

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190>

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ 09Г2С И 30МпВ5 НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

А.П. Щербаков, А.Е. Пушкарев, Т.В. Виноградова
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются пути повышения надежности эксплуатации дорожно-строительных машин. По итогам этого рассмотрения предлагается вариант замены используемой стали 09Г2С бор-содержащей сталью 30МпВ5. На примере ножа автогрейдера анализируются силовые воздействия на данный рабочий орган дорожно-строительных машин. С целью повышения уровня физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30МпВ5 дополнительно проводится их термоциклическая обработка. Описываются экспериментальные исследования влияния данного вида термического воздействия на структуру и свойства сталей. Сравнительный анализ полученных характеристик позволяет сделать заключение о возможности рассматриваемой замены.

Материалы и методы. С помощью металлографического анализа авторами было исследовано влияние количества циклов термических воздействий на размер зерна стали. Параллельно определен комплекс физико-механических характеристик данных сталей на различных этапах термоциклической обработки.

Результаты. Было определено, что повышения уровня физико-механических характеристик исследуемых сталей можно добиться применением термоциклической обработки. Это достигается за счет получения мелкозернистой структуры металла, имеющей более высокую прочность. Рассмотрены зависимости предела прочности и предела текучести исследуемых сталей от числа циклов термического воздействия. Подобраны корреляционные соотношения для описания этих зависимостей. Рассмотрена связь пределов текучести и прочности сталей 09Г2С и 30МпВ5 с размером зерна. Все исследованные зависимости представлены в графическом виде.

Обсуждение и заключение. На основе сравнительного анализа комплекса физико-механических характеристик авторами сделано заключение о возможности замены стали 09Г2С на сталь 30МпВ5.

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

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

Поступила 14.03.21, принята к публикации 28.04.21.

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. Анализ влияния термоциклической обработки сталей 09г2с и 30мпв5 на прочностные характеристики рабочих органов дорожно-строительных машин/ А.П. Щербаков, А.Е. Пушкарев, Т.В. Виноградова. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 2(78). – С. 180-190.

© Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Виноградова Т.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190>

INFLUENCE ANALYSIS OF 09Г2С AND 30МnВ5 STEELS THERMOCYCLIC TREATMENT ON STRENGTH CHARACTERISTICS OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES WORKING BODIES

Alexandr P. Scherbakov, Alexandr E. Pushkarev, Tamara V. Vinogradova
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

Introduction. The ways of increasing the reliability of road construction machinery operation are considered. As a result, an option is proposed to replace the used 09Г2С steel with 30МnВ5 boron steel. Using the example of a motor grader blade, the force effects on this working body of the road construction machinery are analyzed. In order to increase the level of physical and mechanical characteristics of 09Г2С and 30МnВ5 steels, they are additionally exposed to thermo cyclic treatment. The experimental studies about the influence of this type thermal action on the structure and properties of steels are described. The comparative analysis of the obtained characteristics allows making a conclusion about the possibility of the considered replacement.

Materials and methods. Through the metallographic analysis the influence of the number of thermal effects cycles on the grain size of steel is investigated. Alongside a set of physical and mechanical characteristics of these steels was determined at various stages of the thermo cyclic treatment.

Results. It was determined that an increasing the level of physical and mechanical characteristics of the studied steels is possible through the use of thermo cyclic treatment. This is achieved by producing a fine-grained metal structure with a higher strength. The dependence of the tensile strength and yield strength of the steels under investigation on the number of cycles of thermal action is considered. Some correlation relationships were selected to describe these dependencies. The relationship between the yield stress and ultimate strength of 09Г2С and 30МnВ5 steels and the grain size is considered. All investigated dependencies are presented in graphical form.

Discussion and conclusion. Based on a comparative analysis of the complex of physical and mechanical characteristics, the conclusion about the possibility of replacing 09Г2С steel with 30МnВ5 steel was made.

KEYWORDS: metallographic analysis, grain size, thermo cyclic treatment, physical and mechanical characteristics, steel replacement.

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

Submitted 14.03.21, revised 28.04.21.

