Научная статья
УДК 621.86
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661

ЗАМЕНА МАТЕРИАЛА РАБОЧЕГО ОРГАНА КАК ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

А.П. Щербаков, А.Е. Пушкарев, С.Е. Максимов
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия
shurbakov.aleksandr@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2454-7751,
pushkarev-agn@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5546-015X,
https://orcid.org/0000-0001-6879-0684

АННОТАЦИЯ

Введение. *На примере ножа автогрейдера оцениваются пути повышения надежности эксплуатации дорожно-строительных машин (ДСМ). С этой целью проводится анализ характера силовых воздействий на данный рабочий орган ДСМ и выделяются его конструктивные особенности (наличие сварного соединения). На основании проведенного анализа определяется круг характеристик, необходимых для принятия решения о возможности замены материала рабочего органа ДСМ, дополнительно проводится их термоциклическая обработка (ТЦО). Описываются экспериментальные исследования влияния данного вида термического воздействия на структуру и свойства сталей.*
Материалы и методы. *С помощью металлографического анализа авторами было исследовано влияние количества циклов термических воздействий на размер зерна и комплекс физико-механических характеристик различных материалов рабочего органа ДСМ на различных этапах ТЦО.*
Результаты. *Было определено, что повышение уровня физико-механических характеристик исследуемых сталей возможно посредством применения ТЦО вследствие получения мелкозернистой структуры металла. Рассмотрены зависимости основных физико-механических характеристик исследуемых сталей (предел прочности и предел текучести) от числа циклов термического воздействия. Подобраны корреляционные соотношения для описания этих зависимостей. Рассмотрена связь пределов текучести и прочности сталей 09Г2С и 30MnB5 с размером зерна. Кроме этого, проведены исследования усталостных характеристик указанных сталей, для сварного соединения представлены данные по определению микротвердости. Для различных температур эксплуатации проведены фрактографические исследования на образцах после циклического нагружения.*
Обсуждение и заключение. *На основании сравнительного анализа комплекса физико-механических характеристик авторами сделано заключение о возможности замены стали 09Г2С на сталь 30MnB5.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *металлографический анализ, размер зерна, термоциклическая обработка, физико-механические характеристики, сварное соединение, замена стали*

БЛАГОДАРНОСТИ. *Авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.*

Статья поступила в редакцию 14.10.2021; одобрена после рецензирования 25.10.2021; принята к публикации 14.12.2021.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Максимов С.Е. Замена материала рабочего органа как путь повышения надежности дорожно-строительных машин // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 646-661. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2021-18-6-646-661

© Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Максимов С.Е., 2021

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661

REPLACEMENT WORKING BODY MATERIAL AS A WAY TO INCREASE RELIABILITY OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES

Alexander P. Scherbakov, Alexandr E. Pushkarev, Sergey E. Maksimov
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia
shurbakov.aleksandr@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2454-7751,
pushkarev-agn@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5546-015X,
https://orcid.org/0000-0001-6879-0684

ABSTRACT

Introduction. *On the example of a motor grader knife, ways of increasing the reliability of road construction machines (RCM) operation are evaluated. For this purpose, the analysis of force effects nature on the working body of the RCM is carried out and its design features are highlighted (the presence of a welded joint). Based on the analysis, the range of characteristics necessary for making a decision on the possibility of replacement the material of the RCM working body is determined. Additionally, its thermocyclic treatment (TCT) is carried out. Experimental studies of the effect of this thermal impact type on the structure and properties of steels are described.*
Materials and methods. *With the help of metallographic analysis, the author investigates the influence of the number of thermal effects cycles on the grain size and the complex of various materials physical and mechanical characteristics of road construction machines working body at various stages of the thermocyclic treatment.*
Results. *It is determined that an increase in the level of the investigated steels physical and mechanical characteristics is possible through the use of TCT due to the obtaining of a fine-grained metal structure. The dependences of the main physical and mechanical characteristics of the investigated steels (ultimate strength and yield strength) on the number of thermal effects cycles are considered. Correlation relationships are selected to describe these dependencies. The relationship between the yield strength and ultimate strength of 09G2S and 30MnB5 steels and the grain size is considered. In addition, studies of the steels fatigue characteristics are carried out; data on determining the microhardness are presented for the welded joint. For various operating temperatures, fractographic studies are carried out on samples after cyclic loading.*
Discussion and conclusion. *Based on a comparative analysis of the complex of physical and mechanical characteristics, the author made a conclusion about the possibility of replacing steel 09G2S with steel 30MnB5.*

KEYWORDS: *metallographic analysis, grain size, thermocyclic treatment, physical and mechanical characteristics, welded joint, steel replacement.*

ACKNOWLEDGEMENTS. *The authors express their gratitude to the Russian Automobile and Highway Industry Journal editorial staff and the reviewers of the article.*

The article was submitted *14.10.2021*; approved after reviewing *25.10.2021;* accepted for publication *14.12.2021*.
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: Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Maksimov S.E. Replacement working body material as a way to increase reliability of road construction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (6): 646-661. DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661

© Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Maksimov S.E., 2021

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

ВВЕДЕНИЕ

Исходя из определения эффективности, рассматриваемой ГОСТ Р ИСО 9000–2015[1] как соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами, следует вывод о том, что своего максимального значения она достигает при работе каждой машины как можно дольше с максимальной производительностью и при минимальных затратах. Существует ряд факторов, приводящих к уменьшению технической производительности ДСМ [1, 2, 3,4, 5, 6]:

– осуществление капитального ремонта машины, снижающего ее производительность до (70÷85)% относительно новой машины;

– износ зубьев и режущих кромок у рабочих органов, сказывающийся на снижении эффективности работы машины;

– износ шин, грунтозацепов, башмаков, приводящий к снижению тягового усилия;

– предупредительно плановые ремонты;

– характер выполняемых работ – циклический или непрерывный.

Для пояснения последнего обстоятельства на рисунке 1 приведены временные зависимости изменения тягового усилия P(t) для скрепера и бульдозера (машины цикличного действия) и автогрейдера (машина непрерывного действия) на различных этапах рабочего цикла $t_ц$. Циклограмма скрепера показана на рисунке 1, *а*, бульдозера – на рисунке 1, *б* и автогрейдера – на рисунке 1, *в*. Цифрами на рисунке 1 обозначены рабочие операции цикла: *1* – резание и копание грунта; *2* – транспортирование грунта; *3* – разгрузка; *4* – холостой ход; *5* – добор грунта и его перемещение; *6* – выглубление отвала; *7* – зарезание; *8* – квазиустановившийся режим копания; *9* – разворот (поворот).

В работах цикличного характера основная операция (воздействие рабочего оборудования на среду) занимает лишь часть продолжительности цикла tц. Далее осуществляются вспомогательные операции (транспортирование, разгрузка и холостой ход), которые необходимы для возвращения к основной операции. Для разных машин доли основных и вспомогательных операций в циклах различны. Производительность машин непрерывного действия выше производительности машин цикличного действия, что связано с непрерывным воздействием рабочего оборудования на среду в течение всего цикла. Рабочие и вспомогательные операции выполняются одновременно. Необходимые повороты и развороты машин для возобновления цикла являются непродолжительными по времени.

