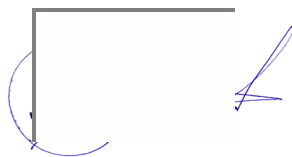


На правах рукописи



Щербаков Александр Павлович

**ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
КОНСТРУКЦИИ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ
РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

Специальность 2.5.11. Наземные
транспортно-технологические средства и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пушкарев Александр Евгеньевич;

Официальные оппоненты: **Манжула Константин Павлович**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского
государственного политехнического
университета Петра Великого», институт
машиностроения, материалов и транспорта,
Высшая школа транспорта, профессор;

Ватулин Ян Семенович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I», кафедра «Наземные
транспортно-технологические комплексы»,
доцент.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».**

Защита состоится «30» мая 2023 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.05 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» СПбГАСУ по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/shcherbakov-aleksandr-pavlovich>.

Автореферат разослан «10» апреля 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Е. В. Куракина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основные дорожно-строительные работы включают в себя достаточно широкий спектр таких технологических операций, как разработка, перемещение и уплотнение грунта, буровые и свайные работы, ремонт инженерных коммуникаций, подготовительные виды работ, гидромеханизация земляных работ, разработка мерзлых грунтов, реконструкция и устройство дорожного покрытия и т. д. Такое многообразие выполняемых работ означает необходимость разработки большого числа различных дорожно-строительных машин (ДСМ). При этом сохраняется общность подходов в таких вопросах, как определение характера силовых и климатических воздействий на рабочие органы ДСМ и поиск путей повышения их эффективности, экономичности, надежности и производительности. Такая работа ведется на всех этапах жизненного цикла машин и включает в себя обоснование конструктивного исполнения и режимов работы как машины в целом, так и отдельных ее узлов и деталей. Последнее обстоятельство в первую очередь связано со свойствами материалов, из которых изготовлены рабочие органы машин, поскольку повышенные прочностные характеристики используемых материалов позволяют увеличить временные интервалы межрегламентных работ, а значит, повысить эффективность использования ДСМ.

Знание уровня механических и физических характеристик нескольких материалов позволяют уже на этапе проектирования использовать те, которые повышают ее эксплуатационные качества. Чем больше информации о свойствах материалов будет предоставлено разработчику машин, тем более обоснованным будет выбор.

Из сказанного выше можно заключить, что повышение долговечности рабочего оборудования за счет обоснованного выбора материала деталей, формирования технологических воздействий на этапе изготовления и ремонта ДСМ представляет собой важную народно-хозяйственную задачу и определяет актуальность темы исследования.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами совершенствования конструкций и эксплуатации ДСМ занимались научные школы Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) и т. д. Решению проблем в данном направлении посвящены работы В. И. Баловнева, В. Е. Гордиенко, Н. Г. Гринчара, Ю. И. Густова, В. А. Зорина, В. Н. Кузнецовой, К. П. Манжулы, И. А. Недорезова, А. К. Рейша, С. В. Репина, В. В. Савинкина, В. С. Щербакова и многих других.

Цель исследования. Установление новых и уточнение существующих закономерностей изменения свойств материалов рабочих органов ДСМ, включая

сварные соединения, в зависимости от реализуемой термоциклической обработки, обеспечивающей повышение надежности эксплуатации машин.

Задачи исследования. Для достижения цели данного диссертационного исследования необходимо решить ряд последовательных задач, а именно:

1. Провести поиск сведений, приведенных в научно-технической литературе, по путям получения мелкозернистой структуры сталей для повышения уровня их физико-механических характеристик, удовлетворяющих требованиям условий применения ДСМ.

2. Осуществить выбор объектов исследований и оценить объем исследований свойств сталей исходя из возможностей имеющегося технологического и испытательного оборудования.

3. Провести комплексные исследования физико-механических и физических характеристик выбранных сталей и обработку полученных результатов. На основании полученных результатов построить математические модели, связывающие уровень физико-механических характеристик сталей с их структурой.

4. С использованием определенных физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30МnВ5 провести расчетные исследования прочности зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А, включая оценку чувствительности к концентраторам напряжений.

5. Провести сравнение показателей характеристик выбранных объектов исследований и обосновать выбор наиболее предпочтительного материала для изготовления деталей ДСМ с учетом выявленных закономерностей применения технологических приемов.

Объект исследования. Работоспособность и долговечность ДСМ в связи с применяемыми при изготовлении деталей рабочих органов машин материалами и технологическими воздействиями.

Предмет исследования. Закономерности, характеризующие связь физико-механических и физических характеристик материала с его структурой, а также расчетная оценка работоспособности рабочего органа ДСМ.

Рабочая гипотеза состоит в том, что повышение долговечности при эксплуатации ДСМ обеспечивается уменьшением размера зерна материалов, из которых изготовлены детали рабочих органов, что позволяет повысить уровень физико-механических характеристик.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Выявлены закономерности уменьшения размера зерна и прочностных свойств для стали 09Г2С и 30МnВ5 при термоциклической обработке. Установлено, что для стали 09Г2С процесс стабилизируется на четвертом цикле, в то время как сталь 30МnВ5 реагирует на дальнейшее проведение термоциклической обработки уменьшением среднего размера зерна вплоть до десятого цикла.

2. Экспериментально исследован комплекс физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30МnB5. Определены зависимости, описывающие связь механических характеристик сталей при растяжении, сжатии и изгибе, с размером зерна. Для стали 30МnB5 впервые получены механические характеристики (пределы прочности и текучести при растяжении, предел текучести при сжатии и прочность при изгибе) при различных количествах циклов термоциклической обработки. Данные сведения позволили оценить влияние числа циклов на такие параметры сталей 09Г2С и 30МnB5, как предел выносливости, износостойкость и коэффициент интенсивности напряжений.

Методология и методы исследования. Методология исследований построена на экспериментальном изучении изменяемости комплекса физико-механических и физических характеристик сталей и теоретическом анализе влияния этих изменений на работоспособность ДСМ при их эксплуатации. Помимо прямых экспериментов по определению характеристик сталей, были использованы математическое моделирование, теоретические подходы обеспечения прочности, надежности и долговечности ДСМ, а также методы математической статистики.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы, п. 2: «Методы расчета и проектирования, направленные на создание новых и совершенствование существующих транспортно-технологических средств и их комплексов с учетом полного жизненного цикла изделий, обладающих высоким качеством, в том числе повышенными показателями экономичности, надежности, производительности, экологичности и эргономичности, обеспечивающих энергоэффективность и безопасность эксплуатации»; п. 3 «Экспериментальные исследования и испытания транспортно-технологических средств и их комплексов, а также отдельных систем, агрегатов, узлов, деталей и технологического оборудования».

