

**В.В. Трубников, В.А. Марков, С.В. Ганин, С.А. Блинов,
А.М. Левитский, А.В. Трофимов, И.А. Зверев**

АНАЛИЗ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН

Введение. Защита металла от коррозии – важнейшая задача для современной лесной промышленности, что связано, в первую очередь, с суровыми условиями эксплуатации техники. Отслоение краски от корпусных и несущих элементов, повышенная влажность, абразивное воздействие и перемены температуры окружающей среды являются основными причинами появления коррозии. Совокупное воздействие перечисленных факторов ведет к интенсивным окислительным реакциям, вызывающим разрушение металла. Решением может служить как создание нового коррозионностойкого материала, так и нанесение защитных покрытий на уже существующие. Ввиду того, что для каждой задачи требуется свой материал, нанесение защитных покрытий выглядит перспективнее и экономически целесообразнее.

Существует множество способов нанесения покрытий, однако из всех вариантов предпочтительными являются те, которые не оказывают термического воздействия на материал изделия, например холодное газодинамическое напыление (ХГДН) [Katanoda et al., 2007]. Технология реализуется в двух вариантах: ХГДН с высоким давлением (для менее пластичных металлов) и ХГДН с низким давлением (для пластичных металлов [Katanoda et al., 2007; Li et al., 2007; Lee et al., 2009; De Force et al., 2011; Koh et al., 2012; Champagne, Helfritch, 2016]).

Суть метода заключается в использовании кинетической энергии частиц при соударении их с подложкой, при этом частицы не расплавляются, а налипают на материал [Алхимов и др., 2000; Алхимов и др., 2010; Assadi et al., 2003; Jodoin et al., 2006; King et al., 2010; Ghelichi et al., 2011]. Формируется сплошное, беспористое покрытие [Li et al., 2009, 2014; Rahmati, Ghaei, 2014].

Материалы и методика исследования. Для нанесения коррозионностойких порошковых покрытий было изготовлено 32 образца размером 100×20×3 мм из стали марки СтЗсп. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Для нанесения на образцы защитных покрытий использовалась установка ХГДН с низким давлением «Димет-405» (рис. 1), активно используемая в промышленности и научно-исследовательских работах [Балданов и др., 2019; Павлов, 2023].

Таблица 1

Химический состав стали марки СтЗсп
Chemical composition of steel grade СтЗсп

Содержание элементов, масс. %							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,165	0,205	0,410	0,006	0,004	0,032	0,040	0,011



Рис. 1. Установка холодного газодинамического напыления с низким давлением «Димет-405»

Fig. 1. Low-pressure cold gas dynamic spraying unit «Dimet-405»

При проведении исследования применялись 4 вида покрытия, нанесенные порошками фирмы «Димет» на основе: меди – С-01-01; цинка – Z-00-11; никеля – N3-00-02; алюминия с добавлением цинка – А-80-13. В литературе встречаются данные, что при использовании смеси алюминиевого и цинкового порошков стойкость к коррозии возрастает в разы [Герашенков, 2011]. Добавление Al_2O_3 в смесь для ХГДН повышает адгезию и помогает в формировании более плотного и сплошного покрытия [Schmidt et al., 2009]. В состав представленных смесей помимо основного металла также включён электрокорунд.

Для определения формы и размеров частиц порошков проведен морфологический анализ с использованием сканирующего электронного микроскопа ZeissSupra 55VP. Съемку проводили с применением детектора SE и увеличением 1510 крат. С целью оценки распределения частиц порошков по размеру контролировался гранулометрический состав (лазерный грануломер FritschAnalysette 22 NanoTecplus).

Результаты анализов приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Морфология частиц (увеличение $\times 1.5K$)
Morphology of particles (magnification $\times 1.5K$)

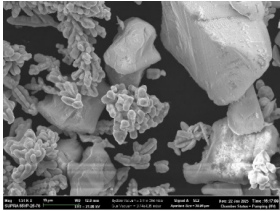
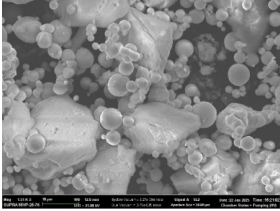
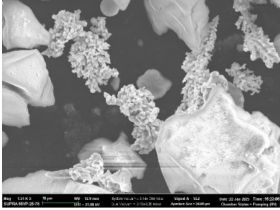
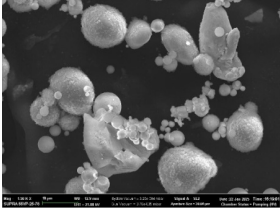
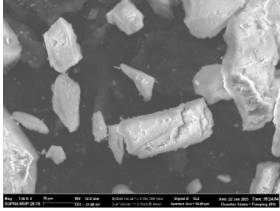
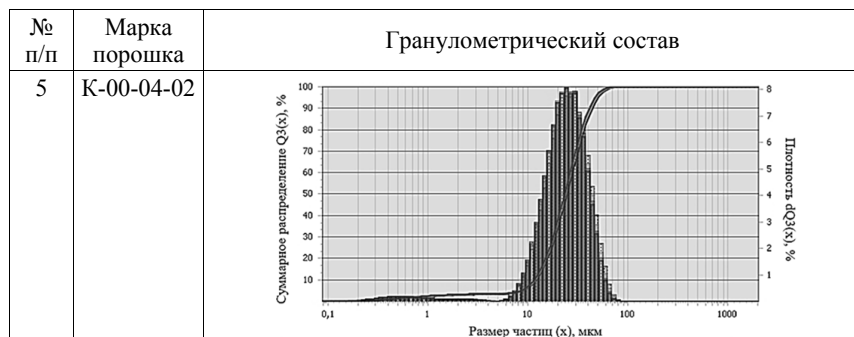
№ п/п	Марка порошка	Фото частиц	Форма частиц
1	C-01-01		Дендритная (частицы меди)/ осколочная (частицы корунда)
2	Z-00-11		Сферическая (частицы цинка)/ осколочная (частицы корунда)
3	N3-00-02		Дендритная (частицы никеля)/ осколочная (частицы корунда)
4	A-80-13		Сферическая (частицы алюминия и цинка)/ осколочная (частицы корунда)
5	K-00-04-02		Осколочная (частицы корунда)