При наполнении ковша скрепера (см. рисунок 1, *а*) тяговое усилие на колесах движителя повышается в 2–3 раза, при этом буксование движителя зачастую доходит до 100%. При зарезании отвалом бульдозера (рисунок 1, *б*) тяговое усилие также повышается в несколько

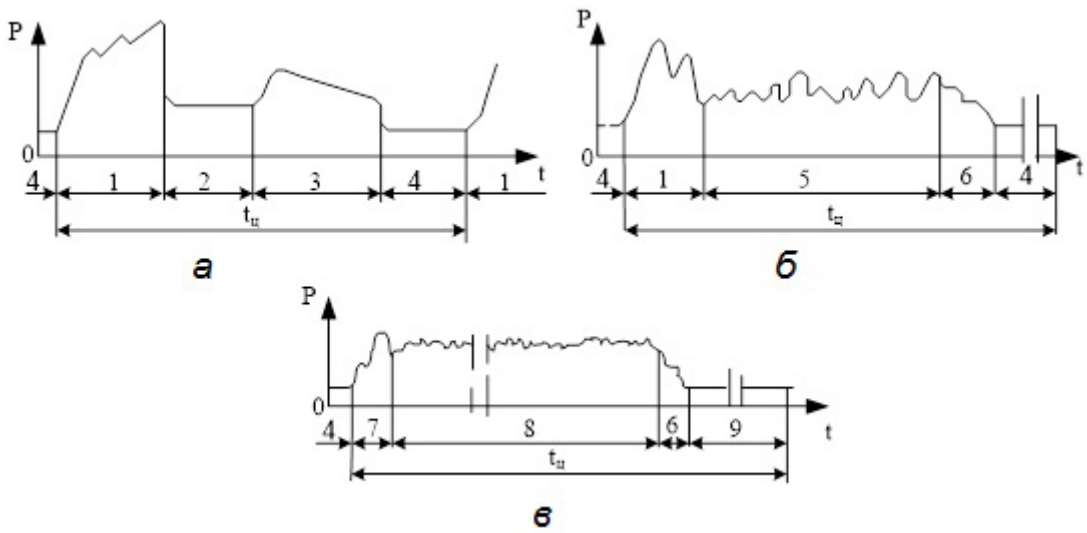


Рисунок 1 – Зависимость P = f(t)

Figure 1 – Dependency P = f(t)

[1] ГОСТ Р ИСО 9000–2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. Москва : Стандартинформ, 2015. 49 с.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

раз относительно холостого хода. Значительные скачки тягового усилия в процессе работы автогрейдера отсутствуют (рисунок 1, *в*).

Повышение производительности ДСМ может быть достигнуто либо за счет организационных мероприятий (сокращение простоев, улучшение загрузки ДСМ, улучшение организации производства, укрепление трудовой дисциплины, повышение квалификации и культурно-технического уровня машинистов и ИТР), либо путем технического совершенствования машин – их модернизации, компьютеризации работ, расширения наборов сменных рабочих органов, применения адаптирующегося рабочего оборудования и приспособлений, внедрения новых ДСМ для сокращения ручного труда и сбережения ресурсов [1].

Основную роль в оценке прочности рабочего элемента играет величина силы сопротивления копанию $P_к$, которая складывается из силы сопротивления грунта резанию $P_р$, сопротивления стружки $P_{сс}$ и сопротивления перемещению призмы волочения $P_{пв}$ [7]:

$$P_к=P_р+P_{сс}+P_{пв}.$$

Рассмотрим для определенности в качестве рабочего органа нож отвала бульдозера или автогрейдера. Согласно [7] конечное выражение для определения усилия копания выглядит следующим образом:

$$P_к = 10 \cdot C \cdot h^{1,35} \cdot (1 + 2,6 \cdot l) \cdot$$
$$\cdot (1 + 0,01 \cdot \delta) + \Delta \cdot K_{сж} \cdot l \cdot h +$$
$$+ g \cdot \frac{l \cdot (H - h)^2}{2 \cdot tg\varphi_0 \cdot K_р} \cdot \gamma_г \cdot tg\rho,$$

где C – число ударов плотномера; h – глубина резания; *l* – длина режущей кромки ножа; δ – угол резания; ρ – угол трения грунта по грунту; Δ – коэффициент, связанный с величиной высоты отвала H; g – ускорение свободного падения; $K_{сж}$ – активная удельная (на единицу площади поперечного сечения стружки F) сила сопротивления вырезаемой стружки продольному сжатию; $\gamma_г$ – плотность грунта; ϕ_0 – угол естественного откоса; $K_р$ = (1,05 ÷ 1,35) – коэффициент, учитывающий степень разрыхления грунта. Видно, что правую часть данного соотношения составляют величины, связанные с характеристиками грунта, геометрическими параметрами ДСМ или с технологическими характеристиками процесса копания грунта. Сведения о материале рабочего органа ДСМ появляются после вычисления напряжений от действующего усилия $P_к$ и сравнении его величины с пределом прочности или текучести материала для вычисления запаса прочности. При этом очевидно, что чем выше значения этих физико-механических материалов, тем больше запас прочности и, соответственно, выше уровень эксплуатационной надежности.

Одним из путей повышения надежности эксплуатации ДСМ является увеличение прочностных характеристик материалов, используемых для изготовления рабочих органов.

В настоящее время существует несколько направлений повышения прочности материалов за счет получения мелкозернистой структуры. В научно-технической литературе говорится о порошковых методах, осаждении из газовой фазы. Выделяются методы, связанные с интенсивной пластической деформацией [8, 9, 10, 11, 12, 13].

Широкое распространение получил метод ТЦО материалов и их сварных соединений. Теоретические основы данного метода изложены в работах [14, 15, 16]. Отечественная и зарубежная техническая литература, посвященная прикладному применению данного направления, достаточно обширна. Во всех этих публикациях отмечается, что после термоциклической обработки в различных сталях и сварных соединениях фиксируется измельчение исходного зерна с одновременным повышением механических характеристик, в качестве которых взяты предел прочности, предел текучести и твердость [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33].

В статье [34] изложены первые результаты исследований влияния количества циклов термической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 на размер зерна и физико-механические характеристики (пределы прочности и текучести). Описаны методики и оборудование, примененные для проведения испытаний и анализа результатов. Кроме того, показано, что для данных сталей выполняется соотношение Холла–Петча, которое связывает предел текучести и предел прочности поликристаллического материала с размером зерна. В данной статье представлены результаты дополнительных исследований, которые касаются следующих моментов:

1. Анализ приведенных выше циклограмм работы некоторых типов ДСМ (см. рисунок 1) показывает, что на протяжении рабочего цикла тяговое усилие, а следовательно, и нагрузки на рабочий орган машины не являются постоянными. Они носят циклический характер, поэтому были проведены исследования циклической прочности рассматриваемых материалов.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

2. Проведены фрактографические исследования поверхностей изломов образцов из сталей 09Г2С и 30MnB5 при различных температурах.

3. Проведены исследования по определению микротвердости сварных швов и околошовных зон сталей 09Г2С и 30MnB5.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований были выбраны широко применяемые в дорожно-строительных машинах стали 09Г2С и 30MnB5. Цель исследований заключалась в сравнительном анализе микроструктуры и комплекса физико-механических характеристик данных сталей и их сварных соединений после термоциклической обработки для определения возможности замены стали 09Г2С на сталь 30MnB5.

