

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАБОЧИХ МЕХАНИЗМОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

А.П. Щербаков

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проводятся экспериментальные исследования влияния термической обработки на свойства сварных соединений рабочих механизмов дорожно-строительных машин. Изучая структуры как непосредственно металла, так и сварных соединений и основываясь на их неоднородности, автор анализирует прочностные характеристики указанных объектов.

Материалы и методы. Прибегнув к металлографическому анализу, а также используя в качестве материала исследования борсодержащую сталь 30MnB5, применяемую для изготовления конструкций строительных машин, автор исследовал ее микроструктуру на тех или иных зонах сварных соединений. В частности, были изучены сварные швы, зоны сплавления с участком перегрева, участок полной перекристаллизации и основной металл. Также были исследованы особенности проведения холодной пластической деформации указанного образца стали.

Результаты. Было определено, что механическая неоднородность стали на указанных соединениях стала причиной структурной неоднородности сварных соединений. Данный процесс способствовал образованию опасных зон концентрации действующих напряжений. Эти выводы говорят о необходимости выявить те или иные зоны, которые концентрируют в себе напряжения; при этом обязательным условием является усиление металла в таких зонах до нормативных показателей.

Повышение прочностных свойств исследуемой стали возможно посредством применения холодной пластической деформации и последующей термоциклической обработки (ТЦО). Это достигается за счет получения мелкозернистой структуры металла, имеющей более высокую прочность.

В качестве наиболее опасных участков, подвергающихся нагрузке, автором были определены сварной шов и зона его сплавления с основным металлом и участком перегрева. В качестве средства контроля за данным процессом в настоящей работе рекомендован к использованию пассивный феррозондовый метод; при этом контролю должна подвергаться вначале зона сплавления с участком перегрева, а после – сварной шов.

Обсуждение и заключение. Автор приходит к выводу, что проведенные экспериментальные исследования могут способствовать повышению эффективности процесса снижения концентрации напряжений (КН) в выполненных из стали и подвергающихся интенсивной эксплуатации элементах строительных машин за счет снижения структурной и механической неоднородности сварных соединений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлографический анализ, сварные металлические конструкции, сварные соединения, зоны концентрации напряжений.

Поступила 17.11.20, принята к публикации 25.12.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. **Конфликт интересов отсутствует.**

Для цитирования: А.П. Щербаков. Экспериментальные исследования влияния термической обработки на свойства сварных соединений рабочих механизмов дорожно-строительных машин. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>

© Щербаков А.П.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>

EXPERIMENTAL STUDIES OF HEAT TREATMENT INFLUENCE ON THE WELDED CONNECTIONS PROPERTIES IN WORKING MECHANISMS OF ROAD BUILDING

Alexander P. Scherbakov

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia*

ABSTRACT

Introduction. The experimental studies of the heat treatment effect on the properties of welded joints in working mechanisms of road-building machines are carried out in the work. Studying the structures of the metal itself, as well as welded joints and considering their heterogeneity, the author analyzes the strength characteristics of these objects.

Materials and methods. By means of metallographic analysis, as well as using boron-containing steel 30MnB5, which is used for the manufacture of structures for construction machines, as a research material, the author examined its microstructure, which took place in certain zones of welded joints. In particular, welded joints, fusion zones with an overheating area, a complete recrystallization area and the base metal were studied. We also studied the features of cold plastic deformation of the specified steel sample.

Results. It was determined that the mechanical inhomogeneity of the steel at these joints is the cause of the structural inhomogeneity of the welded joints. As a result of this process, some dangerous zones of acting voltages concentration are formed. These conclusions predetermine the need to identify some certain zones that concentrate stresses in themselves, while it is mandatory to strengthen the metal in such zones to standard indicators.

An increase in the strength properties of the steel under study is possible by applying cold plastic deformation and subsequent thermal cycling (STC). This is achieved by obtaining a fine-grained metal structure with higher strength. The author defines the welded joints and the zone of its fusion with the base metal and the overheating area as the most dangerous areas subject to loading. To control this process, it is recommended to use the passive fluxgate method in the work, while the fusion zone with the overheating section should be inspected first, and then the weld.

Discussion and conclusion. The author comes to the conclusion that the experimental studies carried out can contribute to an increase in the efficiency of the process of reducing the stress concentration (SC) in the elements of construction machines made of steel and subjected to intensive operation by reducing the structural and mechanical inhomogeneity of welded joints.

KEYWORDS: metallographic analysis, welded metal structures, welded joints, stress concentration zones.

Submitted 17.11.20, revised 25.12.2020.

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: Alexander P. Scherbakov. Experimental studies of the influence of heat treatment on the properties of welded connections of working mechanisms of road building machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>

© Scherbakov A.P.



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

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях ускоренный износ строительной техники становится достаточно серьезной проблемой для потребителей, так как в связи с ростом курса мировых валют увеличивается и стоимость самих машин. Следствием этого является рост стоимости основных средств, вновь приобретаемых строительной компанией, что не может не отражаться на стоимости и работ, и готового строительного объекта. По этой причине представляется актуальным поиск возможных путей снижения уровня износа отдельных узлов и агрегатов строительных машин в целях продления срока эксплуатации последних [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Известно, что на некоторых участках и зонах сварного соединения структура металла не отличается однородностью. Она может быть крупно- или мелкозернистой в зоне перегрева, зоне полной перекристаллизации и основного металла соответственно или же быть литой дендритной в зоне сварного шва. Проанализированные исследования, где рассматривается конструкционная борсодержащая сталь 30MnB5, свидетельствуют о том, что существует несколько путей решения проблемы снижения износостойкости узлов и агрегатов, выполненных из данного вида стали: это применение термоциклической обработки (ТЦО) сварных образцов, за счет чего снижается структурная неоднородность всех зон и участков сварного соединения, а также уменьшение зерна при крупнозернистой структуре, что дает возможность повысить прочность металла в тех зонах, в которых уровень концентрации напряжения (КН) очень высок [11, 12, 13, 14, 15].