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., Vinogradova T.V. Influence analysis of 09Г2С and 30МnВ5 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. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190>

© Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Vinogradova T.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация дорожно-строительных машин включает в себя три основных направления:

- процесс формирования парка дорожно-строительных машин;
- использование машин по их функциональному назначению;
- обеспечение работоспособности дорожно-строительных машин за счет технического обслуживания и ремонта.

Первое направление связано с решением вопросов по приобретению новой или уже бывшей в эксплуатации техники. Второе и третье направления напрямую связаны с обеспечением эффективной эксплуатации дорожно-строительной техники.

В рамках данной статьи подойдем к понятию эффективной эксплуатации машины через значение запаса прочности ее рабочих узлов, который определяется двумя параметрами – прочностными характеристиками материала рабочего органа дорожно-строительной машины и действующими нагрузками. В общем случае оба этих параметра могут носить случайный характер. Чаще всего при расчетах коэффициентов запаса прочности рассматривается нормальное распределение указанных величин [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Это позволяет использовать либо средние значения указанных величин, либо нормированные или же брать отношение минимальной прочности к максимальной нагрузке.

Одним из путей повышения надежности эксплуатации дорожно-строительных машин является увеличение прочностных характеристик материалов рабочих органов.

В настоящее время существует несколько направлений повышения прочности материалов. Однако наибольший эффект дают методы, связанные с получением мелкозернистой структуры. В статье [12] говорится о порошковых методах, осаждении из газовой фазы. Выделяются методы, связанные с интенсивной пластической деформацией [13, 14, 15].

Не менее распространенным можно считать метод термоциклической обработки. Теоретические основы данного метода, служащего для повышения механических характеристик различных материалов и сварных соединений за счет улучшения структуры, изложены в работах [16, 17]. Авторами этих источников отмечается, что вопрос выбора режимов термоциклической обработки для каждого материала должен определяться контекстом его применения. Поэтому отечественная и зарубежная техническая литература, посвященная данному направлению, достаточно обширна. Во всех этих публикациях отмечается, что после термоциклической обработки в сталях фиксируется измельчение исходного зерна с одновременным повышением механических характеристик, в качестве которых взяты предел прочности, предел текучести и твердость [18, 19, 20, 21, 22, 23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований были выбраны широко применяемые в дорожно-строительных машинах стали 09Г2С и 30МnВ5. Цель исследований заключалась в сравнительном анализе микроструктуры и физико-механических характеристик данных сталей после термоциклической обработки.

В таблице 1 приведен химический анализ сталей.

Сталь 09Г2С подвергалась отжигу при температуре 900 °С. Термообработка стали 30МnВ5 проводилась по режиму закалка (860–900) °С плюс отпуск (400–600) °С.

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

Испытания на растяжение проводились с использованием плоских образцов (рисунок 1). Некоторые из образцов имели в центральной части боковые радиусные проточки, которые ослабляли поперечное сечение на 20%.

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	
30МnВ5	0,027–0,33	≤0,40	1,15–1,45	≤0,035	≤0,025	–	–	≤0,40	0,0008–0,0050



Рисунок 1 – Основная часть образцов, используемых для проведения экспериментальных исследований

Figure 1 – The main part of the samples used for experimental studies

Растяжение образцов осуществлялось на универсальной испытательной машине Instron 5969, показанной на рисунке 2, с записью диаграмм деформирования на компьютер.

Определение среднего размера зерна проводили по методике, предусмотренной ГОСТ 5639–82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна». Для измерений был использован металлографический микроскоп Olympus SpinSR10 с системой количественного анализа изображений Thixomet (рисунок 3).