В таблице 1 приведен химический анализ сталей [34].

Сталь 09Г2С подвергалась отжигу при температуре 900 °С. Термообработка стали 30MnB5 проводилась по режиму закалка (860–900) °С плюс отпуск (400–600) °С.

Термоциклическая обработка заключалась в проведении десяти циклов «нагрев до 780 °С – охлаждение».

Методики, форма образцов и оборудование для проведения металлографических исследований для определения размера зерна (металлографический микроскоп Olympus SpinSR10) и испытаний на растяжение (универсальная электромеханическая машина Instron 5969) описаны в [34].

Циклические испытания материалов проводились на сервогидравлической испытательной системе UTM 100 кН, показанной на рисунке 2.

Сервогидравлическая испытательная система UT-04-0100 предназначена для статических и циклических испытаний металлических, деревянных, железобетонных и композитных материалов на сжатие, растяжение, изгиб, малоцикловую усталость, механику разрушения при комнатной температуре, раскрытие трещин в диапазоне нагрузок от 0 до 100 кН с целью определения физико-механических характеристик.

Рисунок 2 – Испытательная система UTM 100 кН

Figure 2 – UTM test system 100 kN

В рамках данных исследований испытания проводились при нормальной и пониженных температурах от плюс 20 до минус 80 °С (выдержка в криокамере).Образцы вырезались из одношовной трубы диаметром 720 мм и толщиной стенки 10 мм. Испытания проводились по схеме изгиба вращающегося образца, цикл нагружения симметричный, коэффициент асимметрии цикла составлял величину 0,1. Испытания образцов проводились на базе 10^6 циклов.

Фрактографический анализ изломов образцов сталей проводился с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA с термоэмиссионным вольфрамовым катодом (рисунок 3).

Таблица 1
Химический состав сталей

Table 1
Chemical composition of steels

Марка стали	Химический состав, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	B
09Г2С	0,11	0,68	1,33	0,008	0,015	0,03	0,02	0,03	
30MnB5	0,027–0,33	≤0,40	1,15–1,45	≤0,035	≤0,025	–	–	≤0,40	0,0008–0,0050

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

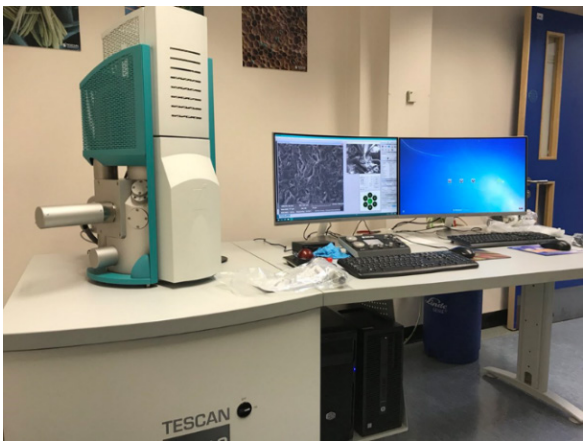


Рисунок 3 –Сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA

Figure 3 – Scanning TESCAN VEGA electron microscope

Данный микроскоп позволяет получать СЭМ-изображения и проводить анализ элементного состава в реальном времени в одном окне программного обеспечения TESCAN Essence™, что значительно упрощает получение данных как о морфологии поверхности образца, так и о его локальном элементом составе и делает СЭМ TESCAN VEGA эффективным аналитическим решением для проведения регулярного контроля качества материалов, анализа отказов и различных лабораторных исследований.

Диапазон энергий пучка, падающего на образец, от 200 эВ до 30 кэВ. Ток пучка – от 1 пА до 2 мкА с непрерывной регулировкой. Для изменения тока пучка в качестве устройства смены апертур используется электромагнитная линза. Увеличение – непрерывное от 2× до 1 000 000×.

Для полноты информации о свойствах исследуемых материалов приведем сведения об оборудовании, использованном для изучения распределения микротвердости по зонам сварного шва. Для стали 30MnB5 эти результаты подробно описаны в статье [18].

Измерение микротвердости в сварных соединениях осуществлялось с использованием универсального твердомера DuraVision-30 (рисунок 4).

В конструкции твердомера имеется монолитная чугунная рама, за счет которой повышаются точность и стабильность измерений. Твердомер имеет возможность измерять твердость различными методами без изменения конструктива прибора, что свидетельствует об универсальности данного аппарата. Твердомер DuraVision-30 находит свое применение и

Рисунок 4 – Универсальный твердомер DuraVision-30

Figure 4 – DuraVision-30 universal hardness tester

в лабораторных условиях, и в производственном процессе.

Указанный прибор обладает следующими положительными качествами:

– нагрузки, возможные для применения, 30–30000 Н;

– возможность установить рабочее расстояние до 400 мм;

– возможность исследования достаточно больших образцов массой до 200 кг;

– возможность функционировать как в ручном, так и в автоматическом режиме;

– возможность позиционировать место измерения при помощи лазера;

– организация освещения при помощи диодов;

– применение принципа замкнутого контура closed loop при осуществлении нагрузки на исследуемый объект.

В проведенных исследованиях измерение микротвердости проводилось при нагрузке 10 Н с выдержкой в течение 10 с.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблицу 2 сведены результаты испытаний на растяжение (предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_b) и по определению среднего размера зерна d исследуемых сталей после термоциклической обработки.

На рисунке 5 представлены зависимость среднего размера зерна d от количества N циклов термоциклической обработки.

Зависимости d = f(N) описываются следующими аппроксимационными соотношениями, полученными при обработке данных в программе Sigma Plot. Здесь и далее для каждого соотношения приведено значение коэффициента регрессии R.

Общий вид: $d = d_0 + a \cdot e^{-bN}$.

Сталь 09Г2С: d_0 = 8,735 мкм; a = 22,965 мкм; b = 0,978; R = 0,99.

Сталь 30MnB5: d_0 = 3,237 мкм; a = 15,456 мкм; b = 0,476; R = 0,95.

Рассмотрим зависимости предела текучести и предела прочности исследуемых сталей от числа циклов термической обработки.

На рисунке 6 приведены зависимости $\sigma_{0,2}$ = f(N) (рисунок 6, *а*) и σ_b = f(N) (рисунок 6, *б*).