При этом нельзя не отметить, что длительность эксплуатации той или иной строительной машины может стать причиной возникновения опасных локальных зон, так как металл в них постоянно находится под влиянием холодной пластической деформации. Кроме того, на участках сварных соединений могут возникнуть и развиваться различные трещины, причиной которых чаще всего выступает структурная неоднородность металла [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22].

В этой связи представляется актуальным рассмотрение проблемы влияния на неоднородность структуры сварных соединений холодной пластической деформации и термических нагрузок.

Отдельные исследования, проведенные в рамках поставленной проблемы, позволи-

ли определить, что применение пассивного феррозондового метода дает возможность обозначить опасные зоны КН и держать под постоянным контролем их состояние. Данный метод позволяет вывести корреляцию между магнитным параметром H_p и структурными изменениями металла в ходе холодной пластической деформации. Это дает возможность улучшить диагностику строительных машин, подвергающихся длительной и интенсивной эксплуатации. В рассматриваемом разрезе определенный интерес также представляет исследование влияния ТЦО на структурную неоднородность деформированных зон и участков сварных соединений.

Цели настоящей работы заключались в изучении структуры металла, подвергающегося воздействию, в различных зонах сварного соединения, а также в определении уровня ее влияния на механические свойства. Планировалось определить как влияние ТЦО на неоднородность структуры сварных соединений, так и возможность повысить с ее помощью прочностные свойства металла [23, 24, 25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследований была обозначена сталь 30MnB5. Указанный вид конструкционной борсодержащей стали находит на сегодняшний день широкое применение в различных областях промышленности, в том числе при сборке различных видов строительных машин. Прочность данной стали достаточно высока: она устойчива к износу и имеет высокий уровень ударной вязкости. Указанную сталь рекомендуется применять там, где планируется использовать высокие нагрузки. Оборудование, изготовленное из такой стали, высокопрочное. Оно имеет меньшую массу по сравнению с аналогами, произведенными из других видов стали, что дает возможность сократить объем используемого топлива и обеспечить высокопрочную конструкцию изделий. Кроме того, данная сталь экономична в производстве, что означает сокращение себестоимости конечной продукции.

При изготовлении данную сталь термически обрабатывают определенным способом, который включает закалку и последующий отпуск. Данный способ обработки эффективно влияет на качество указанной стали. Срок ее службы при этом возрастает. Химический состав данной стали, при условии определенной обработки, позволяет повысить ее характеристики, что благотворно повлияет на конечный продукт.

Данный вид стали также позволяет изготавливать из нее различные сложные узлы и агрегаты машин, так как при нагреве пластичность стали достаточно высока. Однако при охлаждении прочность такой стали позволяет говорить о высокой прочности изделий, изготовленных из нее.

Технические характеристики рассматриваемой стали приведены в таблице 1.

В таблице 2 представлен химический состав указанной стали.

Сварные образцы были изготовлены на основе требований из стальных пластин, толщина которых составляла 3, 5 и 10 мм.

Образцы, которые использовались для проведения металлографического анализа, были произведены на прецизионном отрезном станке Brillant 220 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Универсальный отрезной станок Brillant 220

Figure 1 – Brillant 220 Universal cut-off machine

Указанный станок представляет собой агрегат, способный работать в нескольких режимах резки материала, позволяющих идеально использовать пространство. Конструкция станка модульная; сам аппарат полностью автоматизирован, что дает возможность осуществлять резку небольших частиц, геометрия которых различна. Станок оснащен вакуумным держателем, что повышает уровень точности получаемых образцов до 0,001 мм.

Микрошлифы были подготовлены в установке для запрессовки микрошлифов Opal 460 (рисунок 2).



Рисунок 2 – Пресс для горячей запрессовки Opal 460

Figure 2 – Opal 460 press for hot pressing

Таблица 1
Технические характеристики стали 30MnB5

Table 1
Technical characteristics of 30MnB5 steel

Толщина, мм		Ширина, мм		Длина листов, мм
3–16		900–1800		2000–12000
Предел текучести, МПа		Предел прочности, МПа		Твердость, HRC
В состоянии поставки	После ТО	В состоянии поставки	После ТО	
400	1200	650	1700	52

Таблица 2
Химический состав стали 30MnB5, %

Table 2
Chemical composition of 30MnB5 steel, %

C	Mn	Si	P	S	Cu	B
0,27–0,33	1,15–1,45	≤0,40	≤0,025	≤0,035	≤0,40	0,0008–0,0050

Затем проводилась шлифовка и полировка образцов на установке Metapol 160E.

Травление шлифов осуществлялось в 4%-м растворе HNO_3 в этиловом спирте. После соответствующей обработки образцов был проведен их микроструктурный анализ, для чего применялся металлографический микроскоп Olympus SpinSR10, оснащенный системой количественного анализа изображений Thixomet (рисунок 3).

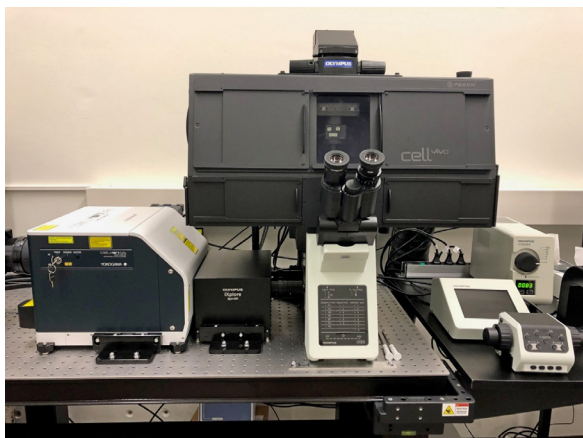


Рисунок 3 – Металлографический микроскоп Olympus SpinSR10

Figure 3 – Olympus SpinSR10 metallographic microscope

Указанный микроскоп оснащен вращающимся диском, позволяющим получить изображения с суперразрешением. Глубина таких изображений составляет до 100 мкм; в данном случае исследованию подвергаются области, которые недоступны для изучения, если применяются другие оптические приборы. Скорость обработки спектральных данных при этом очень высокая.