Таблица 3

Гранулометрический состав порошков
Granulometric composition of powders

№ п/п	Марка порошка	Гранулометрический состав
1	С-01-01	
2	Z-00-11	
3	N3-00-02	
4	А-80-13	

Окончание табл. 3



Изготовленные образцы обезжиривались, после чего помещались в камеру, оснащенную вытяжной системой Циклон. При помощи установки «Димет-405» производилась абразивная обработка поверхностей порошком электрокорунда K-00-04-02 с целью придания образцам необходимой шероховатости ($Ra = 1,534$ мкм). Нанесение покрытий осуществлялось по режимам, рекомендованным производителем, с помощью регулятора мощности нагревателя и регулятора скорости подачи материала.

Параметры процесса нанесения покрытий отображены в табл. 4. Обработанные образцы представлены на рис. 2.

Таблица 4

Технологические режимы нанесения покрытий

Technological modes of coating application

Материал покрытия	Порошок, используемый для покрытия	Температурный режим	Режим расхода порошка
Cu	C-01-01	3	6
Zn	Z-00-11	3	6
Ni	N3-00-02	5	6
Al, Zn	A-80-13	3	6

Изготовленные образцы были подвергнуты коррозионным испытаниям в трех различных агрессивных средах: нейтральном соляном тумане, морской воде и нейтральном соляном тумане – воздухе.

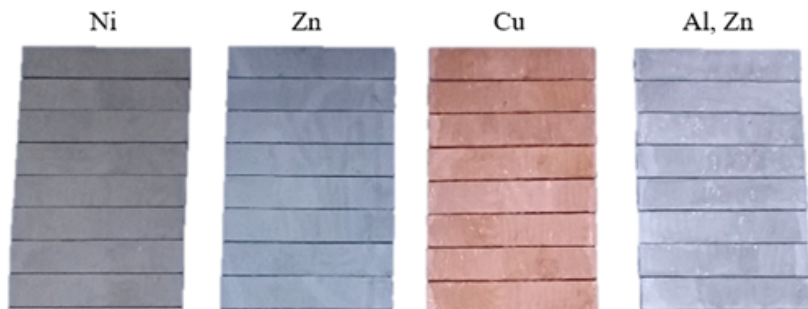


Рис. 2. Общий вид изготовленных образцов вида СтЗсп + ХГДН

Fig. 2. General view of the manufactured samples СтЗсп + CGDS

Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана. Ускорение коррозионного процесса обеспечивается повышением температуры окружающей среды и введением в атмосферу раствора хлористого натрия в концентрации 50 ± 1 г/дм³. Режим для распыления соляного тумана – 5 минут распыления тумана каждые 15 минут. Продолжительность испытания – 720 ч. Температура испытания – 35 ± 5 °С.

Циклические испытания: нейтральный соляной туман – воздух. Самыми опасными являются условия воздействия, при которых наблюдается постоянная смена электролита. Например, на причальных сооружениях, в зоне переменного уровня воды, наблюдается больший уровень коррозии, чем в части, постоянно находящейся под водой. Наиболее показательным является циклическое испытание, сущность которого заключается в ускорении коррозионного процесса повышением температуры окружающей среды с введением в атмосферу раствора хлористого натрия концентрацией 50 ± 1 г/дм³ и сушкой при нормальных условиях. Режим для распыления соляного тумана – 5 минут распыления тумана каждые 15 минут. Температура испытания – 35 ± 5 °С. Каждые 3 дня образцы извлекались из камеры и располагались на подставках до полного высыхания влаги. Продолжительность испытания – 720 ч.

Испытания в морской воде. Испытание в морской воде заключается в экспонировании образцов в морской воде (3%-й р-р NaCl) с последующей оценкой их коррозионной стойкости. Образцы погружаются в ванну с морской водой. Продолжительность испытания – 720 ч.

Лучшее покрытие определялось по результатам коррозионных испытаний и металлографического анализа.

Результаты исследования. После проведения коррозионных испытаний первоначально осуществлялся визуальный контроль масштабов коррозионного поражения металла с целью предварительной оценки эффектив-

ности используемых покрытий. На рис. 3 показаны образцы после проведения коррозионных испытаний.

