

Научная статья

УДК 691.175.5/8:620.178.169

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ПЕСКА В ЭПОКСИДНО-ПЕСЧАНОМ КОМПОЗИТЕ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ С УЧЕТОМ ВЫСОТЫ ОСАЖДЕНИЯ**Юрий Игоревич Филин, Сергей Александрович Феськов**
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

Аннотация. Установлено влияние дисперсности песчаного наполнителя d на абразивную износостойкость эпоксидно-песчаного композита, применяемого для восстановления и упрочнения рабочих органов сельскохозяйственной техники, в частности лемехов почвообрабатывающих машин. Износостойкость c (мин/мм) определяли методом лунок на образцах высотой $h = 50$ мм для трёх уровней по высоте (верхний, средний, нижний), получаемых последовательным снятием слоя. Исследованы фракции песка $d = 0,1; 0,25; 0,5; 1$ мм при концентрациях $P = 30...70$ мас.ч. (общая дозировка 100 мас.ч.). Показано, что на верхнем уровне c возрастает с увеличением d (до 58,78 мин/мм при $d = 1$ мм), тогда как на нижнем уровне максимум достигается при $d = 0,1$ мм (151,32 мин/мм). При $d = 0,5$ мм высотный градиент минимален ($K_{31} \approx 0,98$), что указывает на повышение структурной однородности покрытия по толщине. Полученные закономерности позволяют обосновать подбор фракционного состава песка для ремонтных композитных покрытий, применяемых при восстановлении лемехов плугов и других рабочих органов сельскохозяйственных машин, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания почвенной средой. Дополнительно установлено, что дисперсность песчаного наполнителя оказывает существенное влияние на формирование структуры эпоксидно-песчаного композита и характер распределения его свойств по толщине материала. Анализ полученных результатов позволяет прогнозировать изменение износостойкости композитного покрытия в зависимости от размера частиц наполнителя и условий его осаждения при формировании материала. Практическая значимость исследования заключается в возможности целенаправленного подбора фракционного состава песчаного наполнителя при разработке технологий восстановления и упрочнения лемехов плугов и других рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Ключевые слова: лемех плуга; почвообрабатывающие машины; восстановление деталей сельскохозяйственной техники; эпоксидно-песчаный композит; дисперсность наполнителя; абразивное изнашивание; износостойкость; ремонтные покрытия.

Для цитирования: Филин Ю.И., Феськов С.А. Влияние дисперсности песка в эпоксидно-песчаном композите на износостойкость с учетом высоты осаждения // Вестник Брянской ГСХА. 2026. № 2 (114). С.72-77.

*Original article***INFLUENCE OF SAND DISPERSION IN EPOXY-SAND COMPOSITE ON WEAR RESISTANCE, CONSIDERING SEDIMENTATION HEIGHT****Yuri I. Filin, Sergei A. Fes'kov***Bryansk State Agrarian University, Bryansk region, Kokino, Russia*

Abstract. *The effect of sand filler dispersion d on the abrasive wear resistance of epoxy-sand composite used for restoration and strengthening of working parts of agricultural machinery, in particular plowshares of tillage machines is established. Wear resistance c (min/mm) was determined by the pit method on samples of height $h = 50$ mm for three height levels (upper, middle, lower), obtained by sequential layer removal. Sand fractions $d = 0.1; 0.25; 0.5; 1$ mm were studied at concentrations $P = 30...70$ parts by weight (total dosage 100 parts by weight). It is shown that at the upper level c increases with increasing d (up to 58.78 min/mm at $d = 1$ mm), while at the lower level the maximum is achieved at $d = 0.1$ mm (151.32 min/mm). At $d = 0.5$ mm, the vertical gradient is minimal ($K_{31} \approx 0.98$), indicating increased structural homogeneity of the coating across its thickness. The obtained patterns allow us to justify the selection of sand fractional composition for repair composite coatings used to restore plow shares and other working parts of agricultural machinery operating under conditions of intense abrasive wear by the soil environment. It was also established that the dispersion of the sand filler has a significant impact on the formation of the structure of the epoxy-sand composite and the distribution of its properties across the thickness of the material. Analysis of the obtained results allows us to predict changes in the wear resistance of the composite coating depending on the filler particle size and the conditions of its deposition during material formation. The practical significance of the study lies in the possibility of targeted selection of the fractional composition of the*

sand filler in the development of technologies for the restoration and strengthening of plow shares and other working parts of tillage machines.