Все поле зрения при использовании микроскопа равномерно освещено, а переход от конфокального режима к режиму суперразрешения достаточно плавный.

Технология работы данного прибора основана не на тщательном сканировании той или иной области образца, а на быстрых снимках исследуемых областей, что позволяет наблюдать за реальными процессами. Оснащение прибора двумя камерами дает возможность видеть изображение в двухцветном режиме. Конструкция микроскопа включает вращающийся диск, который позволяет получать на выходе достаточно яркие изображения исследуемого объекта и его составляющих.

Вся информация, полученная при помощи указанного оборудования, напрямую передавалась на ПК и обрабатывалась при помощи специальной программы.

Также для измерения микротвердости в сварных соединениях применялся универсальный твердомер DuraVision-30 (рисунок 4).



Рисунок 4 – Универсальный твердомер DuraVision-30

Figure 4 – DuraVision-30 universal hardness tester

В структуру твердомера входит монолитная чугунная рама, за счет чего повышаются точность и стабильность измерений. Также микроскоп оснащен семипозиционной моторизованной турелью, которая дает возможность измерять твердость различными методами без изменения конструктива прибора, что свидетельствует об универсальности данного аппарата. Указанный твердомер находит свое применение и в лабораторных условиях, и в производственном процессе.

Указанный прибор обладает следующими положительными качествами:

- нагрузки, возможные для применения, – 3–3000 кгс;
- возможность установить рабочее расстояние до 400 мм;
- возможность исследования достаточно больших образцов массой до 200 кг;
- возможность функционировать как в ручном, так и в автоматическом режиме;
- возможность позиционировать место измерения при помощи лазера;
- организация освещения при помощи диодов;
- применение принципа замкнутого контура closed loop при осуществлении нагрузки на исследуемый объект.

В результате проведенного анализа на сварных швах была обнаружена структурная неоднородность, свойственная борсодержащим сталям. Данная неоднородность обычно имеет место при сварных работах, вызывающих в металле структурные изменения.

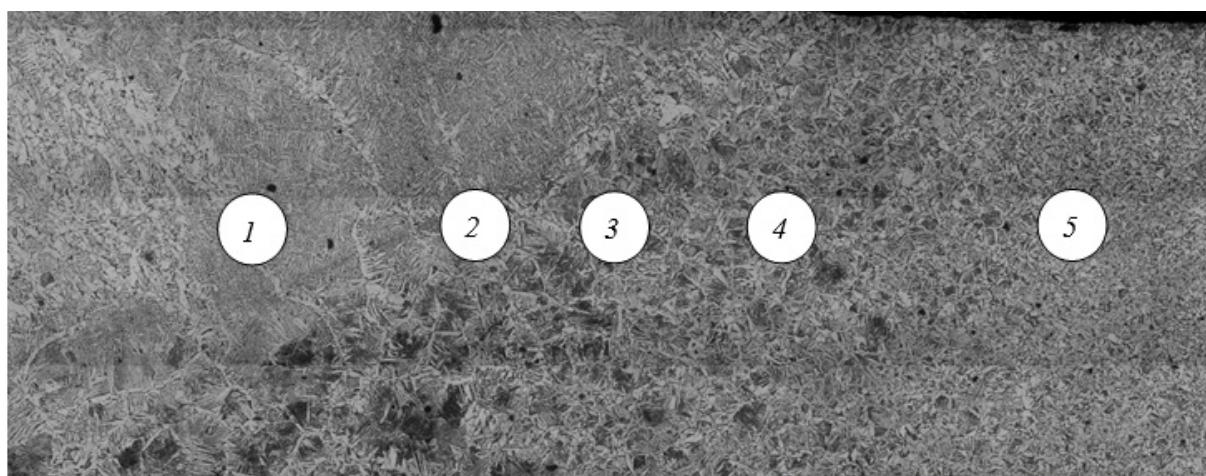


Рисунок 5 – Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст30МnB5 толщиной 3 мм, $\times 50$:
1 – сварной шов; 2 – зона сплавления; 3 – участок перегрева; 4 – зона полной перекристаллизации стали;
5 – основной металл

Figure 5 – Microstructure of a butt weld made of St30MnB5 steel with a thickness of 3 mm, $\times 50$:
1 – weld; 2 – fusion zone; 3 – overheating area; 4 – zone of complete recrystallization of steel;
5 – base metal

Панорама структуры стыкового сварного соединения из стали Ст30МnB5 представлена на рисунке 5.

На рисунке 6 представлена микроструктура сварного шва стыкового сварного соединения из стали Ст30МnB5 толщиной 3 мм, $\times 100$. Изображение демонстрирует, что микроструктура сварного шва имеет дендритное строение.



Рисунок 6 – Микроструктура сварного шва стыкового сварного соединения из стали Ст30МnB5 толщиной 3 мм, $\times 100$

Figure 6 – Microstructure of a 3 mm thick St30MnB5 steel butt weld, $\times 100$

Причина этого кроется в условиях проведения сварных работ, а также в свойствах самой стали. Можно отметить, что оси роста кристаллов, которые располагаются в сварных швах, представлены пространственными кривыми, что является следствием как изменения формы сварочной ванны в плоскостях, парал-

лельных плоскости свариваемого листа, так и перемещения теплового поля в направлении производимой сварки.

Если же проводимая сварка тонких листов является стыковой, то имеет место смена пространственной схемы кристаллизации на плоскую, что переносит оси роста образующихся кристаллов в параллельные плоскости. Увеличение разориентации кристаллов в сварном шве по сравнению со слитками находится в прямой зависимости от размера сварочной ванны и кривизны оплавленной поверхности (рисунок 7).