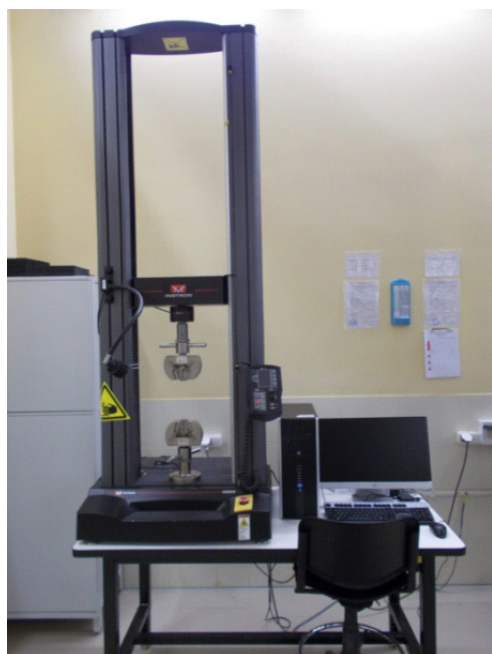


Рисунок 2 – Универсальная электромеханическая машина Instron 5969

Figure 2 – Instron 5969 Universal Electromechanical Machine

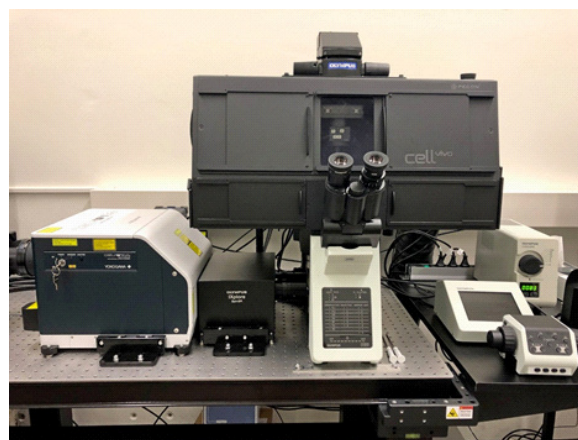


Рисунок 3 – Металлографический микроскоп Olympus SpinSR10

Figure 3 – SpinSR10 Olympus metallographic microscope

Указанный микроскоп оснащен вращающимся диском, позволяющим получить изображения с суперразрешением. Глубина таких изображений составляет до 100 мкм. Это позволяет исследовать области, которые недоступны для изучения с использованием других оптических приборов. Скорость обработки спектральных данных при этом очень высокая.

Конструкция микроскопа позволяет равномерно освещать все поле зрения. Переход от конфокального режима к режиму суперразрешения осуществляется плавно. Наличие вращающегося диска обеспечивает достаточную яркость изображения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблицу 2 сведены результаты испытаний на растяжение и средний размер зерна исследуемых сталей после термоциклической обработки.

На рисунке 4 представлена зависимость среднего размера зерна d от количества N циклов термоциклической обработки. Обработка данных проводилась в программе Sigma Plot v.12.5.

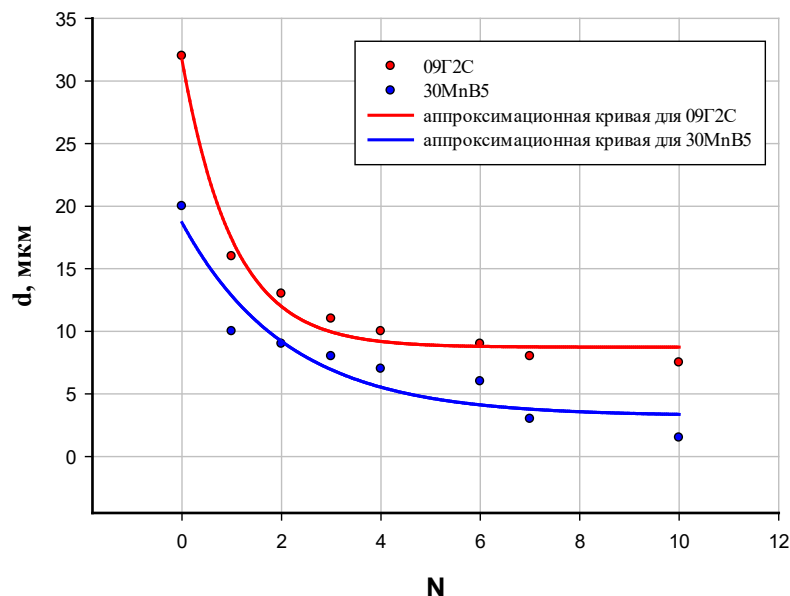
Видно, что сталь 09Г2С имеет более крупное зерно, чем сталь 30МпВ5. Кроме того, необходимо отметить, что сталь 09Г2С, начиная с $N = 4$, практически не изменяет размер зерна. Сталь 30МпВ5 продолжает менять размер зерна вплоть до $N = 10$.