Таблица 2
Механические свойства сталей после термоциклической обработки

Table 2
Mechanical properties of steels after thermocyclic processing

Сталь	Характеристика	Количество термических циклов N								S_σ, МПа
		0	1	2	3	4	6	7	10	
09Г2С	$\sigma_{0,2}$, МПа	357	371	385	392	404	405	409	410	2,9
	σ_b, МПа	446	468	482	491	499	502	503	507	4,4
	d, мкм	32	16	13	11	10	9	8	7,5	–
30MnB5	$\sigma_{0,2}$, МПа	400	410	415	420	480	500	600	610	26,5
	σ_b, МПа	650	750	760	785	850	950	998	1700	66,5
	d, мкм	20	10	9	8	7	6	3	1,5	–

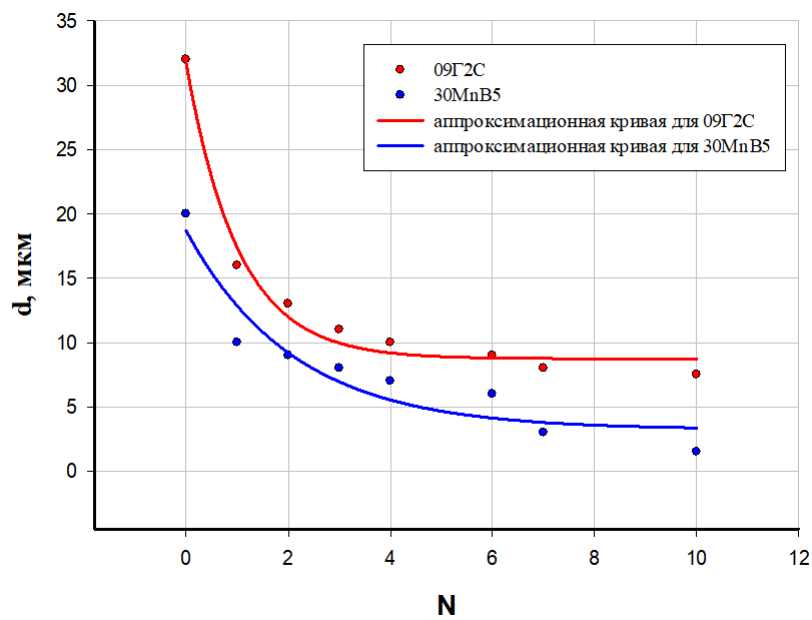
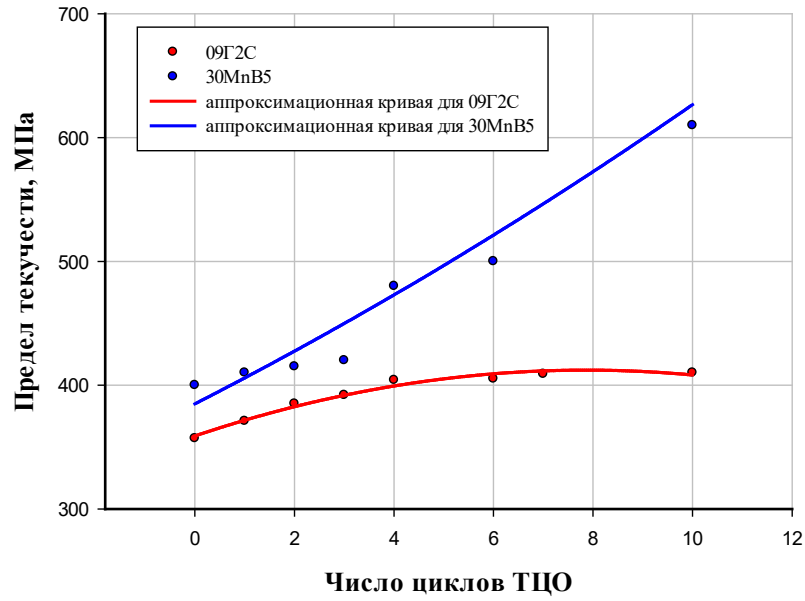


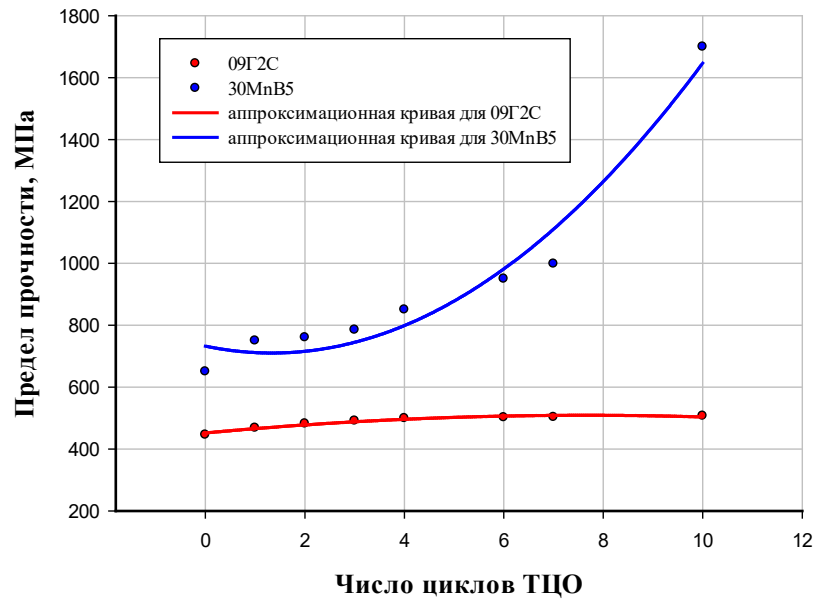
Рисунок 5 – Зависимость d = f(N)

Figure 5 – Dependancy d = f(N)

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal



а



б

Рисунок 6 – Зависимости $\sigma_{0,2}$ = f(N) и σ_b = f(N)

Figure 6 – Dependancies $\sigma_{0.2}$ = f(N) and σ_b = f(N)

Общий вид аппроксимационных зависимостей функций $\sigma_{0,2}$ = f(N) и σ_b = f(N) следующий:

Общий вид для предела текучести: $\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}^0 + a_{0,2}N + b_{0,2}N^2$.

Общий вид для предела прочности: $\sigma_b = \sigma_b^0 + a_b N + b_b N^2$.

Коэффициенты, входящие в данные соотношения, имеют следующие численные значения:

Сталь 09Г2С: $\sigma_{0,2}^0$ = 358,97 МПа; $a_{0,2}$ = 13,52 МПа; $b_{0,2}$ = – 0,86 МПа; R = 0,99.

σ_b^0 = 451,83 МПа; a_b = 14,96 МПа; b_b = –0,98 МПа; R = 0,98.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Сталь 30MnB5: $\sigma_{0,2}^{0}$ = 384,87 МПа; $a_{0,2}$ = 20,55 МПа; $b_{0,2}$ = 0,36 МПа; R = 0,95;

σ_b^{0} = 732,43 МПа; a_b = –33,34 МПа; b_b = 12,48 МПа; R = 0,98.

Полученные зависимости показывают, что для стали 09Г2С изменения предела текучести и предел прочности заканчиваются после четвертого цикла термической обработки. Аналогичные характеристики для стали 30MnB5 показывают постоянное увеличение вплоть до 10-го цикла.

Если рассмотреть значения $\sigma_{0,2}$ и σ_b, вычисленные по полученным зависимостям $\sigma_{0,2}$ = f(N) и σ_b = f(N), в качестве средних значений, то можно объединить все экспериментальные данные в одну совокупность по соответствующим характеристикам и сталям и оценить значения средних квадратичных отклонений величин пределов текучести и прочности, а именно

$$S_\sigma = S_{\sigma_{0.2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\sigma_{0.2i}^{э} - \sigma_{0,2i}^{т}\right)^2}{n-1}} \quad \text{и}$$

$$S_\sigma = S_{\sigma_b} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\sigma_{bi}^{э} - \sigma_{bi}^{т})^2}{n-1}}.$$

Здесь величины с индексом «э» относятся к экспериментальному результату, а с индексом «т» – к расчетному (по соответствующему соотношению). Величина n представляет собой количество экспериментальных точек по значениям N, в нашем случае n = 8 (см. таблицу 2). Вычисленные значения S_σ приведены в таблице 2.

