
15. Maystrenko I. YU., Zinnurov T.A., Yegorova I.YU., i dr. Otsenka resursnykh pokazateley avtorozhnykh mostov na osnove analiza strukturnykh izmeneniy i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktivnykh elementakh [Estimation of resource indicators of road bridges based on the analysis of structural changes and damage accumulation in structural elements]. *Izvestiya KGASU*. 2019; 4 (50): 444 – 454. (in Russ.)
16. Talanov O. P., Nastich S. YU., Nikitin V. N., Denisov S. V., Shiryayev O. P., Kudryakov Ye. A., Bogach D. I., Trayno A. I., Kurash V. S. Osvoeniye proizvodstva vysokoprochnoy iznosostoykoy svarivayemoy stali s predelom tekuchesti boleye 950 N/mm² dlya nesushchikh metallokonstruksiy [Mastering the production of high-strength wear-resistant welded steel with a yield strength of more than 950 N/mm² for load-bearing metal structures]. *Metallurg*. 2013; 1: 62 – 66. (in Russ.)
17. Sych O. V. Nauchno-tehnologicheskkiye osnovy sozdaniya khladostoykikh staley s garantirovannym predelom tekuchesti 315-750 Mpa dlya Arktiki. Chast' 1. Printsipy legirovaniya i trebuvaniya k osobomu listovomu prokatu [Scientific and technological foundations for the creation of cold-resistant steels with a guaranteed yield strength of 315-750 MPa for the Arctic. Part 1. Principles of alloying and requirements for the structure of rolled products]. *Vopr. materialovedeniya*. 2018; 3 (95): 22 – 47. (in Russ.)
18. Sych O. V., Khlusova Ye. I. Stali dlya Arktiki [Steel for the Arctic]. *Neftegaz. RU*. 2020; 5: 50 – 55. (in Russ.)
19. Sych O. V., Khlusova Ye. I., Pazilova U. A., Yashina Ye. A. Struktura i svoystva zony termicheskogo issledovaniya nizkolegirovannykh khladostoykikh staley dlya arkticheskikh [Structure and properties of the heat-affected zone of low-alloy cold-resistant steels for arctic applications]. *Vopr. materialovedeniya*. 2018; 2 (49) 30 – 51. (in Russ.)
20. Goritsky V. M. Shneiderov G. R. O neobkhodimosti ucheta anizotropii udarnoy vyazkosti v inzhenernoy praktike [On the need to take into account the impact strength anisotropy in engineering practice]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; 10: 39 – 47. (in Russ.)
21. Zhelkashiev S. A. Vliyaniye primesey na prochnost' stali [Influence of impurities on the strength of steel]. *Nauka. Tehnika. Tehnologii (Politehnicheskij vestnik)*. 2022; No. 4: 102 – 104. (in Russ.)
22. Goritsky V. M. Shneiderov G. R. Kharakteristiki soprotivleniya khрупkosti atmosferostoykoy stali 14KHNDTS [Characteristics of resistance to brittle fracture of weather-resistant steel 14KhGNDTS]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2020; No. 9: 35 – 38. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кравчук Е. В. Руководство темой исследования. Формирование целей и задач исследования. Анализ состояния вопроса. Подготовка материала для статьи.

Белуцкий И. Ю. Консультирование по вопросам применения стальной балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки, в экстремальных условиях мостостроения. Анализ состояния вопроса. Подготовка материала для статьи.

Кравчук В. А. Сбор библиографической информации. Оформление статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Evgenii V. Kravchuk. Management of the research topic. Formation of study goals and objectives. Analysis of the issue. Preparation of the material for the article.

Igor. Yu. Belutskii Advising on the use of a steel beam, prestressed by wall drawing, in extreme conditions of bridge construction. Analysis of the issue. Preparation of the material for the article.

Valerii A. Kravchuk. Accumulating of bibliographic information. Article layout.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кравчук Евгений Валерьевич – ст. преподаватель кафедры «Строительство»; ст. преподаватель кафедры «Промышленное и гражданское строительство», SPIN-код: 2325-0177.

Белуцкий Игорь Юрьевич – доц., проф. кафедры «Автомобильные дороги», SPIN-код: 4125-7182.

Кравчук Валерий Андреевич – проф., проф. кафедры «Промышленное и гражданское строительство», SPIN-код: 3004-5213.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeny V. Kravchuk – Senior Lecturer, Construction Department ; Senior Lecturer, Industrial and Civil Engineering Department, SPIN: 2325-0177.

Igor Yu. Belutskii – Associate Professor, Professor of the Roads Department , SPIN-code: 4125-7182

Valery A. Kravchuk – Professor, Professor of the Industrial and Civil Engineering Department, SPIN-code: 3004-5213.