Положения, выносимые на защиту:

1. Термоциклическая обработка сталей приводит к уменьшению размеров зерна и существенному изменению физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30МnB5.

2. Результаты расчетных и экспериментальных исследований комплекса механических и физических характеристик деталей и их сварных соединений, подтверждающие возможность повышения долговечности рабочих органов ДСМ за счет обоснованной замены материала при их изготовлении и ремонте.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обоснована применением общепринятых методов и методик выполнения теоретических и экспериментальных исследований, использованием

стандартизованных методик измерения и последующего анализа результатов; подтверждена сопоставимостью теоретических и экспериментальных результатов, их практическим использованием; обеспечена применением сертифицированных средств измерения, обеспечивающих надлежащую точность, и согласованностью полученных результатов теоретических исследований и эксперимента.

Практическая ценность и реализация результатов исследований состоит в установленной целесообразности замены материала рабочего органа как пути повышения надежности ДСМ. Материал рабочего органа (сталь 30MnB5) рекомендован к практическому использованию для различных организаций в сфере тяжелого машиностроения, машиностроения и дорожного строительства (ООО «СПбГАСУ-Дорсервис», ООО «Марка», АО «Северо-Западный региональный центр концерна ВКО „Алмаз-Антей”» — Обуховский завод», ООО «Завод дорожных машин», АО «ГК „Северавтодор”», АО «Московский машиностроительный завод „Авангард”», ПАО «Уральский завод тяжелого машиностроения»), а также в учебных программах вузов (СПбГАСУ, ВГТУ, СибАДИ) в рамках подготовки обучающихся по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» по направлению 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Теоретическая значимость заключается в развитии теории формирования физико-механических свойств сталей для применения в конструкциях строительных и дорожных машин при исследовании зависимости размеров зерна сталей 09Г2С и 30MnB5 от количества термоциклов обработки.

Практическая значимость заключается в возможности применения термоциклической обработки для измельчения зерна исследуемых материалов – сталей 09Г2С и 30MnB5. Так, при осуществлении десяти циклов «нагрев – охлаждение» для стали 09Г2С происходит уменьшение размеров зерна с 32 мкм в исходном состоянии до 7,5 мкм. Для стали 30MnB5 степень измельчения структуры оказывается еще более существенной – с 22 до 1,5 мкм.

Сформулированные выводы и практические рекомендации могут быть использованы при оценке различных аспектов повышения долговечности ДСМ и наземных транспортно-технологических средств и комплексов при их эксплуатации.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. III International Scientific and Practical Conference “Innovative Technologies in Environmental Science and Education”, ITESE 2019 (9–14 сентября 2019 года, с. Дивноморское, Краснодарский край).

2. 13th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for The Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2020 (26–28 февраля 2020 года, г. Ростов-на-Дону).

3. International Scientific and Practical Conference on Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2020 (20–22 октября 2020 года, г. Ростов-на-Дону).

4. 73-я научная конференция профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета (4–6 октября 2017 года, г. Санкт-Петербург).

5. 74-я научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета (3–5 октября 2018 года, г. Санкт-Петербург).

6. 71-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (4–6 апреля 2018 года, г. Санкт-Петербург).

7. XVIII Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения» (5 апреля 2020 года, г. Пенза).

8. Международная научно-техническая конференция молодых ученых (25–27 мая 2020 года, г. Белгород).

9. I Всероссийская межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 80-летию основания кафедры «Строительное производство» (14–15 мая 2020 года, г. Санкт-Петербург).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 34 печатных работах общим объемом 41,0 п. л. (из которых лично автором написано 25,94 п. л.). Из числа этих работ 11 публикаций приходится на рецензируемые издания из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК РФ; 10 научных статей опубликованы в изданиях, включенных в международную базу научного цитирования Scopus. Кроме того, автором изданы две монографии и один патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, основных выводов. Диссертация изложена на 182 страницах машинописного текста; содержит 71 рисунок, 19 таблиц, список литературы из 134 наименований.

Во введении представлена актуальность проблемы исследования; сформулирована цель; показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; даны общая характеристика исследования, сведения об апробации и внедрении, а также основные положения, которые выносятся на защиту.

Первая глава посвящена вопросам прочности элементов конструкций ДСМ. Приведен пример расчета прочности ножа автогрейдера. Показаны способы повышения уровня механических характеристик материалов за счет получения мелкозернистой структуры.

Во второй главе рассмотрены критерии работоспособности ДСМ и характер действующих нагрузок, а также материалы, используемые при изготовлении деталей, и требования к ним. Описан комплекс характеристик,

необходимый для обоснования возможности замены одного материала другим.

В третьей главе представлены описания методик проведения экспериментальных исследований и расчетного моделирования реакции зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А на действие внешних нагрузок, в том числе при наличии в нем трещины.

Четвертая глава посвящена описанию и анализу полученных экспериментальных данных и результатов численного моделирования. Рассмотрены технический, экономический, надежностный аспекты вопроса замены стали 09Г2С сталью 30MnB5.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Термоциклическая обработка сталей приводит к уменьшению размеров зерна и существенному изменению физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5.

Детали машин работают при различных условиях нагружения. В них реализуются различные виды напряженного состояния (растяжение, сжатие, изгиб кручение и т. д.). Данное обстоятельство приводит к тому, что в качестве критериев работоспособности выступают не только величины предела текучести или предела прочности на растяжение, но и другие характеристики: предел выносливости, предельные напряжения при изгибе и т. д. Именно эти характеристики материалов составляют комплекс характеристик, который используется при решении задачи о замене одного материала детали другим. В диссертации на основании сведений из научно-технической литературы приведены все необходимые соотношения для определения характеристик материалов.