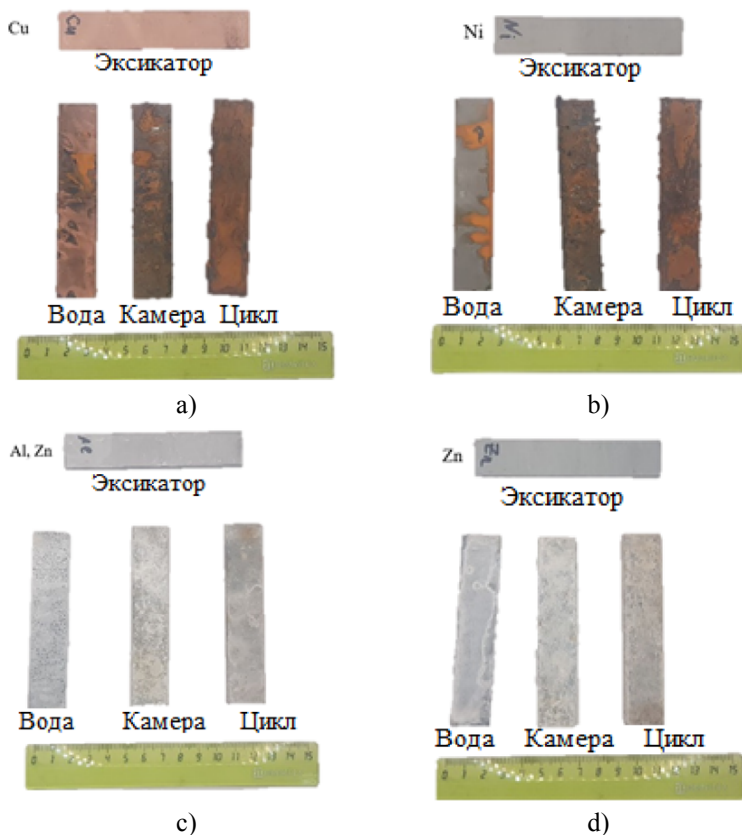


Рис. 3. Общий вид образцов:

а – образцы Ст3 + ХГДН С-01-01; б – образцы Ст3 + ХГДН N3-00-02;
 с – образцы Ст3 + ХГДН А-80-13; д – образцы Ст3 + ХГДН Z-00-11

Fig. 3. General view of the samples:

а – samples Ст3 + CGDS C-01-01; б – samples Ст3 + CGDS N3-00-02;
 с – samples Ст3 + CGDS A-80-13; д – samples Ст3 + CGDS Z-00-11

Макроанализ образцов показал, что наилучшей коррозионной стойкостью обладают образцы с покрытием на основе цинка (Z-00-11) и алюминия с цинком (А-80-13). Образцы с покрытием на основе меди (С-01-01) и никеля (N3-00-02) отличаются гораздо более существенным коррозионным разрушением вплоть до частичного отслоения покрытия.

Для определения наиболее эффективного защитного покрытия производились замеры массы образцов до (m_0) и после (m_1) проведения коррозионных испытаний (для каждого из трех видов). Определялись значения коррозионных потерь M (1):

$$M = \frac{m_0 - m_1}{A}, \text{ г/см}^2, \quad (1)$$

где A – площадь образца, см^2 .

Результаты расчета коррозионных потерь представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты определения коррозионных потерь исследуемых образцов

Results of determination of corrosion losses of the studied samples

№ обр.	Тип покрытия	Коррозионные потери ($\Delta m / A$), г/см ²		
		Соляной туман	Соляной туман – воздух	Морская вода
1	Без покрытия	$25,89 \cdot 10^{-5}$	$26,93 \cdot 10^{-5}$	$2,18 \cdot 10^{-5}$
2		$20,34 \cdot 10^{-5}$	$31,48 \cdot 10^{-5}$	$2,46 \cdot 10^{-5}$
3		$22,76 \cdot 10^{-5}$	$29,72 \cdot 10^{-5}$	$3,15 \cdot 10^{-5}$
4		$28,91 \cdot 10^{-5}$	$27,84 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-5}$
5		$26,47 \cdot 10^{-5}$	$30,49 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-5}$
6	Ni	$3,57 \cdot 10^{-5}$	$14,78 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-5}$
7		$6,86 \cdot 10^{-5}$	$16,56 \cdot 10^{-5}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$
8		$11,73 \cdot 10^{-5}$	$20,64 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-5}$
9		$9,67 \cdot 10^{-5}$	$18,88 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$
10		$8,15 \cdot 10^{-5}$	$17,71 \cdot 10^{-5}$	$0,94 \cdot 10^{-5}$
11	Zn	$2,72 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$
12		$4,95 \cdot 10^{-5}$	$4,88 \cdot 10^{-5}$	$0,95 \cdot 10^{-5}$
13		$3,49 \cdot 10^{-5}$	$4,06 \cdot 10^{-5}$	$0,88 \cdot 10^{-5}$
14		$4,33 \cdot 10^{-5}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$
15		$3,58 \cdot 10^{-5}$	$4,72 \cdot 10^{-5}$	$1,95 \cdot 10^{-5}$
16	Cu	$8,34 \cdot 10^{-5}$	$15,51 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
17		$7,73 \cdot 10^{-5}$	$17,74 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-5}$
18		$10,72 \cdot 10^{-5}$	$21,77 \cdot 10^{-5}$	$1,87 \cdot 10^{-5}$
19		$9,57 \cdot 10^{-5}$	$19,36 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-5}$
20		$11,88 \cdot 10^{-5}$	$20,48 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-5}$
21	Al, Zn	$2,96 \cdot 10^{-5}$	$2,74 \cdot 10^{-5}$	$0,71 \cdot 10^{-5}$
22		$3,36 \cdot 10^{-5}$	$3,24 \cdot 10^{-5}$	$0,85 \cdot 10^{-5}$
23		$2,24 \cdot 10^{-5}$	$3,15 \cdot 10^{-5}$	$0,58 \cdot 10^{-5}$
24		$2,66 \cdot 10^{-5}$	$2,84 \cdot 10^{-5}$	$0,67 \cdot 10^{-5}$
25		$3,25 \cdot 10^{-5}$	$3,11 \cdot 10^{-5}$	$0,92 \cdot 10^{-5}$

По полученным значениям коррозионных потерь массы образцов была проведена статистическая обработка данных, согласно методике, изложенной в ГОСТ 9.502-82. Результаты статистической обработки приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты статистической обработки результатов коррозионных испытаний**Results of statistical processing of corrosion tests results**