Знание S_σ позволяет оценить коэффициенты вариации для значений пределов прочности и текучести исследуемых сталей. Для этого по всем экспериментальным значениям определяются средние величины пределов текучести $\acute{\sigma}_{0,2}$ и прочности $\acute{\sigma}_b$ (для каждой стали). Коэффициент вариации ω определяется как отношение

$$\omega_{0.2} = \frac{S_{\sigma_{0.2}}}{\bar{\sigma}_{0,2}} \quad \text{и} \quad \omega_b = \frac{S_{\sigma_b}}{\bar{\sigma}_b}.$$

Для 09Г2С: $\bar{\sigma}_{0,2} = 391$ МПа, $\bar{\sigma}_b = 487$ МПа. Для 30MnB5: $\bar{\sigma}_{0,2} = 479$ МПа, $\bar{\sigma}_b = 930$ МПа.

Примем для упрощения максимальное значение коэффициента вариации одинаковым для обеих сталей. Это значение 7% для предела прочности стали 30MnB5.

Тогда, согласно[2], с вероятностью 0,99 разность между двумя средними будет значимой при различии в 1,2 раза. Для меньших коэффициентов вариации эта величина будет меньше.

По представленным в таблице 2 величинам физико-механических характеристик получа-

Таблица 3
Результаты циклических испытаний

Table 3
Results of cyclic tests

Сталь	Частота циклов ω, Гц	Показатель сопротивления усталости, $tg\alpha_н$	Напряжение, соответствующее долговечности $N = 10^6$ циклов, МПа	Временное сопротивление разрыву, $\sigma_в$, МПа	$\chi = \frac{\sigma_{N=10^6}}{\sigma_в}$
09Г2С	2,0	0,2655	115	490	0,234
	2,7	0,3293	105	490	0,214
	100	0,1337	310	490	0,632
30MnB5	2,0	0,0877	540	950	0,568
	2,7	0,1311	480	950	0,505
	46,7	0,1600	250	950	0,263

[2] Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность. Устойчивость. Колебания. Справочник в 3 томах. Том 1. Москва: Машиностроение, 1968. 831 с.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ется, что по пределу текучести сталь 30MnB5 превышает величину 1,2 относительно стали 09Г2С после 4 цикла ТЦО. По пределу прочности это превышение идет уже сразу после исходного состояния(0 циклов ТЦО).

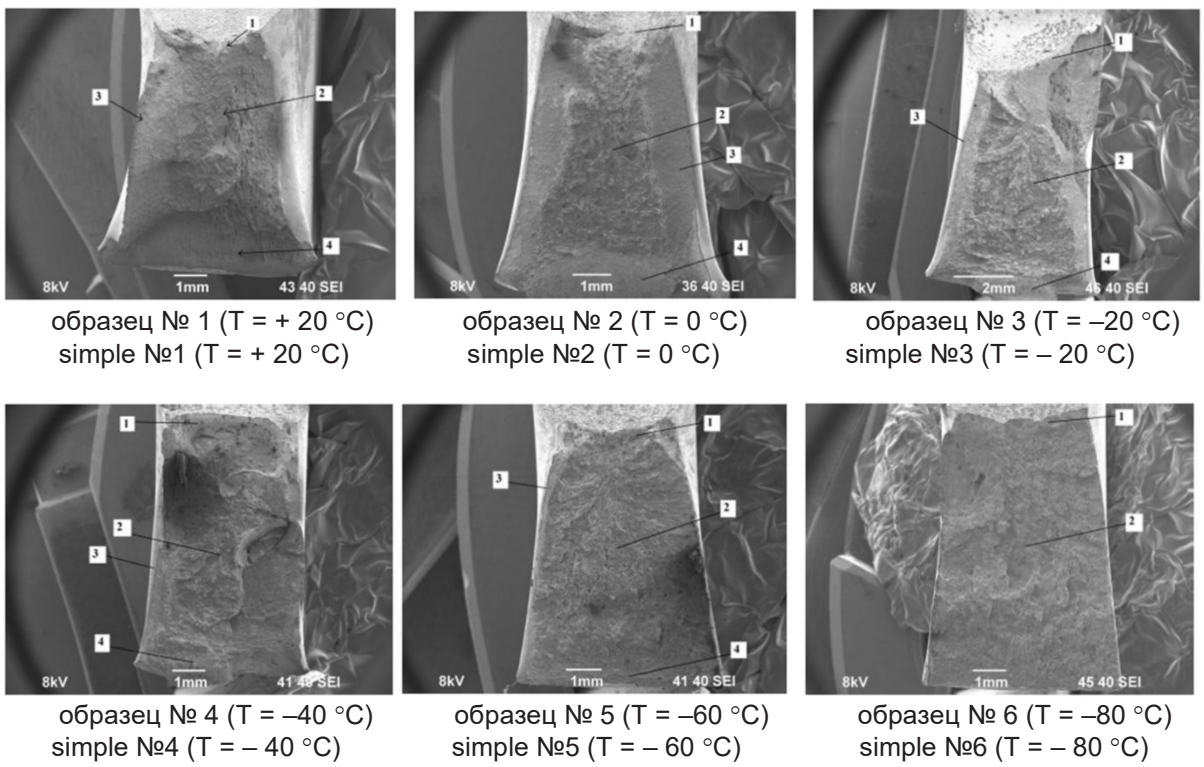
В таблице 3 приведены результаты испытаний образцов сталей на циклическую прочность для трех значений частоты нагружения.

Сталь марки 09Г2С с увеличением частоты циклического нагружения показывает повышение циклической прочности, а сталь 30MnB5, наоборот, снижение. Таким образом, при выборе материала для рабочих органов дорожно-строительных машин, работающих в одинаковых (похожих) условиях эксплуатации при низких частотах нагружения целесообразнее использовать борсодержащую сталь 30MnB5 вместо низколегированной стали 09Г2С.

На рисунке 7 показаны фотографии (СЭМ-снимки) изломов образцов стали 30MnB5, испытанных при разных температурах.

В результаты визуального осмотра поверхности изломов очаги разрушения не выявлены. Характерные дефекты строения изломов не обнаружены. На поверхности изломов всех шести образцов характерно наличие трех зон, имеются утяжки.

На всех изображениях, представленных на рисунке 7, цифрами обозначены: *1* – зона зарождения трещины; *2* – зона распространения трещины; *3* – зона утяжки; *4* – зона долома.