Keywords: *plow share; tillage machines; restoration of agricultural machinery parts; epoxy-sand composite; filler dispersion; abrasive wear; wear resistance; repair coatings.*

For citation: *Filin Yu.I., Fes'kov S.A. Influence of sand dispersion in epoxy-sand composite on wear resistance, considering sedimentation height // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2026. № 2 (114). pp.72-77.*

Введение. Рабочие органы почвообрабатывающих машин сельскохозяйственной техники работают в условиях интенсивного абразивного воздействия почвы. Наиболее подвержены изнашиванию лемехи плугов, лапы культиваторов и другие детали, контактирующие с почвенной массой. В процессе эксплуатации происходит постепенное уменьшение их геометрических размеров, что приводит к снижению качества обработки почвы и увеличению тягового сопротивления агрегатов.

Одним из эффективных способов продления ресурса таких деталей является восстановление и упрочнение их рабочих поверхностей с использованием композиционных материалов [1,2,3]. В практике ремонта сельскохозяйственной техники перспективным направлением является применение эпоксидно-песчаных композитов, обладающих высокой адгезией к металлической основе и повышенной абразивной стойкостью.

Износостойкость подобных композитов определяется не только концентрацией наполнителя, но и размером его частиц. Дисперсность песка влияет на характер взаимодействия материала с абразивными частицами почвы и формирование структуры композита. Кроме того, при формировании литых композитных покрытий происходит осаждение наполнителя, вследствие чего образуется градиент свойств по толщине покрытия.

Для ремонтных покрытий, используемых при восстановлении лемехов и других рабочих органов сельскохозяйственных машин, данный фактор имеет особое значение, поскольку изнашивание происходит преимущественно в поверхностных слоях.

Эпоксидно-песчаные композиты широко используются для восстановления и упрочнения деталей, работающих в абразивной среде. При неизменной химической природе компонентов износостойкость таких материалов определяется, с одной стороны, массовой долей твердой фазы, а с другой стороны, размером частиц наполнителя, который задает характер контакта с абразивом и способность кварцевых зерен сопротивляться микрорезанию [4,5,6]. Для литых и заливочных композиций существенную роль играет также осаждение частиц в процессе отверждения: формируется неоднородность по толщине, из-за которой эксплуатационные свойства верхнего и нижнего слоев покрытия различаются [7].

Научная новизна исследования заключается в установлении закономерностей изменения абразивной износостойкости эпоксидно-песчаного композита в зависимости от дисперсности песчаного наполнителя с учетом высоты его осаждения в процессе формирования покрытия. Впервые для данного типа композитов определен коэффициент высотной неоднородности износостойкости и выявлена фракция наполнителя, обеспечивающая минимальный градиент свойств по толщине материала. Полученные результаты позволяют обосновать выбор дисперсности минерального наполнителя для ремонтных покрытий рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Цель исследования - оценить влияние дисперсности песчаного наполнителя на износостойкость эпоксидно-песчаного композита с учетом высоты осаждения и обосновать выбор фракционного состава наполнителя для ремонтных покрытий рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Материалы и методы. Исследуемый эпоксидно-песчаный композит рассматривается как материал для формирования ремонтных покрытий при восстановлении изношенных лемехов почвообрабатывающих машин. В качестве матрицы использован эпоксидный компаунд промышленного назначения. Дисперсным наполнителем служил минеральный песок, рассев которого обеспечивал четыре диапазона диаметра частиц: $d = 0,1; 0,25; 0,5; 1$ мм. Композиции готовили при общей дозировке 100 мас.ч. по компонентам «песок – эпоксидная матрица» и изменяли содержание песка Р в пределах 30...70 мас.ч. с соответствующим содержанием эпоксидной составляющей $E = 100 - P$ мас.ч. (варианты Р/Е: 30/70, 40/60, 50/50, 60/40, 70/30).