Тип покрытия	Вид испытания	Статистические показатели						
		$\bar{x}$	σ_n	E	$\sigma_{\bar{x}}$	$\pm\Delta x$	Z	ΔZ
Без покрытия	Соляной туман	24,874	3,354	13,5	1,5	3,19	—	—
	Соляной туман – воздух	29,292	1,877	6,4	0,84	1,79	—	—
	Морская вода	2,644	0,375	14,2	0,17	0,36	—	—
Ni	Соляной туман	7,996	3,068	38,4	1,37	2,92	67,8	12,5
	Соляной туман – воздух	17,714	2,228	12,5	0,99	2,12	39,5	8,1
	Морская вода	1,438	0,325	22,6	0,15	0,31	45,6	13,8
Zn	Соляной туман	3,814	0,853	22,4	0,38	0,81	86,9	2,9
	Соляной туман – воздух	4,220	0,555	13,1	0,25	0,53	83,0	3,0
	Морская вода	1,168	0,442	37,8	0,19	0,42	55,8	17,0
Cu	Соляной туман	9,648	1,697	17,6	0,76	1,62	61,2	8,2
	Соляной туман – воздух	18,972	2,437	12,8	1,09	2,32	35,23	8,8
	Морская вода	1,714	0,188	10,9	0,08	0,18	35,17	11,1
Al, Zn	Соляной туман	2,894	0,455	15,7	0,20	0,43	88,4	2,3
	Соляной туман – воздух	3,016	0,214	7,1	0,09	0,20	89,7	0,9
	Морская вода	0,746	0,137	18,4	0,06	0,13	71,8	6,3

Примечание: $\bar{x}$ – среднеарифметическое значение коррозионных потерь; σ_n – среднеквадратичное отклонение отдельного измерения; E – коэффициент вариации; $\sigma_{\bar{x}}$ – среднеквадратичное отклонение среднеарифметического значения; $\pm\Delta x$ – доверительные границы; Z – защитная способность покрытия; ΔZ – точность определения защитной способности покрытия

Из результатов статистической обработки видно, что все четыре типа рассматриваемых покрытий способствуют защите металла от коррозии. Например, при испытании в нейтральном соляном тумане среднеарифме-

тическое значение коррозионных потерь образцов без покрытия составило $29,292 \cdot 10^{-5}$ г/см², а у образцов с нанесенным защитным слоем оно находится в диапазоне $3,016 \dots 18,972 \cdot 10^{-5}$ г/см².

Результаты статистической обработки результатов коррозионных испытаний показали, что наилучшей защитной способностью обладают покрытия на основе цинка (Z-00-11) и алюминия с цинком (А-80-13). При этом покрытие А-80-13 обладает несколько большей защитной способностью.

Для определения лучшего из двух наиболее эффективных покрытий воспользуемся методом сравнения средних с использованием квантилей распределения Стьюдента. Учитывая, что наибольшие коррозионные потери отмечаются в результате циклических испытаний, то расчет произведем для этого их вида.

Расчетное значение критерия Стьюдента составит (2):

$$t_{\text{расч}} = \frac{\bar{x}_{\text{Zn}} - \bar{x}_{\text{Al, Zn}}}{\sqrt{\frac{\sigma_{n\text{Zn}}^2}{n} + \frac{\sigma_{n\text{Al, Zn}}^2}{n}}} = \frac{4,220 - 3,016}{\sqrt{\frac{0,555^2}{5} + \frac{0,214^2}{5}}} = 4,526. \quad (2)$$

Число степеней свободы равно (3):

$$f = \frac{\left(\frac{\sigma_{n\text{Zn}}^2}{n} + \frac{\sigma_{n\text{Al, Zn}}^2}{n} \right)^2}{\frac{\left(\frac{\sigma_{n\text{Zn}}^2}{n} \right)^2}{n+1} + \frac{\left(\frac{\sigma_{n\text{Al, Zn}}^2}{n} \right)^2}{n+1}} - 2 = \frac{\left(\frac{0,555^2}{5} + \frac{0,214^2}{5} \right)^2}{\frac{\left(\frac{0,555^2}{5} \right)^2}{6} + \frac{\left(\frac{0,214^2}{5} \right)^2}{6}} - 2 = 5,8. \quad (3)$$

Табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы $f = 5$ и уровне значимости $p = 0,05$ составляет $t_{\text{табл.}} = 2,571$.

$$t_{\text{расч.}} = 4,526 > t_{\text{табл.}} = 2,571.$$

Разница между защитными покрытиями А-80-13 и Z-00-11 является статистически значимой. Наилучшей защитной способностью обладает покрытие на основе алюминия с цинком.

Помимо статистической обработки экспериментальных данных коррозионных испытаний был проведен металлографический анализ. Шлифовка и полировка образцов проводилась на установке SAPHIR 560 с использованием шлифовальных бумаг и полировальных алмазных суспензий. Металлографический анализ образцов производился на микроскопе Leica DMI 5000, оснащенный системой анализа изображений Thixomet. Результаты металлографического исследования представлены в табл. 7–10.