Уровень механических характеристик материалов зависит от размера зерна d . Связь между пределом текучести материала σ_t и его твердостью H от размера зерна d описывается известным соотношением Холла – Петча

$$\sigma_t = \sigma_0 + k_t d^{-1/2}; H = H_0 + k_H d^{-1/2},$$

где σ_0 и H_0 – напряжение и твердость монокристалла; k_t и k_H – постоянные.

Термоциклическая обработка (ТЦО) была использована как способ измельчения зерна исследуемых сталей 09Г2С и 30MnB5. Были выбраны следующие режимы предварительной термической обработки для состояния поставки и ТЦО исследуемых сталей. В состоянии поставки сталь 09Г2С подвергалась отжигу при температуре 900 °С. Термообработка стали 30MnB5 в состоянии поставки проводилась по режиму: закалка (860–900) °С плюс отпуск (400–600) °С. Термоциклическая обработка заключалась в проведении от одного до десяти циклов «нагрев до 780 °С – охлаждение».

На рис. 1 представлены зависимости характеристик среднего размера зерна d и предела текучести σ_T при растяжении от числа циклов N термоциклической обработки для исследуемых сталей 09Г2С и 30МнВ5.

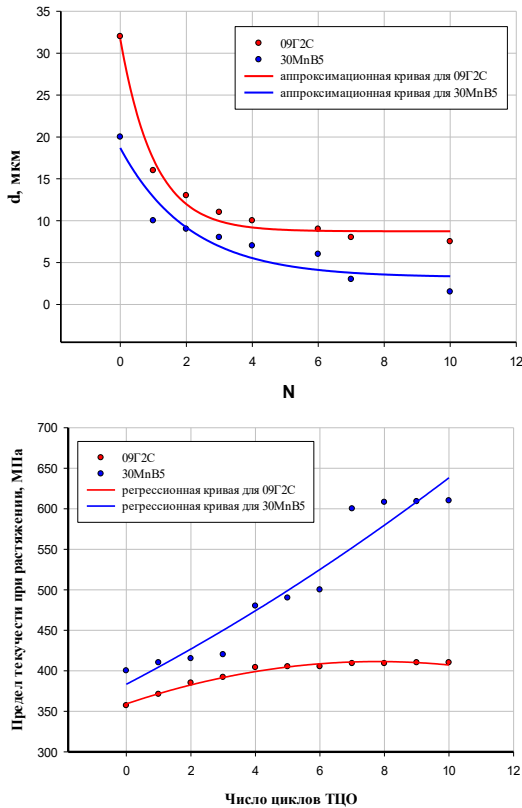


Рис. 1. Зависимость характеристик сталей от числа циклов ТЦО

Аналогичные зависимости были получены по следующим характеристикам: предел прочности при растяжении и изгибе, истинный предел прочности при растяжении, предел текучести при сжатии, предел выносливости и износостойкость.

Исследования показали, что по всем характеристикам сталь 30МнВ5 превосходит сталь 09Г2С.

Аналитические выражения для регрессионных кривых для всех характеристик сталей и соответствующие значения коэффициентов корреляции приведены в табл. 1.

Регрессионные зависимости характеристик от числа циклов ТЦО

Сталь	Зависимость	R
Средний размер зерна, мкм		
09Г2С	$d = 8,735 + 22,965N^{-0,978N}$	0,99
30MnB5	$d = 3,237 + 15,456N^{-0,476N}$	0,95
Предел текучести при растяжении, МПа		
09Г2С	$\sigma_{0,2} = 359,2 + 13,42N - 0,86N^2$	0,99
30MnB5	$\sigma_{0,2} = 383,3 + 20,83N + 0,47N^2$	0,96
Предел прочности при растяжении, МПа		
09Г2С	$\sigma_b = 452,2 + 14,71N - 0,97N^2$	0,98
30MnB5	$\sigma_b = 717,3 - 28,29N + 13,57N^2$	0,97
Истинный предел прочности при растяжении, МПа		
09Г2С	$\sigma_{b \text{ ист}} = 578,0 + 46,36N - 3,67N^2$	0,93
30MnB5	$\sigma_{b \text{ ист}} = 1032,5 + 3,39N + 16,03N^2$	0,98
Предел текучести при сжатии, МПа		
09Г2С	$\sigma_{0,2 \text{ сж}} = 264,61 + \frac{86,65}{1 + e^{\frac{N-4,991}{1,26}}}$	0,999
30MnB5	$\sigma_{0,2 \text{ сж}} = 329,52 + \frac{107,26}{1 + e^{\frac{N-5,006}{1,25}}}$	0,998
Прочность при изгибе, МПа		
09Г2С	$\sigma_{\text{мах и}} = 839,71 + \frac{274,15}{1 + e^{\frac{N-4,999}{1,26}}}$	0,998
30MnB5	$\sigma_{\text{мах и}} = 1201,14 + \frac{392,24}{1 + e^{\frac{N-4,665}{1,26}}}$	0,999
Предел выносливости, МПа		
09Г2С	$\sigma_{-1} = 152,2 + 5,64N - 0,33N^2$	0,98
30MnB5	$\sigma_{-1} = 217,7 - 9,14N + 4,63N^2$	0,96
Износостойкость, г ⁻¹		
09Г2С	$I = 0,6623 + 0,0081N$	0,985
30MnB5	$I = 0,915 + 0,0299N$	0,97

В процессе исследований были проверены зависимости Холла – Петча для пределов текучести и прочности исследуемых сталей (рис. 2).

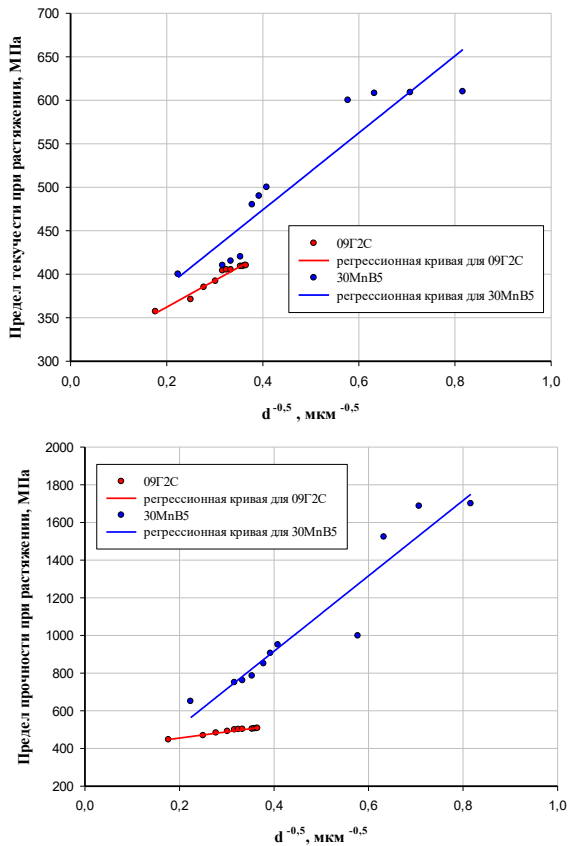


Рис. 2. Зависимости Холла – Петча

Аналитические выражения для зависимостей Холла – Петча приведены в табл. 2.