Смесь компаунда с песком выбранной фракции готовили механическим перемешиванием до визуального однородного состояния. Далее композицию заливали в форму, обеспечивающую получение образца высотой $h = 50$ мм. После отверждения образцы подвергали испытаниям. Плоскостность поверхностей контролировали шлифованием до получения идентичной базовой поверхности перед каждым циклом измерений.

Для оценки влияния осаждения наполнителя использована ступенчатая схема измерений: (1) первый цикл выполняли по исходной верхней поверхности (уровень 1); (2) после завершения истирания лунок образец стачивали до восстановления идентичной поверхности, что обеспечивало переход к более глубокому слою (уровень 2); (3) аналогично выполняли третий цикл по слою, приближенному к нижней части образца (уровень 3). Таким образом, последовательность 1→2→3 интерпретировалась как продвижение по высоте осаждения от верхней зоны к нижней.

Износостойкость определяли методом лунок при абразивном взаимодействии в условиях незакрепленного абразива по методике ускоренных сравнительных испытаний [8,9]. Износостойкость s выражали в мин/мм как отношение времени испытаний t к величине линейного износа Δh : $s = t/\Delta h$. Статистическую обработку выполняли по средним значениям \bar{c} , среднеквадратическому отклонению σ и коэффициенту вариации $V = \sigma/\bar{c}$; при $V \leq 0,33$ разброс оценивали как приемлемый для сопоставления серий.

Результаты и обсуждение. В результате проведённых экспериментальных исследований были получены данные, характеризующие влияние дисперсности песчаного наполнителя и его концентрации на абразивную износостойкость эпоксидно-песчаного композита. Особое внимание уделялось анализу распределения свойств по высоте образца, поскольку в процессе формирования композитного материала возможно осаждение минерального наполнителя, приводящее к возникновению градиента структуры и эксплуатационных характеристик.

Испытания проводились для трёх уровней по высоте образца (верхний, средний и нижний), что позволило оценить изменение износостойкости материала по толщине и установить характер влияния дисперсности песка на формирование структуры композита. Полученные экспериментальные результаты обобщены в таблицах и представлены графически, что позволяет наглядно проследить выявленные закономерности.

Анализ результатов направлен на установление оптимального размера частиц песчаного наполнителя, обеспечивающего высокую износостойкость композитного материала и равномерное распределение его свойств по толщине покрытия. Это имеет практическое значение при разработке ремонтных покрытий для восстановления лемехов плугов и других рабочих органов сельскохозяйственных машин, работающих в условиях интенсивного абразивного воздействия почвенной среды.

При формировании эпоксидно-песчаных композитов в процессе отверждения происходит осаждение частиц минерального наполнителя под действием силы тяжести. В результате этого явления распределение частиц песка по высоте материала становится неравномерным. Более тяжёлые и крупные частицы постепенно перемещаются в нижнюю часть образца, тогда как верхние слои композита содержат большее количество полимерной матрицы.

Такое перераспределение компонентов приводит к формированию *градиента свойств по толщине материала*, то есть к постепенному изменению структуры и эксплуатационных характеристик композита от верхней поверхности к нижней части образца. В верхнем слое материал характеризуется более высоким содержанием эпоксидной матрицы и меньшей концентрацией минерального наполнителя, тогда как в нижней части наблюдается более плотная упаковка частиц песка и повышенная доля твёрдой фазы.

Вследствие этого износостойкость композита по высоте образца может существенно различаться. Верхний слой, содержащий больше полимерной матрицы, обычно обладает меньшей устойчивостью к абразивному воздействию, тогда как нижние слои, обогащённые минеральным наполнителем, способны демонстрировать более высокую износостойкость.

Для количественной оценки степени изменения свойств по толщине материала в работе использован *коэффициент высотной неоднородности* K_{31} , определяемый как отношение износостойкости нижнего слоя образца к износостойкости верхнего слоя:

$$K_{31} = c_3/c_1$$

где c_1 - износостойкость верхнего уровня образца;

c_3 - износостойкость нижнего уровня образца.

Значение коэффициента K_{31} позволяет оценить выраженность градиента свойств. При $K_{31} \approx 1$ материал обладает практически равномерными свойствами по толщине. Значительное отклонение коэффициента от единицы свидетельствует о наличии выраженного градиента износостойкости, обусловленного осаждением наполнителя.

Учет данного явления имеет важное практическое значение при разработке ремонтных композитных покрытий для восстановления рабочих органов сельскохозяйственной техники, так как в про-

цессе эксплуатации изнашиваются преимущественно поверхностные слои материала. Поэтому понимание распределения износостойкости по толщине покрытия позволяет более обоснованно выбирать дисперсность наполнителя и прогнозировать долговечность восстановленных деталей.

Зависимость износостойкости от дисперсности имеет различный характер для каждого уровня по высоте (рисунок 1, таблица 1). На верхнем уровне (уровень 1) с увеличением диаметра частиц наблюдается рост \bar{c}_1 от 39,54 мин/мм при $d = 0,1$ мм до 58,78 мин/мм при $d = 1$ мм. Данный эффект согласуется с тем, что крупные зерна выступают над поверхностью и принимают основную долю контактной нагрузки, экранируя эпоксидную матрицу от прямого царапания.

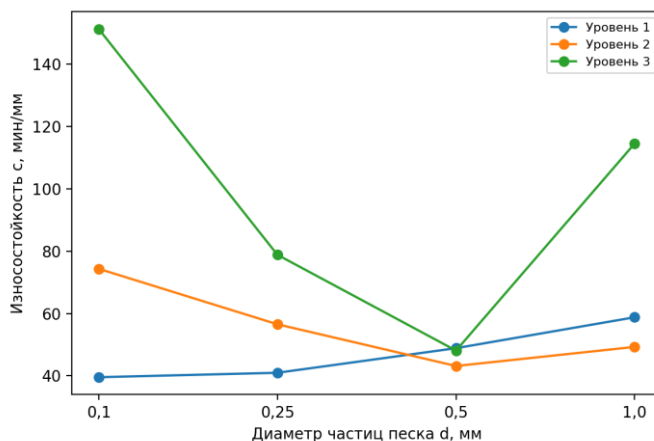


Рисунок 1 - Зависимость износостойкости \bar{c} от диаметра частиц песка d для различных уровней по высоте (усреднение по P)

Таблица 1 - Средняя износостойкость \bar{c} (мин/мм) в зависимости от диаметра частиц песка d и уровня по высоте (усреднение по P)

d , мм	\bar{c}_1 (верх)	\bar{c}_2 (серед.)	\bar{c}_3 (низ)	$K_{31} = \bar{c}_3/\bar{c}_1$
0,1	39,54	74,34	151,32	3,83
0,25	40,96	56,53	78,84	1,92
0,5	48,86	43,13	48,08	0,98
1	58,78	49,27	114,56	1,95

Полученные закономерности имеют практическое значение при разработке ремонтных покрытий для рабочих органов сельскохозяйственной техники. При эксплуатации лемехов плугов абразивное воздействие почвенных частиц приводит к интенсивному изнашиванию поверхностного слоя. Поэтому подбор оптимальной дисперсности наполнителя позволяет регулировать структуру композита и повышать долговечность восстановленных деталей.

На нижнем уровне (уровень 3) тенденция меняется: максимальная износостойкость достигается при $d = 0,1$ мм ($\bar{c}_3 = 151,32$ мин/мм), после чего наблюдается снижение до минимума при $d = 0,5$ мм ($\bar{c}_3 = 48,08$ мин/мм) и последующий рост при $d = 1$ мм ($\bar{c}_3 = 114,56$ мин/мм). Такой немонотонный характер может быть связан с различной степенью уплотнения и упаковки частиц в зоне осаждения: мелкая фракция формирует более плотный каркас с меньшей долей дефектов и пор, тогда как промежуточные размеры ($d = 0,5$ мм) при данных концентрациях могут приводить к повышенной неоднородности распределения и локальным зонам матрицы, уязвимым к выкрашиванию.