образец № 1 (T = + 20 °C)
simple №1 (T = + 20 °C)

образец № 2 (T = 0 °C)
simple №2 (T = 0 °C)

образец № 3 (T = –20 °C)
simple №3 (T = – 20 °C)

образец № 4 (T = –40 °C)
simple №4 (T = – 40 °C)

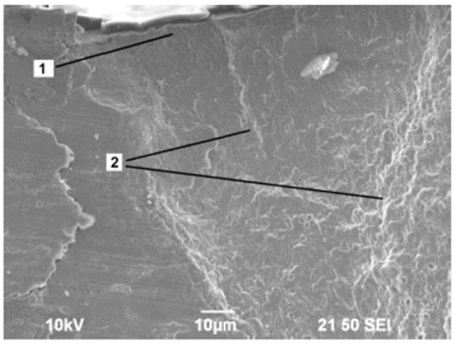
образец № 5 (T = –60 °C)
simple №5 (T = – 60 °C)

образец № 6 (T = –80 °C)
simple №6 (T = – 80 °C)

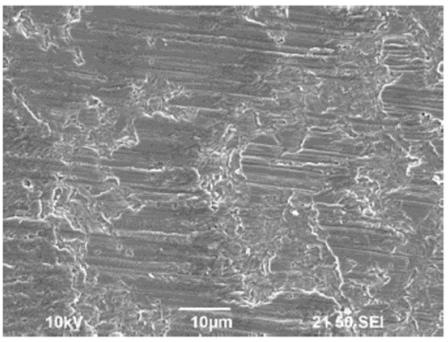
Рисунок 7 – Излом образцов из стали 30MnB5

Figure 7 – Fracture of 30MnB5 steel samples

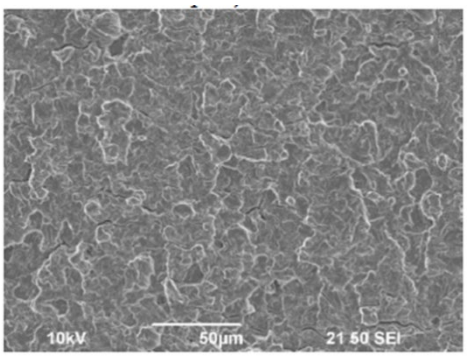
© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal



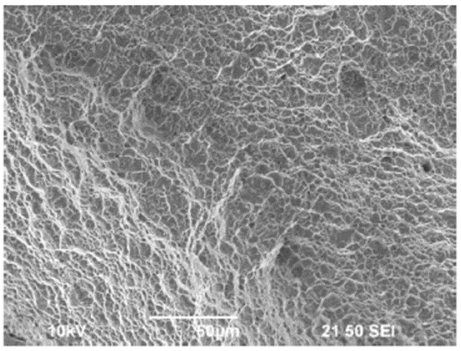
Очаг разрушения
The focus of destruction



Зона стабильного роста трещин
Zone of stable crack growth



Зона ускоренного развития трещин
Zone of accelerated crack development



Зона долома
Upload failure zone

Рисунок 8 – Зоны разрушения образца из стали 09Г2С

Figure 8 – Destruction zones of the 09G2S steel sample

На рисунке 8 приведены СЭМ-снимки отдельных зон излома образца из стали 09Г2С.

С понижением температуры испытания меняются размеры и соотношение площадей зон в изломах. Самая большая утяжка и долом у образцов №1,2, у образца №6 они не обнаруживаются (см. рисунок 7). Зоны зарождения трещины по размерам близки у всех образцов, что задано наличием U-образного концентратора. Зона распространения трещин увеличивается по мере понижения температуры и при 80 °С занимает практически всю площадь излома (см. рисунок 7).

Из очагов разрушения выходят трещины, которые распространяются вглубь образца. В зоне стабильного роста трещин наблюдаются усталостные линии, их параллельное расположение позволяет классифицировать их как вязкие бороздки. Однако общее очертание фигур на фрактограмме фасеточное, что говорит о хрупком (квазихрупком) разрушении.

Зона ускоренного развития трещин в образце из стали 09Г2С образована транскристаллитным разрушением. Имеются вторичные трещины (на снимке очага разрушения обозначены цифрой 2). Трещины короткие и не ветвящиеся, что характерно для вязких материалов. Топология зоны – фасетки квазискола, таким образом, наряду с признаками хрупкого разрушения имеются признаки пластической деформации. Разрушение при этом носит смешанный (хрупко-вязкий) характер.

Зона долома представляет собой совокупность ямок, вытянутых в направлении разрушения (равноосные ямки и ямки сдвига), таким образом, финал разрушения проходил по вязкому механизму.

В целом разрушение данного образца с линейным надрезом можно квалифицировать как хрупко-вязкое, а сам излом – квазихрупким.

На рисунке 9 показаны точки измерения микротвердости в сварном шве с привязкой к его отдельным зонам – основной металл, зона термического влияния (ЗТВ) и собственно сварной шов.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

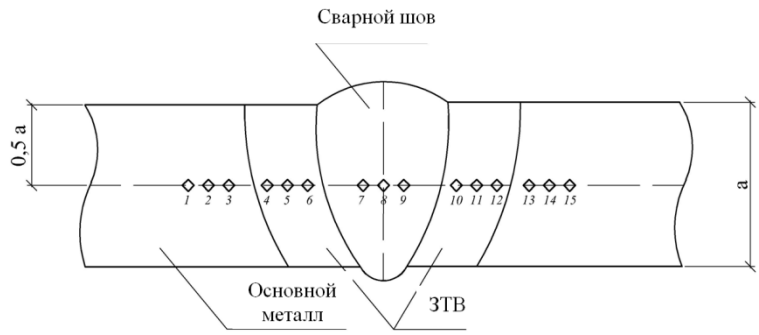


Рисунок 9 – Точки измерения микротвердости

Figure 9 – Microhardness measurement points

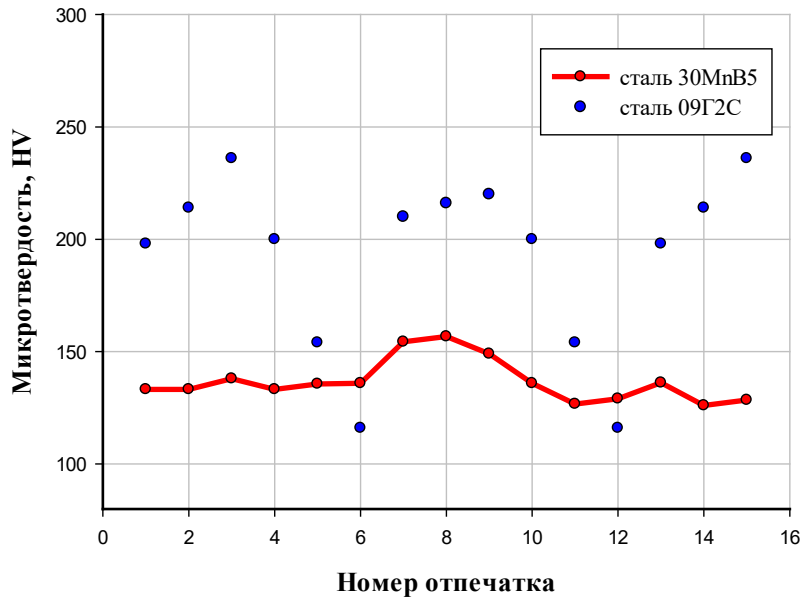


Рисунок 10 – Изменение микротвердости в различных зонах сварного соединения

Figure 10 – Changes in microhardness in various zones of welded joint

Распределение микротвердости по точкам измерения для образца из стали 30MnB5 (толщина 3 мм) показано на рисунке 10. Там же точками с привязкой к упомянутым выше зонам сварного шва показаны значения микротвердости для образца из стали 09Г2С[3].