Таблица 7

Результаты металлографического анализа образцов с медным покрытием

Results of metallographic analysis of copper-coated samples

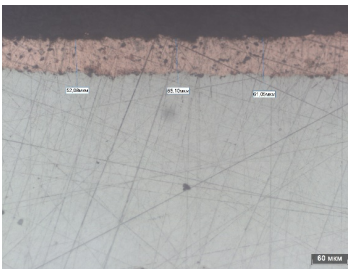
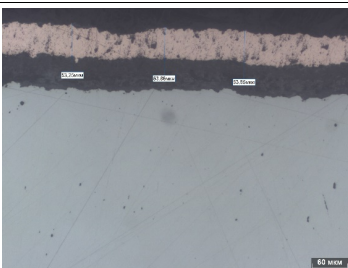
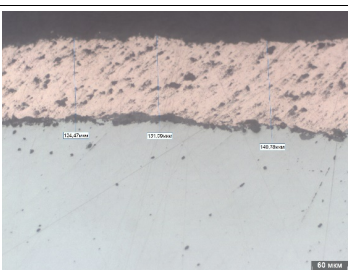
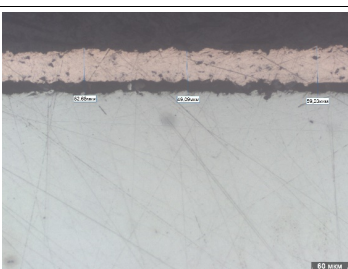
Исходный образец		Средняя толщина слоя составила 56,08 мкм. Покрyтие нанесено равномерно.
Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана		Средняя толщина слоя составила 53,65 мкм. Под покрытием наблюдается слой окислов. Это указывает на наличие сквозных дефектов в покрытии.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воздух»		Средняя толщина слоя составила 132,11 мкм. Под покрытием наблюдается слой окислов. Это указывает на наличие сквозных дефектов в покрытии.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя составила 53,66 мкм. Под покрытием наблюдается равномерный слой окислов. Причина его образования – несплошность покрытия.

Таблица 8

Результаты металлографического анализа образцов с цинковым покрытием

Results of metallographic analysis of zinc-coated samples

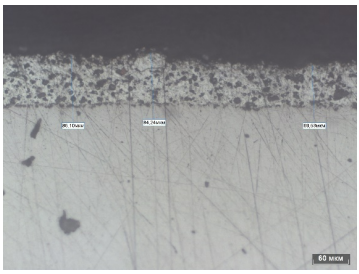
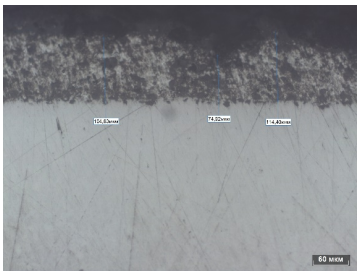
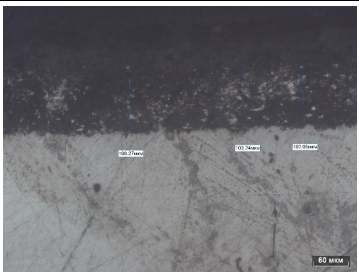
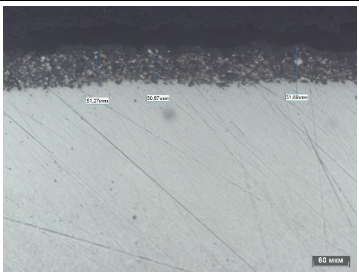
Исходный образец		Средняя толщина слоя составила 79,96 мкм. Покрытие нанесено равномерно.
Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана		Средняя толщина слоя составила 98,05 мкм. Следов коррозии стали нет. Заметно небольшое истончение покрытия, что является следствием взаимодействия цинка с коррозионной средой.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воздух»		Средняя толщина слоя составила 103,85 мкм. Следов коррозии стали нет. Заметно небольшое истончение покрытия, что свидетельствует о взаимодействия цинка с коррозионной средой.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя составила 51,27 мкм. Следов коррозии стали нет. Наблюдается сильное истончение покрытия.

Таблица 9

Результаты металлографического анализа образцов с никелевым покрытием

Results of metallographic analysis of nickel-coated samples

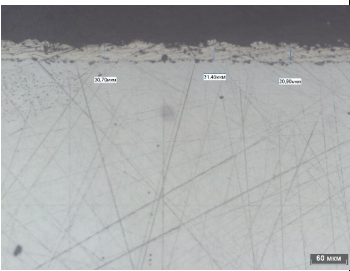
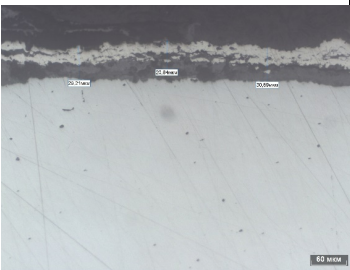
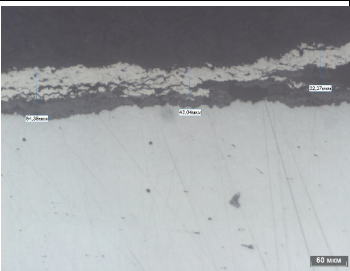
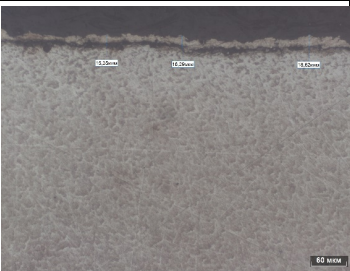
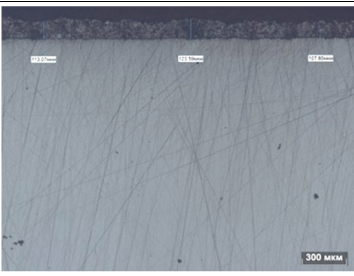
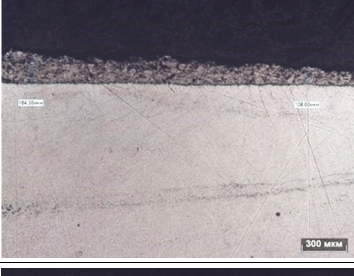
Исходный образец		Средняя толщина слоя составила 31,02 мкм. Покрyтие нанесено неравномерно.
Испытания при воздействии нейтрально-го соляного тумана		Средняя толщина слоя 26,91 мкм. В покрyтии наблюдаются сквозные дефекты. Также отчетливо виден слой окислов под покрyтием.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воздух»		Средняя толщина слоя составила 43,26 мкм. Наблюдается отслоение покрyтия. Образование окислов под покрyтием могло привести к его частичному отслоению.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя составила 16,75 мкм. Наблюдается слой окислов под покрyтием.