Таблица 2

Регрессионные зависимости Холла – Петча

Сталь	Зависимость	R
Для предела текучести на растяжение		
09Г2С	$\sigma_{0.2} = 301,1 + 305,68d^{-0.5}$	0,98
30МнВ5	$\sigma_{0.2} = 297,2 + 442,34d^{-0.5}$	0,94

Сталь	Зависимость	R
Для предела прочности на растяжение		
09Г2С	$\sigma_b = 389,3 + 329,77d^{-0,5}$	0,98
30MnB5	$\sigma_b = 115,7 + 2001,49d^{-0,5}$	0,96

Близость регрессионных зависимостей к линейной функции (высокие значения коэффициента корреляции) говорит о том, что данная закономерность для сталей 09Г2С и 30MnB5 выполняется.

2. Результаты расчетных и экспериментальных исследований комплекса механических и физических характеристик деталей и их сварных соединений, подтверждающие возможность повышения долговечности рабочих органов ДСМ за счет обоснованной замены материала при их изготовлении и ремонте.

Расчетное определение напряженно-деформированного состояния деталей ДСМ было проведено с использованием программных комплексов ANSYS и COMSOL Multiphysics®. В качестве объекта расчетов был взят зуб ковша экскаватора ЭКГ-5А. Цель проводимых расчетных исследований заключалась в оценке влияния ТЦО и пластичности на напряженно-деформированное состояние данной детали при ее изготовлении из сталей 09Г2С и 30MnB5, а также в оценке чувствительности зуба ковша к наличию концентраторов напряжений при разных количествах циклов N ТЦО. Расчеты были проведены для $N = 0$ (состояние поставки после предварительной термической обработки), $N = 6$ и $N = 10$.

Расчеты показывают, что уровень эквивалентных напряжений при учете пластичности материалов существенно ниже, чем при расчетах в упругой постановке. Влияние ТЦО сильно сказывается на величинах общих перемещений. Причем для стали 30MnB5 это снижение более заметно, чем для стали 09Г2С.

В табл. 3 приведены максимальные значения эквивалентных напряжений и общих перемещений для всех рассматриваемых вариантов расчетов.

Таблица 3

Результаты расчетов НДС зуба

Характеристика	Сталь	
	09Г2С	30MnB5
Упругий расчет		
$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	1163	1163
$\Delta_{\text{общ}}$, мм	6	5

Характеристика		Сталь	
		09Г2С	30MnB5
Упруго-пластический расчет			
$N = 0$	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	552	637
	$\Delta_{\text{общ}}$, мм	110	89
$N = 6$	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	647	693
	$\Delta_{\text{общ}}$, мм	87	33
$N = 10$	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	676	657
	$\Delta_{\text{общ}}$, мм	82	6

В графическом виде распределение $\sigma_{\text{экв}}$ и $\Delta_{\text{общ}}$ по поверхности зуба показаны на рис. 3 и 4 (представлены результаты расчетов для десяти циклов ТЦО).

На рис. 5 показаны распределения эквивалентных напряжений по телу зуба с трещиной для вариантов его конструктивного исполнения из сталей 09Г2С и 30MnB5. Для иллюстрации приведены эпюры напряжений, реализуемых в случае проведения шести циклов ТЦО ($N = 6$).

Как видно из рис. 5, в вершине трещины реализуются эквивалентные напряжения, равные соответствующему значению предела текучести материала зуба на растяжение. При этом для стали 09Г2С в зоне, противоположной трещине, возникают напряжения, близкие по величине к пределу текучести. Для стали 30MnB5 эти напряжения существенно меньше предела текучести. Аналогичные распределения эквивалентных напряжений по телу зуба ковша были получены для $N = 0$ и $N = 10$. То есть сталь 30MnB5 оказывается менее чувствительной к наличию трещины, чем сталь 09Г2С.

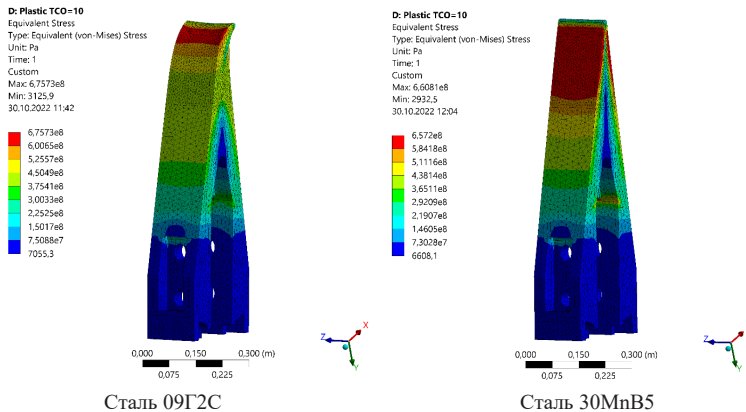
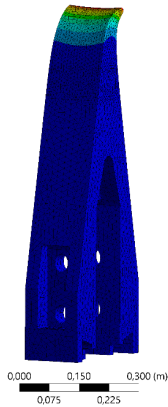
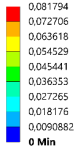


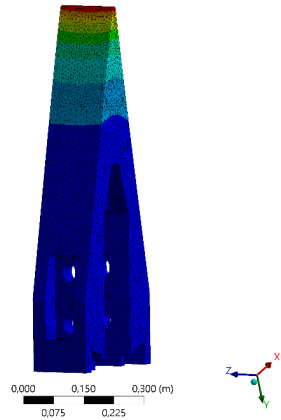
Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений

D: Plastic TCO=10
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
Custom
30.10.2022 11:42



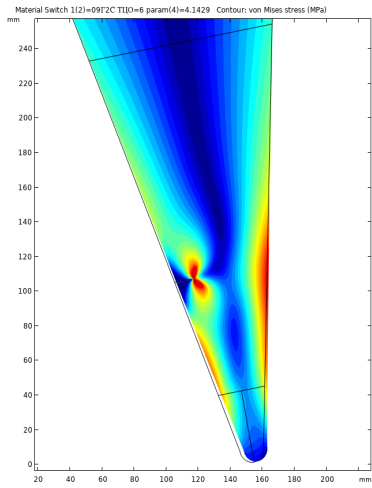
Сталь 09Г2С

D: Plastic TCO=10
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
Custom
Max: 0.0064683
Min: 0
30.10.2022 12:03

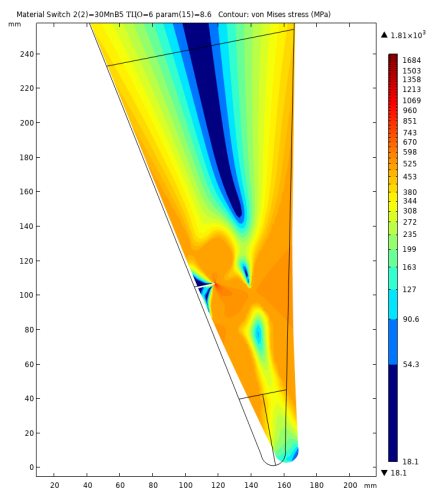


Сталь 30MnB5

Рис. 4. Распределение общих перемещений



Сталь 09Г2С



Сталь 30MnB5

Рис. 5. Распределение напряжений в зубе ковша при наличии трещины

Были проведены расчеты для нагрузок, превышающих те, что потребовались для достижения пределов текучести. На рис. 6 приведены зависимости, иллюстрирующие изменение эквивалентных напряжений в окрестности вершины трещины от величины приложенного усилия F . Отчетливо виден упругий участок (вплоть до достижения значений пределов текучести). Далее

следует резкий излом, связанный с тем, что трещина своего размера не меняет, и в зубе начинает реализовываться пластическая деформация. При этом разница в усилиях составляет порядка 30 %. Для стали 09Г2С предел текучести достигается при усиллии 16 345 Н, а для стали 30MnB5 – 21 300 Н. Дальнейшее повышение величины приводит к росту эквивалентных напряжений (в расчете величина усилия была ограничена верхним значением 150 000 Н). Но на всем участке деформирования зуба сталь 30MnB5 показывает более высокие значения усилия, т. е. имеет преимущество перед сталью 09Г2С.

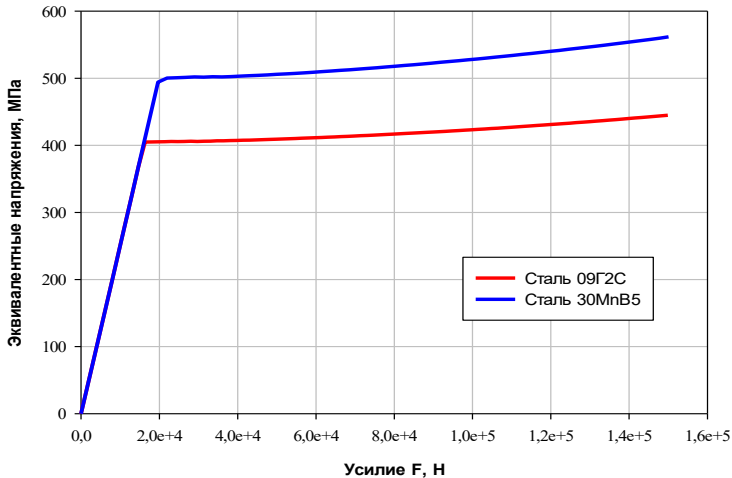


Рис. 6. Зависимость эквивалентных напряжений от приложенного усилия

На основе полученных экспериментальных данных о характеристиках материалов в диссертации проанализированы три аспекта оценки возможности замены стали 09Г2С на сталь 30MnB5 при изготовлении деталей рабочих органов ДСМ: технический, надежностный и экономический.

Результаты расчетно-экспериментальных исследований физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5 сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетно-экспериментальных исследований физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5

Параметр	Сталь	Величина	
		Поставка	ТЦО
Предел текучести при растяжении, МПа	09Г2С	357	371÷410
	30MnB5	400	410÷710

Окончание табл. 4

Параметр	Сталь	Величина	
		Поставка	ТЦО
Предел прочности при растяжении, МПа	09Г2С	446	468÷507
	30МnB5	650	750÷1700
Модуль упругости, МПа	09Г2С	$2,01 \cdot 10^5$	$(1,99 \div 2,01) \cdot 10^5$
	30МnB5	$2,34 \cdot 10^5$	$(2,13 \div 2,41) \cdot 10^5$
Относительное удлинение, %	09Г2С	16	10÷15
	30МnB5	32	19÷30
Относительное сужение, %	09Г2С	24	16÷23
	30МnB5	46	47÷52
Предел текучести при сжатии, МПа	09Г2С	265	268÷349
	30МnB5	330	333÷434
Прочность при изгибе, МПа	09Г2С	841	850÷1106
	30МnB5	1203	1216÷1582
Предел выносливости, МПа	09Г2С	150	158÷177
	30МnB5	195	228÷561
Твердость HV , МПа	09Г2С	1120	1140÷1450
	30МnB5	1520	1570÷2150
Износостойкость, $г^{-1}$	09Г2С	0,66	0,67÷0,74
	30МnB5	0,94	0,97÷1,23
Трещиностойкость, МПа · м ^{1/2}	09Г2С	60	63,4÷65,4
	30МnB5	168,5	229,2÷734,7
Отношение σ_b / σ_T	09Г2С	1,25	1,22÷1,25
	30МnB5	1,63	1,66÷2,78

Из приведенных в табл. 4 данных видно, что по всем характеристикам сталь 30МnB5 превосходит сталь 09Г2С. Особенно важно то, что не только уровни относительного удлинения и относительного сужения у стали 30МnB5 выше, чем у стали 09Г2С, но и отношение σ_b / σ_T имеет аналогичную тенденцию. При чем это касается как состояния поставки, так и всех циклов ТЦО.