Видно, что распределение микротвердости для различных зон сварного шва образца из стали 30MnB5 достаточно равномерное. Даже в зоне сварного шва превышение 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 по сравнению со сталью 30MnB5. Это говорит о том, что сталь 09Г2С, имея высокий уровень микротвердости, оказывается более хрупкой (относительно стали 30MnB5). Это означает наличие низкой пластичности и повышенной чувствительности к концентраторам напряжений.

[3] Файрушин А.М., Каретников Д.В., Романчук А.С. Исследование влияния вибрационной обработки стали 09Г2С в процессе сварки на металл сварного шва. Современные проблемы машиностроения. Сборник научных трудов XI Международной научно-технической конференции, Томск. 2017. С. 50–58.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования влияния количества циклов термической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 показали следующее. С увеличением числа циклов структура стали 09Г2С практически не изменяет значение среднего размера зерна начиная с четвертого цикла. Средний размер зерна у стали 30MnB5 уменьшается вплоть до десятого цикла.

Установлена прямая зависимость уровня пределов пластичности и прочности от среднего размера зерна, а следовательно, и от количества циклов термического воздействия «нагрев–охлаждение». Чем мельче зерно, тем выше механические характеристики.

Распределение микротвердости для различных зон сварного шва образца из стали 30MnB5 достаточно равномерное. Уровень микротвердости стали 09Г2С выше и имеет больший разброс. Данное обстоятельство является положительным моментом в вопросе чувствительности к концентраторам напряжений.

Исследования вибрационных характеристик сталей показали, что при низких частотах предпочтительнее использование изделий из стали 30MnB5.

Таким образом, сталь 30MnB5 с точки зрения эксплуатационных характеристик ДСМ предпочтительнее стали 09Г2С для изготовления ножей, отвалов и других элементов рабочего оборудования дорожно-строительных машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Scherbakov A., Sklyarova A., Pushkarev A., Petrov A.: Destruction of Welded Metal Structures of Construction Machines Operated in Corrosive Environments. In: Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 247, pp 557-573 (2022). https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_50.

2. Мухаметшина Р.М. Отказы дорожно-строительных машин по параметрам коррозии // Известия КазГАСУ. 2013. № 4 (26). С. 62–67.

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

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

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

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

7. Scherbakov A., Lukashuk E., Pushkarev A., Vinogradova T.: The Influence of Deformation and Thermal Effects on the Structure and Properties of the Metal of Welded Structure Elements of Lifting Cranes. In: Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 247, pp 539-555 (2022). https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_49.

8. Gleiter H. Nanostructured materials: basid concepts and microstructure // Acta materialia. 2000. Vol. 48. № 1. – 29 p.

9. Valiev R.Z., Murashkin M.Yu., Semenova I.P. Grain boundaries and mechanical properties of ultrafine-grained metals // Metallurgical and Materials Transactions. Vol. 41, issue 4, 2010, – 816 p.

10. Маркушев М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов // Письма о материалах. Том 1. 2011. С. 36–42.

11. Утяшев Ф.З. Наноструктурирование металлических материалов методами интенсивной пластической деформации // Физика и техника высоких давлений. 2010. Том 20, № 1. С. 7–25.

12. Scherbakov A., Babanina A., Solovyeva E., Aleksandrovskiy M.: Mechanisms of construction machines and selection of steels for the manufacture of welded metal structures. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol 1001, 012012 (2020). https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012012.

13. 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.

14. Scherbakov A., Babanina A., Solovyeva E., Aleksandrovskiy M.: Materials and Methods of Experimental Studies of Welded Metal Structures of Construction Machines. In: Lecture Notes in Civil Engineering, vol 130 LNCE, pp 572-586 (2021). https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6_57.

15. Тихонов А.С., Белов В.В. , Леушин И.Г., Еременко В.И., Забелин С.Ф. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов. Москва. Наука. 1984. 187 с.

16. 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.

17. Щербаков А.П. Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин. Вестник СибАДИ . 2020. № 4(17). С. 464–475. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475.

18. Щербаков А.П. Экспериментальные исследования влияния термической обработки на свойства сварных соединений рабочих механизмов дорожно-строительных машин. Вестник СибАДИ. 2020. № 6(17). С. 664–675. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

19. 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.

20. 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.

21. Morrison W.B. Superplasticity of low-alloy steels // *ASM Transactions Quarterly*. 1968, vol. 61, no. 3, pp. 423–434.

22. 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.

23. Polyansky, I. Sizov, U. Mishigdorzhiyn, V. Butukhanov. Improvement of the heat resistance of carbon steels by thermocycling thermochemical treatment with self-protective pastes based on boron carbide and aluminum // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2016, 116*, pp. 1–5.

24. Бубликов Ю.А. Основные направления повышения свойств конструкционных сталей ферритo-перлитного класса // ВЕЖПТ. 2014. № 11 (72). С. 81–82.

25. 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.

26. Floreen S., Hayden H.W. The deformation and fracture of stainlees 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.

27. 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.

28. Мыльников В.В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов // Наука и техника. 2019. № 5. С. 52–55.

29. 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.

30. Scherbakov, A., Babanina, A., Graboviy, K.: Acting Stresses in Structural Steels During Elastoplastic Deformation. In: Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1259, pp 298-311 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_26.

31. Scherbakov, A., Babanina, A., Kochetkov, I., Khoroshilov, P.: Technical condition of welded load-bearing metal structures of operated agricultural hoisting cranes. In: E3S Web of Conferences, vol 175, 11005 (2020). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017511005.

32. Scherbakov, A., Babanina, A., Matusevich, A.: Passive Probe-Coil Magnetic Field Test of Stress-Strain State for Welded Joints. In: Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1259, pp 312-323 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_27.

33. Scherbakov A., Monastyreva D., Smirnov V.: Passive fluxgate control of structural transformations in structural steels during thermal cycling. In: E3S Web of Conferences, vol. 135, 03022 (2019). https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913503022.

34. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Виноградова Т.В. Анализ влияния термоциклической обработки сталей 09г2с и 30mnb5 на прочностные характеристики рабочих органов дорожно-строительных машин. Вестник СибАДИ. 2021. № 2(18). С. 180–190. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190.

REFERENCES

1. Scherbakov A., Sklyarova A., Pushkarev A., Petrov A.: Destruction of Welded Metal Structures of Construction Machines Operated in Corrosive Environments. In: Smart Innovation, Systems and Technologies, 2022. 247: 557-573 (). https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_50.

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.

3. 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.

4. Gustov Yu.I., Orekhov A.A. *Issledovanie konstrukcionno-tekhnologicheskih i ekspluatacionnyh 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.

5. Mukhametshina R.M. *Vliyanie klimaticheskih faktorov na svoistva materialov i nadejnost dorojno_stroitelnih mashin* [Influence of climatic factors on the properties of materials and reliability of road construction machines]. *Izvestiya KazGASU – News of the University*, 2014, 4 (30): 102–108.

6. Zaitseva M.M., Megera G.I., Kasyanov D.N. *Problema dolgovechnosti detalej gruzovyh avtomobilej* [The problem of durability of truck parts]. *IVD*, 2017, 2 (45): 71–75.