Рисунок 7 – Микроструктура зоны сплавления стыкового сварного соединения из стали Ст30МnB5 толщиной 3 мм, $\times 100$

Figure 7 – Microstructure of the fusion zone of a butt welded joint made of St30MnB5 steel with a thickness of 3 mm, $\times 100$

Если рассмотреть микроструктуру зоны сплавления (см. рисунок 7), то можно увидеть, что металл в процессе сварки имеет твердое жидкое состояние и находится между температурами ликвидуса и солидуса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Химический состав стали выступает фактором, влияющим на ширину зоны плавления. При этом в данной зоне происходят различные диффузионные процессы и имеет место процесс кристаллизации.

На участке перегрева измерение температуры происходит от линии солидуса до Ас3. Указанная зона становится тем местом, где происходят изменения металла, свойственные углеродистым сталям. Перегрев вызывает снижение прочности стали на данном участке, а ее зернистость укрупняется (рисунок 8).

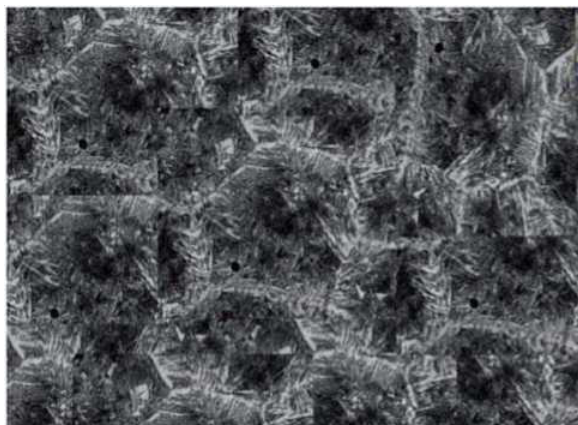


Рисунок 8 – Микроструктура участка перегрева стыкового сварного соединения из стали Ст30МnB5 толщиной 3 мм, ×100

Figure 8 – Microstructure of the superheating section of a butt weld made of 3 mm thick St30MnB5 steel, ×100

В данной зоне происходят полное и частичное фазовое превращение, а также рекристаллизация под воздействием высоких температур.

Следующий участок – это область механического и термомеханического влияния. Фазовые и структурные изменения здесь невозможны, так как этого не позволяет уровень температуры на данном участке (рисунок 9).

На данном участке определенные сварочные напряжения вызывают упругую и пластическую деформацию материала.

Фотография на рисунке 10 демонстрирует зону, в которой отсутствуют изменения в микроструктуре материала. Зерно металла здесь мельче, нежели в двух представленных ранее зонах, а прочность металла – выше. О



Рисунок 9 – Микроструктура участка полной перекристаллизации стыкового сварного соединения из стали Ст30МnB5 толщиной 3 мм, ×100

Figure 9 – Microstructure of the section of complete recrystallization of a butt welded joint made of St30MnB5 steel with a thickness of 3 mm, ×100

бъяснение этому можно найти в уравнении Холла – Петча, где предел текучести металла связан с размером зерен следующим образом:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k_d - \frac{1}{2},$$

где σ_0 – параметр, характеризующий сопротивление кристаллической решетки движению дислокаций; k – параметр, характеризующий барьерный эффект границ зерен при переходе скольжения от зерна к зерну; d – размер зерен.

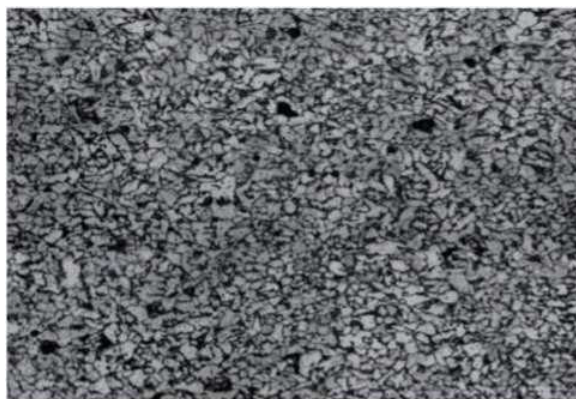


Рисунок 10 – Микроструктура зоны основного металла стыкового сварного соединения из стали Ст30МnB5 толщиной 3 мм, ×100

Figure 10 – Microstructure of the base metal zone of a butt weld made of 3 mm thick St30MnB5 steel, ×100

В литературе отмечено, что уменьшение зерна металла влечет за собой рост твердости, ударной вязкости, а также повышение предела прочности. На рисунке 11 продемонстрированы изменения микротвердости в различных зонах, подвергшихся исследованию.

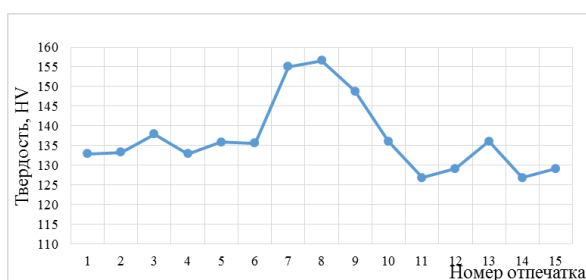


Рисунок 11 – Изменение микротвердости в различных зонах стыкового сварного соединения из стали Ст30МнВ5 толщиной 3 мм

Figure 11 – Changes in microhardness in various zones of butt welded joints made of 3 mm thick St30MnB5 steel

Согласно данным рисунка 11, изменения микротвердости незначительны, что нельзя отметить в отношении сварного шва.

В таблицу 3 включены данные, касающиеся исследования температуры микроструктур других зон сварных соединений толщиной 5 и 10 мм. Также были проанализированы влияние ТЦО на неоднородность структуры сварных соединений и повышение прочностных свойств металла.

Перед началом эксперимента образцы бор-содержащей стали 30MnB5 были подвергнуты

дробной холодной пластической деформации на 20 и 50%. Затем проведена ТЦО. Ее режим был следующим: температура нагрева составила 770 °С, после чего производилось охлаждение на воздухе (число циклов – 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10). Для учета результатов применялись различные методы контроля с использованием вышеуказанного лабораторного оборудования.