На рис. 7 показаны точки измерения микротвердости в сварном шве с привязкой к его отдельным зонам (основной металл, зона термического влияния (ЗТВ) и собственно сварной шов).

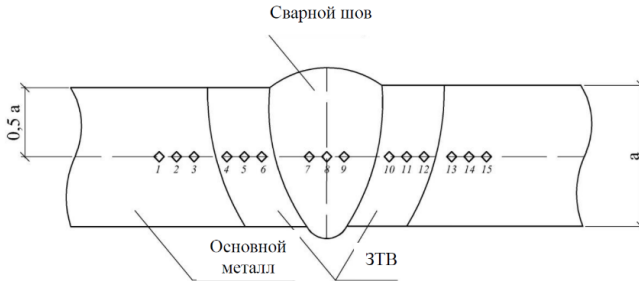


Рис. 7. Точки измерения микротвердости

Распределение микротвердости по точкам измерения для образца из стали 30MnB5 (толщина 3 мм) показано на рис. 8. Там же точками с привязкой к упомянутым выше зонам сварного шва показаны значения микротвердости для образца из стали 09Г2С.

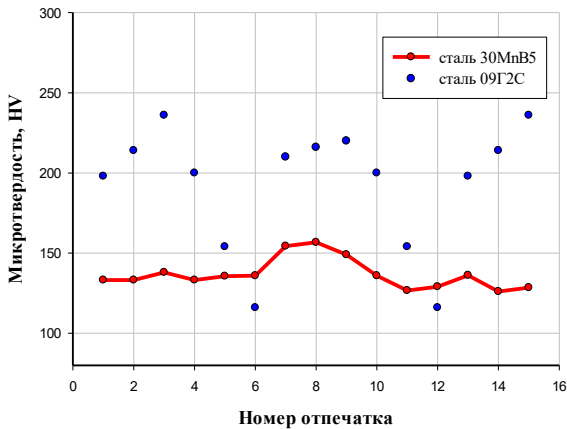


Рис. 8. Микротвердость в различных зонах сварного соединения

Видно, что распределение микротвердости для различных зон сварного шва образца из стали 30MnB5 достаточно равномерное. Для стали 09Г2С разброс показателя микротвердости значительно выше. Кроме того, микротвердость самого соединения значительно выше, чем у стали 30MnB5. При изготовлении сварных образцов было использовано специально разработанное приспособление.

Таким образом, с точки зрения обеспечения более высокого уровня прочностных и пластических характеристик деталей предпочтительно использование стали 30MnB5.

В рамках данной работы была сделана оценка вероятности неразрушения $P(\beta, N)$ одинаковых деталей, выполненных из сталей 09Г2С и 30МnB5, в зависимости от количества N циклов ТЦО с использованием следующего соотношения:

$$P(\beta, N) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\beta N^2 - 1}{\beta N^3} \exp \frac{-\beta N^2}{2},$$

где β – характеристика безопасности, определяемая через статистические характеристики распределений действующих нагрузок и разрушающих напряжений.

В качестве разрушающих напряжений рассматривались предел текучести $\sigma_{0,2}$ и предел прочности σ_b . В графическом виде полученные зависимости $P(\beta, N)$ представлены на рис. 9.

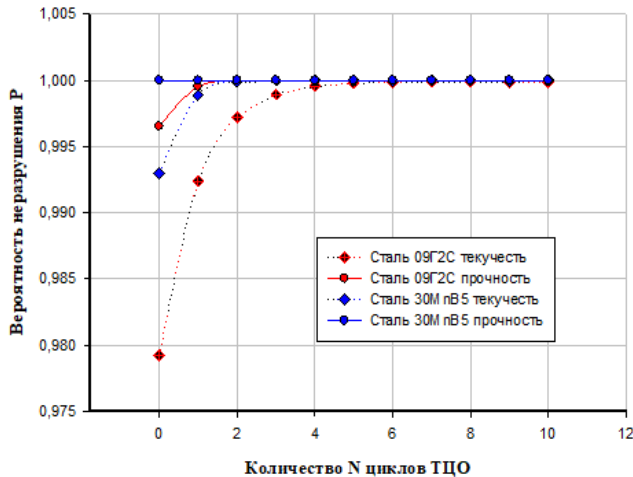


Рис. 9. Зависимость $P = f(\beta, N)$

На рис. 9 видно, что обе стали обеспечивают высокий уровень вероятности неразрушения по пределу текучести при заданном уровне нагрузки (≈ 1) после шести циклов ТЦО для стали 09Г2С и после двух циклов для стали 30МnB5. По пределу прочности вероятность неразрушения для этой стали равна 1 уже в состоянии поставки. Для стали 09Г2С вероятность неразрушения по пределу прочности выходит на максимальный уровень после одного цикла ТЦО.

При оценке экономической целесообразности замены стали 09Г2С сталью 30МnB5 (сопоставительная оценка) были использованы следующие критерии отказов деталей при их эксплуатации:

- разрушение детали – отношение пределов прочности $K_{пр}$;
- потеря формы детали – отношение пределов текучести $K_{тек}$;

- разрушение при действии циклических нагрузок – отношение пределов выносливости $K_{\text{вын}}$;
- износ детали – отношение износостойкости $K_{\text{из}}$;
- снижение чувствительности к трещинам – отношение трещиностойкости $K_{\text{тр}}$.

Оценка показала, что минимальная относительная величина критерия отказа реализуется по требованию отсутствия пластической деформации и составляет 1,07. С увеличением числа циклов термоциклической обработки данный коэффициент может возрасти до 1,49. При этом определяющим критерием отказа по-прежнему будет оставаться именно требование отсутствия пластических деформаций. На основании сравнительного анализа комплекса физико-механических характеристик сделано заключение о возможности замены стали 09Г2С на 30MnB5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решение задачи определения максимальных напряжений, возникающих в ноже бульдозера или автогрейдера при работе по перемещению грунта, показывает, что ключевые физико-механические характеристики материала ножа, необходимые для обоснования его прочности, – это пределы текучести и прочности. Данные характеристики играют главную роль при назначении коэффициентов запасов прочности при различных типах действующих усилий (растяжение, сжатие, изгиб, кручение и т. д.). Представлено описание методических подходов к назначению коэффициентов запаса прочности. Рассмотрены пути повышения уровня физико-механических характеристик материалов и прочности деталей: РКУП, КВД, термическая обработка, поверхностная обработка деталей и применение нанопорошков. Описаны эффекты влияния размера зерна на такие физико-механические характеристики, как твердость, пределы текучести и прочности, относительное удлинение при разрыве.

