

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475>

## ВЫБОР МАТЕРИАЛА И МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

**А.П. Щербаков**

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В статье исследуется проблема выбора материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин. На работоспособность строительных машин особое влияние оказывает надёжность используемых деталей. Выбор материалов их изготовления позволяет в дальнейшем рассчитать вероятность того, как подобные элементы будут влиять на её трудоспособность и производительность.

**Материалы и методы.** В процессе определения материала и метода повышения износостойкости строительных машин были выбраны конструкционные стали с различным химическим составом: малоуглеродистые 08пс (в качестве модельного материала), 10, 20, 30, Ст3 и низколегированные стали 09Г2С и 10ХСНД, а также высокоуглеродистая сталь 65Г и борсодержащая сталь 30МнВ5. Были применены такие методы, как высокотемпературный отжиг, нормализация, закалка и высокотемпературный отпуск, термоциклическая обработка, холодная пластическая деформация, термоциклическая обработка сталей после холодной пластической деформации.

**Результаты.** В процессе проведения эксперимента было установлено, что как для малоуглеродистых 08пс, 10, 20, 30, Ст3, так и для низколегированных конструкционных сталей 09Г2С и 10ХСНД, а также для высокоуглеродистой стали 65Г и борсодержащей стали 30МнВ5, увеличение числа циклов ТЦО (термоциклической обработки) приводит к повышению прочностных свойств металла. С увеличением числа циклов более 3–6 приращение прочностных свойств значительно замедляется.

Также было определено, что механические свойства исследуемых сталей значительно зависят как от вида, так и режимов термической и термоциклической обработки. В частности, трехкратная и шестикратная ТЦО позволяют, по сравнению с отжигом и нормализацией, значительно повысить предел текучести и предел прочности исследуемых сталей.

**Заключение.** Проведение ТЦО, в отличие от термической обработки, позволяет лучше выявлять положительное воздействие легирования на прочностные и пластические свойства. При этом, значительно повышая прочность и пластичность, можно получить недостижимые ранее значения работы разрушения легированных сталей в процессе различных видов нагружения. Как следствие, предварительная подготовка стали для производства отдельных элементов машин и механизмов позволит повысить их прочность и износостойкость.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительные машины, повышение износостойкости элементов, долговечность, эксплуатация, термоциклическая обработка.

Поступила 12.07.2020, принята к публикации 23.08.2020.

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: Щербаков А.П. Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (4): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475>

© Щербаков А.П.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475>

## MATERIAL AND METHOD SELECTION FOR INCREASING WEAR RESISTANCE OF CONSTRUCTION MACHINES COMPONENTS

Alexander P. Scherbakov

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

### ANNOTATION

**Introduction.** The article examines the problem of choosing a material and method for increasing the wear resistance of construction machines elements. The performance of construction machines is affected by the reliability of the parts used. The selection of materials for their manufacture allows to calculate the probability of how such elements will affect its ability to work and productivity.

**Materials and methods.** In the process of determining the material and the method for increasing the wear resistance of construction machines, structural steels with various chemical compositions were selected: low-carbon 08ps (as a model material), 10, 20.30, St3 and low-alloy steels 09G2S and 10HSND, as well as high-carbon steel 65G and boron steel 30MnB5. The methods as high temperature annealing, normalization, injection and high temperature release, thermocyclic processing, cold plastic deformation, thermocyclic processing of steels after cold plastic deformation were used.

**Results.** During the experiment, it was found that both for low-carbon 08ps, 10, 20, 30, St3, and for low-alloy structural steels 09G2S and 10HSND, as well as for high-carbon steel 65G and for boron-containing steel 30MnB5, an increase in the number of TCT cycles (thermal cycling) leads to an increase in the strength properties of the metal. With an increase in the number of cycles over 3-6, the increase in strength properties slows down significantly.

**Conclusion.** In contrast to heat treatment, TCO allows to identify the positive effect of alloying on strength and plastic properties to a greater extent. At the same time, significantly increasing the strength and plasticity, it is possible to obtain previously unattainable values of the work of destruction of alloy steels in the process of various types of loading. Accordingly, the preliminary preparation of steel for the production of individual elements of machines and mechanisms will increase their strength and wear resistance.

**KEYWORDS:** construction machines, increasing wear resistance of elements, durability, operation, thermocyclic processing.

**Submitted 12.07.2020, revised 23.08.2020.**

**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. Material and method selection for increasing the wear resistance of construction machines components. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (4): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475>

© Scherbakov A. P.



