

УДК 620.178.167

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-55-64

Зависимости гидроабразивного износа низкоуглеродистых сталей струей воды с частицами SiO₂ от их механических свойств и углеродного эквивалента*

Д. В. Ляшенко, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

А. Д. Бреки, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

В. А. Яхимович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Е. Б. Седакова, доктор технических наук, Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Н. А. Казаринов, доктор физико-математических наук, Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Н. Е. Стариков, доктор технических наук, профессор, Тульский государственный университет, Тула, Россия

Как показывают данные нефтегазовых компаний, абразивный износ, обусловленный воздействием различных видов механических примесей, является причиной от 20 до 40 % отказов следующего важного оборудования: насосно-компрессорных труб, погружного оборудования и промышленных трубопроводов. В статье приведены полученные в результате экспериментальных исследований зависимости гидроабразивного износа низкоуглеродистых сталей струей воды с частицами SiO₂ от их механических свойств и углеродного эквивалента. Показано, что при увеличении предела текучести, прочности и твердости стали наблюдается нелинейное снижение гидроабразивного массового износа по гиперболическому закону в соответствии с принятой математической моделью. Полученные на основе выбранной математической модели уравнения регрессии оказались статистически значимыми, что говорит о справедливости данной модели. В результате проведенного исследования установлена зависимость гидроабразивного массового износа от углеродного эквивалента стали, которая имеет гиперболический характер. Полученные уравнения регрессии, отражающие указанную зависимость износа от углеродного эквивалента, оказались статистически значимыми. Реализовано дополнение посредством введения углеродного эквивалента стали, многофакторной математической модели зависимости гидроабразивного массового износа от плотностей компонентов среды, общего числа взаимодействий, приводящих к микро-разрезанию, радиуса абразивных частиц, угла их атаки и коэффициента трения между ними и атакуемой поверхностью, динамического давления смеси, плотности рабочей смеси жидкости и частиц, предела текучести материала. Установлено, что наименьший гидроабразивный массовый износ имеет образец стали опытной плавки, где имелось высокое содержание углерода и хрома, а также некоторое количество молибдена и ванадия.

Ключевые слова: гидроабразивный износ, предел текучести, предел прочности, твердость по Бринеллю, углеродный эквивалент стали, математическая модель.

По данным нефтегазовых компаний отказы насосно-компрессорных труб, погружного оборудования и промышленных трубопроводов по причине износа механическими примесями составляют от 20 до 40 % от общего числа отказов [1]. Твердые частицы, перемещаемые потоком жидкости или газа, вызывают изнашивание деталей насосов, гидротурбин, землесосов, энергетического оборудования, вентиляторов и многих других машин [2]. Процессы гидроабразивного изнашивания специфичны по комплексу факторов, влияющих на скорость разрушения по-

верхностного слоя. Закономерности этих сложных процессов выявляли различные исследователи [1–12].

Е. Ф. Непомнящим с позиции фрикционно-контактной усталости рассматривался процесс разрушения поверхности косым потоком твердых сферических частиц. Получены следующие теоретические соотношения для оценки износа поверхности под воздействием потока частиц [6, 7]:

а) при упругом контакте

$$M_w = \frac{15}{8} \rho_s (3\rho_r)^{\frac{m_\sigma}{5}} (v_0 \sin(\alpha))^{2+\frac{2m_\sigma}{5}} \left(\frac{kf}{3\sigma_b} \right)^{m_\sigma} \left[\frac{4E}{\pi(1-\mu^2)} \right]^{\frac{4m_\sigma-1}{5}} \xi(\varepsilon) \int_0^\varepsilon \frac{m_\sigma+3}{2} d\xi, \quad (1)$$

б) при пластическом контакте

$$M_w = \frac{\rho_s}{\sqrt{2}} \left(\frac{\rho_r}{3} \right)^{\frac{m_\sigma+1}{4}} \left(\frac{v_0 \sin(\alpha)}{\sqrt{c\sigma_s}} \right)^{\frac{m_\sigma+5}{2}} \left(\frac{2}{e_0} \sqrt{\frac{1+kf}{1-kf}} \right)^{m_\sigma} \xi(\varepsilon) \int_0^\varepsilon \frac{m_\sigma+3}{2} d\xi, \quad (2)$$

где ρ_s, ρ_r – плотность соответственно изнашиваемого материала и сферических частиц; v_0 – скорость соударения; α – угол атаки; m_σ – показатель кривой усталости; k, \bar{k} – коэффициенты пропорциональности; f – коэффициент трения; σ_b – предел прочности на разрыв; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; e_0 – исходная разрушающая деформация материала; $c\sigma_s = HB$ – твердость материала; σ_s – предел текучести; c – коэффициент несущей способности контактной поверхности [11,

$$M_w = 15,5\rho_s N_p k_c R^3 (\operatorname{ctg}(\alpha) - f) \left(K_T \sin(\alpha) \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}} \cdot \rho_r}{3c\sigma_s \rho_{\text{см}}}} \right)^{\frac{5}{2}}, \quad (3)$$

где N_p – общее число взаимодействий, приводящих к микрорезанию; $k_c = V_c/V_u$ – коэффициент стружкообразования (V_c – объем металла, удаленного в виде микростружки, V_u – теоретический объем царапины); R – радиус частицы, связанный со средним диаметром пятна касания при ударе и глубиной внедрения следующим образом [13]:

$$L = 2\sqrt{Rh}, \quad (4)$$

где L – средний диаметр пятна касания при ударе; h – глубина внедрения частицы; K_T – коэффициент, учитывающий условия взаимодействия в зоне контакта частица – тело; $P_{\text{дин}}$ – динамическое давление смеси; $\rho_{\text{см}}$ – плотность рабочей смеси жидкости и частиц.