7. Scherbakov A., Lukashuk E., Pushkarev A., Vinogradova T.: The Influence of Deformation and Thermal Effects on the Structure and Properties of the Metal of Welded Structure Elements of Lifting Cranes. In: Smart Innovation, Systems and Technologies, 2022. 247: 539-555. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_49.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

8. Gleiter H. Nanostructured materials: basid concepts and microstructure // *Acta materialia*. 2000. 48(1): 29

9. Valiev R.Z., Murashkin M.Yu., Semenova I.P. Grain boundaries and mechanical properties of ultrafine-grained metals // *Metallurgical and Materials Transactions*. 2010 41(4): 816.

10. Markushev M.V. *K voprosu ob ehffektivnosti nekotorykh metodov intensivnoi plasticheskoi deformatsii, prednaznachennykh dlya polucheniya ob"emnykh nanostrukturnykh materialov*. [On the issue of the efficiency of some severe plastic deformation methods intended for the production of bulk nanostructured materials]. *Pis'ma o materialakh*. 2011. 1: 36–42.

11. Utyashev F.Z. *Nanostrukturirovanie metallicheskikh materialov metodami intensivnoi plasticheskoi deformatsii* [Nanostructuring of metallic materials by methods of intensive plastic deformation]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii*. 2010, 20(1): 7–25.

12. Scherbakov A., Babanina A., Solovyeva E., Aleksandrovskiy M.: Mechanisms of construction machines and selection of steels for the manufacture of welded metal structures. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1001, 012012 (2020). https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012012.

13. 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-tekhnicheskoj i ekonomicheskoj informacii. – Journal of Iron and Steel. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2019, 75(4): 417–426.

14. Scherbakov A., Babanina A., Solovyeva E., Aleksandrovskiy M.: Materials and Methods of Experimental Studies of Welded Metal Structures of Construction Machines. In: Lecture Notes in Civil Engineering, vol 130 LNCE: 572-586 (2021). https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6_57.

15. Tikhonov A.S., Belov V.V., Leushin I.G., Eremenko V.I., Zabelin S.F. *Termotsiklicheskaya obrabotka stalei, splavov i kompozitsionnykh materialov* [Thermocyclic treatment of steels, alloys and composite materials]. Moskow, *Nauka*, 1984, 187.

16. Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Manvelova N.E. *Rabochie mekhanizmy stroitel'nyh mashin i sposoby tekhnologicheskogo obespecheniya prochnosti svarnyh soedinenij iz vysokoprochnyh 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.

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

18. Scherbakov A.P. Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya termicheskoj obrabotki na svojstva svarnyh soedinenij rabochih mekhanizmov dorozhno-stroitel'nyh mashin // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(6):664-675. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675.

19. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Kuz'min O.V., Trunova E.V., Scherbakov A.P. *Vliyanie termicheskoj i termociklicheskoj obrabotki na mekhanicheskie svojstva konstrukcionnyh stalej* [Influence of thermal and thermocyclic treatment on the mechanical properties of structural steels]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, 1(66): 128–133.

20. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V., Korneeva E.A., Scherbakov A.P. *Vliyanie strukturnyh parametrov konstrukcionnyh stalej na rezul'taty ocenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarnyh metallokonstrukcij* [Influence of structural parameters of structural steels on the results of stress-strain state assessment of welded metal structures]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, 6 (59): 194–199.

21. Morrison W. B. Superplasticity of low-alloy steels // *ASM Transactions Quarterly*, 1968, 61(3): 423–434.

22. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V. *Vliyanie termociklicheskoj obrabotki na strukturnye izmeneniya plasticheski deformirovannyh svarnyh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh 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.

23. Polyansky, I. Sizov, U. Mishigdorzhiyn, V. Butukhanov. Improvement of the heat resistance of carbon steels by thermocycling thermochemical treatment with self-protective pastes based on boron carbide and aluminum // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2016, 116:* 1–5.

24. Bublikov Yu.A. *Osnovnie napravleniya povisheniya svoistv konstrukcionnih stalei ferrito_perlitnogo klassa* [Main directions of improving the properties of structural steels of ferrite-perlite class]. *VEZHPT*, 2014,11 (72): 81–82.

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

26. Floreen S., Hayden H.W. The deformation and fracture of stainlees 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.

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

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

28. Mylnikov V.V. *Vliyanie chastoty nagruzheniya na ustalost' konstrukcionnyh materialov* [Influence of loading frequency on fatigue of structural materials]. *Nauka i tekhnika – Science and Engineering*, 2019, 5: 52–55.

29. Vedyakov I.I., Odesskij P.D., Gurov S.V. *Obespechenie prochnosti svarnyh soedinenij dlya unikal'nyh 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.

30. Scherbakov, A., Babanina, A., Graboviy, K.: Acting Stresses in Structural Steels During Elastoplastic Deformation. In: Advances in Intelligent Systems and Computing, 2021. 1259: 298-311. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_26.

31. Scherbakov, A., Babanina, A., Kochetkov, I., Khoroshilov, P.: Technical condition of welded load-bearing metal structures of operated agricultural hoisting cranes. In*: E3S Web of Conferences*, 2020. 175: 11005. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017511005.

32. Scherbakov, A., Babanina, A., Matusevich, A.: Passive Probe-Coil Magnetic Field Test of Stress-Strain State for Welded Joints. In: Advances in Intelligent Systems and Computing, 1259: 312-323 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_27.

33. Scherbakov A., Monastyreva D., Smirnov V.: Passive fluxgate control of structural transformations in structural steels during thermal cycling. In: E3S *Web of Conferences*, 2019. 135: 03022. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913503022.

34. Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Vinogradova T.V. Influtnce analysis of 09Г2С and 30MnB5 steels thermo cyclic treatment on strength characteristics of road construction machines working bodies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(2):180-190. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Щербаков А.П. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследований, анализ результатов, обоснование и структурирование методики расчета (80%).

Пушкарев А. Е. Обзор основных направлений эксплуатации дорожно-строительных машин (10%).

Максимов С. Е. Описание материалов и методов для расчета параметров конструкций (10%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Alexander P. Scherbakov – formation of the research direction, formulation of goals and objectives, designation of the research algorithm, analysis of results, justification and structuring of the calculation method (80%).

Alexandr E. Pushkarev – overview of the main directions of road-building machinery operation (10%).

Sergey E. Maksimov – description of materials and methods for calculating structural parameters (10%)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Щербаков Александр Павлович – аспирант, Scopus Author ID 57212375284, Researcher ID AAP-8095-2020, старший преподаватель кафедры судебных экспертиз.

Пушкарев Александр Евгеньевич – д-р техн. наук, Scopus Author ID8290951800, Researcher ID E-4532-2019, проф. кафедры наземных транспортно-технологических машин.

Максимов Сергей Евгеньевич – д-р техн. наук, проф. кафедры наземных транспортно-технологических машин.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander P. Scherbakov (Saint-Petersburg) – postgraduate student, Scopus author ID 57212375284, Researcher ID AAP-8095-2020, Senior Lecturer, the Forensics Department.

Alexandr E. Pushkarev (Saint-Petersburg) – Dr. of Sci. Ec., Scopus Author ID8290951800, Researcher ID E-4532-2019, Professor of Technological Machines.

Sergey E. Maksimov (Saint-Petersburg) – Dr. of Sci. Ec., Professor of Technological Machines.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal