

tests of equipment for road marking, cutting bushes and small trees in the highway right-of-way, patching, preparation of dry asphalt concrete mixes and vibratory compaction of soils are given.

Keywords: road markings, right-of-way of highways, cutting of bushes and small trees, dry asphalt concrete mix, pit (pothole) repair, vibration exciter, soil compacting machine.

Поступила в редакцию/received: 01.10.2024; после рецензирования/revised: 08.10.2024; принята/accepted: 14.10.2024

УДК 622.23.05

ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ГОРНЫХ МАШИН

В.У. МНАЦАКАНЯН¹, д-р техн. наук, С.Х. НГУЕН¹, асп.,
В.Н. НГО², канд. техн. наук

¹Университет науки и технологий МИСИС,
119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1, e-mail: artvik@bk.ru

² Университет Ту Дау Мот,
Вьетнам, г. Ту Дау Мот, ул. Тран Ван Он, 6, e-mail: nguyennv@tdmu.edu.vn

© Мнацаканян В.У., Нгуен С.Х., Нго В.Н., 2024

Представлены результаты экспериментальных исследований коррозионной стойкости стальных образцов, покрытых антикоррозионными составами, в 3,4%-м растворе хлорида натрия. Установлено, что металлокерамические покрытия на основе композитов $Zn + Al_2O_3$ и $Al + Zn + Al_2O_3$, сформированные холодным газодинамическим напылением, существенно повышают сопротивляемость коррозии в морской воде у сварных соединений из стали, а также монолитных стальных образцов.

Ключевые слова: электрохимическая коррозия, сварные соединения, скорость коррозии, морская вода, холодное газодинамическое напыление, защитные покрытия, коэффициент анодной защиты.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-51-58

ВВЕДЕНИЕ

Потери от коррозии и износа в горнодобывающей промышленности Вьетнама, где добыча твердых полезных ископаемых ведется как на суше, так и в прибрежных районах Южно-Китайского моря, имеют колоссальные масштабы. Жесткие условия эксплуатации горных машин, характеризующиеся наличием абразивных сред, а также динамических и циклических нагрузок, в тропическом климате страны существенно усугубляются высокой влажностью воздуха и воздействием агрессивной морской среды, что приводит к интенсивной коррозии металлоконструкций и их ускоренному разрушению. Особенно чувствительны к морской атмосфере сварные соединения, широко применяемые при сборке, монтаже и ремонте горных машин, в частности карьерных экскаваторов, составляющих основную часть выемочной техники. Для ремонта несущих и базовых элементов металлоконструкций горных машин применяют технологии сварки и наплавки [1–5].

Коррозионные повреждения деталей приводят к большим расходам на ремонт и обслуживание горной техники, что определяет потребность в применении эффективных способов защиты сварных соединений от коррозионного износа на этапе ремонта за счет формирования на восстанавливаемых сваркой или наплавкой локальных поверхностях коррозионно-стойких покрытий. К числу таких методов относится процесс холодного газодинамического напыления.

Цель работы – повышение эксплуатационных свойств восстанавливаемых сваркой несущих металлоконструкций горных машин, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивной морской среды, за счет применения защитных покрытий, сформированных холодным газодинамическим напылением.

ФАКТОРЫ И МЕХАНИКА КОРРОЗИОННЫХ РАЗРУШЕНИЙ

Известно, что склонность сварных конструкций к разрушениям (\bar{K}) в агрессивных средах обусловлена рядом факторов, из которых определяющее влияние оказывают свойства материала конструкции \bar{M} , напряженное состояние сварного соединения \bar{N} , вид и свойства агрессивной среды \bar{C} [6]:

$$\bar{M} + \bar{N} + \bar{C} \rightarrow \bar{K}. \quad (1)$$

Под воздействием морской воды (атмосферы) в сварных соединениях возникает электрохимическая коррозия, которая, стремительно развиваясь, приводит к различным видам разрушений. Характер и механика разрушения зависят от интенсивности, знака и цикличности напряжений первого σ_I и второго σ_{II} рода, запаса и концентрации потенциальной энергии первого W_I и второго W_{II} рода; исходных свойств материала конструкции $M_{и}$ и неоднородности свойств, приобретенных в процессе технологии изготовления конструкции $M_{т}$, определяющих степень термодинамической и электрохимической неустойчивости материала сварного соединения; химического состава C_x , температуры и продолжительности воздействия, а также характера контактирования сварного соединения со средой C_b :

$$K \leftarrow \begin{cases} N = f(\sigma_{I,II}, W_{I,II}); \\ M = f(M_{и}, M_{т}); \\ C = f(C_x, C_b). \end{cases} \quad (2)$$

Использование преимущественно термической сварки (например, ручной электродуговой) при ремонте металлоконструкций горных машин или в среде защитных газов приводит к образованию неоднородной структуры сварного шва и околошовной зоны. Эти участки обладают различной величиной электрохимических потенциалов, усиливающих эффект проявления электрохимической коррозии в различных электролитах, поэтому скорость коррозии сварных соединений в несколько раз превышает аналогичный показатель для монолитных конструкций. Процесс электрохимической коррозии усугубляется наличием в сварном соединении пористости, что также способствует активному местному разрушению металла. Таким образом, сварное соединение следует рассматривать как сложную многоэлектродную систему (рис. 1а). Агрессивное воздействие морской воды на сталь обусловлено в первую очередь присутствием в среде ионов хлора Cl^- , обладающих депассивирующим эффектом (рис. 1б) [7]. Необходимо дать пояснения обозначений на рис. 1. Римской цифрой I обозначены начальные макропотенциалы в сварном соединении; II – схема макроэлектрохимической коррозии в макропарах: «основной металл – зона термического влияния (з. т. в.)»; «з. т. в. – шов»; «основной металл – шов + з. т. в.»; III –

схема самораспространения; $\varphi_{ш}$, $\varphi_{з.т.в.}$, φ_M – электродный потенциал шва, зоны термического влияния и основного материала соответственно; $\varphi_{уст}$ – установившийся стационарный потенциал поляризованной системы «шов – з. т. в. – основной металл»; 1 – гетерогенный механизм электрохимической коррозии; 2 – гомогенный механизм электрохимической коррозии; 3 – химическая коррозия; Me – металл; D – депольризатор.

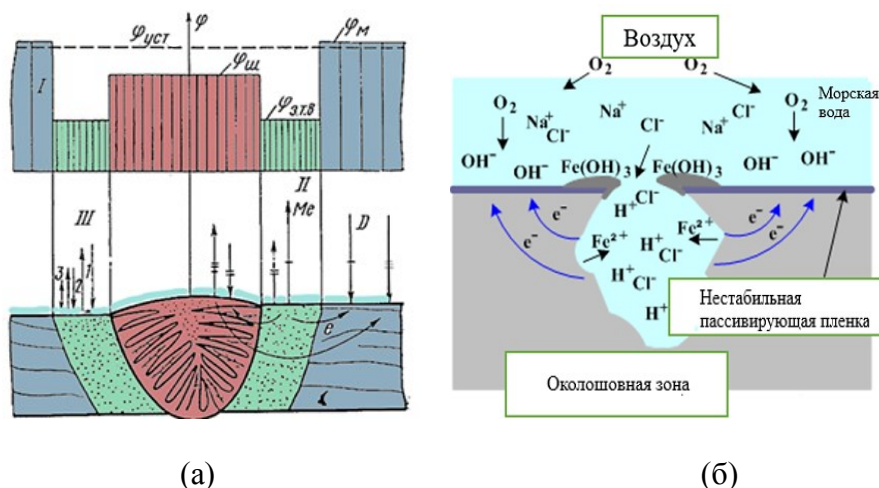


Рис. 1. Схема электрохимической коррозии сварного соединения: сварное соединение как многоэлектродная система [1] (а); схема протекания окислительно-восстановительных реакций на поверхности стали вблизи неоднородного сварного шва при взаимодействии с морской средой (б)

Вследствие малой, по сравнению с основным металлом, площади сварного шва и околошовной зоны (з. т. в.) плотность коррозионного тока в этих областях будет достаточно высока, что приведет к высокой скорости растворения металла. Для макрогальванического элемента «основной металл – сварное соединение» коррозионный ток определяется выражением

$$I_{кор} = F_c i_c = F_M i_M, \quad (3)$$

где $F_M i_M$, $F_c i_c$ – площадь и плотность тока основного металла и сварного соединения.

Так как $F_M \gg F_c$ и $i_c \gg i_M$, то в агрессивной атмосфере более интенсивно самопроизвольная коррозия будет протекать в сварном соединении, а именно в тех зонах, где больше величина разброса потенциалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подавить процессы электрохимической коррозии в сварном соединении возможно за счет применения защитных антикоррозионных покрытий.

Способы защиты от электрохимической коррозии и применяемые покрытия подразделяют на катодные и анодные. Первые (Cu, Ni, Au, Ag, и др.), имеющие более положительные значения потенциалов в агрессивной среде, осуществляют надежную защиту стали, но при нарушении целостности покрытий способствуют образованию гальванического элемента, где анодом служит основной металл, который начинает растворяться, а на покрытии-катоде происходит восстановление водорода [8].

Анодные покрытия (на основе Zn, Cd, Al) предпочтительнее, так как они менее чувствительны к нарушению сплошности. В этом случае важно правильно определить толщину анодного покрытия для обеспечения надежной защиты сварного соединения в

течение межремонтного периода эксплуатации. Для этого должны быть известны такие параметры, как скорость коррозии K анодного покрытия и линейный показатель коррозии h_c , определяемые экспериментальным путем, поскольку расчетными методами оценить их точно не представляется возможным.

При сравнении различных способов нанесения защитных покрытий выявлены несомненные достоинства метода холодного газодинамического напыления (ХГН), сущность которого заключается в формировании покрытий с помощью высокоскоростного потока порошковых частиц металла, находящихся в твердом состоянии. Колоссальная кинетическая энергия твердых частиц, движущихся со сверхзвуковой скоростью, приводит к их высокоскоростной деформации при столкновении с подложкой и образованию прочных адгезионных связей, при этом пористость покрытий не превышает 3 %, что весьма существенно для защиты сварных швов. ХГН-процесс достаточно легко реализовать в ремонтном производстве, особенно при локальном ремонте. Он хорошо совмещается с процессом наплавки или сварки и может быть применен в полевых условиях [9].

Для выявления антикоррозионных свойств покрытий, рекомендуемых для защиты элементов горного оборудования от морской воды, были подготовлены плоские стальные образцы прямоугольной формы из низко- и среднеуглеродистых легированных сталей марок 25Х и 40Х. Часть образцов оставалась без покрытий, тогда как на вторую и третью были нанесены покрытия на основе порошковых композиций составов $Zn + Al_2O_3$ и $Al + Zn + Al_2O_3$. Выбор материалов покрытий обусловлен их приемлемой стоимостью, а также необходимостью получения достоверной информации о степени защиты ими сварных швов от морской коррозии.

Верхняя и нижняя поверхности образцов обрабатывались шлифованием. На образцы наносилось защитное покрытие полностью со всех сторон (рис. 2а). Толщина покрытий составляла 0,3...0,4 мм. В эксперименте также использовали сварные стальные образцы из низкоуглеродистой легированной стали (рис. 2б), при этом сварной шов формировался методом аргоно-дуговой сварки.

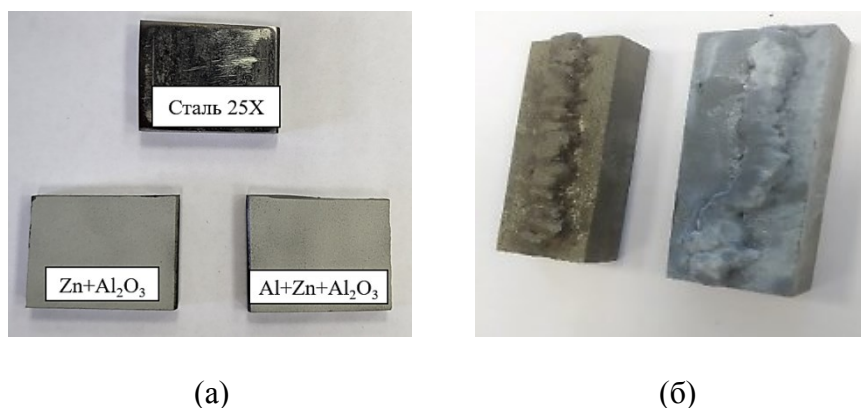


Рис. 2. Подготовленные образцы для проведения экспериментальных исследований: в виде монолитных пластин (а); сварные с покрытием и без него (б)

Наличие оксида алюминия в составе покрытий обусловлено спецификой процесса ХГН. Его присутствие в порошковых составах улучшает условия подачи порошка в сопловое устройство, а также повышает коррозионную стойкость покрытий.

Покрытия формировались при помощи аппарата «Димет-405» с предварительной струйно-абразивной очисткой поверхностей экспериментальных образцов частицами электрокорунда для обеспечения лучшего сцепления покрытия с основой. Масса

образцов до и после коррозионных испытаний определялась на аналитических весах с точностью до 0,001 г.

Напыление покрытий выполнялось при следующих условиях: давление сжатого воздуха $P = 0,5...0,6$ МПа, дистанция напыления $L = 10...12$ мм, дисперсность порошковых частиц $\delta = 35...40$ мкм, температура высокоскоростного газового потока $310...360$ °С. Прочность сцепления составляла не менее 30 МПа, пористость находилась в пределах 3,0...3,5 %; шероховатость покрытий Ra – в пределах 3,6...5,0 мкм.

Все образцы помещали в стеклянные емкости с раствором морской соли (NaCl) с периодическим погружением. Концентрация раствора соли соответствовала ее содержанию в морской воде Южно-Китайского моря и составляла 32...34 г/л [10]. В помещении, где проходил эксперимент, поддерживали температуру воздуха 27...28 °С, температура солевого раствора находилась в пределах 24...25 °С. Таким образом, условия эксперимента были приближены к условиям тропического климата Вьетнама. Продолжительность эксперимента – 60 сут.

Через каждые 10 сут образцы промывали, очищали от продуктов коррозии, просушивали феном и повторно взвешивали на аналитических весах. Скорость коррозии по гравиметрическому (весовому) показателю K ($\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$) рассчитывали на основе формулы

$$K = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}, \quad (4)$$

где Δm – изменение массы образца, г; S – площадь поверхности образца, м^2 ; τ – продолжительность воздействия коррозионной среды на образец, сут.

Эффективность анодной защиты $K_{3,a}$ определялась отношением скорости коррозии без защиты $K_{б,з}$ к скорости коррозии под защитой K_3 :

$$K_{3,a} = K_{б,з} / K_3, \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ результатов экспериментов показал, что коррозия сварного соединения без покрытия протекает более активно. На рис. 3 представлены фотографии стальных сварных образцов в процессе испытаний в морской воде. Очаги коррозии зарождаются в околошовной зоне уже на четвертые сутки (рис. 3б), а далее коррозия распространяется по всей поверхности образца (рис. 3в).



Рис. 3. Фотографии стальных сварных образцов с покрытием и без него при испытании в морской воде в течение 10 сут (а) и после извлечения образцов без покрытия из раствора через 4 сут (б); 10 сут (в)

Установлено, что скорость коррозии не является постоянной величиной (рис. 4). Для всех образцов в первые сутки испытаний она достигает максимальных значений, затем постепенно снижается, что в большей степени выражено для монолитного стального образца без покрытия и образца с покрытием $Zn + Al_2O_3$. В то же время скорость коррозии образца с покрытием $Al + Zn + Al_2O_3$ остается практически неизменной. При этом коэффициент эффективной анодной защиты покрытий $K_{э,а}$ для сварного соединения составляет 32...36, а для монолитного стального образца – 7...8.

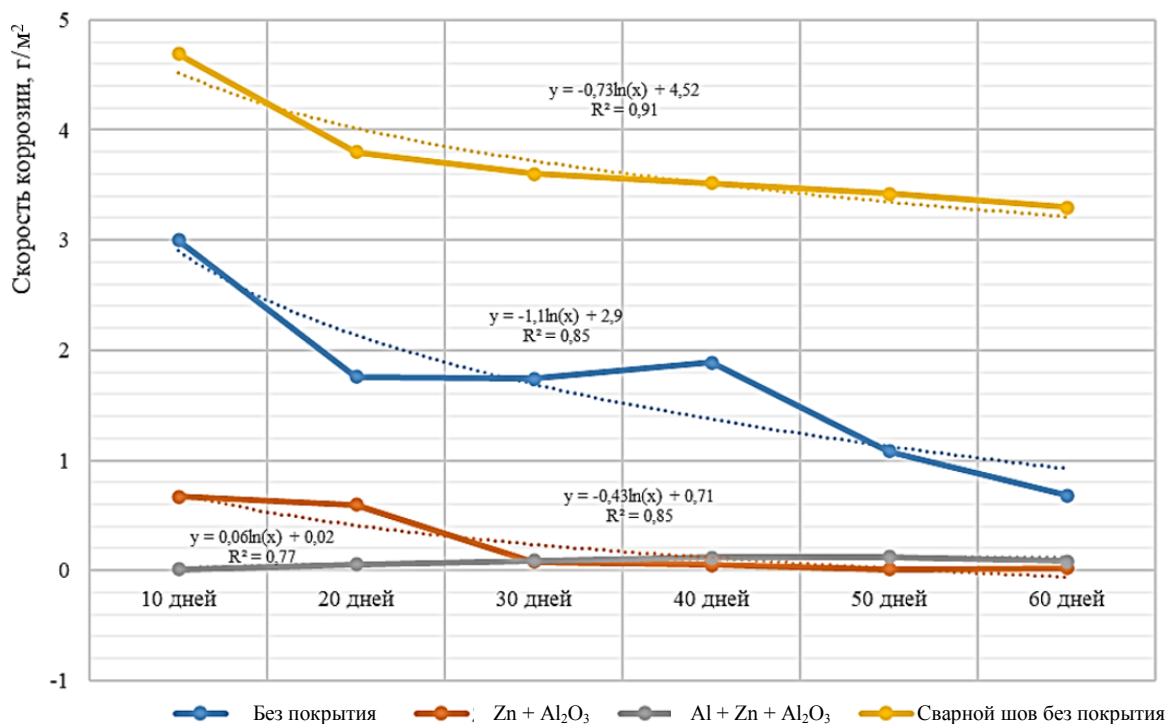


Рис. 4. Изменение скорости коррозии образцов с покрытиями и без в морской воде с периодическим погружением

К концу испытаний скорость коррозии стабилизируется у всех образцов, достигая минимума. Для сварного соединения она также снижается, но остается достаточно высокой, если сравнить с монолитным образцом без покрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения экспериментальных исследований коррозионной стойкости стальных образцов в морской воде с покрытиями, сформированными ХГН, было установлено:

1) применение алюмоцинковых и цинковых покрытий предотвращает электрохимическую коррозию основного металла и тем самым продлевает ресурс сварных металлоконструкций;

2) лучшими защитными свойствами в морской воде обладает покрытие на основе композиции $Al + Zn + Al_2O_3$. Вероятно, высокая коррозионная стойкость алюмосодержащего покрытия в морской воде обусловлена достаточно сильным наклепом частиц алюминия при напылении покрытия, благодаря чему в каждом элементарном слое покрытия возникают сжимающие напряжения, повышающие сопротивляемость коррозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузин Е.Г., Пудов Е.Ю., Дубинкин Д.М. Анализ отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации // *Горное оборудование и электромеханика*. 2021. № 2. С. 55–61.
2. Дефекты металлоконструкции карьерных экскаваторов / А.П. Богданов [и др.] // *Universum: Технические науки*. 2015. № 11 (22). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/2775> (дата обращения: 15.10.2024).
3. Власов Ю.А., Спиринов Е.Н., Ляпин А.Н., Ляпина О.В., Чечулин К.Н. Анализ причин низкой эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов // *Научное обозрение. Технические науки*. 2016. № 5. С. 37–44.
4. Кривоносова Е.А., Акулова С.Н., Мышкина А.В. К проблеме коррозионного разрушения сварных швов // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2017. Т. 19. № 3. С. 114–137.
5. Состояние и перспективы ремонтных работ восстановления изношенных деталей горно-металлургического оборудования / М. Эргашев [и др.] // *Universum: Технические науки*. 2024. № 5 (122). С. 59–64. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17622> (дата обращения: 15.10.2024).
6. Стеклов О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах. М.: Машиностроение. 1976. 199 с.
7. Lê Thị Hồng Liên Ăn mòn và phá hủy vật liệu kim loại trong môi trường khí quyển nhiệt đới Việt Nam // *Vietnam Journal of Science and Technology*. 2012. V. 50. № 6. P. 795–823.
8. Картер В.И. Металлические противокоррозионные покрытия / пер. с англ. Г.Н. Носовой. Л.: Судостроение. 1980. 167 с.
9. Каширин А.И., Шкодкин А.В. Метод газодинамического напыления металлических покрытий: развитие и современное состояние // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007. № 12 (36). С. 22–33.
10. Хорн Р. Морская химия: структура воды и химия гидросферы. М.: Мир. 1972. 398 с.

Для цитирования: Мнацакян В.У., С.Х. Нгуен, В.Н. Нго. Повышение коррозионной стойкости металлоконструкций горных машин // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 51–58.

IMPROVING THE CORROSION RESISTANCE OF MINING MACHINES METAL STRUCTURES

V. U. MNATSAKANYAN¹, Dr. Sc., X.H. NGUYEN¹, Postgraduate,
V.N. NGO², Cand. Sc. in Technical Sciences

¹University of Science and Technology MISIS,

¹Building 1, 4, Leninsky pr., Moscow, 119049, e-mail: artvik@bk.ru

²Thu Dau Mot University,

6, Tran Van On str., Thu Dau Mot, Vietnam, e-mail: nguyennv@tdmu.edu.vn

The results of experimental studies of the corrosion resistance of steel samples coated with anticorrosive compounds in a 3.4 % sodium chloride solution are presented. It has been found that metal-ceramic coatings based on Zn + Al₂O₃ and Al + Zn + Al₂O₃ composites formed by cold gas-dynamic spraying significantly increase the corrosion resistance in seawater of welded steel joints, as well as monolithic steel samples.

Keywords: electrochemical corrosion, welded joints, corrosion rate, seawater, cold gas dynamic spraying, protective coatings, anodic protection coefficient.

Поступила в редакцию/received: 01.10.2024; после рецензирования/revised: 08.10.2024;
принята/accepted: 15.10.2024

УДК 622.331

ВЛИЯНИЕ ВИДА ФРЕЗЕРУЮЩЕГО АГРЕГАТА НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТОРФА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГРУНТОВ

К.Л. ШАХМАТОВ, канд. техн. наук, О.В. ПУХОВА, канд. техн. наук,
К.Ю. ЖЕНИХОВ, ст. препод.

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: owpuhova@mail.ru

© Шахматов К.Л., Пухова О.В., Женихов К.Ю., 2024

В статье рассмотрены вопросы подбора фрезерующего агрегата для добычи торфа в целях производства грунтов с наименьшими затратами и повышенными качественными показателями. Отмечено, что для удовлетворения технологических условий при выполнении фрезерования существует множество конструкций фрезерующих устройств. Указано, что в исследованиях непосредственно на полях добычи с последующими операциями сушки и уборки были использованы агрегируемые с гусеничным трактором ДТ-75Б фрезер МТФ-14, плоскорез ПТ-09 и пассивная фреза ФПТ-09; глубина фрезерования составляла 0,02 м. Получено, что после фрезерования на поверхность залежи достаточно равномерно укладывались в слой частицы разного размера, толщина которого предопределялась коэффициентом разрыхления (у плоскореза ПТ-09 он составил 1,7 по сравнению с 1,4 у фрезера МТФ-14 и пассивной фрезы ФПТ-09). Установлено, что фракционный состав крошкообразного торфа находился в зависимости от природных свойств торфа залежи, а также от конструкции фрезы и режима фрезерования. При этом он был неоднороден с большим количеством частиц с крупностью более 5 мм, что повысило качественные показатели (большая водоудерживающая способность и одновременно воздухопроницаемость). На основе исследований выявлено, что длительность сушки торфяной крошки зависела от процентного содержания фракций, на которое повлияли природные и технологические факторы (тип и вида торфа, степень разложения, влажность верхнего слоя залежи, тип фрезерующего агрегата, рабочая скорость). Сделан вывод, что использование плоскореза ПТ-09 для фрезерования залежи позволяет снизить производственные издержки и получить торф с повышенными качественными показателями, тем самым улучшить экономические показатели участка.

Ключевые слова: фрезерование, торф, торфяная залежь, фрезерующий агрегат, глубина фрезерования, торфяная крошка.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-58-67