Для среднего уровня (уровень 2) минимальные значения \bar{c}_2 фиксируются при $d = 0,5$ мм (43,13 мин/мм), а наибольшее значение наблюдается при $d = 0,1$ мм (74,34 мин/мм). В результате фактор дисперсности определяет не только абсолютный уровень износостойкости, но и направление изменения свойств по толщине.

Коэффициент высотной неоднородности K_{31} (таблица 1, рисунок 2) демонстрирует ключевую особенность: для $d = 0,1$ мм градиент максимален ($K_{31} = 3,83$), то есть нижний слой существенно превосходит верхний; для $d = 0,25$ и 1 мм градиент близок ($K_{31} \approx 1,92 \dots 1,95$), а при $d = 0,5$ мм наблюдается практически равномерное распределение износостойкости по высоте ($K_{31} \approx 0,98$) (рисунок 3). Следовательно, фракция $d = 0,5$ мм может рассматриваться как технологически целесообразная при необходимости обеспечения однородности покрытия по толщине.

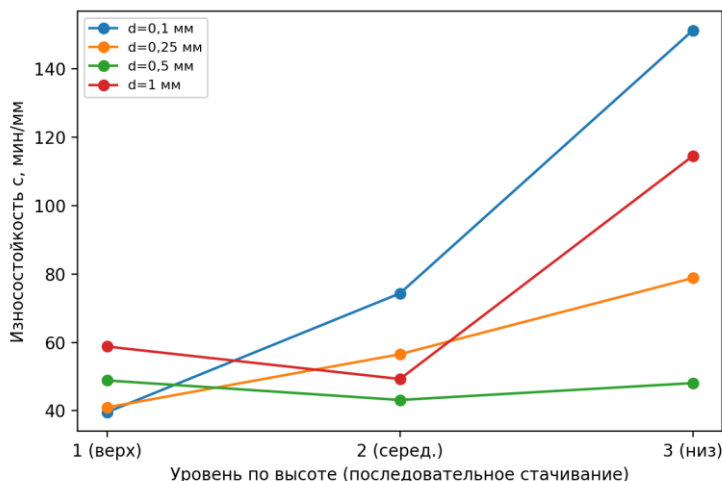


Рисунок 2 - Изменение износостойкости по высоте для различных фракций песка d (усреднение по концентрациям P)

Статистическая устойчивость к изменению концентрации песка при фиксированном d (таблица 2) характеризуется $V \leq 0,18$ для уровней 1–2 и $V \leq 0,33$ для уровня 3, что указывает на приемлемую воспроизводимость и на доминирование фактора дисперсности в формировании высотного градиента. Практически это означает, что при заданной технологии формования выбор размера частиц является более «жестким» рычагом управления распределением свойств по толщине, чем последующая корректировка концентрации в узком диапазоне.

Таблица 2 - Статистические характеристики по фактору концентрации (σ ; V) при фиксированном d

d, мм	σ_1	V1	σ_2	V2	σ_3	V3
0,1	3,58	0,09	11,37	0,15	49,86	0,33
0,25	6,21	0,15	9,96	0,18	10,42	0,13
0,5	6,59	0,13	4,21	0,10	3,32	0,07
1	6,72	0,11	1,61	0,03	13,89	0,12

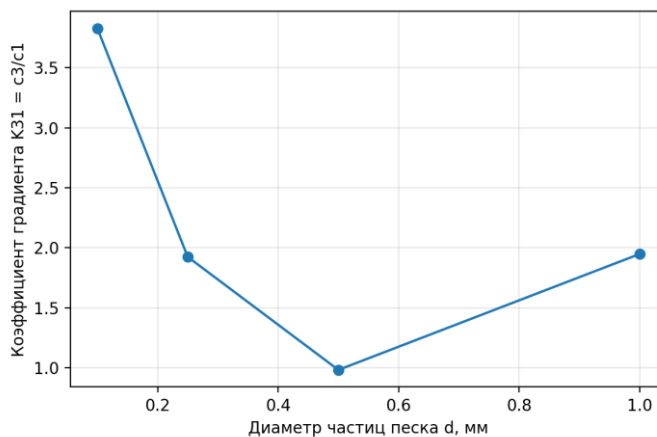


Рисунок 3 - Изменение коэффициента высотной неоднородности $K_{31} = \bar{c}_3/\bar{c}_1$ в зависимости от диаметра частиц песка d

Анализ результатов позволяет оценить влияние дисперсности песчаного наполнителя на износостойкость композитного материала, который может применяться при восстановлении рабочих поверхностей лемехов.