2. Рассмотрены критерии работоспособности дорожно-строительных машин: прочность, жесткость, износостойкость, теплостойкость и виброустойчивость. Дана привязка данных критериев к геометрическим параметрам деталей и свойствам материалов, из которых они изготовлены. Рассмотрены материалы, традиционно применяемые в конструкциях ДСМ. В качестве материалов для исследований в настоящей диссертационной работе используются стали 09Г2С и 30MnB5. Описан алгоритм принятия решения о замене одного материала детали ДСМ другим. Совокупность основных и дополнительных характеристик материалов, а также наличие эмпирических соотношений, связывающих отдельные характеристики друг с другом, складывается в комплекс физико-механических характеристик. Причем наличие такого комплекса полезно не только при решении задачи замены материала

конкретной детали, но и в рамках других задач, требующих знания величин физико-механических характеристик. Описаны принципы ТЦО сталей, знание которых поможет повысить их механические характеристики. Проведен анализ имеющихся данных по результатам ТЦО сталей 09Г2С и 30MnB5. На основе представленных сведений о стали 09Г2С и предварительных экспериментов для стали 30MnB5, проведенных автором данной диссертационной работы, были выбраны следующие режимы предварительной термической обработки исследуемых сталей. Сталь 09Г2С подвергалась отжигу при температуре 900 °С. Термообработка стали 30MnB5 проводилась по такому режиму: закалка (860÷900) °С плюс отпуск (400÷600) °С. Термоциклическая обработка заключалась в проведении до десяти циклов «нагрев до 780 °С – охлаждение».

3. Описаны методики и условия проведения испытаний, осуществленных в рамках данной диссертационной работы. Для каждого вида испытания приведено описание образцов и указано используемое оборудование. Представлены сведения о погрешностях измерения исследуемых величин. Описана КЭ-модель зуба ковша экскаватора, с помощью которой проводится расчет напряженно-деформированного состояния данного рабочего органа ДСМ с целью оценки влияния уровня пластических характеристик исследуемых сталей 09Г2С и 30MnB5 на предельные нагрузки.

4. Приведены экспериментальные результаты определения механических характеристик при изменении числа циклов термоциклической обработки от 0 (состояние поставки) до 10. Для каждой характеристики материалов подобраны аппроксимационные зависимости, связывающие величину механической характеристики с числом циклов ТЦО. Коэффициент регрессии данных зависимостей имеет высокие значения – от 0,93 до 0,999. Расчетным путем с использованием данных по одноосному растяжению образцов оценены параметры износостойкости и трещиностойкости сталей 09Г2С и 30MnB5.

5. Для пределов текучести и прочности исследуемых сталей проведена проверка закона Холла – Петча. Близость корреляционных зависимостей к линейной функции (высокие значения коэффициента корреляции) говорит о том, что данная закономерность выполняется для сталей 09Г2С и 30MnB5. Распределение микротвердости для различных зон сварного шва образца из стали 30MnB5 достаточно равномерное. В зоне сварного шва превышение микротвердости над зоной основного металла и ЗТВ незначительно – порядка 20÷30 единиц. Для стали 09Г2С этот разброс значительно выше. Кроме того, микротвердость самого соединения значительно выше, чем стали 30MnB5.

6. Расчеты с использованием программных комплексов ANSYS и COMSOL Multiphysics® показали, что влияние пластичности исследуемых сталей сказывается на уровне $\sigma_{\text{экр}}$. Так, при расчетах компонентов НДС зуба в упругопластической постановке получается, что уровень максимальных

эквивалентных напряжений практически в два раза ниже уровня, полученного при расчетах в упругой постановке. Наличие пластических деформаций сказывается на появлении изгиба незакрепленной части зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А; при этом для стали 30MnB5 уровень пластических деформаций (общих перемещений) оказывается ниже соответствующих показателей стали 09Г2С. Показано, что зуб из стали 30MnB5 по сравнению со сталью 09Г2С менее чувствителен к наличию в нем трещин.

7. Рассмотрены технический, надежностный и экономический аспекты возможности замены стали 09Г2С на сталь 30MnB5 для изготовления деталей ДСМ. Показано, что результаты расчетных оценок и экспериментов по всем трем направлениям говорят о возможности такой замены. При замене материала детали с 09Г2С на 30MnB5 наработка до отказа может быть увеличена в зависимости от количества термоциклов от 7 до 49 %.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ

1. Щербаков А. П. Влияние структурных параметров конструкционных сталей на результаты оценки напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций / А. П. Щербаков, В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, Е. В. Трунова, Е. А. Корнеева, В. Н. Горшков // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 6(59). – С. 194–199.
2. Щербаков А. П. К выбору конструкционных сталей для изготовления сварных металлических конструкций строительных машин / А. П. Щербаков, В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, Е. В. Трунова // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 6(65). – С. 233–238. – DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-233-238.
3. Щербаков А. П. К вопросу проведения коррозионных испытаний конструкционных сталей с различной исходной микроструктурой / А. П. Щербаков, В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, Е. В. Трунова // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 6(71). – С. 142–148.
4. Щербаков А. П. К вопросу влияния исходного состояния сварных заготовок на структуру и свойства сварных соединений / А. П. Щербаков, В. Е. Гордиенко, И. А. Иванов, А. А. Абросимова // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 4(69). – С. 150–155. – DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-150-155.
5. Щербаков А. П. Влияние термической и термоциклической обработки на механические свойства конструкционных сталей / А. П. Щербаков, В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, О. В. Кузьмин, Е. В. Трунова // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 1(66). – С. 128–133. – DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-1-128-133.
6. Щербаков А. П. Оценка напряженно-деформированного состояния в зоне сварного соединения для рамы автопогрузчика / А. П. Щербаков, А. Е. Пушкарев, Н. Е. Манвелова // Известия МГТУ МАМИ. – 2020. – № 2(44). – С. 93–101. – DOI 10.31992/2074-0530-2020-44-2-93-101.
7. Щербаков А. П. Влияние эксплуатационных особенностей строительных машин на выбор материала конструкций рабочих механизмов / А. П. Щербаков,

В. И. Новиков, А. Е. Пушкарев, О. В. Кузьмин // Металлообработка. – 2020. – № 2(116). – С. 24–30. – DOI 10.25960/мо.2020.2.24.