На рисунке 12 продемонстрирована зависимость величины магнитного параметра H_p от числа циклов при ТЦО сварного соединения в зонах сварного шва и основного металла, значительно отличающихся по исходной структуре.

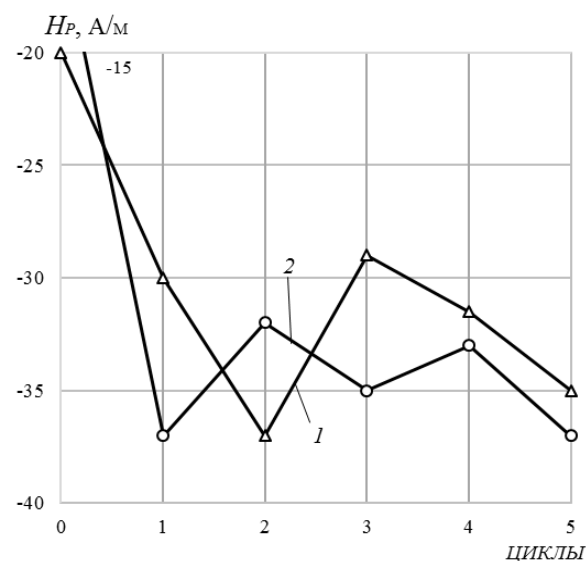


Рисунок 12 – Зависимость магнитного параметра H_p от числа циклов при ТЦО сварного соединения из стали Ст30МнВ5: 1 – зона сварного шва; 2 – зона основного металла

Figure 12 – Dependence of H_p magnetic parameter on the number of cycles in the STC of a welded joint made of St30MnB5 steel: 1 – weld zone; 2 – base metal zone

Таблица 3
Температура и размеры зон сварных соединений

Table 3
The temperature and size of the welded joints zones

Зона сварного соединения	Структура металла	Температура, °C	Ширина зоны, мм
Сварной шов	Столбчатая, литая, с пониженными механическими свойствами	1530 ± 5	½ ширины шва
Линия сплавления	Рост зерна, образование игольчатой структуры с повышенной хрупкостью	1530–1470	0,1–0,4
Участок перегрева	Крупнозернистая, с пониженной ударной вязкостью и пластичностью	1470–1100	3–4
Участок полной перекристаллизации	Измельчение зерна, повышение механических свойств	1100–880	0,2–4,0
Основной металл	Структурных изменений нет	510–200	0,8–12

Согласно рисунку 12, налицо высокая динамика изменения значений H_p во время осуществления первых 2–3 циклов. Чем больше количество циклов, тем стабильнее величина напряженности магнитного поля рассеяния H_p . С пятого цикла измерения рассматриваемого параметра практически не происходит. Это является следствием структурных преобразований металла, происходящих в процессе ТЦО, ранее описанных в работах автора.

На рисунке 13 показано, что под влиянием ТЦО существенно измельчается структура металла: отмечается высокая трансформация специфической дендритно-ориентированной литой структуры сварного шва (рисунок 13, а) и сокращается размер зерен в зоне перегрева (рисунок 13, б). Максимальные структурные изменения отмечены на участках полной перекристаллизации стали и основного металла (рисунок 13, в, г).

Если степень предварительной холодной пластической деформации сварного соединения увеличивается до 50%, то после проведения ТЦО можно увидеть более мелкозернистую структуру во всех зонах и участках. Наиболее мелкозернистой структура становится в зоне сплавления сварного шва с основным металлом и на участке перегрева. Соответственно, предварительная деформация сварного соединения является предпосылкой образования более мелкозернистой структуры металла после проведения ТЦО. Если же образцы не были изначально подвергнуты холодной пластической деформации, то влияние количества циклов ТЦО в данной ситуации на указанный процесс несущественно. Все вышесказанное подтверждает необходимость осуществления холодной пластической деформации перед проведением ТЦО, чтобы повысить дисперсность структуры всех зон и участков сварного соединения.