Зависимость массового износа при гидроабразивном воздействии на материал от предела текучести с учетом (3) можно представить следующим образом:

$$M_w = k_{\sigma_s} \cdot \sigma_s^{-\frac{5}{4}}, \quad (5)$$

где k_{σ_s} – эмпирический коэффициент. С учетом сказанного выше $c\sigma_s = HB$ зависимость массового износа от твердости:

$$M_w = k_{HB} \cdot HB^{-\frac{5}{4}}, \quad (6)$$

где k_{HB} – эмпирический коэффициент. Поскольку с увеличением твердости предел прочности увеличивается для некоторых сталей линейно [14], то для таких сталей:

$$M_w = k_{\sigma_b} \cdot \sigma_b^{-\frac{5}{4}}, \quad (7)$$

где k_{σ_b} – эмпирический коэффициент. Следует отметить, что описанные механические характеристики сталей зависят от концентрации углерода и их углеродного эквивалента, который, как правило, определяется по формуле Дирдена и О’Нила [15]:

$$C_{eq} = \omega_C + \frac{\omega_{Mn}}{6} + \frac{(\omega_{Cr} + \omega_{Mo} + \omega_V)}{5} + \frac{\omega_{Ni} + \omega_{Cu}}{15}, \quad (8)$$

12]; ε – безразмерное внедрение частицы в материал плоскости; ξ – безразмерный путь скольжения частицы от момента касания до прекращения скольжения [7].

В работах [11, 12] при использовании методики Е.Ф. Непомнящего выведено уравнение для расчета съема металла при гидроабразивной обработке, которое может быть использовано и при определении массового износа вследствие гидроабразивного воздействия:

где $C_{eq}, \%$ – углеродный эквивалент, ω_C – массовая доля углерода, ω_{Mn} – массовая доля марганца, ω_{Cr} – массовая доля хрома, ω_{Mo} – массовая доля молибдена, ω_V – массовая доля ванадия, ω_{Ni} – массовая доля никеля, ω_{Cu} – массовая доля меди.

По мере повышения содержания углерода в стали и чугуна изменяются структура и их механические свойства. Прочность горячекатаной стали в нормализованном состоянии с увеличением содержания углерода повышается, а пластичность снижается (рис. 1) [16].

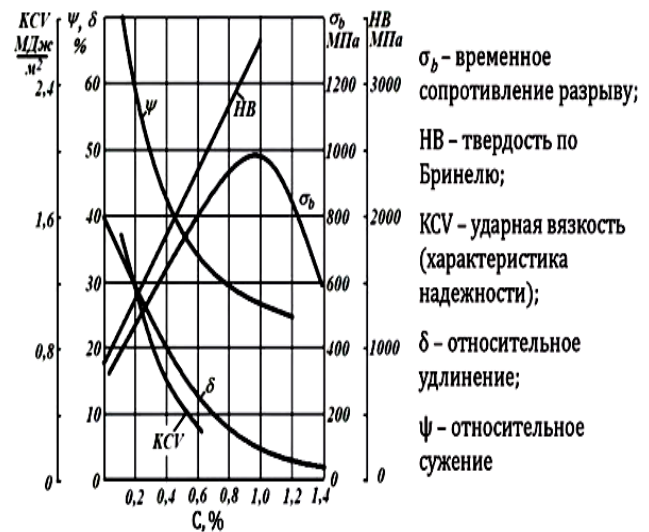


Рис. 1. Зависимость механических свойств стали от содержания углерода [16]

Fig. 1. Dependence of mechanical properties of steel on carbon content [16]

Из рис. 1 видно, что твердость линейно изменяется с ростом массовой доли углерода.

Как показано на рис. 2, максимальная твердость HAZ (зоны термического влияния) повышается по мере повышения углеродного эквивалента C_{eq} , что подтверждает сильное и прямое воздействие углерода на твердость [17].

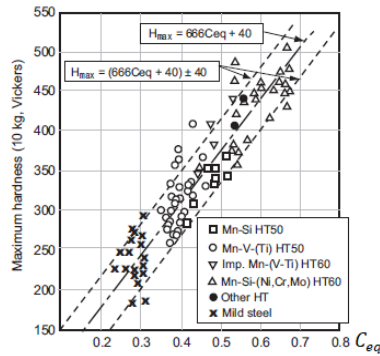


Рис. 2. Максимальная твердость HAZ и C_{eq} 20-миллиметровой пластины малоуглеродистой стали и высокопрочных сталей (валик, наплавленный на пластину с электродом D5016) [17]

Fig. 2. Maximum HAZ and C_{eq} hardness of a 20 mm plate of mild steel and high strength steels (Bead deposited on the plate with D5016 electrode) [17]

Другие элементы сплава также влияют на твердость, но в меньшей степени [17]. С учетом влияния других элементов положим, в границах данной работы, что твердость имеет линейную зависимость от углеродного эквивалента:

$$HB = HB_0 + k_{eqH} C_{eq}, \quad (9)$$

где HB_0 – значение твердости при $C_{eq} = 0$, k_{eqH} – размерный коэффициент, характеризующий «интенсивность роста» твердости при увеличении углеродного эквивалента. При этом положим, что массовый износ низкоуглеродистых сталей будет зависеть от углеродного эквивалента, тогда подставляя (9) в (6) получим следующее уравнение:

$$M_w = \frac{k_{HB}}{(HB_0 + k_{eqH} C_{eq})^{1.25}}. \quad (10)$$

Зависимости (5), (6), (7) и (10) верифицировались в границах данной работы для случая использования воды, не содержащей NaCl.

Методика исследования и материалы

В СПбПУ Петра Великого [18] разработан стенд для проведения испытаний на гидроабразивный износ.