Выводы.

1. Установлено, что дисперсность песчаного наполнителя существенно влияет на износостойкость эпоксидно-песчаного композита, применяемого для формирования ремонтных покрытий рабочих органов сельскохозяйственных машин.

2. На верхнем уровне образцов износостойкость возрастает с увеличением размера частиц песка, тогда как в нижней зоне максимальные значения достигаются при использовании мелкодисперсной фракции.

3. Минимальный градиент износостойкости по толщине композитного слоя наблюдается при размере частиц песка 0,5 мм ($K_{31} \approx 0,98$), что свидетельствует о повышенной структурной однородности материала.

4. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий восстановления лемехов плугов и других почвообрабатывающих рабочих органов, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания.

Список источников

1. Бормотов А.Н. Оптимизация полимерной матрицы эпоксидных композитов // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 1-1 (115). С. 28-33.

2. Егунова Т.Н. Влияние влажности наполнителя на свойства эпоксидно-песчаного композита // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 8. С. 45-48.

3. Егунова Т.Н. Баурова Н.И., Нефело И.С. Определение вязкоупругих характеристик эпоксидно-песчаных композитов, применяемых при ремонте дорожных машин // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. № 5. С. 28-31.

4. Применение эпоксидно-гравийных композитов для упрочнения составных лемехов с возможностью устранения лучевидного износа / И.Н. Кравченко, С.А. Феськов, П.В. Сенин и др. // Инженерные технологии и системы. 2025. Т. 35, № 1. С. 155-169.

5. Влияние эпоксидно-песчаных покрытий различных составов на процесс изнашивания, специфику износа и ресурс плужных лемехов / А.М. Михальченков, С.А. Феськов, А.А. Осипов, А.С. Кононенко // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 1. С. 45-48.

6. Сивцов В.Н. Котин А.В. Новый этап в применении полимерных материалов в ремонтном производстве // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2021. № 39 (44). С. 15-19.

7. Effect of filler materials on abrasive wear performance of glass fiber reinforced epoxy composites / V. Suresha et al. // Tribology in Industry. 2023. Vol. 45, No. 1. P. 111-120.

8. Михальченков А.М. Козарез И.В., Кононенко А.С. Совершенствование техники лабораторных ускоренных сравнительных испытаний полимерных дисперсных композитов на изнашивание в незакрепленном абразиве // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 3. С. 34-38.

9. Mikhal'chenkov A.M., Torikov V.E., Filin Y.I. The influence of the concentration of components of an epoxy-sandy composite on its abrasive-wear resistance // Polymer Science. Series D. 2018. Vol. 11, No. 1. P. 47-49.

Информация об авторах:

Ю.И. Филин - кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехнологий, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ. rock2032@rambler.ru.

С.А. Феськов - кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе и инновациям, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Information about the authors:

Yu. I. Filin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electric Power Engineering and Electrical Technology, Bryansk State Agrarian University, rock2032@rambler.ru.

S.A. Fes'kov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Bryansk State Agrarian University.

Все авторы внесли равный вклад в выполнение работы, подготовку рукописи и несут равную ответственность за представленные данные. Конфликт интересов отсутствует.

All authors contributed equally to the work, preparation of the manuscript, and bear equal responsibility for the presented data. There are no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 14.01.2026, одобрена после рецензирования 15.02.2026, принята к публикации 12.03.2026.

The article was submitted 14.01.2026, approved after reviewing 15.02.2026, accepted for publication 12.03.2026.

© Феськов С.А., Филин Ю.И..