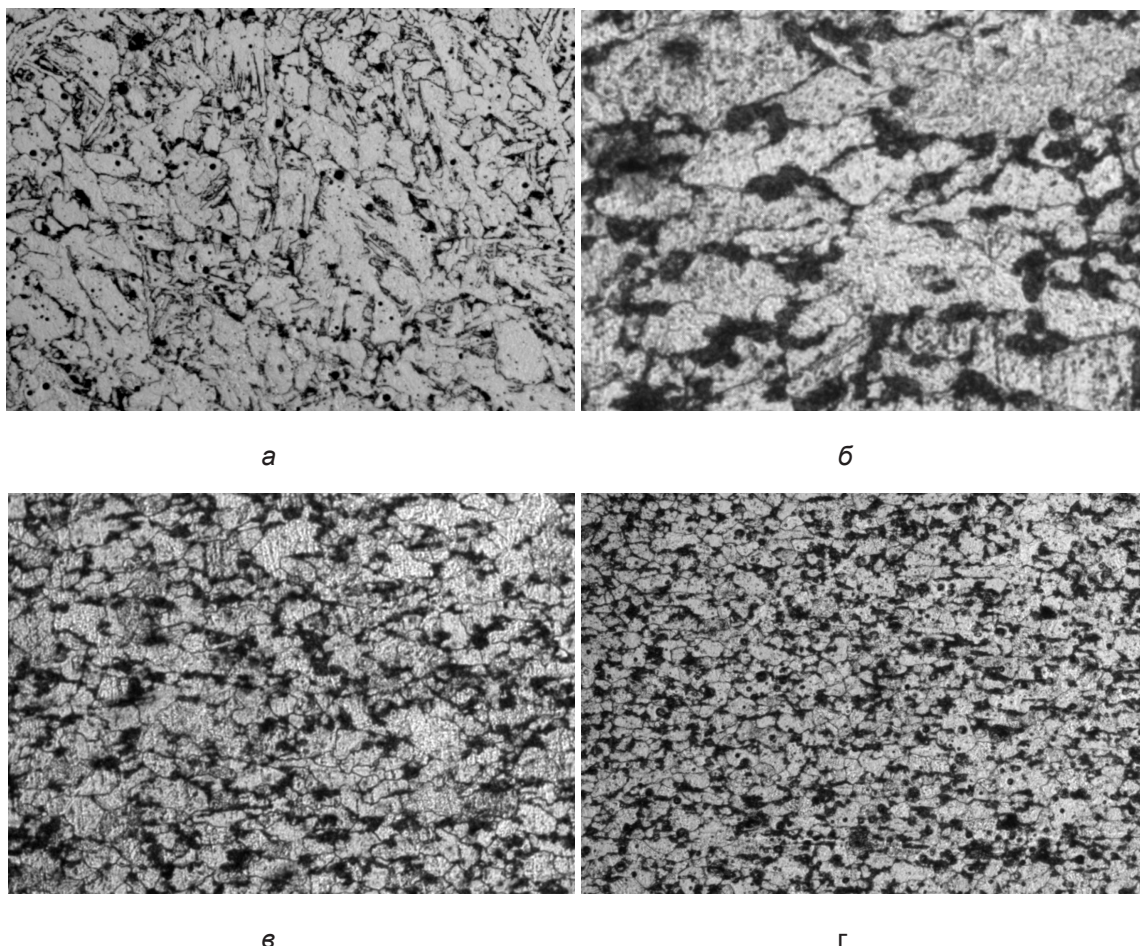


Рисунок 13 – Строение стыкового сварного соединения из стали Ст30МнВ5 после деформации на 20% и трех циклов ТЦО ($\times 200$): а – сварной шов; б – участок перегрева; в – участок полной перекристаллизации; г – основной металл

Figure 13 – The structure of the butt welded joint made of steel St30MnB5 after deformation by 20% and three cycles of TCO ($\times 200$): a – weld ; b – overheating area; c – full recrystallization area; d – base metal

Если количество циклов ТЦО свыше 3–5, то изменения структуры практически не происходит. Как следствие, вышеприведенные исследования позволяют соотнести данный процесс со снижением амплитуды колебаний магнитного поля.

Рассмотренный выше процесс повышения мелкозернистости структуры металла, подвергнутого сначала холодной пластической деформации, а затем ТЦО, скорее всего, связан с активизацией структурных изменений, происходящих в процессе ТЦО. В частности, в опытах с предварительной холодной деформацией при ТЦО отмечено увеличение количества центров образующейся γ -фазы, что влечет за собой измельчение зерна аустенита.

Кроме того, значительную трансформацию структуры металла при ТЦО после холодной пластической деформации можно объяснить перераспределением дефектов кристаллического строения (дислокации, вакансии, дефекты упаковки) и повышением их плотности, а также образованием и развитием мало- и высокоугловых границ. Все вышесказанное подтверждает эффективность применения холодной пластической деформации перед проведением ТЦО, если целью экспериментатора заявлено получение более мелкозернистой структуры сталей.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование свидетельствует о том, что следствием появления механической неоднородности сталей выступает структурная неоднородность различных зон сварных соединений. Проведенный эксперимент позволяет говорить о существовании зависимости между напряженностью магнитного поля рассеяния H_p и структурными изменениями в различных зонах и участках сварных соединений, предварительно деформированных сварных образцов при ТЦО, контролируемой пассивным феррозондовым методом. Определена зависимость величины магнитного параметра H_p , числа циклов ТЦО, исходной микроструктуры участков и количества зон сварного соединения.

Если в период первых 3–5 циклов, включающих нагрев-охлаждение, значения H_p изменяются достаточно интенсивно, то с ростом количества циклов такая амплитуда сокращается. Соответственно, чувствительность магнитного метода может быть использована в проведении контрольных процедур, связанных с отслеживанием процесса формирования мелкозернистой структуры в опасных локальных зонах КН (концентрации напряжений) сварных соединений на самых ранних стадиях ТЦО.

Влияние холодной пластической деформации, проведенной перед ТЦО, на повышение мелкозернистости стали, несомненно, имеет

связь с активизацией проходящих при ТЦО структурных изменений.

При этом было определено, что если повысить степень предварительной холодной пластической деформации с 20 до 50%, то мелкозернистость структуры зон и участков сварных соединений также возрастет.

Результаты данного исследования будут способствовать повышению эффективности сварных соединений и элементов длительно эксплуатируемых МК (металлических конструкций) строительных машин. При этом появляется возможность уменьшить структурную и механическую неоднородность сварных соединений, а также повысить степень равнопрочности различных зон и участков сварных соединений. Данный процесс обещает значительно повысить безопасность эксплуатации строительных машин, так как позволит устранить опасные локальные зоны КН с металлом в стадии предразрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Рабочие механизмы строительных машин и способы технологического обеспечения прочности сварных соединений из высокопрочных сталей // *Недвижимость: экономика, управление*. 2020. № 1. С. 63–68.
2. Мухаметшина Р.М. Отказы дорожно-строительных машин по параметрам коррозии // *Известия КазГАСУ*. 2013. № 4 (26). С. 62–67.
3. Щербаков А.П. Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин // *Вестник СибАДИ*. 2020. № 17 (4). URL: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475>.
4. Вишнякова Е.В. История развития конструкционных материалов // *Холодильная техника и кондиционирование*. 2016. № 1. С. 51–56.
5. Гордиенко В.Е., Трунова Е.В., Абросимова А.А., Шананина Н.В. Пассивный феррозондовый контроль длительно эксплуатируемых сварных металлоконструкций с коррозионными повреждениями // *Вестник гражданских инженеров*. 2016. № 3 (56). С. 193–197.
6. Болдырев А.М. Технология сварки в строительстве. Воронеж, ВГУ. 1987. 196 с.
7. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Трунова Е.В., Щербаков А.П. К выбору конструкционных сталей для изготовления сварных металлических конструкций строительных машин // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 6 (65). С. 233–238.
8. Floreen S., Hayden H.W. The deformation and fracture of stainless steels having microduplex structures (Deformation characteristics and fracture strength of Cr-Ni stainless steels with fine scale two-phase ferrite plus austenite microstructures) // *ASM Transactions Quarterly*. 1968. Vol. 61. Pp. 489–499.
9. Березина А.А. Некоторые особенности оценки структурной и механической неоднородности сварных соединений металлических конструкций строительных машин // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. № 4 (51). С. 123–127.
10. Мыльников В.В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов // *Наука и техника*. 2019. № 5. С. 52–55.