Таблица 1. Химический состав сталей, взятых для исследований

Table 1. Chemical composition of steels taken for research

Параметр	S1 (ТЧЖ)	S2 (Сталь 1)	S3	S4	S5(13ХФА)	S6	S7	S8
C	0,025	0,06-0,12	0,06	0,243	0,11-0,17	0,168	0,17	0,234
Si	0,05	<0,1	0,32	0,364	0,17-0,37	0,354	0,363	0,27
Mn	0,035	0,25-0,5	1,16	1,216	0,4-0,65	1,002	1,03	1,09
P	0,015	<0,04	0,01	0,01	до 0,015	0,012	0,012	0,013
S	0,025	<0,05	0,002	0,012	до 0,015	0,017	0,017	0,02
Cr	0	<0,3	0,27	0,068	0,5-0,7	0,318	0,311	4,492
Mo	0	0	0,002	0	0	0	0	0,25
Ni	0	<0,3	0,44	0,015	до 0,25	0,02	0,018	0,158
Cu	0,055	<0,3	0,96	0,0073	до 0,25	0,218	0,0092	0,271
Al	0	0	0,043	0,007	0,02-0,05	0,053	0,028	0,058
Nb	0	0	0,029	0,0017	0	0,002	0,0026	0,014
Ti	0	0	0,022	0,0037	до 0,008	0,0021	0,0048	0,0024
V	0	0	0,045	0	0,04-0,09	0	0	0,1

Схема стенда для испытаний материалов на гидроабразивный износ представлена на рис. 3.

Данный стенд позволяет проводить испытания на гидроабразивный износ материалов в различных средах с добавлением абразивного материала. За счет постоянной циркуляции испытательной среды в системе достигается равномерное распределение частиц абразива в растворе. В процессе испытаний температура поддерживается постоянной при помощи термостата.

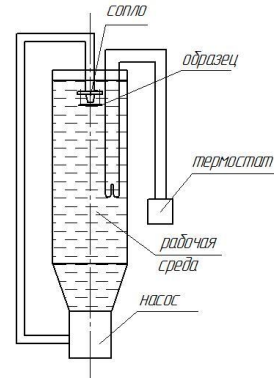


Рис. 3. Схема стенда для испытаний материалов на гидроабразивный износ

Fig. 3. Schematic diagram of a test bench for testing materials for hydroabrasive wear

Для проведения исследований были взяты 5 заготовок сталей опытных плавок, заготовки сталей марок 13ХФА и Сталь 1 серийного производства, а также заготовка технического чистого железа (ТЧЖ), которые использовались для сравнения по гидроабразивному износу. Геометрические размеры каждого образца составляли 24×24×7 мм. Каждый тип материала испытывается при концентрации 1 % абразива SiO₂ – речного песка фракции 0,4–0,8 мм. Объем испытательной среды составлял 25 л, диаметр сопла – 20 мм, расстояние от сопла до образца – 12 мм, средний угол атаки принимаем ≈89°, расход испытательной емкости – 7,5 м³/ч. Продолжительность одного испытания составляла 24 часа.

В табл. 1 представлен химический состав сталей, взятых для исследований.

Массовый износ M_w определялся как разность масс образца, определенных до и после испытаний. Оценка износа образца в результате испытаний происходила гравиметрическим методом.

Образцы взвешивались до и после испытаний. Взвешивание проводилось на аналитических весах САРТОГОСМ ЛВ 210А, дискретность отсчета которых составляет 0,1 мг.

На основании полученных результатов строились зависимости M_w от твердости, предела текучести, предела прочности и углеродного эквивалента.

На основании анализа диаграммы рассеяния и опыта предыдущих исследований формировали уравнение регрессии триботехнической характеристики Y по X (M_w по $HВ$, σ_s , σ_b) [19]. Параметры выбранного уравнения находили, применяя метод наименьших квадратов. На основании экспериментальных данных изображали диаграмму рассеяния и на ней строили график уравнения регрессии Y по X .

Для оценки тесноты связи в нелинейной регрессионной модели вычисляли индекс корреляции по формуле [19]:

$$R_{yx} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{xi})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_{xi})^2}}, \quad (11)$$

Таблица 2. Данные для регрессионного анализа

Table 2. Data for regression analysis

Параметр	$HВ$	$\sigma_s, МПа$	$\sigma_b, МПа$	$C_{eq}, \%$	$M_w, \text{г}$
S1 (ТЧЖ)	80	138	276	0,034167	1,4
S2 (сталь 1)	110	290	310	0,115	0,7
S3	131	600	730	0,410067	0,377
S4	133	477	676	0,460753	0,384
S5 (13ХФА)	210	353	502	0,404667	0,4797
S6	250	380	610	0,414467	0,5519
S7	310	445	590	0,40568	0,4632
S8	366	920	1050	1,412667	0,2521

На основании априорной информации, диаграммы рассеяния, опыта предыдущих исследований сформировали уравнение регрессии массового износа M_w по σ_s (5).

Параметры выбранного уравнения (5) находили, применяя метод наименьших квадратов:

$$M_w(\sigma_s) = \frac{825}{\sigma_s^{1,25}}. \quad (13)$$

По данным табл. 2 изображали диаграмму рассеяния и на ней строили график уравнения регрессии M_w по σ_s (рис. 4).

где R_{yx} – индекс корреляции; y_{xi} – теоретическое значение результирующего признака y (рассчитанное по уравнению регрессии); y_i – значение результирующего признака y ; \bar{y} – среднее арифметическое; R_{yx}^2 – коэффициент детерминации.

Для расчета R_{yx} составляли специальную вспомогательную таблицу. Оценивали значимость уравнения регрессии Y по X . Полученное уравнение регрессии значимо на уровне α , если фактически наблюдаемое значение статистики [19]:

$$F_{\text{exp}} = \frac{R_{yx}^2}{1 - R_{yx}^2} \cdot \frac{n_p - m_x - 1}{m_x} > F_{\alpha; k_1; k_2}, \quad (12)$$

где m_x – число параметров при переменной x . Фактическое значение F-критерия F_{exp} сравнивали с табличным при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $k_1 = m_x$ и $k_2 = n_p - m_x - 1$.

Результаты и их обсуждение

На основе полученных экспериментальных результатов реализовали выявление закономерностей изменения массового износа сталей вследствие гидроабразивного воздействия пресной воды с абразивом в зависимости от их механических свойств и углеродного эквивалента.