Программа Sigma Plot позволяет проводить подбор аппроксимационных соотношений, используя для этих целей метод наименьших квадратов и набор различных функций – линейных, экспоненциальных, логарифмических, степенных. Эти функции встроены в

Таблица 2 – Механические свойства сталей после термоциклической обработки

Table 2 – Mechanical properties of steels after thermo cyclic processing

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

Рисунок 4 – Зависимость $d = f(N)$ Figure 4 – Dependence $d = f(N)$

алгоритм обработки, и все расчеты выполняются автоматически. Критерием выбора той или иной аппроксимирующей функции служит значение коэффициента регрессии R . Этот параметр изменяется от 0 до 1. Чем его значение выше, то есть ближе к 1, тем лучше аппроксимацию дает выбранная функция. В этом случае она наиболее близко расположена ко всему набору экспериментальных результатов, что позволяет сделать заключение о наличии функциональной связи между парами рассматриваемых величин. Наличие аппроксимационной зависимости, имеющей коэффициент корреляции, близкий к 1, позволяет прогнозировать значения рассматриваемой функции как внутри интервала изменения аргумента, подтвержденного экспериментальными значениями, так и за его пределами. При выходе за экспериментально подтвержденный

интервал необходимо оговаривать определенную условность прогнозируемых результатов.

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 .

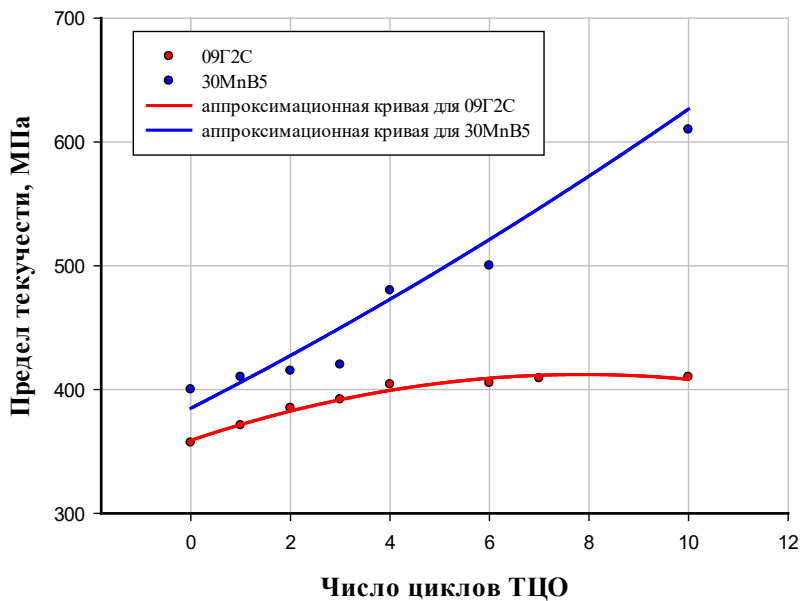
– Общий вид: $d = d_0 + a \cdot e^{-bN}$.

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

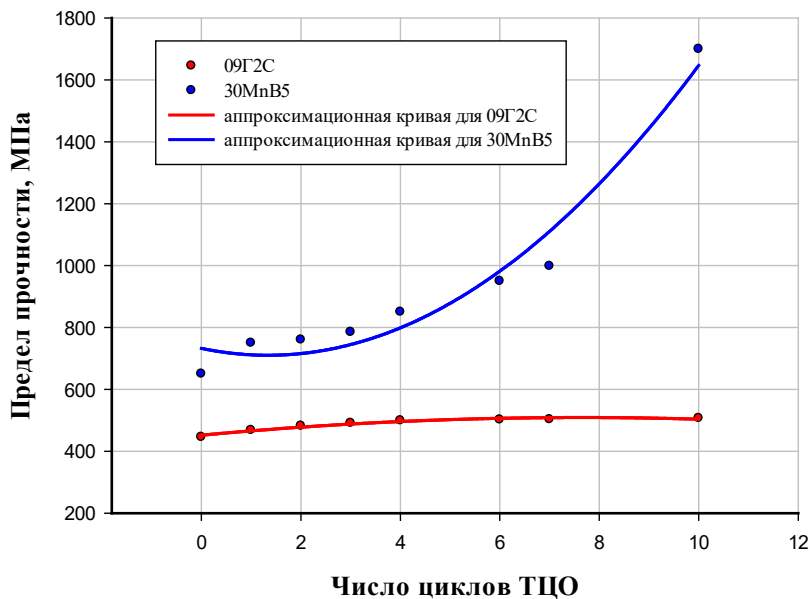
– Сталь 30MnB5: $d_0 = 3,237$ мкм; $a = 15,456$ мкм; $b = 0,476$; $R = 0,95$.