Таблица 10

**Результаты металлографического анализа образцов с покрытием
на основе алюминия и цинка**

Results of metallographic analysis of samples with aluminum and zinc coating

Исходный образец		Средняя толщина слоя составила 164,14 мкм. Покрытие нанесено равномерно.
Испытания при воздействии нейтрально-го соляного тумана		Средняя толщина слоя составила 125,25 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Сквозных дефектов в покрытии нет. Покрытие плотно прилегает к стали.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воздух»		Средняя толщина слоя составила 196,19 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Сквозных дефектов в покрытии нет. Покрытие плотно прилегает к стали.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя составила 91,02 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Сквозных дефектов в покрытии нет. Покрытие плотно прилегает к стали.

Заключение. Наилучшую коррозионную стойкость во всех испытаниях показали образцы с покрытиями на основе цинка (Z-00-11) и алюминия с цинком (А-80-13), поскольку у них значения коррозионных потерь существенно меньше, чем у образцов с покрытиями на основе меди и никеля. Например, при испытании в нейтральном соляном тумане среднеарифметическое значение коррозионных потерь образцов с цинковым и алюминий-ево-цинковым покрытиями составило $3,814 \cdot 10^{-5}$ и $2,894 \cdot 10^{-5}$ г/см² соответственно, у образцов с медным и никелевым покрытием – $9,648 \cdot 10^{-5}$ и $7,996 \cdot 10^{-5}$ г/см² соответственно.

Результаты металлографического анализа показали, что применяемая технология нанесения покрытия обеспечивает формирование толстого сплошного покрытия именно в сочетании с алюминиевой и цинковой порошковыми смесями. На образцах с покрытиями на основе цинка и алюминия с цинком не было выявлено очагов коррозии стали после завершения испытаний, а коррозионные потери были вызваны истончением защитных покрытий в результате воздействия агрессивной среды. При этом на остальных образцах присутствуют явные очаги коррозии стали. Наилучшей защитной способностью обладает покрытие А-80-13.

Полученные результаты могут быть объяснены тем, что цинк и алюминий являются протекторами, т. е. обладают высокой химической активностью, благодаря чему именно они вступают в окислительно-восстановительные реакции. Это приводит к образованию прочных и сплошных оксидных пленок, которые предохраняют материал от дальнейшего взаимодействия с агрессивной средой.

Результаты исследования показали, что для стальных элементов конструкции лесных машин наиболее предпочтительными являются композиционные покрытия на основе цинка и алюминия.

Вклад авторов. Трубников В.В.: постановка цели и задач исследования, проведение эксперимента, обработка экспериментальных данных (40%); Марков В.А.: проведение эксперимента, обработка экспериментальных данных (10%); Ганин С.В.: проведение эксперимента, металлографический анализ (10%); Блинов С.А.: проведение эксперимента, подготовка образцов (10%); Левитский А.М.: проведение эксперимента, подготовка образцов (10%); Трофимов А.В.: обработка экспериментальных данных (10%); Зверев И.А.: обработка экспериментальных данных, общее руководство работой (10%).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Алхимов А.П., Гулидов А.И., Косарев В.Ф., Нестерович Н.И. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41, №1. С. 204–209.

Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: Физматлит, 2010. 536 с.

Балданов К.П., Бураев М.К., Рязанов П.Г. К расчету параметров холодного газодинамического напыления деталей машин с использованием установки ДИ-МЕТ-405 // Вестник ВСГУТУ. 2019. № 1(72). С. 69–73.

Геращенко Д.А. Износо-коррозионностойкий сплав на основе алюминия для наноструктурированных покрытий: пат. 2413024 Рос. Федерация; заявл. 16.11.09; опубл. 27.02.11.

Павлов И.С. Определение влияния технологических параметров режимов напыления на структуру и свойства функциональных покрытий на основе Al_2O_3 и Cu , полученных методом холодного газодинамического напыления низкого давления // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №4 (130). С. 1–15.

Assadi H., Gartner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying // Acta Materialia. 2003. Vol. 51, no. 15. P. 4379–4394.

Champagne V., Helfrich D. The unique abilities of cold spray deposition // International Materials Reviews. 2016. Vol. 61 (7). P. 437–455. DOI: 10.1080/09506608.2016.1194948.

De Force B., Eden T., Potter J. Cold spray Al-5% Mg coatings for the corrosion protection of magnesium alloys // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20, no. 6. P. 1352–1358.

Ghelichi R., Bagherifard S., Guagliano M., Verani M. Numerical simulation of cold spray coating // Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 205. P. 5294–5301.

Jodoin B., Raletz F., Vardelle M. Cold spray modeling and validation using an optical diagnostic method // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 200, iss. 14–15. P. 4424–4432.

Katanoda H., Fukuhara M., Iino N. Numerical study of combination parameters for particle impact velocity and temperature in cold spray // Journal of Thermal Spray Technology. 2007. Vol. 16, no. 5–6. P. 627–633. DOI: 10.1007/s11666-007-9087-7.

King P., Bae G., Zahiri S., Jahedi M., Lee C. An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates // Journal of Thermal Spray Technology. 2010. Vol. 19, no. 3. P. 620–634.

Koh P.K., Cheang P., Loke K., Yu S., Siao Ming Ang A. Deposition of amorphous aluminium powder using cold spray // Thermal Spray 2012: Proceedings from the Int. Thermal Spray Conf. and Exposition. Houston, 2012. P. 22–24.

Lee K.A., Jung D.J., Park D.Y., Kang W.G., Lee J.K., Kim H.J. Study on the fabrication and physical properties of cold sprayed, Cu-based amorphous coating // Journal of Physics: Conference Series. 2009. Vol. 144. P. 12–15.

Li C.-J., Yang G.-J., Gao P.-H., Ma J., Wang Y.-Y., Li C.-X. Characterization of nanostructured WC-codeposited by cold spraying // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2007. Vol. 16, no. 5–6. P. 1011–1020.

Li W.Y., Zhang C., Li C.J., Liao H.L. Modelling aspects of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2009. Vol. 18, no. 5–6. P. 921–933.

Li W.Y., Zhang D.D., Huang C.J., Yin S., Yu M., Wang F.F., Liao H.L. Modelling of impact behaviour of cold spray particles: review // *Surface Engineering*. 2014. Vol. 30, no. 5. P. 299–308.

Rahmati S., Ghaei A. The use of particle/substrate material models in simulation of cold-gas dynamic-spray process // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2014. Vol. 23, no. 3. P. 530–540.

Schmidt T., Assadi H., Gärtner F., Richter H., Stoltenhoff T., Kreye H., Klassen T. From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2009. Vol. 18, no. 5–6. P. 794–808.

References

Alkhimov A.P., Gulidov A.I., Kosarev V.F., Nesterovich N.I. Features of microparticle deformation upon impact with a solid barrier. *Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 1, pp. 204–209. (In Russ.)

Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice. Moscow: Fizmatlit, 2010. 536 p. (In Russ.)

Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, no. 15, pp. 4379–4394.

Baldanov K.P., Buraev M.K., Ryazanov P.G. On the calculation of parameters of cold gas-dynamic spraying of machine parts using the DIMET-405 installation. *Bulletin of VSGUTU*, 2019, no. 1(72), pp. 69–73. (In Russ.)

Champagne V., Helfritsch D. The unique abilities of cold spray deposition. *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61 (7), pp. 437–455. DOI: 10.1080/09506608.2016.1194948.

De Force B., Eden T., Potter J. Cold spray Al-5% Mg coatings for the corrosion protection of magnesium alloys. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, no. 6, pp. 1352–1358.

Gerashchenkov D.A. Wear- and corrosion-resistant aluminum-based alloy for nanostructured coatings: patent 2413024 Russian Federation; decl. 11/16/09; publ. 02/27/11. (In Russ.)

Ghelichi R., Bagherifard S., Guagliano M., Verani M. Numerical simulation of cold spray coating. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, pp. 5294–5301.

Jodoin B., Raletz F., Vardelle M. Cold spray modeling and validation using an optical diagnostic method. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, iss. 14–15, pp. 4424–4432.

Katanoda H., Fukuhara M., Iino N. Numerical study of combination parameters for particle impact velocity and temperature in cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, vol. 16, no. 5–6, pp. 627–633. DOI: 10.1007/s11666-007-9087-7.

King P., Bae G., Zahiri S., Jahedi M., Lee C. An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, vol. 19, no. 3, pp. 620–634.

Koh P.K., Cheang P., Loke K., Yu S., Siao Ming Ang A. Deposition of amorphous aluminium powder using cold spray. *Thermal Spray 2012: Proceedings from the Int. Thermal Spray Conf. and Exposition*. Houston, 2012, pp. 22–24.

Lee K.A., Jung D.J., Park D.Y., Kang W.G., Lee J.K., Kim H.J. Study on the fabrication and physical properties of cold sprayed, Cu-based amorphous coating. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, vol. 144, pp. 12–15.

Li C.-J., Yang G.-J., Gao P.-H., Ma J., Wang Y.-Y., Li C.-X. Characterization of nanostructured WC-codeposited by cold spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, vol. 16, no. 5–6, pp. 1011–1020.

Li W.Y., Zhang C., Li C.J., Liao H.L. Modelling aspects of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, vol. 18, no. 5–6, pp. 921–933.

Li W.Y., Zhang D.D., Huang C.J., Yin S., Yu M., Wang F.F., Liao H.L. Modelling of impact behaviour of cold spray particles: review. *Surface Engineering*, 2014, vol. 30, no. 5, pp. 299–308.

Pavlov I.S. Determination of the influence of technological parameters of spraying modes on the structure and properties of functional coatings based on Al₂O₃ and Cu obtained by the method of cold gas-dynamic low-pressure spraying. *International Research Journal*, 2023, no. 4 (130), pp. 1–15. (In Russ.)

Rahmati S., Ghaei A. The use of particle/substrate material models in simulation of cold-gas dynamic-spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 530–540.

Schmidt T., Assadi H., Gärtner F., Richter H., Stoltenhoff T., Kreye H., Klassen T. From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, vol. 18, no. 5–6, pp. 794–808.

Материал поступил в редакцию 17.11.2024

Трубников В.В., Марков В.А., Ганин С.В., Блинов С.А., Левитский А.М., Трофимов А.В., Зверев И.А. Анализ коррозионной стойкости порошковых покрытий для защиты деталей лесных машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 336–356. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.336-356

В статье рассматривается эффективность использования защитных коррозионностойких порошковых покрытий, нанесенных на стальные элементы конструкции лесных машин методом холодного газодинамического напыления

(ХГДН). Для нанесения защитных покрытий было изготовлено 32 образца размером 100×20×3 мм из стали марки Ст3сп. В качестве оборудования для напыления использовалась установка ХГДН с низким давлением «Димет-405». В исследовании были рассмотрены 4 вида покрытия: на основе меди – С-01-01; цинка – Z-00-11; никеля – N3-00-02; алюминия с добавлением цинка – А-80-13. Для каждого вида порошкового покрытия был произведен морфологический анализ частиц и определен гранулометрический состав. Полученные образцы испытывались в условиях: соляного тумана, соляного тумана и воздуха и морской воды. Продолжительность коррозионных испытаний составила 720 ч. По результатам испытаний определялись значения коррозионных потерь образцов. Была произведена статистическая обработка полученных данных. Кроме того, был проведен металлографический анализ образцов. Наилучшую коррозионную стойкость во всех испытаниях показали образцы с покрытиями на основе цинка (Z-00-11) и алюминия с цинком (А-80-13). Результаты металлографического анализа показали, что на образцах с покрытиями на основе цинка и алюминия с цинком не было выявлено очагов коррозии стали после завершения испытаний, а коррозионные потери были вызваны истончением защитных покрытий в результате воздействия агрессивной среды. При этом на остальных образцах присутствуют явные очаги коррозии стали. Результаты исследования показали, что для стальных элементов конструкции лесных машин наиболее предпочтительными являются композиционные покрытия на основе цинка и алюминия.

Ключевые слова: коррозия, коррозионные испытания, холодное газодинамическое напыление, коррозионностойкие покрытия, лесное машиностроение.

Trubnikov V.V., Markov V.A., Ganin S.V., Blinov S.A., Levitsky A.M., Trofimov A.V., Zverev I.A. Analysis of corrosion resistance of powder coatings for protection of forestry machine parts. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 336–356 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.336-356

The article considers the efficiency of using protective corrosion-resistant powder coatings applied to steel structural elements of forestry machines by cold gas-dynamic spraying (CGDS). To apply the protective coatings, 32 samples measuring 100×20×3 mm were made of Ст3сп steel. A low-pressure CGDS unit «Dimet-405» was used for spraying. The study considered 4 types of coating: copper-based – C-01-01; zinc – Z-00-11; nickel – N3-00-02; aluminum with added zinc – A-80-13. For each type of powder coating, a morphological analysis of the particles was performed and the granulometric composition was determined. The resulting samples were tested under the following conditions: salt fog, salt fog and air, and sea water. The duration of corrosion tests was 720 hours. Based on the test results, the values of corrosion losses of the samples were determined. The obtained data were statistically processed. In addition, a metallographic analysis of the samples was carried out. The best corrosion resistance in all tests was

shown by samples with zinc-based (Z-00-11) and aluminum-zinc (A-80-13) coatings. The results of the metallographic analysis showed that no steel corrosion centers were detected on the samples with zinc-based and aluminum-zinc coatings after the tests were completed, and the corrosion losses were caused by the thinning of the protective coatings as a result of exposure to an aggressive environment. At the same time, obvious steel corrosion centers were present on the remaining samples. The results of the study showed that composite coatings based on zinc and aluminum are the most preferable for steel structural elements of forestry machines.

Keywords: corrosion, corrosion testing, cold gas dynamic spraying, corrosion-resistant coatings, forestry engineering.

ТРУБНИКОВ Виктор Валерьевич – соискатель Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. SPIN-код: 3756-3397.

191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия.

TRUBNIKOV Viktor V. – PhD candidate of the Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 3756-3397.

191186. Bolshaya Morskaya str. 18. St. Petersburg. Russia.

МАРКОВ Виктор Александрович – доцент кафедры машин автоматизированных систем Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук. SPIN-код: 1503-7932.

191186, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mactor85@mail.ru

MARKOV Viktor A. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Machines and Automated Systems of the Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 1503-7932.

191186. Bolshaya Morskaya str. 18. St. Petersburg. Russia. E-mail: mactor85@mail.ru

ГАНИН Сергей Владимирович – директор Высшей школы физики и технологий материалов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 8871-2200.

194021, ул. Политехническая, д. 19, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ganin_sv@spbstu.ru

GANIN Sergey V. – PhD (Technical), Director of the Higher School of Physics and Materials Technology of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Associate Professor. SPIN-code: 8871-2200.

194021. Politekhnikeskaya str. 19. St. Petersburg. Russia. E-mail: ganin_sv@spbstu.ru

БЛИНОВ Святослав Алексеевич – инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. SPIN-код: 9757-7380.

194021, ул. Политехническая, д. 19, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

BLINOV Svyatoslav A. – engineer at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. SPIN-code: 9757-7380.

194021. Politekhnikeskaya str. 19. St. Petersburg. Russia. E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

ЛЕВИТСКИЙ Алексей Максимович – инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. SPIN-код: 2037-3169.

194021, ул. Политехническая, д. 19, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

LEVITSKY Alexey M. – engineer at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. SPIN-code: 2037-3169.

194021. Politekhnikeskaya str. 19. St. Petersburg. Russia. E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

ТРОФИМОВ Александр Викторович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 8933-0230.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: agregat9@yandex.ru

TROFIMOV Alexandr V. – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8933-0230.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: agregat9@yandex.ru

ЗВЕРЕВ Игорь Андреевич – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 1126-2121. ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: igorzv1997@gmail.com

ZVEREV Igor A. – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1126-2121. ORCID: 0000-0002-8163-7489.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: igorzv1997@gmail.com