Данные для проведения регрессионного анализа приведены в сводной табл. 2.

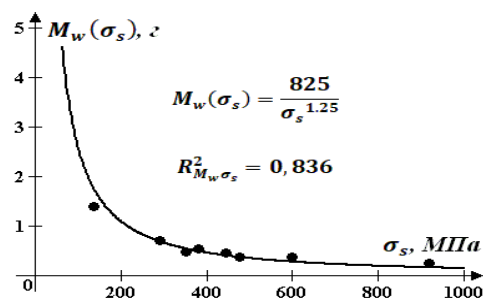


Рис. 4. Зависимость M_w от σ_s

Fig. 4. Dependence of M_w on σ_s

Для расчета $R_{M_w \sigma_s}$ и F-критерия составляли специальную вспомогательную таблицу (табл. 3).

Таблица 3. Таблица для расчета $R_{M_w\sigma_s}$ и F-критерияTable 3. Table for calculating $R_{M_w\sigma_s}$ and F-criterion

i	σ_{si}	M_{wi}	$M_w(\sigma_{si})$	$(M_{wi} - \bar{M}_w)^2$	$(M_{wi} - M_w(\sigma_{si}))^2$
1	138	1,4	1,744235	0,6789966	0,118497994
2	290	0,7	0,689376	0,0153791	0,00011286
3	600	0,377	0,277821	0,039596025	0,009836497
4	477	0,384	0,370089	0,0368592	0,000193521
5	353	0,4797	0,539182	0,009271283	0,003538135
6	380	0,5519	0,491727	0,000580208	0,003620736
7	445	0,4632	0,403649	0,01272102	0,003546316
8	920	0,2521	0,162824	0,104903113	0,007970154
Среднее		0,575988			
Сумма				0,898306549	0,147316213

Индекс корреляции между M_w и σ_s вычисляли по формуле (11):

$$R_{M_w\sigma_s} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_{wi} - M_w(\sigma_{si}))^2}{\sum_{i=1}^n (M_{wi} - \bar{M}_w)^2}} = 0,9143.$$

Значимость уравнения регрессии (13) проверяли с помощью критерия Фишера по формуле (12):

$$F_{\text{exp}} = \frac{0,9143^2}{1 - 0,9143^2} \cdot \frac{8 - 1 - 1}{1} \cong 30,6.$$

Фактическое значение F-критерия F_{exp} сравнивали с табличным при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $k_1 = 1$ и $k_2 = 6$. Табличное значение равно $F_{0,05;1;6} \cong 5,987$. Поскольку $F_{\text{exp}} > F_{0,05;1;6}$ то на уровне значимости 0,05 признается статистическая значимость уравнения регрессии в целом. Коэффициент детерминации $R_{M_w\sigma_s}^2 = 0,836$ показывает, что вариация гидроабразивного массового износа на 83,6% обусловлена регрессией или изменчивостью предела текучести стали.

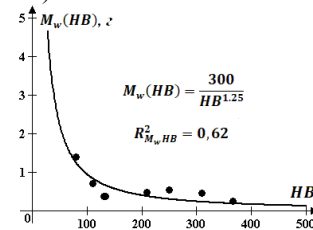
Соответственно, вариация массового гидроабразивного износа на 16,4 % обусловлена воздействием неучтенных в модели переменных, к которым отно-

сятся характеристики коррозионного воздействия среды и другие факторы.

Далее параметры выбранного уравнения (6) находили, применяя метод наименьших квадратов:

$$M_w(HB) = \frac{300}{HB^{1,25}}. \quad (14)$$

По данным табл. 2 изображали диаграмму рассеяния и на ней строили график уравнения регрессии M_w по HB (рис. 5).

Рис. 5. Зависимость M_w от HB Fig. 5. Dependence of M_w on HB

Для расчета R_{M_wHB} и F-критерия составляли специальную вспомогательную таблицу (табл. 4).

Таблица 4. Таблица для расчёта R_{M_wHB} и F-критерияTable 4. Table for calculating R_{M_wHB} and F-criterion

i	HB_i	M_{wi}	$M_w(HB_i)$	$(M_{wi} - \bar{M}_w)^2$	$(M_{wi} - M_w(HB_i))^2$
1	80	1,4	1,253888	0,6789966	0,021348696
2	110	0,7	0,842132	0,0153791	0,020201631
3	131	0,377	0,676912	0,03959603	0,089947135
4	133	0,384	0,664212	0,0368592	0,078518753
5	210	0,4797	0,375273	0,00927128	0,010905031
6	250	0,5519	0,301784	0,00058021	0,062558002
7	310	0,4632	0,230632	0,01272102	0,05408798
8	366	0,2521	0,1874	0,10490311	0,004186073
Среднее		0,575988			
Сумма				0,89830655	0,3417533

Индекс корреляции между M_w и HB вычисляли по формуле (11):

$$R_{M_w HB} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_p} (M_{wi} - M_w(HB_i))^2}{\sum_{i=1}^{n_p} (M_{wi} - \bar{M}_w)^2}} = 0,787.$$

Значимость уравнения регрессии (14) проверяли с помощью критерия Фишера по формуле (12):

$$F_{\text{exp}} = \frac{0,787^2}{1 - 0,787^2} \cdot \frac{8 - 1 - 1}{1} \cong 9,77.$$

Фактическое значение F-критерия F_{exp} сравнивали с табличным при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $k_1 = 1$ и $k_2 = 6$. Табличное значение равно $F_{0,05;1;6} \cong 5,987$. Поскольку $F_{\text{exp}} > F_{0,05;1;6}$, то на уровне значимости 0,05 признается статистическая значимость уравнения регрессии в целом. Коэффициент детерминации $R_{M_w HB}^2 = 0,62$ показывает, что вариация гидроабразивного массового износа на 62 % обусловлена регрессией или изменчивостью твердости стали. Соответственно, вариация массового гидроабразивного износа на 38 % обусловлена воздействием неучтенных в модели переменных, к которым относятся характеристики коррозионного воздействия среды и другие факторы.