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

На рисунке 5 приведены зависимости $\sigma_{0,2} = f(N)$ (рисунок 5, а) и $\sigma_b = f(N)$ (рисунок 5, б).



а



б

Рисунок 5 – Зависимости $\sigma_{0,2} = f(N)$ и $\sigma_b = f(N)$

Figure 5 – Functions $\sigma_{0,2} = f(N)$ and $\sigma_b = f(N)$

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

– общий вид для предела текучести:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}^0 + a_{0,2}N + b_{0,2}N^2;$$

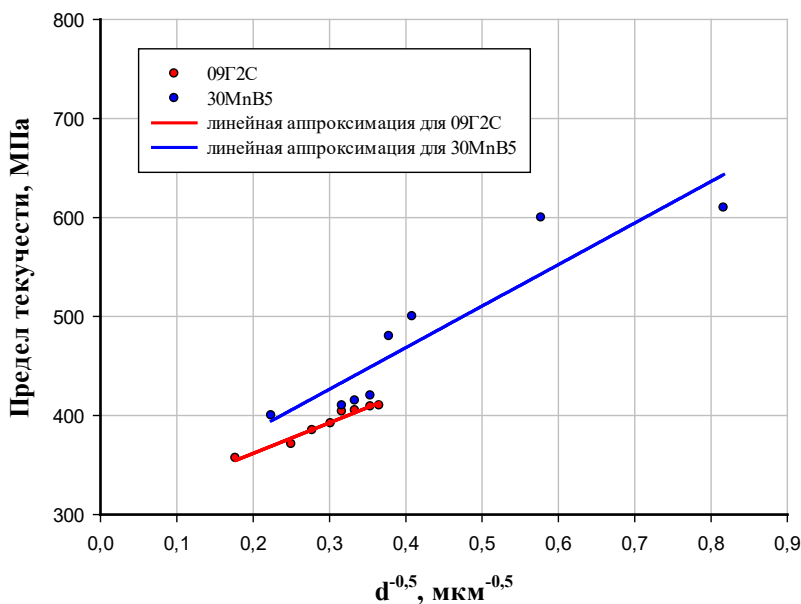
– общий вид для предела прочности:

$$\sigma_b = \sigma_b^0 + a_b N + b_b N^2.$$

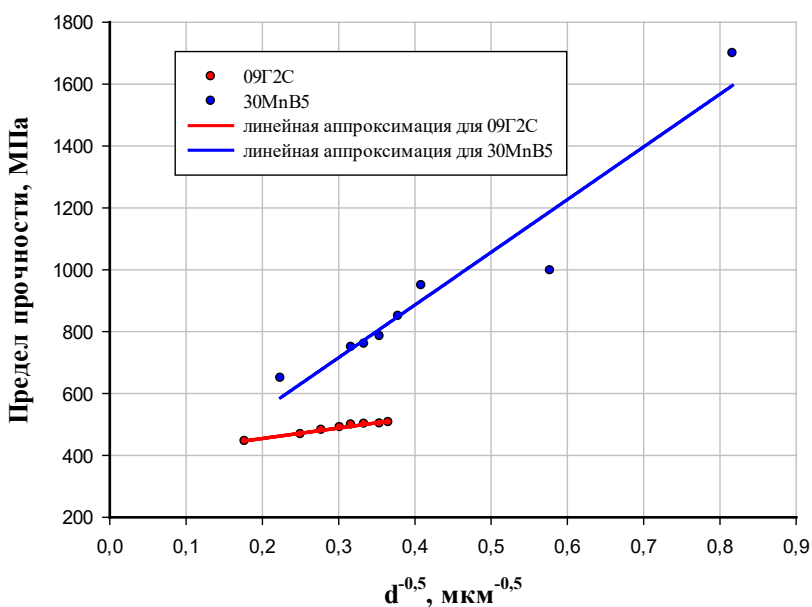
Коэффициенты, входящие в данные соотношения, имеют следующие численные значения:

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

$\sigma_b^0 = 451,83$ МПа; $a_b = 14,96$ МПа; $b_b = -0,98$ МПа; $R = 0,98$;



а



б

Рисунок 6 – Зависимости $\sigma_{0,2} = f(d^{-0,5})$ и $\sigma_b = f(d^{-0,5})$ Figure 6 – Dependences $\sigma_{0,2} = f(d^{-0,5})$ and $\sigma_b = f(d^{-0,5})$

– сталь 30MnB5: $\sigma_{0,2}^0 = 384,87$ МПа; $a_{0,2} = 20,55$ МПа; $b_{0,2} = 0,36$ МПа; $R = 0,95$; $\sigma_{0,2}^0 = 732,43$ 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. Данный вывод совпадает с результатом исследования зависимости среднего размера зерна от числа циклов. Необходимо отметить, что при дальнейшем увеличении числа циклов для стали 30MnB5, несмотря на явное стремление пределов текучести и прочности к дальнейшему росту при числе циклов больше 10, не следует ожидать существенно-го прироста. Зависимость среднего размера зерна d от количества N циклов термоциклической обработки для этой стали показывает, что параметр d достаточно близок к своему минимальному значению (см. рисунок 5).

Проверка выполнения соотношения Холла–Петча, которое связывает предел текучести и предел прочности поликристаллического материала с размером зерна дала следующие результаты. На рисунке 6 приведены зависимости $\sigma_{0,2} = f(d^{-0,5})$ (рисунок 6, а) и $\sigma_b = f(d^{-0,5})$ (рисунок 6, б).

Общий вид аппроксимационных зависимостей функций $\sigma_{0,2} = f(d^{-0,5})$ и $\sigma_b = f(d^{-0,5})$ следующий:

– общий вид: $\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}^0 + a_{0,2}d^{-0,5}$;
 $\sigma_b = \sigma_b^0 + a_b d^{-0,5}$;

– сталь 09Г2С: $\sigma_{0,2}^0 = 299,90$ МПа; $a_{0,2} = 309,11$ МПа·мкм^{0,5}; $R = 0,98$; $\sigma_b^0 = 387,05$ МПа; $a_b = 337,68$ МПа·мкм^{0,5}; $R = 0,99$;

– сталь 30MnB5: $\sigma_{0,2}^0 = 300,57$ МПа; $a_{0,2} = 419,89$ МПа·мкм^{0,5}; $R = 0,92$; $\sigma_b^0 = 204,91$ МПа; $a_b = 1703,59$ МПа·мкм^{0,5}; $R = 0,96$.

Зависимость предела текучести от размера зерна $\sigma_{0,2} = f(d^{-0,5})$ имеет линейный характер, что подтверждается достаточно высокими значениями коэффициента регрессии R . Следовательно, для данных материалов соотношение Холла–Петча выполняется. В [24, 25] сказано, что соотношение Холла–Петча справедливо и для твердости, величина которой связана со значением предела прочности. Линейный характер зависимости $\sigma_b = f(d^{-0,5})$, представленный на рисунке 6, б, подтверждает данное утверждение.

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. Существует 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. Иными словами, полученные данные свидетельствуют о выполнении соотношения Холла–Петча. Причем этот вывод относится как к пределу текучести, так и к пределу прочности.

Полученные корреляционные зависимости достаточно близки с экспериментальными результатами. Коэффициент корреляции для всех зависимостей лежит в пределах от 0,92 до 0,99.

Таким образом, сталь 30MnB5 с точки зрения эксплуатационных характеристик дорожно-строительных машин предпочтительнее стали 09Г2С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Рабочие механизмы строительных машин и способы технологического обеспечения прочности сварных соединений из высокопрочных сталей // Недвижимость: экономика, управление. 2020. № 1. С. 63–68.
2. Мухаметшина Р.М. Отказы дорожно-строительных машин по параметрам коррозии // Известия КазГАСУ. 2013. № 4 (26). С. 62–67.
3. Щербаков А.П. Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин // Вестник СибАДИ. 2020. № 17 (4). С. 464–475. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475>.
4. Щербаков А.П. Экспериментальные исследования влияния термической обработки на свойства сварных соединений рабочих механизмов дорожно-строительных машин // Вестник СибАДИ. 2020. №17(6). С. 664-675. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>.
5. Гордиенко В.Е., Трунова Е.В., Абросимова А.А., Шананина Н.В. Пассивный феррозондовый контроль длительно эксплуатируемых сварных металлоконструкций с коррозионными повреждениями // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 193–197.
6. I. Polyansky, I. Sizov, U. Mishigdorzhyn, 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. 116: 1-5.

7. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Трунова Е.В., Щербаков А.П. К выбору конструкционных сталей для изготовления сварных металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 233–238.

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

9. Березина А.А. Некоторые особенности оценки структурной и механической неоднородности сварных соединений металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 4 (51). С. 123–127.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

REFERENCES

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

2. Mukhametshina R.M. Otkazy dorozhno-stroitel'nyh mashin po parametram korrozii [Failures of road construction machines in terms of corrosion parameters]. *Izvestiya KazGASU. – News of the University*, 2013, no. 4 (26): 62–67. (In Russian)

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

4. Scherbakov A.P. Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya termicheskoy obrabotki na svoystva svarynyh 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>. (In Russian)

5. Gordienko V.E., Trunova E.V., Abrosimova A.A., Shananina N.V. Passivnyy ferrozondovyy kontrol'ditel'no ehkspluatiruemykh svanykh metallokonstruktsiy s korrozionnymi povrezhdeniyami [Passive ferrosonde monitoring of long-term operation of welded metal structures with corrosion damage]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 3 (56): 193–197. (In Russian)
6. Polyansky, I. Sizov, U. Mishigdorzhyn, 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.* 116: 1-5.
7. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V., Scherbakov A.P. K vyboru konstrukcionnyh staley dlya izgotovleniya svarnykh metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [To the choice of structural steels for the manufacture of welded metal structures of construction machines]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65): 233–238. (In Russian)
8. 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. 61:489–499.
9. Berezina A.A. Nekotorye osobennosti ocenki strukturnoj i mekhanicheskoy neodnorodnosti svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [Some features of evaluation of structural and mechanical heterogeneity of welded joints of metal structures of construction machines]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 4 (51): 123–127. (In Russian)
10. 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. (In Russian)
11. Prokhorov V.Yu., Bykov V.V. Puti povysheniya dolgovechnosti i iznosostojkosti podshipnika skol'zheniya navesnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [Ways to increase the durability and wear resistance of the sliding bearing of mounted technological equipment]. *NiKa*, 2017, 1: 71–74. (In Russian)
12. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V. Vliyanie termociklicheskoj obrabotki na strukturnye izmeneniya plasticheski deformirovannykh svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [Influence of thermocyclic processing on structural changes of plastically deformed welded joints of metal structures of construction machines]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, 2 (55): 174–180. (In Russian)
13. Bezlyudko G.Ya., Muzhitskiy V.F., Popov B.E. Magnitnyj kontrol' (po koercitivnoj sile) NDS i ostochnogo resursa stal'nykh MK [Magnetic control (by coercive force) VAT and residual resource of steel MK]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 1999, 9 (65): 53–57. (In Russian)
14. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Kuz'min O.V., Trunova E.V., Scherbakov A.P. Vliyanie termicheskoy i termociklicheskoj obrabotki na mekhanicheskie svojstva konstrukcionnyh staley [Influence of thermal and thermocyclic treatment on the mechanical properties of structural steels]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no.1 (66):128–133. (In Russian)
15. Zajtsev A.I. *Perspektivnye napravleniya razvitiya metallurgii i materialovedeniya stali* [Promising areas of development of metallurgy and materials science of steel]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii. – Journal of Iron and Steel. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2019, 75(4): 417–426. (In Russian)
16. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V., Korneeva E.A., Scherbakov A.P. Vliyanie strukturnykh parametrov konstrukcionnyh staley na rezul'taty ocenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarnykh metallokonstrukcij [Influence of structural parameters of structural steels on the results of stress-strain state assessment of welded metal structures]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, 6 (59): 194–199. (In Russian)
17. Morrison W. B. Superplasticity of low-alloy steels // *ASM Transactions Quarterly*, 1968, 61(3): 423–434.
18. Vedyakov I.I., Odesskiy P.D. *Sovremennyye otechestvennyye standarty i voprosy rasshireniya primeneniya metallicheskih konstrukcij v stroitel'stve* [Modern domestic standards and issues of expanding the use of metal structures in construction]. *Vestnik NIC "Stroitel'stvo" – Bulletin of SIC "Construction"*, 2019, 3 (22): 42–53. (In Russian)
19. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V. Vliyanie termociklicheskoj obrabotki na strukturnye izmeneniya plasticheski deformirovannykh svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'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. (In Russian)
20. Vedyakov I.I., Odesskiy P.D., Gurov S.V. Obespechenie prochnosti svarnykh soedinenij dlya unikal'nykh konstrukcij iz prokata bol'shih tolshchin povshennoj i vysokoj prochnosti [Ensuring the strength of welded joints for unique structures made of rolled products of large thicknesses increased and high strength]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij – Construction mechanics and calculation of structures*, 2018, 2 (277): 68–75. (In Russian)
21. Gustov Yu.I., Orekhov A.A. Issledovanie konstrukcionno-tekhnologicheskikh i ehkspluatacionnykh pokazatelej stroitel'noj tekhniki [Research of structural-technological and operational indicators of construction equipment]. *Izvestiya KazGASU – News of the University*, 2014, 4 (30):19–24. (In Russian)
22. Mukhametshina R.M. Влияние климатических факторов на свойства материалов и надежность дорожно-строительных машин [Influence of climat-

ic factors on the properties of materials and reliability of road construction machines]. *Izvestiya KazGASU – News of the University*, 2014, 4 (30): 102–108. (In Russian)

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

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

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

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Щербakov А.П. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследований, анализ результатов, обоснование и структурирование методики расчета (60%).

Пушкарев А.Е. Обзор основных направлений эксплуатации дорожно-строительных машин (20%).

Виноградова Т.В. Описание материалов и методов для расчета параметров конструкций (20%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Alexander P. Scherbakov – the research direction statement, goals and objectives statement, the research algorithm determination, analysis of results, justification and structuring of the calculation method (60%).

Alexandr E. Pushkarev – overview of the main directions of road construction machinery operation (20%).

Tamara V. Vinogradova – description of materials and methods for calculating structural parameters (20%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Щербakov Александр Павлович – аспирант, ORCID.org/0000-0002-2454-7751, Scopus Author ID 57212375284, Researcher ID AAP-8095-2020, accu-

стент кафедры судебных экспертиз ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4; тел. +79675912967; e-mail: shurbakov.aleksandr@yandex.ru).

Пушкарев Александр Евгеньевич – д-р техн. наук, ORCID.org/0000-0001-5546-015X, Scopus Author ID8290951800, Researcher ID E-4532-2019, проф. кафедры наземных транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4; e-mail: pushkarev-agn@mail.ru).

Виноградова Тамара Владимировна – канд. техн. наук, ORCID.org/0000-0001-8475-7155 доц. кафедры наземных транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4; e-mail: tvin-205@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Alexandr E. Pushkarev (Saint-Petersburg) – Dr. of Sci., ORCID.org/0000-0001-5546-015X, Scopus Author ID8290951800, Researcher ID E-4532-2019, Professor of the Technological Machines Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (190005, Saint-Petersburg, 4 Vtoraia Krasnoarmeiskaia st., e-mail: pushkarev-agn@mail.ru).

Tamara V. Vinogradova (Saint-Petersburg) – Cand. of Sci., Associate ORCID.org/0000-0001-8475-7155 Professor of the Technological Machines Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (190005, Saint-Petersburg, 4 Vtoraia Krasnoarmeiskaia st., e-mail: tvin-205@yandex.ru).