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

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что на работоспособность строительных машин особое влияние оказывает надёжность используемых деталей [1]. Выбор материалов их изготовления дает возможность в дальнейшем рассчитать вероятность того, как подобные элементы будут влиять на её трудоспособность и производительность, позволяя заранее предусмотреть возможные сложности, которые влияют на функционирование машины, на её ремонт, техническое обслуживание и замену материалов [2]. Выбор материалов для изготовления строительных машин происходит уже на этапе проектирования, так как износостойкость зависит как от первичных этапов создания строительных машин, так и от последующих: эксплуатации и технического обслуживания.

Одним из ключевых свойств строительных машин является надёжность. Надёжность – это свойство строительной машины, позволяющее выполнять ряд необходимых задач без потери технической мощности и падения уровня производительности. Надёжность отвечает за ряд показателей, необходимых для стабильной работы строительной машины, к которым можно отнести эксплуатационный, технико-экономический и технологический [3]. Выбор правильных материалов и поиск корректного метода повышения износостойкости машины позволяют предотвратить возможные риски возникновения излишних финансовых затрат, связанных с восстановлением машины после её поломки.

Надёжность задействует такие свойства, как безотказность и долговечность. Безотказность – свойство, которое подразумевает стабильную работу машины в течение длительного промежутка времени, то есть непрерывную деятельность до отказа или прохождения планового технического обслуживания [4].

Безотказность непосредственно влияет на весь рабочий процесс и имеет огромную значимость для корректного функционирования строительных машин, так как последние часто располагаются группами [5]. Выход из эксплуатации всего одной машины влияет на весь ход работы, что негативно сказывается на производственном процессе и чревато крупными затратами.

К важным свойствам машин также можно отнести долговечность. Долговечность подразумевает под собой полноценное использование строительных машин с сохранением их максимального уровня работоспособности до наступления предельного состояния [6]. Дол-

говечность отличается от безотказности тем, что подразумевает вычисление уровня состояния машины по продолжительности её работы, то есть по её суммарной наработке. Данный временной промежуток начинается с момента введения машины в эксплуатацию и длится до проведения ремонтных работ в случае поломки или же до полной утилизации машины ввиду доведения её до предельного состояния [7].

Выход машины из строя происходит под влиянием ряда факторов:

- отсутствия необходимого уровня безопасности;
- несоответствия уровня параметров машины к заданным изначально значениям;
- снижением эффективности эксплуатации строительной машины;
- постоянной необходимостью в проведении ремонтных или технических работ для поддержания корректного функционирования машины [8].

Существует ряд критериев, применяемых в отношении строительной машины для того, чтобы определить уровень её предельного состояния. К ним относятся только те, которые категорически нарушают эксплуатационные свойства рассматриваемой техники. Это замена центральных элементов, влияющих на работоспособность машины; проведение полного разбора машины из-за нанесения критических повреждений и т. д.

Изнашивание – это систематическое преобразование геометрических показателей частей оборудования (непосредственных рабочих элементов, подвижных деталей, комбинированных сегментов) во время соприкосновения с поверхностями, ведущее к выбиванию с граней соприкосновения частичек материала и к его последующему искривлению. В оборудовании XXI в. поломки элементов строительных машин из-за изнашивания составляют 80–90% от всего объёма поломок. Поломки в узлах трения возникают вследствие следующих факторов:

- истирания соприкасающихся граней из-за чрезмерно активного использования;
- моментального повышения коэффициента трения до степени сцепления;
- неопозволительного понижения коэффициента трения в элементах, ответственных за тормозную функцию, и в работе кинематических пар [9].

Среди этих факторов самым значительным является изнашивание соприкасающихся граней. В большинстве случаев износ зависит от величины линейного износа (другими слова-

ми, от уменьшения или увеличения габаритов рабочих элементов на стыке, расположенном в перпендикулярной плоскости к грани соприкосновения). В некоторых ситуациях для измерения величины износа применяют такие показатели, как величина объёмного или массового изнашивания [10].

Существует такая форма состояния строительной машины, как отказ. В случае отказа машина теряет (полностью или частично) работоспособность и перестаёт выполнять свои ключевые функции и задачи. В данном случае происходит полное или частичное отклонение от норм, установленных технической документацией, регламентированной стандартами или определёнными техническими установками.

В большинстве случаев отказ происходит из-за частичного или полного разрушения элементов или деталей строительных машин [11].

У каждого механизма либо машины есть свой предел выносливости. Этот предел зависит от того уровня напряжения, который могут выдержать изделие, материал или полная машинная конструкция в связи с длительной или быстрой, но отклоняющейся от нормы формой эксплуатации. Огромную роль при установке положенного уровня напряжения для той или иной конструкции играют расчёты. Они позволяют заранее узнать допустимый уровень напряжения для того, чтобы оценить эффективность работы строительной машины ещё на первичной стадии проектирования и рассчитать возможные эксплуатационные риски, вызванные износом элементов, деталей или самой машинной конструкции [12].

Изнашиваемость элементов строительных машин в первую очередь означает свойство материала, из которого состоит деталь или элемент, поддаваться процессу старения, то есть изнашиванию. Существует ряд факторов, влияющих на износостойкость элементов строительных машин:

- качество материала, из которой состоит элемент;
- качество поверхности элемента;
- степень оказываемых на поверхность элемента нагрузок;
- скорость трения поверхностей;
- соблюдение строгих правил поддержания корректного функционирования элемента [13] и т. д.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Большое влияние на износостойкость строительных машин оказывает выбор материалов, из которых будут созданы его элементы.

Свойства материала позволяют заранее определить степень износостойкости строительной машины. Широко известны такие свойства, как твердость, прочность и вязкость [14]. Стоит отметить, что подобные свойства позволяют подобрать тот материал, который будет оптимален в условиях работы строительных машин. Как пример можно привести машины, используемые в буровой промышленности. При создании подобных машин задействуют высокопрочные хромистые стали со значительной вязкостью.

На износостойкость металлов оказывают огромное влияние химический состав и структура. К наиболее износостойким видам сталей можно отнести мелкозернистый. Подобный вид включает в себя большое содержание кремния, марганца, элементы никеля, хрома, молибдена, вольфрама, которые позволяют достичь необходимого уровня износостойкости материалов, применяемых для создания строительных машин [15].

Кроме того, на износостойкость влияют материалы, из которых сделаны элементы машин, подверженные износу, а также способы их обработки и их состав. Рассмотрим основные виды сталей, используемых для изготовления элементов строительных машин. Технические показатели стали Ст3 дают возможность применять её в сооружении нагруженных частей строений со сварочными соединениями и элементов в машинах и механизмах, которые производят свою деятельность при высокой температуре.

Прокат отдельных категорий (а конкретно 5-й категории) применяется для сооружения металлоконструкций, работающих в широких температурных пределах (от  $-40$  до  $425$  °C). По окончании сборки металлоконструкции сложной конфигурации необходимо подвергнуть её термической обработке при высокой температуре. Подобные действия обязательны, так как помогают убрать лишнее напряжение, возникшее от сварочных работ.

К главным достоинствам данной марки стали можно отнести:

- хорошие противокоррозийные свойства;
- высокие механические качества;
- хорошую способность поддаваться сварке [16].

Сталь 08пс принадлежит к группе конструкционных углеродистых сталей. Состав на химическом уровне установлен ГОСТ 1050–88. Он регламентирует соотношение веществ, которые входят в строение сплава 08пс, а именно:



- С: от 0,05 до 0,11%;
- Si: от 0,05 до 0,17%;
- Mn: от 0,35 до 0,65%;
- Cr: не более 0,10%.

Данная сталь имеет высокий уровень прочности и твёрдости. К плюсам этого материала можно отнести и то, что он не восприимчив к нагрузкам, которые не доходят до определённых пределов. Если эти пределы не превышать, то изделие, изготовленное из данной марки стали, сохраняет свою изначальную форму. Тем не менее необходимо отметить, что изделие будет испытывать небольшую деформацию, после чего вернётся в свою прежнюю форму, и на момент восстановления оно будет в состоянии напряжения [17].

Данная марка стали проявляет положительные качества во время сварки, однако необходимо помнить, что изделия из такого материала, которые прошли тепловую обработку, уже не пригодны для использования в сварочных работах.

Сталь 09Г2С разработана для сооружения металлоконструкций, предназначенных для последующего использования в строительстве. Данная особенность объясняется значительной прочностью, надёжностью, а также допустимостью снижения количества расходного сырья на производство элементов. Так, при применении обычного сплава толщина элемента составила бы 5 мм, а при использовании марки 09Г2С – 2,5–3 мм.

Показатели стали данной марки делают возможным её применение при температурах от –70 до +450 °С. Из-за этого её используют при изготовлении всевозможных деталей и соединений. Высокая свариваемость позволяет изготавливать сложные агрегаты для машино-

и судостроительной, железнодорожной отрасли. Сталь 09Г2С, прошедшая термообработку, используется при изготовлении трубопроводов. В северных областях её применяют при транспортировке углеводорода [18].

Прекрасные свойства стали предоставляют возможность для создания фасонного проката – двутавров, уголков и др. Охват области, в которой используется сталь 09Г2С, довольно обширен и затрагивает станкостроение, транспортную промышленность и строительство.

Кроме низкоуглеродистых сталей, при производстве отдельных элементов машин и механизмов используют и низколегированные стали. В данных сталях содержание легирующих компонентов в сумме составляет менее 2,5% (кроме углерода). При содержании легирующих элементов в сумме от 2,5 до 10% сталь называется среднелегированной, при содержании свыше 10% легирующих элементов – высоколегированной [19].

В процессе определения материала и метода повышения износостойкости строительных машин были выбраны конструкционные стали с различным химическим составом: малоуглеродистые 08пс (в качестве модельного материала), 10, 20, Ст3, 30, низколегированные стали 09Г2С и 10ХСНД, а также высокоуглеродистая сталь 65Г и борсодержащая сталь 30MnB5. Химический состав сталей приведен в таблице 1.

Причина выбора данных сталей заключалась в том, что они:

- широко применяются при изготовлении сварных МК (металлических конструкций) строительных машин, в машиностроении и других отраслях промышленности;

Таблица 1  
Химический состав сталей

Table 1  
Chemical composition of steels

| Марка стали | Химический состав, % |           |           |        |        |       |       |       |
|-------------|----------------------|-----------|-----------|--------|--------|-------|-------|-------|
|             | C                    | Si        | Mn        | S      | P      | Cr    | Ni    | Cu    |
| 08пс        | 0,09                 | 0,013     | 0,33      | 0,015  | 0,006  | 0,03  | 0,02  | 0,03  |
| 10          | 0,08                 | 0,09      | 0,45      | 0,02   | 0,014  | 0,03  | 0,02  | 0,04  |
| 20          | 0,21                 | 0,18      | 0,38      | 0,032  | 0,025  | 0,012 | 0,03  | 0,05  |
| 30          | 0,27–0,35            | 0,17–0,37 | 0,5–0,8   | ≤0,040 | ≤0,035 | ≤0,25 | ≤0,30 | ≤0,30 |
| Ст3         | 0,19                 | 0,21      | 0,53      | 0,034  | 0,032  | 0,06  | 0,03  | 0,07  |
| 09Г2С       | 0,11                 | 0,68      | 1,33      | 0,008  | 0,015  | 0,03  | 0,02  | 0,03  |
| 10ХСНД      | 0,10                 | 0,64      | 0,56      | 0,06   | 0,013  | 0,65  | 0,53  | 0,44  |
| 65Г         | 0,62–0,7             | 0,17–0,37 | 0,9–1,2   | 0,035  | 0,035  | 0,25  | 0,25  | 0,25  |
| 30MnB5      | 0,27–0,33            | ≤0,40     | 1,15–1,45 | ≤0,035 | ≤0,025 | –     | –     | ≤0,40 |

- обладают высокими характеристиками пластичности при обычных и низких температурах;
- имеют различный химический состав;
- имеют разные категории прочности и разную склонность к циклическому упрочнению и разупрочнению;
- отличаются хорошей свариваемостью;
- имеют повышенные и обычные антикоррозионные свойства;
- дают возможность распространить полученные закономерности на все стали, близкие к выбранным маркам как по составу, так и по свойствам;
- ввиду низкого содержания углерода могут использоваться для изучения физики магнито-механического явления.

Для проведения исследований из стальных листов поперек прокатки вырезались пластины шириной 30 и длиной 150 мм, которые подвергались различным видам термической обработки.

В процессе исследования изучение свойств указанных сталей проводилось после различных видов обработки, таких как:

- высокотемпературный отжиг;
- нормализация (температура отжига и нормализации для сталей 08пс, 20, Ст3, 09Г2С и 10ХСНД составляла 900 °С, для стали 10 – 920 °С, время выдержки составляло 30 мин);

- закалка и высокотемпературный отпуск (проводимые для сталей 20, 30 и 30МнВ5 при температурах 880 и 600 °С соответственно, а для стали 65Г – при температурах 880 и 360 °С соответственно);

- термоциклическая обработка для исследуемых сталей, осуществляемая при температуре 770 °С и с последующим охлаждением на воздухе;

- холодная пластическая деформация (дробная прокатка) стали на степень деформации 20 и 50%;

- термоциклическая обработка сталей, проводимая после холодной пластической деформации.

Для исследования процесса формирования микроструктуры конструкционных сталей в процессе термического, термоциклического и деформационного воздействий применялись микроструктурный анализ и пассивный феррозондовый метод.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Виды термической обработки исследуемых сталей представлены в таблице 2.

В процессе проведения экспериментальных исследований было установлено, что высокий температурный отжиг позволяет получить наиболее крупнозернистую и равноосную структуру в малоуглеродистых и низколегированных сталях [20].

Таблица 2  
Виды термической обработки исследуемых сталей

Table 2  
Heat treatment types of the studied steels

| Марка стали | Отжиг, °С | Нормализация, °С | Закалка + отпуск, °С | Отжиг + ТЦО, °С |          | Нормализация + ТЦО, °С |          | Обработка на зернистый перлит (нормализация + ТЦО), °С        |          |
|-------------|-----------|------------------|----------------------|-----------------|----------|------------------------|----------|---------------------------------------------------------------|----------|
|             |           |                  |                      | 3 цикла         | 6 циклов | 3 цикла                | 6 циклов | 3 цикла                                                       | 6 циклов |
| Ст3         | 900       | 900              | –                    | 780             | 780      | 780                    | 780      | –                                                             | –        |
| 08пс        | 900       | 900              | –                    | 780             | 780      | 780                    | 780      | –                                                             | –        |
| 10          | 920       | 920              |                      | 780             | 780      | 780                    | 780      | –                                                             | –        |
| 20          | 900       | 900              | 880 + 600, вода      | 780             | 780      | 780                    | 780      | –                                                             | –        |
| 30          | 880       | 880              | 880 + 600, вода      | 780             | 780      | 780                    | 780      | Нормализация + 780 °С, охлаждение до 630 °С на воздухе + вода |          |
| 09Г2С       | 900       | 900              | –                    | 780             | 780      | 780                    | 780      | –                                                             | –        |
| 10ХСНД      | 900       | 900              | –                    | 780             | 780      | 780                    | 780      | –                                                             | –        |
| 65Г         | 800       | 800              | 800 + 360, масло     | 780             | 780      | 780                    | 780      | –                                                             | –        |
| 30МнВ5      | 800       | 800              | 880 + 600, вода      | 780             | 780      | 780                    | 780      | –                                                             | –        |

Анализ показал, что высокий эффект при измельчении в конструкционных сталях дает применение термоциклической обработки, основанной на многократном циклическом нагреве сталей (аустенизация) и последующем охлаждении после каждого цикла. Вторичным эффектом здесь будет получение однородного распределения химических элементов, что обусловлено интенсификацией диффузионных процессов за счет усиления теплофизических факторов [20].

В процессе осуществления металлографических исследований было установлено, что без учета химического состава и исходной структуры исследуемых сталей после ТЦО во всех случаях формируется мелкозернистая структура с различной степенью дисперсности.

Типичные структуры сталей после ТЦО приведены на рисунках 1, 2, 3. Наибольшие изменения структуры сталей происходят в процессе первых 3–6 циклов ТЦО. Дальнейшее повышение числа циклов уже не так сильно влияет на степень измельчения структуры, однако уменьшает разнотернистость сталей. Та же ситуация имеет место и в случае других сталей с различным исходным структурным состоянием; соответственно, для оптимизации зернистой структуры в конструкционных сталях требуется от 3 до 6 циклов ТЦО.

Следует учесть, что конечный размер зерен после ТЦО определяется также исходной структурой сталей перед данным процессом. Структуре сталей (поставка плюс отжиг при 900 °C), более крупнозернистой по сравнению со структурой в состоянии поставки, соответствует и более крупнозернистая структура после термоциклической обработки [20] (рисунки 1, 2). Если имеет место деформация конструкционных сталей перед проведением ТЦО, то на выходе можно получить более мелкозер-

нистую структуру, чем в случае других видов предварительной обработки (рисунок 3) [20].

Кроме того, для достижения более высокого измельчения структуры при ТЦО целесообразно изначально применить метод холодной пластической деформации [20]. Причина этого в том, что в ходе пластической деформации происходят перераспределение и повышение плотности дислокаций, вакансий, дефектов упаковки, интенсифицируется образование и развитие мало- и высокоугловых границ. Это в последующем оптимизирует структуру сталей при ТЦО [20].

Механические свойства хорошо сваривающихся и наиболее широко применяемых конструкционных сталей Ст3 и 10ХСНД после высокотемпературного отжига при 1050 °C и последующей 1...10-кратной ТЦО при 770 °C приведены в таблице 3. Для сравнения представлены свойства модельной стали 08, имеющей низкое содержание углерода.

Данные таблицы 3 позволяют заключить, что как для малоуглеродистых сталей 08пс и Ст3, так и низколегированной стали 10ХСНД после ТЦО наблюдается значительное повышение прочностных свойств, особенно после первых трех циклов. Но когда количество циклов превышает 3, приращение прочностных свойств металла несколько замедляется. Таким образом, для повышения основных прочностных характеристик металлов целесообразно применение ТЦО в течение первых 3–6 циклов [21].

Изменения механических свойств конструкционных сталей 08, 10, 20, 30, Ст3, 09Г2С, 10ХСНД, 65Г и 30МnB5 в зависимости от различных видов термической обработки показаны в таблице 4. При этом стали в состоянии заводской поставки подвергались отжигу и нормализации при 900 °C и термоциклической обработке.

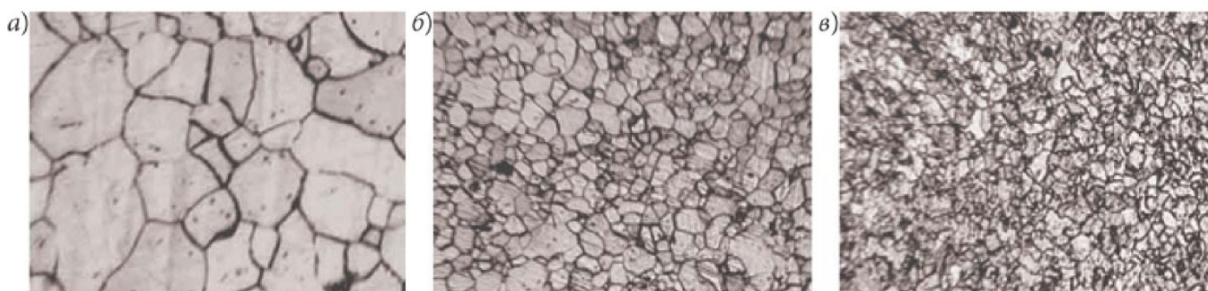


Рисунок 1 – Изменение структуры стали 09Г2С при термоциклической обработке,  $\times 650$ :  
а – состояние поставки; б, в – после 3-го и 6-го циклов соответственно

Figure 1 – Changes in the structure of steel 09G2S during thermocyclic processing,  $\times 650$ :  
a – the state of delivery; b, c – after 3<sup>rd</sup> and 6<sup>th</sup> cycles, respectively

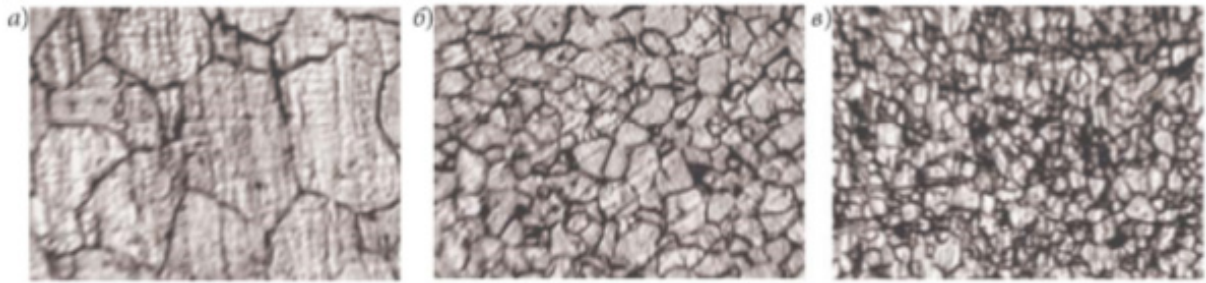


Рисунок 2 – Изменение структуры стали 08пс при термоциклической обработке,  $\times 650$ :  
 а – состояние (поставка + отжиг при 900 °С); б, в – после 3-го и 6-го циклов соответственно  
 Figure 2 – Change in the structure of steel 08ps during thermocyclic processing,  $\times 650$ :  
 а – state (delivery + annealing at 900 °C; б, в – after 3<sup>rd</sup> and 6<sup>th</sup> cycles, respectively

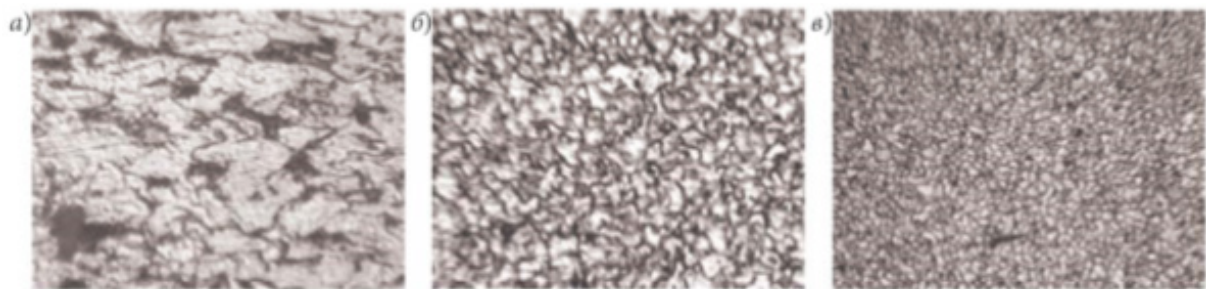


Рисунок 3 – Изменение структуры стали 10 ХСНД при термоциклической обработке,  $\times 650$ :  
 а – состояние (поставка + прокатка на  $\epsilon = 50\%$ ); б, в – после 3-го и 6-го циклов соответственно  
 Figure 3 – Change in the structure of steel 10 HSND during thermocyclic processing,  $\times 650$ :  
 а – state (delivery + rolling at  $\epsilon = 50\%$ ); б, в – after the 3<sup>rd</sup> and 6<sup>th</sup> cycles, respectively

Таблица 3  
 Механические свойства сталей после термоциклической обработки

Table 3  
 Mechanical properties of steels after thermocyclic processing

| Марка материала | Механические свойства, МПа | Число циклов ТЦО |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|----------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                            | 0                | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 7     | 10    |
| 08пс            | $\sigma_{0,2}$             | 166,0            | 172,0 | 181,5 | 188,0 | 190,5 | 193,0 | 193,5 | 195,0 |
|                 | $\sigma_b$                 | 281,5            | 295,5 | 301,0 | 309,5 | 315,0 | 317,5 | 320,5 | 323,5 |
|                 | $\sigma_{0,2}$             | 233,0            | 242,5 | 250,0 | 255,5 | 259,0 | 262,5 | 263,0 | 263,5 |
| Ст3             | $\sigma_b$                 | 418,0            | 441,5 | 451,0 | 468,5 | 471,5 | 476,0 | 477,5 | 484,5 |
| 10 ХСНД         | $\sigma_{0,2}$             | 385,0            | 400,5 | 416,0 | 423,5 | 428,5 | 435,0 | 434,0 | 435,0 |
|                 | $\sigma_b$                 | 503,0            | 538,0 | 538,0 | 563,5 | 568,5 | 573,5 | 578,5 | 583,5 |



Таблица 4  
Механические свойства сталей в зависимости от разных видов термообработки

Table 4  
Mechanical properties of steels depending on different types of heat treatment

| Марка материала | Механические свойства, МПа | Вид термообработки |              |                |                   |
|-----------------|----------------------------|--------------------|--------------|----------------|-------------------|
|                 |                            | Отжиг              | Нормализация | ТЦО, три цикла | ТЦО, шесть циклов |
| 08пс            | $\sigma_{0,2}$             | 151,0              | 217,0        | 274,0          | 276,0             |
|                 | $\sigma_b$                 | 280,0              | 331,0        | 352,0          | 353,0             |
| 10              | $\sigma_{0,2}$             | 149,0              | 223,0        | 250,0          | 252,0             |
|                 | $\sigma_b$                 | 265,0              | 304,0        | 328,0          | 331,0             |
| 20              | $\sigma_{0,2}$             | 252,0              | 314,0        | 330,0          | 332,0             |
|                 | $\sigma_b$                 | 388,0              | 421,0        | 448,0          | 449,0             |
| Ст3             | $\sigma_{0,2}$             | 242,0              | 305,0        | 368,0          | 369,0             |
|                 | $\sigma_b$                 | 392,0              | 439,0        | 460,0          | 462,0             |
| 09Г2С           | $\sigma_{0,2}$             | 279,0              | 338,0        | 404,0          | 406,0             |
|                 | $\sigma_b$                 | 438,0              | 494,0        | 528,0          | 530,0             |
| 10ХСНД          | $\sigma_{0,2}$             | 425,0              | 492,0        | 615,0          | 617,0             |
|                 | $\sigma_b$                 | 618,0              | 684,0        | 727,0          | 729,0             |
| 30              | $\sigma_{0,2}$             | 152,0              | 266,0        | 280,0          | 295,0             |
|                 | $\sigma_b$                 | 235,0              | 295,0        | 354,0          | 356,0             |
| 65Г             | $\sigma_{0,2}$             | 468,0              | 614,0        | 620,0          | 622,0             |
|                 | $\sigma_b$                 | 769,0              | 830,0        | 871,0          | 872,0             |
| 30МнВ5          | $\sigma_{0,2}$             | 620,0              | 827,0        | 1197,0         | 1200,0            |
|                 | $\sigma_b$                 | 815,0              | 1150,0       | 1695,0         | 1700,0            |

На основе данных таблицы 4 можно сделать вывод, что проведение ТЦО, позволяющей получить мелкозернистую структуру в конструкционных сталях, дает возможность существенно изменить их механические характеристики. Так, предел текучести и предел прочности исследуемых сталей после трех- и шестикратной ТЦО повышаются гораздо больше, чем при отжиге и нормализации.

Проведение ТЦО, в отличие от термической обработки, позволяет лучше выявлять положительное воздействие легирования на прочностные и пластические свойства. При этом, значительно повышая прочность и пластичность, можно получить недостижимые ранее значения работы разрушения легированных сталей в процессе различных видов нагружения [22, 23, 24, 25].

Соответственно, предварительная подготовка стали для производства отдельных элементов машин и механизмов позволит повысить их прочность и износостойкость.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения производительности машин и механизмов очень важно, чтобы машина сохраняла эффективность и не теряла свои эксплуатационные показатели. Надежность включает в себя способность строительной машины не терять производственные характеристики. Несмотря на данные обстоятельства, с течением времени строительная машина под воздействием ряда факторов видоизменяется. На неё могут оказать влияние такие факторы, как изменение климатических условий, изменение температуры, воздействие окружающей среды, что приводит к изнашиваемости машины и может полностью вывести её из эксплуатации.

Основное внимание должно быть уделено материалу, из которого изготавливаются элементы строительных машин и механизмов. Под влиянием различных факторов сталь может иметь различные степени износостойкости; по этой причине необходимо повысить

данное свойство стали, что увеличит срок службы как отдельных элементов машины, так и всего механизма в целом.

В процессе проведения эксперимента было установлено, что как для малоуглеродистых 08пс, 10, 20, Ст3, так и для низколегированных конструкционных сталей 09Г2С, 10ХСНД, а также для высокоуглеродистой стали 65Г и для борсодержащей стали 30МпВ5 увеличение числа циклов ТЦО приводит к повышению прочностных свойств металла. С ростом количества циклов более 3–6 приращение прочностных свойств значительно замедляется.

Также было определено, что механические свойства исследуемых сталей сильно зависят как от вида, так и режимов термической и термоциклической обработки. В частности, трех- и шестикратная ТЦО позволяют, по сравнению с отжигом и нормализацией, значительно повысить предел текучести и предел прочности исследуемых сталей.

Эффект повышения прочностных свойств конструкционных сталей в процессе контролируемой ТЦО можно использовать при восстановлении и усилении прочности металла в локальных зонах концентрации напряжения в сварных соединениях и элементах сварных МК.

## 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. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Трунова Е.В. Влияние холодной пластической деформации на структурную неоднородность сварных соединений металлических конструкций строительных машин // *Вестник гражданских инженеров*. 2016. № 1 (54). С. 127-131.
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. Т. 65, № 9. 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 феррито-перлитного класса // ВЕЖПТ. 2014. № 11 (72). С. 81-82.

25. Зайцева М.М., Мегера 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 svarnykh 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. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V. Vliyanie holodnoj plasticheskoy deformacii na strukturnuyu neodnorodnost' svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [Influence of cold plastic deformation on structural heterogeneity of welded joints of metal structures of construction machines]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 1 (54): 127-131. (in Russian)

4. Vishnyakova E.V. Istoriya razvitiya konstrukcionnykh 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'dlitel'no ehkspluatiruemykh svarykh metallokonstruktsiy s korroziionnymi povrezhdeniyami [Passive ferrosonde monitoring of long-term operation of welded metal structures with corrosion damage]. *Vestnik 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 konstrukcionnykh 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]. *Vestnik 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 svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [Some features of evaluation of structural and mechanical heterogeneity of welded joints of metal structures of construction machines]. *Vestnik 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 iznosostojkosti 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'nyh 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. Magnitnyj kontrol' (po koercitivnoj sile) NDS i ostatochnogo resursa stal'nyh MK [Magnetic control (by coercive force) VAT and residual resource of steel MK]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 1999; 65(9): 53-57. (in Russian)

14. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Kuz'min O.V., Trunova E.V., Scherbakov A.P. Vliyanie termicheskoy i termociklicheskoj obrabotki na mekhanicheskie svoystva konstrukcionnykh stalej [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. (in Russian)

18. Vedyakov I.I., Odesskij P.D. Sovremennye otechestvennye standarty i voprosy rasshireniya primeneniya 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 plastically 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., Odesskij 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. Влияние климатических факторов на свойства материалов и надежность дорожно-строительных машин [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 – 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 Vtoraia Krasnoarmeiskaia st., phone +79675912967, e-mail: shurbakov.aleksandr@yandex.ru).