Таблица 5. Таблица для расчета $R_{M_w \sigma_b}$ и F-критерия

Table 5. Table for calculating $R_{M_w \sigma_b}$ and F-criterion

i	σ_{bi}	M_{wi}	$M_w(\sigma_{bi})$	$(M_{wi} - \bar{M}_w)^2$	$(M_{wi} - M_w(\sigma_{bi}))^2$
1	276	1,4	1,177822	0,6789966	0,049363228
2	310	0,7	1,018624	0,0153791	0,101521039
3	730	0,377	0,34919	0,039596025	0,000773374
4	676	0,384	0,384399	0,0368592	1,59384E-07
5	502	0,4797	0,557617	0,009271283	0,006071104
6	610	0,5519	0,437073	0,000580208	0,013185331
7	590	0,4632	0,45567	0,01272102	5,66942E-05
8	1050	0,2521	0,221681	0,104903113	0,000925291
Среднее		0,575988			
Сумма				0,898306549	0,171896221

Индекс корреляции между M_w и σ_b вычисляли по формуле (11):

$$R_{M_w \sigma_b} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_p} (M_{wi} - M_w(\sigma_{bi}))^2}{\sum_{i=1}^{n_p} (M_{wi} - \bar{M}_w)^2}} = 0,8992.$$

Значимость уравнения регрессии (15) проверяли с помощью критерия Фишера по формуле (12):

$$F_{\text{exp}} = \frac{0,8992^2}{1 - 0,8992^2} \cdot \frac{8 - 1 - 1}{1} \cong 25,36.$$

На основании априорной информации диаграммы рассеяния, опыта предыдущих исследований, сформировали уравнение регрессии массового износа M_w по σ_b (7).

Параметры выбранного уравнения (7) находили, применяя метод наименьших квадратов:

$$M_w(\sigma_b) = \frac{1325}{\sigma_b^{1,25}}. \quad (15)$$

По данным табл. 2 изображали диаграмму рассеяния и на ней строили график уравнения регрессии M_w по σ_b (рис. 6).

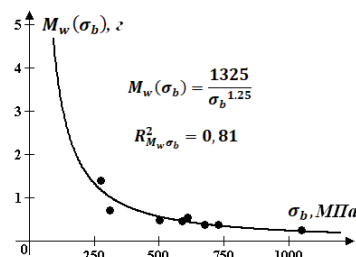


Рис. 6. Зависимость M_w от σ_b

Fig. 6. Dependence of M_w on σ_b

Для расчета $R_{M_w \sigma_b}$ и F-критерия составляли специальную вспомогательную таблицу (табл. 5).

Фактическое значение F-критерия F_{exp} сравнивали с табличным при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $k_1 = 1$ и $k_2 = 6$. Табличное значение равно $F_{0,05;1;6} \cong 5,987$. Поскольку $F_{\text{exp}} > F_{0,05;1;6}$, то на уровне значимости 0,05 признается статистическая значимость уравнения регрессии в целом.

Коэффициент детерминации $R_{M_w \sigma_b}^2 = 0,81$ показывает, что вариация гидроабразивного массового износа на 81 % обусловлена регрессией или изменчивостью предела прочности стали на разрыв. Соответственно, вариация гидроабразивного массового износа на 19 % обусловлена воздействием неучтенных в модели переменных, к которым относятся ха-

рактические характеристики коррозионного воздействия среды и другие факторы.

На основании априорной информации, диаграммы рассеяния, опыта предыдущих исследований сформировали уравнение регрессии массового износа M_w по C_{eq} (10).

Параметры выбранного уравнения (10) находили, применяя метод наименьших квадратов:

$$M_w(C_{eq}) = \frac{300}{(80 + 193C_{eq})^{1.25}} \quad (16)$$

По данным табл. 2 изображали диаграмму рассеяния и на ней строили график уравнения регрессии M_w по C_{eq} (рис. 7).

Таблица 6. Таблица для расчета $R_{M_w C_{eq}}$ и F-критерия

Table 6. Table for calculating $R_{M_w C_{eq}}$ and F-criterion

i	C_{eqi}	M_{wi}	$M_w(C_{eqi})$	$(M_{wi} - \bar{M}_w)^2$	$(M_{wi} - M_w(C_{eqi}))^2$
1	0,034167	1,4	1,135692	0,678997	0,069859
2	0,115	0,7	0,923282	0,015379	0,049855
3	0,410067	0,377	0,530747	0,039596	0,023638
4	0,460753	0,384	0,492609	0,036859	0,011796
5	0,404667	0,4797	0,535124	0,009271	0,003072
6	0,414467	0,5519	0,527228	0,00058	0,000609
7	0,40568	0,4632	0,534297	0,012721	0,005055
8	1,412667	0,2521	0,196313	0,104903	0,003112
Среднее		0,576			
Сумма				0,898307	0,166995

Индекс корреляции между M_w и C_{eq} вычисляли по формуле (11):

$$R_{M_w C_{eq}} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_p} (M_{wi} - M_w(C_{eqi}))^2}{\sum_{i=1}^{n_p} (M_{wi} - \bar{M}_w)^2}} = 0,9023.$$

Значимость уравнения регрессии (16) проверяли с помощью критерия Фишера по формуле (12):

$$F_{\text{exp}} = \frac{0,9023^2}{1 - 0,9023^2} \cdot \frac{8 - 1 - 1}{1} \cong 26,275.$$

Фактическое значение F-критерия F_{exp} сравнивали с табличным при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $k_1 = 1$ и $k_2 = 6$. Табличное значение равно $F_{0,05;1;6} \cong 5,987$. Поскольку $F_{\text{exp}} > F_{0,05;1;6}$ то на уровне значимости 0,05 признаётся статистическая значимость уравнения регрессии в целом. Коэффициент детерминации $R_{M_w C_{eq}}^2 = 0,814$ показывает, что вариация гидроабразивного массового износа на 81,4 % обусловлена регрессией или изменчивостью углеродного эквивалента стали. Соответственно, вариация массового гидроабразивного износа на 18,6 % обусловлена воздействием неучтенных в модели переменных, к которым относятся

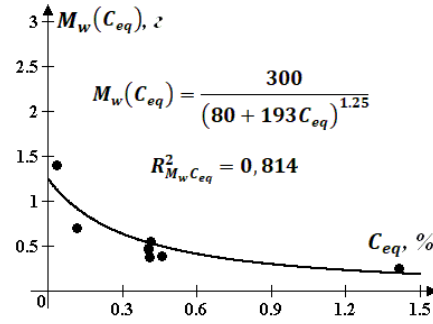


Рис. 7. Зависимость M_w от C_{eq}

Fig. 7. Dependence of M_w on C_{eq}

Для расчета $R_{M_w C_{eq}}$ и F-критерия составляли специальную вспомогательную таблицу (табл. 6).

характеристики коррозионного воздействия среды и другие факторы.

Таким образом, рассчитанные коэффициенты детерминации $R_{M_w \sigma_s}^2 = 0,836$, $R_{M_w HB}^2 = 0,62$, $R_{M_w \sigma_b}^2 = 0,81$ и $R_{M_w C_{eq}}^2 = 0,814$ показывает существенное влияние рассмотренных факторов на гидроабразивный износ, при этом следует отметить, что все они тесно взаимосвязаны между собой. В частности, выявление корреляционных связей между пределом текучести и твердостью, а также пределом прочности и твердостью позволило установить зависимости $\sigma_s \cong 0,2HB$ (коэффициент корреляции $\approx 0,6$) и $\sigma_b \cong 0,3HB$ (коэффициент корреляции $\approx 0,5$), что соответствует ряду экспериментальных данных.

Поскольку предел текучести линейно зависит от твердости, а твердость имеет линейную зависимость от углеродного эквивалента в соответствии с (9), то можно положить:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + k_{eq\sigma_s} C_{eq}, \quad (17)$$

где σ_{s0} — значение предела текучести при $C_{eq} = 0$, $k_{eq\sigma_s}$ — размерный коэффициент, характеризующий «интенсивность роста» предела текучести при увеличении углеродного эквивалента.

Подставляя (17) в (5), получим следующее уравнение:

$$M_w = \frac{k_{\sigma_s}}{(\sigma_{s0} + k_{eq\sigma_s} C_{eq})^{1.25}} \quad (18)$$

$$M_w = 15,5 \rho_s N_p k_c R^3 (\operatorname{ctg}(\alpha) - f) \left(K_T \sin(\alpha) \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}} \cdot \rho_r}{3c(\sigma_{s0} + k_{eq\sigma_s} C_{eq}) \rho_{\text{см}}}} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (19)$$

Математическая модель (19), помимо указанных факторов, учитывает влияние углеродного эквивалента стали на гидроабразивный массовый износ.

Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Сравнение экспериментальных сталей по химическому составу со сталью 13ХФА, применяемой для изготовления труб, позволяет отметить следующее:

– наиболее близка по составу заготовка S6, у которой несколько больше марганца и меньше хрома, а также практически отсутствует ванадий;

– в заготовке S7, кроме того, полностью отсутствует медь;

– заготовка S3 отличается пониженным содержанием углерода и наличием до 1 % меди;

– заготовка S4 имеет повышенную концентрацию углерода, при малом содержании хрома и отсутствии ванадия;

– наибольшее отличие наблюдается в заготовке S8, где имеется высокое содержание углерода и особенно хрома, а также некоторое количество молибдена и ванадия.

2. При увеличении предела текучести, прочности и твердости стали наблюдается нелинейное снижение гидроабразивного массового износа по гиперболическому закону в соответствии с принятой математической моделью. Полученные на основе выбранной математической модели уравнения регрессии оказались статистически значимыми, что говорит о справедливости данной модели.

3. В результате проведенного исследования установлена зависимость гидроабразивного массового износа от углеродного эквивалента стали, которая имеет гиперболический характер. Полученные уравнения регрессии, отражающие указанную зависимость износа от углеродного эквивалента, оказались статистически значимыми.

4. Реализовано дополнение посредством введения углеродного эквивалента стали, многофакторной математической модели зависимости гидроабразивного массового износа от плотностей компонентов среды, общего числа взаимодействий, приводящих к микрорезанию, радиуса абразивных частиц, угла их атаки и коэффициента трения между ними и атакуемой поверхностью, динамического давления смеси, плотности рабочей смеси жидкости и частиц, предела текучести материала.

5. Установлено, что наименьший гидроабразивный массовый износ имеет образец стали опытной

Плавки S8, где имелось высокое содержание углерода и хрома, а также некоторое количество молибдена и ванадия.

При аппроксимации экспериментальных данных с использованием (18) получено статистически значимое уравнение регрессии. Соответственно, подставляя (17) в исходное уравнение (3), получим:

Библиографические ссылки

1. *Наконечная К. В.* Гидроабразивное изнашивание промышленных трубопроводов коррозионно-активной промышленной средой : дис. ... канд. техн. наук. 2022. 126 с.
2. *Тененбаум М. М.* Сопротивление абразивному изнашиванию. М. : Машиностроение, 1976. 271 с.
3. *Гамольская З. М., Гутерман В. М.* Износостойкость сталей в условиях гидроабразивного износа // Труды ВНИИПТУГЛЕМАШ. Вып. 11. М. : Недра, 1966. С. 3–34.
4. *Козырев С. П.* Гидроабразивный износ металлов при кавитации. 2-е изд., испр. и доп. Москва : Машиностроение, 1971. 240 с.
5. *Тененбаум М. М., Аронов Э. Л.* О связи износостойкости материалов при гидроабразивном изнашивании с показателями их механических свойств // Труды ВИСХОМ. Вып. 56, 1969. С. 175–187.
6. *Непомнящий Е. Ф.* Трение и износ под воздействием струи твердых частиц // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа : сб. статей. М. : Наука, 1971. С. 190–200.
7. Повышение износостойкости горно-обогатительного оборудования / Н. С. Пенкин, Е. П. Капралов [и др.]; ред. Н. С. Пенкин. М. : Недра, 1992. 265 с.
8. *Елагина О. Ю., Наконечная К. В.* Оценка вероятности разгерметизации нефтепромысловых трубопроводов в результате коррозионно-механического изнашивания // Губкинский университет в экосистеме современного образования: Тезисы докладов V Региональной научно-технической конференции, Москва, 21 сентября 2021 года / авторы-составители: А. Ф. Максименко, А. Н. Комков, Р. Р. Фатхутдинов, отв. ред. В. Г. Мартынов. М. : Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, 2021. С. 123.
9. *Елагина О. Ю., Наконечная К. В.* Методика оценки ресурса промышленного трубопровода с внутренним покрытием, работающего в условиях гидроабразивного изнашивания // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2022. № 5 (131). С. 66–70.
10. *Наконечная К. В.* Исследование действия коррозионно-активной промышленной среды факторов гидроабразивного износа на вероятности разгерметизации промышленных трубопроводов // Нефть и газ – 2022 : тезисы докладов 76-й Международной молодежной научной конференции, Москва, 25–29 апреля 2022 года / Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина. Т. 1. М. : Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, 2022. С. 475–476.
11. *Тамаркин М. А., Тихонов А. А.* Методика расчета съема металла при гидроабразивной обработке // Вестник

Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11, № 3 (54). С. 327–332.

12. Тамаркин М. А., Тихонов А. А. Методика расчета установившейся шероховатости поверхности и сжима металла при гидроабразивной обработке // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 4-3 (288). С. 87–93.

13. Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел / Н. М. Михин; АН СССР, Науч. совет по трению и смазкам, Ин-т проблем механики. М.: Наука, 1977. 221 с.

14. Сорокин Г. М., Сорокин Г. М. Основы механического изнашивания сталей и сплавов: учебное пособие вузов. М.: Логос, 2014. 308 с.

15. Ginzburg V.B., Ballas R. Flat Rolling Fundamentals / CRC Press, 2000. 850 p.

16. Материаловедение: практикум: учеб. пособие / В.С. Кушнер, А.С. Верещака, А.Г. Схиртладзе, О.Ю. Бургонова. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 160 с.

17. Suzuki H., Tamura H. Welding Metallurgy. Complete Book of Welding-Series 1, Sanpo Publications Inc.

18. Ляшенко Д. В., Тарасенко Е. А. Теоретические основы современных способов повышения износостойкости и восстановления деталей машин. Оборудование для повышения износостойкости и восстановления деталей машин. Экспериментальные исследования на износостойкость материалов при гидроэрозионном изнашивании: лабораторный практикум. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/s18-113.pdf>. doi.org/10.18720/SPBPU/2/s18-113.

19. Яхимович В. А., Бреки А. Д., Стариков Н. Е. Зависимость интенсивности изнашивания от микротвердости покрытий на основе карбида вольфрама для алюминиевых буровых труб // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 481–487.

References

1. Nakonechnaya K.V. *Gidroabrazivnoe iznashivanie promyslovykh truboprovodov korrozionno-aktivnoj promyslovoj sredoj* [Wear of Field Pipelines in a Corrosive Field Environment]: PhD thesis. 2022. 126 p. (in Russ.).

2. Tenenbaum M.M. *Soprotivlenie abrazivnomu iznashivaniyu* [Abrasive Wear Resistance]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976. 271 p. (in Russ.).

3. Gamolskaya Z.M., Guterman V.M. *Iznosostojkost' staley v usloviyah gidroabrazivnogo iznosa* [Wear Resistance of Steels under Hydroabrasive Wear Conditions]. *Trudy VNIPTUGLEMASH* [Proceedings of VNIPTUGLEMASH], Issue 11, Moscow: Nedra, 1966, pp. 3-34 (in Russ.).

4. Kozyrev S.P. *Gidroabrazivnyj iznos metallov pri kavitatsii* [Hydroabrasive wear of metals during cavitation]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1971. 240 p. (in Russ.).

5. Tenenbaum M.M., Aronov E.L. *O svyazi iznosostojkosti materialov pri gidroabrazivnom iznashivani s pokazatelyami ih mekhanicheskikh svoystv* [On the relationship between the wear resistance of materials during hydroabrasive wear and the indices of their mechanical properties]. *Trudy VISHOM* [Proceedings of VISHOM], issue. 56, 1969, pp. 175 – 187 (in Russ.).

6. Nepomnyashchy E.F. *Trenie i iznos pod vozdeystviem strui tverdykh chastic* [Friction and wear under the influence of a jet of solid particles]. *Kontaknoe vzaimodeystvie tverdykh tel i raschet sil treniya i iznosa: sb. statej* [Contact interaction of solids and calculation of friction and wear forces: collection of articles]. Moscow: Nauka, 1971. Pp. 190-200 (in Russ.).

7. Penkin N.S., Kapralov E.P. [et al.]. *Povyshenie iznosostojkosti gorno-obogatitel'nogo oborudovaniya* [Improving the Wear Resistance of Mining and Processing Equipment]. Moscow: Nedra, 1992. 265 p. (in Russ.).

8. Elagina O.Yu., Nakonechnaya K.V. *Ocenka veroyatnosti razgermetizatsii neftepromyslovykh truboprovodov v rezul'tate korrozionno-mekhanicheskogo iznashivaniya* [Assessing the Probability of Depressurization of Oil Field Pipelines as a Result of Corrosion-Mechanical Wear]. *Gubkinskiy universitet v ekosisteme sovremennogo obrazovaniya: Tezisy dokladov V Regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Proc. Gubkin University in the Ecosystem of Modern Education: Abstracts of the V Regional Scientific and Technical Conference], Moscow, September 21, 2021 / Authors and compilers: A. F. Maksimenko, A. N. Komkov, R. R. Fatkhutdinov, ed. V. G. Martynov. - Moscow: Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkina, 2021. – P. 123 (in Russ.).