8. **Щербаков А. П.** Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин / А. П. Щербаков // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2020. – Т. 17. – № 4(74). – С. 464–475. – DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475.

9. **Щербаков А. П.** Экспериментальные исследования влияния термической обработки на свойства сварных соединений рабочих механизмов дорожно-строительных машин / А. П. Щербаков // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2020. – Т. 17. – № 6(76). – С. 664–675. – DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675.

10. **Щербаков А. П.** Анализ влияния термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 на прочностные характеристики рабочих органов дорожно-строительных машин / А. П. Щербаков, А. Е. Пушкарев, Т. В. Виноградова // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2021. – Т. 18. – № 2(78). – С. 180–190. – DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190.

11. **Щербаков А. П.** Замена материала рабочего органа как путь повышения надежности дорожно-строительных машин / А. П. Щербаков, А. Е. Пушкарев, С. Е. Максимов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2021. – Т. 18. – № 6(82). – С. 646–661. – DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661.

Издания, индексируемые в Scopus и Web Science

12. **Scherbakov A.** Passive fluxgate control of structural transformations in structural steels during thermal cycling / A. Scherbakov, D. Monastireva, V. Smirnov // E3S Web of Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019 [Divnomorskoe Village, 9–14 сентября 2019 года]. – Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019. – P. 03022. – DOI 10.1051/e3sconf/201913503022.

13. **Scherbakov A.** Technical condition of welded load-bearing metal structures of operated agricultural hoisting cranes / A. Scherbakov, A. Babanina, I. Kochetkov, P. Khoroshilov // E3S Web of Conferences: 13 [Rostov-on-Don, 26–28 февраля 2020 года]. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 11005. – DOI 10.1051/e3sconf/202017511005.

14. **Scherbakov A.** Mechanisms of construction machines and selection of steels for the manufacture of welded metal structures / A. Scherbakov, A. Babanina, E. Solovyeva, M. Aleksandrovskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [Rostov-on-Don, 20–22 октября 2020 года]. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 012012. – DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012012.

15. **Scherbakov A.** Materials and methods of experimental studies of welded metal structures of construction machines / A. Scherbakov, A. Babanina, E. Solovyeva, M. Aleksandrovskiy // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 130 LNCE. – P. 572–586. – DOI 10.1007/978-981-33-6208-6_57.

16. **Scherbakov A.** Passive probe-coil magnetic field test of stress-strain state for welded joints / A. Scherbakov, A. Babanina, A. Matusevich // Advances in Intelligent Systems and Computing [см. в книгах]. – 2021. – Vol. 1259 AISC. – P. 312–323. – DOI 10.1007/978-3-030-57453-6_27.

17. **Scherbakov A.** Acting stresses in structural steels during elastoplastic deformation / A. Scherbakov, A. Babanina, K. Graboviy // Advances in Intelligent Systems and

Computing [см. в книгах]. – 2021. – Vol. 1259 AISC. – P. 298–311. – DOI 10.1007/978-3-030-57453-6_26.

18. **Scherbakov A.** The Impact of External Influences on the Characteristics of Metals of Welded Structures of Construction Machines / A. Scherbakov, A. Babanina, V. Breskich, V. Klyovan // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 247. – P. 973–982. – DOI 10.1007/978-3-030-80946-1_88.

19. **Scherbakov A.** Phased Passive Fluxgate Control of Structural Changes in Low-Carbon and Low-Alloy Steels of Construction Machines / A. Scherbakov, E. Kuzbagarova, A. Kuzbagarov, A. Babanina // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 247. – P. 143–157. – DOI 10.1007/978-3-030-80946-1_15.

20. **Scherbakov A.** Destruction of Welded Metal Structures of Construction Machines Operated in Corrosive Environments / A. Scherbakov, A. Sklyarova, A. Pushkarev, A. Petrov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 247. – P. 557–573. – DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_50.

21. **Scherbakov A.** The Influence of Deformation and Thermal Effects on the Structure and Properties of the Metal of Welded Structure Elements of Lifting Cranes / A. Scherbakov, E. Lukashuk, A. Pushkarev, T. Vinogradova // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 247. – P. 539–555. – DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_49.

Монографии

22. **Щербаков А. П.** Пассивный феррозондовый контроль и расчет сварных металлоконструкций строительных машин с учетом кинетики коррозионных повреждений / В.Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, А.П. Щербаков, Е. В. Трунова. – Санкт-Петербург: С.-Петерб. гос. архит.-строит. ун-т, 2018. – 170 с. – ISBN 978-5-9227-0915-6.

23. **Щербаков А. П.** Эффективность и надежность процессов и технологий при эксплуатации наземных транспортно-технологических машин: монография / А. П. Щербаков, А. А. Скларова, Е. В. Куракина. – СПб.: ООО «Издательский дом «Петрополис», 2020. – 188 с. – ISBN 978-5-9676-1191-9.

Патент

24. **Щербаков А. П.** Концентрат смазочно-охлаждающей жидкости на основе отходов масложирового производства для магнитно-абразивной обработки металлов / Н. Н. Романюк, Л. М. Акулович, Л. Е., Сергеев, К. Л. Сергеев, С. А. Войнаш, А. П. Щербаков, В. А. Соколова, Е. Ю. Ремшев, К. Ю. Максимович // Пат. № 2769313, РФ, МПК С10М 165/00 (2006.01), С10М 173/02 (2006.01), С10М 129/40 (2006.01), С10М 125/14 (2006.01), С10М 133/08 (2006.01), С10М 159/08 (2006.01), С10М 40/20 (2006.01). Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (№ 2021109196). Заявл. 02.04.2021; опублик. 30.03.2022. Бюл. № 10. – 8 с.: ил.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 24.03.2023. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 39.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.