11. Прохоров В.Ю., Быков В.В. Пути повышения долговечности и износостойкости подшипника скольжения навесного технологического оборудования // НиКа. 2017. № 1. С. 71-74.

12. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Трунова Е.В. Влияние термоциклической обработки на структурные изменения пластически деформированных сварных соединений металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 174-180.

13. Безлюдько Г.Я., Мужичкий В.Ф., Попов Б.Е. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) НДС и остаточного ресурса стальных МК // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. № 9. Т. 65. С. 53-57.

14. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Кузьмин О.В., Трунова Е.В., Щербаков А.П. Влияние термической и термоциклической обработки на механические свойства конструкционных сталей // Вестник гражданских инженеров. 2018. №1 (66). С. 128-133.

15. Зайцев А.И. Перспективные направления развития металлургии и материаловедения стали // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 4. С. 417-426.

16. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Трунова Е.В., Корнеева Е.А., Щербаков А.П. Влияние структурных параметров конструкционных сталей на результаты оценки напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6 (59). С. 194-199.

17. Morrison W.B. Superplasticity of low-alloy steels // ASM Transactions Quarterly. 1968. Vol. 61. № 3. Pp. 423-434.

18. Ведяков И.И., Одесский П.Д. Современные отечественные стандарты и вопросы расширения применения металлических конструкций в строительстве // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 3 (22). С. 42-53.

19. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Трунова Е.В. Влияние термоциклической обработки на структурные изменения пластически деформированных сварных соединений металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 174-180.

20. Ведяков И.И., Одесский П.Д., Гуров С.В. Обеспечение прочности сварных соединений для уникальных конструкций из проката больших толщин повышенной и высокой прочности // Строительная механика и расчет сооружений. 2018. № 2 (277). С. 68-75.

21. Густов Ю.И., Орехов А.А. Исследование конструкционно-технологических и эксплуатационных показателей строительной техники // Известия КазГАСУ. 2014. № 4 (30). С. 19-24.

22. Мухаметшина Р.М. Влияние климатических факторов на свойства материалов и надежность дорожно-строительных машин // Известия КазГАСУ. 2014. № 4 (30). С. 102-108.

23. Мешков Ю.Я., Котречко С.А., Шиян А.В. Роль прочности и механической стабильности в оценке конструкционного качества сталей // Вісник ПДАБА. 2013. № 5 (182). С. 62-68.

24. Бубликов Ю.А. Основные направления повышения свойств конструкционных сталей ферри-

то-перлитного класса // ВЕЖПТ. 2014. № 11 (72). С. 81-82.

25. Зайцева М.М., Мерепа Г.И., Касьянов Д.Н. Проблема долговечности деталей грузовых автомобилей // ИВД. 2017. № 2 (45). С. 71-75.

REFERENCES

1. Shcherbakov A.P., Pushkarev A.E., Manvelova N.E. Rabochie mekhanizmy stroitel'nyh mashin i sposoby tekhnologicheskogo obespecheniya prochnosti svarnyh soedinenij iz vysokoprochnykh stalej [Working mechanisms of construction machines and methods of technological ensuring the strength of welded joints made of high-strength steels]. *Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie – Real estate: Economics, management*. 2020; 1: 63-68. (in Russian)

2. Mukhametshina R.M. Otkazy dorozhno-stroitel'nyh mashin po parametram korrozii [Failures of road construction machines in terms of corrosion parameters]. *Izvestiya KazGASU. – News of the University*. 2013; 4 (26): 62-67. (in Russian)

3. Shcherbakov A.P. Vybora materiala i metoda povysheniya iznosostojkosti elementov stroitel'nyh mashin [Material and method selection for increasing the wear resistance of construction machines components]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. № 17 (4). URL: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475>. (in Russian)

4. Vishnyakova E.V. Istoriya razvitiya konstrukcionnyh materialov [History of the development of structural materials]. *Holodil'naya tekhnika i kondicionirovanie – Refrigerating Equipment and Air Conditioning*. 2016; 1: 51-56. (in Russian)

5. Gordienko V.E., Trunova E.V., Abrosimova A.A., Shananina N.V. Passivnyy ferrozondovyy kontrol'ditel'no ehkspluatiruemykh svanykh metallokonstruktsiy s korroziionnymi povrezhdeniyami [Passive ferrosonde monitoring of long-term operation of welded metal structures with corrosion damage]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 3 (56): 193-197. (in Russian)

6. Boldyrev A.M. *Tekhnologiya svarki v stroitel'stve* [Welding technology in construction]. Voronezh, VSU, 1987. 196 p. (in Russian)

7. Gordienko V.E., Trunova E.V., Abrosimova A.A., Shananina N.V. K vyboru konstrukcionnyh stalej dlya izgotovleniya svarnykh metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [To the choice of structural steels for the manufacture of welded metal structures of construction machines]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2017; 6 (65): 233-238. (in Russian)

8. Floreen S., Hayden H.W. The deformation and fracture of stainless steels having microduplex structures (Deformation characteristics and fracture strength of Cr-Ni stainless steels with fine scale two phase ferrite plus austenite microstructures). *ASM Transactions Quarterly*. 1968; 61: 489-499.

9. Berezina A.A. Nekotorye osobennosti ocenki strukturnoj i mekhanicheskoy neodnorodnosti svarnyh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [Some features of evaluation of structural and mechanical heterogeneity of welded joints of metal structures of construction machines]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2015; 4 (51): 123-127. (in Russian)

10. Mylnikov V.V. Vliyanie chastoty nagruzheniya na ustalost' konstrukcionnykh materialov [Influence of loading frequency on fatigue of structural materials]. *Nauka i tekhnika – Science and Engineering*. 2019; 5: 52-55. (in Russian)

11. Prokhorov V.Yu., Bykov V.V. Puti povysheniya dolgovechnosti i iznosostoykosti podshipnika skol'zheniya navesnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [Ways to increase the durability and wear resistance of the sliding bearing of mounted technological equipment]. *NiKa*. 2017; 1: 71-74. (in Russian)

12. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V. Vliyanie termociklicheskoj obrabotki na strukturnye izmeneniya plasticheski deformirovannykh svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nykh mashin [Influence of thermocyclic processing on structural changes of plastically deformed welded joints of metal structures of construction machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 2 (55): 174-180. (in Russian)

13. Bezlyudko G.Ya., Muzhitskiy V.F., Popov B.E. Magnitnyy kontrol' (po koercitivnoj sile) NDS i ostatchnogo resursa stal'nykh MK [Magnetic control (by coercive force) VAT and residual resource of steel MK]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 1999; 9 (65): 53-57. (in Russian)

14. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Kuz'min O.V., Trunova E.V., Scherbakov A.P. Vliyanie termicheskoj i termociklicheskoj obrabotki na mekhanicheskie svoystva konstrukcionnykh staley [Influence of thermal and thermocyclic treatment on the mechanical properties of structural steels]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2018; 1 (66): 128-133. (in Russian)

15. Zajtsev A.I. *Perspektivnye napravleniya razvitiya metallurgii i materialovedeniya stali* [Promising areas of development of metallurgy and materials science of steel]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii. – Journal of Iron and Steel. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019; 75 (4): 417-426. (in Russian)

16. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V., Korneeva E.A., Shcherbakov A.P. Vliyanie strukturnykh parametrov konstrukcionnykh staley na rezul'taty ocenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarnykh metallokonstrukcij [Influence of structural parameters of structural steels on the results of stress-strain state assessment of welded metal structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 6 (59): 194-199. (in Russian)

17. Morrison W. B. Superplasticity of low-alloy steels. *ASM Transactions Quarterly*. 1968; 61(3): 423-434.

18. Vedyakov I.I., Odesskiy P.D. *Sovremennye otechestvennye standarty i voprosy rasshireniya primeniya metallicheskih konstrukcij v stroitel'stve* [Modern domestic standards and issues of expanding the use of metal structures in construction]. *Vestnik NIC "Stroitel'stvo" – Bulletin of SIC "Construction"*. 2019; 3 (22): 42-53. (in Russian)

19. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V. Vliyanie termociklicheskoj obrabotki na strukturnye izmeneniya plasticheski deformirovannykh svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nykh mashin [Influence of thermocyclic treatment on structural changes of plas-

tically deformed welded joints of metal structures of construction machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 2 (55): 174-180. (in Russian)

20. Vedyakov I.I., Odesskiy P.D., Gurov S.V. Obespechenie prochnosti svarnykh soedinenij dlya unikal'nykh konstrukcij iz prokata bol'shih tolshchin povyshennoj i vysokoj prochnosti [Ensuring the strength of welded joints for unique structures made of rolled products of large thicknesses increased and high strength]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij – Construction mechanics and calculation of structures*. 2018; 2 (277): 68-75. (in Russian)

21. Gustov Yu.I., Orekhov A.A. Issledovanie konstrukcionno-tekhnologicheskikh i ekspluatacionnykh pokazatelej stroitel'noj tekhniki [Research of structural-technological and operational indicators of construction equipment]. *Izvestiya KazGASU – News of the University*. 2014; 4 (30): 19-24. (in Russian)

22. Mukhametshina R.M. Vliyanie klimaticheskikh faktorov na svoystva materialov i nadezhnost' dorozhno-stroitel'nykh mashin [Influence of climatic factors on the properties of materials and reliability of road construction machines]. *Izvestiya KazGASU – News of the University*. 2014; 4 (30): 102-108. (in Russian)

23. Meshkov Yu.Ya., Kotrechko S.A., Shiyan A.V. Rol' prochnosti i mekhanicheskoy stabil'nosti v ocenke konstrukcionnogo kachestva staley [The Role of Strength and Mechanical Stability in Evaluating the Structural Quality of Steels]. *Visnik PDABA*. 2013; 5 (182): 62-68. (in Russian)

24. Bublikov Yu.A. Основные направления повышения свойств конструкционных сталей феррито-перлитного класса [Main directions of improving the properties of structural steels of ferrite-perlite class]. *VEZHPT*. 2014; 11 (72): 81-82. (in Russian)

25. Zaitseva M.M., Megera G.I., Kasyanov D.N. Problema dolgovechnosti detalej gruzovykh avtomobilej [The problem of durability of truck parts]. *IVD*. 2017; 2 (45): 71-75. (in Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Щербakov Александр Павлович (г. Санкт-Петербург) – аспирант, ORCID.org/0000-0002-2454-7751, Scopus Author ID 57212375284, Researcher ID AAP-8095-2020, ассистент кафедры судебных экспертиз ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, тел. +79675912967, e-mail: shurbakov.aleksandr@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexander P. Scherbakov (Saint-Petersburg) – postgraduate student, ORCID.org/0000-0002-2454-7751, Scopus author ID 57212375284, Researcher ID AAP-8095-2020, assistant lecturer of the Forensics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (190005, Saint-Petersburg, 4 Vtoraya Krasnoarmeyskaya st., phone +79675912967, e-mail: shurbakov.aleksandr@yandex.ru).