9. Elagina O.Yu., Nakonechnaya K.V. [Methodology for assessing the resource of a field pipeline with an internal coating operating under hydroabrasive wear conditions]. *Equipment and technologies for the oil and gas complex*. 2022. No. 5. Pp. 66-70 (in Russ.).

10. Nakonechnaya K.V. *Issledovanie dejstviya korrozionno-aktivnoj promyslovoj sredy faktorov gidroabrazivnogo iznosa na veroyatnosti razgermetizatsii promyslovykh truboprovodov* [Study of the effect of corrosive field environment of hydroabrasive wear factors on the probability of depressurization of field pipelines]. *Neft' i gaz – 2022: tezisy dokladov 76-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii* [Oil and Gas - 2022: abstracts of the 76th international youth scientific conference], Moscow, April 25-29, 2022. Vol. 1. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), 2022. Pp. 475-476 (in Russ.).

11. Tamarkin M.A., Tikhonov A.A. [Methodology for calculating metal removal during hydroabrasive machining]. *Bulletin of the Don State Technical University*. 2011. – Vol. 11, no. 3. Pp. 327-332 (in Russ.).

12. Tamarkin M.A., Tikhonov A.A. [Methodology for calculating steady-state surface roughness and metal removal during waterjet machining]. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2011. No. 4-3. Pp. 87-93 (in Russ.).

13. Mikhin N.M. *Vneshnee trenie tverdykh tel* [External Friction of Solids]. Moscow: Nauka, 1977. 221 p (in Russ.).

14. Sorokin G.M., Malyshev V.N. *Osnovy mekhanicheskogo iznashivaniya staley i splavov* [Fundamentals of Mechanical Wear of Steels and Alloys]: a textbook. Moscow: Logos, 2014. 308 p. (in Russ.).

15. Ginzburg V.B., Ballas R. Flat Rolling Fundamentals / CRC Press, 2000. 850 p.

16. Kushner V.S., Vereshchaka A.S., Skhirtladze A.G., Burgonova O.Yu. *Materialovedenie: praktikum* [Materials Science: A Practical Handbook]: A Textbook. Omsk: OmskGTU Publishing House, 2011. 160 p. (in Russ.).

17. Suzuki H., Tamura H. Welding Metallurgy. Complete Book of Welding-Series 1, Sanpo Publications Inc.

18. Lyashenko D.V., Tarasenko E.A. [Theoretical Foundations of Modern Methods for Improving Wear Resistance and Restoring Machine Parts. Equipment for Improving Wear Resistance and Restoring Machine Parts]. *Experimental Studies on the Wear Resistance of Materials under Hydroerosive Wear* [Electronic Resource]: A Laboratory Handbook. Available at: URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/s18-113.pdf>. Doi.org/10.18720/SPB-PU/2/s18-113. (in Russ.)

19. Yakhimovich V.A., Breki A. D., Starikov N.E. [Dependence of wear intensity on microhardness of tungsten carbide-based coatings for aluminum drill pipes]. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2024. No. 4. Pp. 481-487 (in Russ.).

Dependences of Hydroabrasive Wear of Low-Carbon Steels By a Water Jet With SiO₂ Particles on Their Mechanical Properties and Carbon Equivalent

D. V. Lyashenko, Post-graduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

A. D. Breki, DSc in Engineering, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

V. A. Yakhimovich, PhD in Engineering, Senior Researcher, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

E. B. Sedakova, DSc in Engineering, Head of the Laboratory, Institute of Machine Science Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

N. A. Kazarinov, Doctor of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Machine Science Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

N. E. Starikov, DSc in Engineering, Professor, Head of the Military Training Center, Tula State University, Tula, Russia

According to data from oil and gas companies, abrasive wear caused by various types of mechanical impurities accounts for 20 to 40 percent of failures of critical equipment, including tubing, submersible equipment, and production pipelines. This article presents experimental studies of the dependence of hydroabrasive wear on low-carbon steels by a water jet containing SiO₂ particles on their mechanical properties and carbon equivalent. It is shown that increasing yield strength, strength, and hardness of the steel, a nonlinear decrease in hydroabrasive mass wear is observed according to a hyperbolic law, consistent with the adopted mathematical model. The regression equations, obtained based on the selected mathematical model, were statistically significant, indicating the validity of this model. The study established a hyperbolic relationship between hydroabrasive mass wear and the carbon equivalent of steel. The resulting regression equations, reflecting this relationship between wear and carbon equivalent, were statistically significant. By introducing the carbon equivalent of steel, a multivariate mathematical model was supplemented to reflect the relationship between hydroabrasive mass wear and the densities of the medium components, the total number of interactions leading to micro cutting, the radius of the abrasive particles, their attack angle, the friction coefficient between them and the target surface, the mixed dynamic pressure, the density of the working fluid and particle mixture, and the yield strength of the material. It was found that the lowest hydroabrasive mass wear was observed in the steel sample from the pilot smelting with high content of carbon and chromium, as well as a certain amount of molybdenum and vanadium.

Keywords: hydroabrasive wear, yield strength, tensile strength, Brinell hardness, carbon equivalent of steel, mathematical model.

Получено: 01.12.25

Образец цитирования

Зависимости гидроабразивного износа низкоуглеродистых сталей струей воды с частицами SiO₂ от их механических свойств и углеродного эквивалента / Д. В. Ляшенко, А. Д. Бреки, В. А. Яхимович, Е. Б. Седакова, Н. А. Казаринов, Н. Е. Стариков // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 4. С. 55–64. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-55-64.

For Citation

Lyashenko D.V., Breki A.D., Yakhimovich V.A., Sedakova E.B., Kazarinov N.A., Starikov N.E. [Dependences of hydroabrasive wear of low-carbon steels by a water jet with SiO₂ particles on their mechanical properties and carbon equivalent]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 55-64 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-55-64.