

УДК 621.785:535.211:669.15-194:669.017  
DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240418.27.263

## ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ И ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ НА ИЗНОС ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

ГУБЕНКО С. И.<sup>\*</sup>, д. т. н., проф.

<sup>\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

**Аннотация. Постановка проблемы.** Представляет интерес исследовать влияние неметаллических включений и продуктов коррозии колесной стали на образование частиц износа на поверхности катания железнодорожных колес. Необходимо также выявить особенности взаимодействия колесной стали с окружающей атмосферой в процессе эксплуатации железнодорожных колес. **Целью работы** является изучение механизмов образования частиц износа на поверхности катания железнодорожных колес в процессе эксплуатации. **Методика.** Исследовано влияние включений и продуктов коррозии на механизм износа железнодорожных колес из стали марки R7, проработавших около 5 лет под пассажирским составом, колеса были сняты с эксплуатации по предельному износу ободьев. Изучали макроструктуру и микроструктуру колесной стали по ширине ободьев. Исследования проводились несколькими методами: металлографическим ("Neophot-21"), электронно-микроскопическим (JSM-35). **Результаты.** Исследовали особенности образования частиц износа вблизи неметаллических включений и продуктов коррозии, связанные со структурными изменениями вблизи поверхности катания железнодорожных колес, а также с взаимодействием стали с окружающей атмосферой в процессе эксплуатации. Показано влияние разных факторов на роль неметаллических включений и продуктов коррозии в образовании частиц износа, что дает возможность прогнозировать характер износа поверхности катания железнодорожных колес при различных условиях эксплуатации. **Научная новизна.** Установлены основные источники и взаимное влияние разных факторов на образование частиц износа вблизи неметаллических включений и продуктов коррозии, что дает возможность прогнозировать характер износа поверхности катания железнодорожных колес при различных условиях эксплуатации. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов позволит разработать методы и режимы выплавки колесной стали, позволяющие влиять на размеры, состав, структуру и распределение неметаллических включений, а также разработать противокоррозионные мероприятия, с целью повышения надежности и износостойкости железнодорожных колес.

*Ключевые слова:* железнодорожное колесо; колесная сталь; износ; неметаллические включения; коррозия

## ВПЛИВ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ТА ПРОДУКТІВ КОРОЗІЇ НА ЗНОС ПОВЕРХНІ КОВЗАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

ГУБЕНКО С. І.<sup>\*</sup>, д. т. н., проф.

<sup>\*</sup> Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

**Анотація. Постановка проблеми.** Становить цікавість дослідити вплив неметалевих включень і продуктів корозії колісної сталі на утворення частинок зносу на поверхні ковзання залізничних коліс. Необхідно також виявити особливості взаємодії колісної сталі з навколишнім середовищем в процесі експлуатації залізничних коліс. **Мета роботи** – вивчення механізмів утворення частинок зносу на поверхні ковзання залізничних коліс у процесі експлуатації. **Методика.** Досліджено вплив включень і продуктів корозії на механізм зносу залізничних коліс із сталі марки R7, які пропрацювали близько 5 років під пасажирським потягом, колеса були вилучені з експлуатації через граничний знос ободів. Вивчали макроструктуру та мікроструктуру колісної сталі по ширині ободів. Дослідження проводили декількома методами: металлографічним ("Neophot-21"), електронно-мікроскопічним (JSM-35). **Результати.** Досліджували особливості утворення частинок зносу поблизу неметалевих включень і продуктів корозії, які пов'язані зі структурними змінами поблизу поверхні ковзання залізничних коліс, а також із взаємодією сталі з навколишнім середовищем у процесі експлуатації. Показано вплив різних факторів на роль неметалевих включень і продуктів корозії в утворенні частинок зносу, що дає можливість прогнозувати характер зносу поверхні ковзання залізничних коліс за різних умов експлуатації. **Наукова новизна.** Встановлено основні джерела та взаємний вплив різних факторів на утворення частинок зносу поблизу неметалевих включень і продуктів корозії, що дає можливість прогнозувати характер зносу поверхні ковзання залізничних коліс за різних умов експлуатації. **Практична значимість.** Отримані результати допоможуть розробити методи і режими виплавки колісної сталі, що дозволить впливати на розміри, склад, структуру і розподіл неметалевих включень, а також протикорозійні заходи з метою підвищення надійності і зносостійкості залізничних коліс.

*Ключові слова:* залізничне колесо; колісна сталь; знос; неметалеві включення; корозія

# INFLUENCE OF NON-METALLIC INCLUSIONS AND PRODUCTS OF CORROSION ON THE WEAR OF RAILWAY WHEELS TREAD

GUBENKO S.I. \*, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

\* Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 3748 357, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

**Abstract. Formulation of the problem.** It is of interest to investigate the effect of nonmetallic inclusions and corrosion products of wheel steel on the formation of wear particles on the tread of railway wheels. It is also necessary to identify the specifics of the interaction of wheel steel with the surrounding atmosphere during the operation of railway wheels. **The purpose of the article** is to study the mechanisms of formation of wear particles on the surface of rolling of railway wheels during operation. **Methodology.** The effect of inclusions and corrosion products on the mechanism of wear of railway wheels made of R7 steel, which worked for about 5 years under the passenger train, was studied. The wheels were removed from service due to the extreme wear of the rims. We studied the macrostructure and microstructure of wheel steel along the width of the rims. The research was carried out by several methods: metallographic ("Neophot-21"), electron microscopy (JSM-35). **Findings.** The features of the formation of wear particles near nonmetallic inclusions and corrosion products related to structural changes near the rolling surface of railway wheels as well as to the interaction of steel with the surrounding atmosphere during operation were investigated. The influence of various factors on the role of nonmetallic inclusions and corrosion products in the formation of wear particles is shown, which makes it possible to predict the nature of wear of the rolling surface of railway wheels under various operating conditions. **Originality.** The main sources and the mutual influence of various factors on the formation of wear particles near nonmetallic inclusions and corrosion products have been established, which makes it possible to predict the nature of wear of the rolling surface of railway wheels under various operating conditions. **Practical value.** The use of the obtained results will allow to develop methods and regimes of smelting of wheel steel, allowing to influence the size, composition, structure and distribution of non-metallic inclusions, as well as to develop anticorrosion measures in order to improve the reliability and durability of railway wheels.

*Keywords:* railway wheel; wheel steel; wear; non-metallic inclusions; corrosion

## Введение

При эксплуатации колесо находится в сложном напряженном состоянии, определяемом системой контактных, динамических и циклических напряжений [1], которые вызывают в колесе упруго-пластические и тепловые явления, способствуют усталостным процессам в ободе и диске, подрезу гребня и разрушению поверхности катания. Комплексный подход к механизму изнашивания железнодорожных колес включает не только изучение структурных изменений [2; 3], но также анализ частиц износа. Многообразие условий работы пар трения позволяет утверждать, что общим подходом может быть представление об усталостной природе разрушения поверхностных слоев [4].

*Цель настоящей работы* – изучение влияния неметаллических включений и продуктов коррозии на образование частиц износа на поверхности катания железнодорожных колес в процессе эксплуатации.

## Материалы и методики исследований

Исследован механизм износа железнодорожных колес из стали марки R7, проработавших около 5 лет под пассажирским составом. Исследования проводились несколькими методами: металлографическим ("Neophot-21"), рентгено-структурным (ДРОН 2,0), электронно-микроскопическим (JSM-35).

## Результаты исследований и их обсуждение

При визуальном осмотре колес с сильно изношенным ободом на поверхности катания обнаружены такие дефекты как ползун,

наволакивание металла, отслоения, наплыв металла с поверхности катания на наружную боковую грань обода, усталостно-коррозионный износ. Очевидно, максимальный износ поверхности катания происходит в зонах выкружки и наплыва.

Микроструктура ободьев колес вблизи поверхности катания характеризуется наличием зоны деформированных зерен и участков «белого слоя» [3; 4]. Частицы износа, возникшие вследствие развития интенсивной пластической деформации вблизи поверхности катания, представляют собой чешуйки или пластины разной толщины. Они характерны для нормальных условий износа [4; 5].

Согласно теории износа «отслаиванием» [6], при трении максимальная плотность дислокаций возникает непосредственно не на поверхности, а на некоторой глубине, где и появляются протяженные микротрещины, растущие до критического размера в результате пластического течения стали. Вторым источником образования частиц износа на поверхности катания колеса является так называемый «белый слой», который обладает повышенной хрупкостью [2; 3]. Вблизи участков «белого слоя» обнаруживается локализация деформации поверхностного слоя обода колеса, что способствует концентрации напряжений и выкрашиванию «белого слоя». Частицы износа имеют вид осколков с острыми краями неправильной формы. Они обычно возникают при очень высоких давлениях и их появление можно связать с образованием в поверхностных слоях ободьев мелких усталостных трещин [4].

Рассматривая особенности развития пластической деформации колесной стали вблизи поверхности катания колеса, следует учитывать взаимодействие

этой поверхности с окружающей атмосферой. Известно, что начальный этап коррозии включает адсорбцию атомов элементов из окружающей влажной среды, что может вызывать эффект адсорбционного облегчения пластической деформации вблизи поверхности катания колеса (эффект П. А. Ребиндера) [7]. Явление пластифицирования поверхностных слоев объясняют влиянием изменения поверхностной энергии на поведение деформируемого твердого тела (снижением поверхностного потенциального барьера, оказывающего влияние на поведение дислокаций в приповерхностном слое деформируемого металла), а также уменьшением сил трения и предела текучести стали [7].

По-видимому, пластифицирование поверхности катания способствует на начальных этапах эксплуатации железнодорожного колеса сглаживанию шероховатостей на поверхностях катания колеса и рельса, допустимому изменению профиля поверхности катания колеса, что ускоряет так называемый полезный износ, необходимый для ускорения процесса прирабатываемости в системе колесо–рельс. Далее для образования поверхностных дефектов (частиц износа) необходимо достижение предельного состояния деформационного упрочнения стали, и этот этап деформации ускоряется под действием поверхностно-активной среды [7].

При образовании и отслоении частиц износа появляются новые «свежие» поверхности развивающихся трещин, на них происходит адсорбция активных элементов окружающей влажной среды. Такое адсорбционное проникновение поверхностно-активных компонентов внутрь трещин происходит с достаточно высокими скоростями [7], что приводит к снижению поверхностной энергии трещин (а значит, и работы их образования) и облегчает тем самым дальнейшее их развитие в процессе пластической деформации стали.

Кроме того, в результате адсорбционных процессов на поверхности частиц износа развивается коррозия стали, поэтому на них нередко видны продукты окисления. Таким образом, влажная окружающая среда, содержащая, к тому же, различные смазки, загрязнения и т. д., оказывает отрицательное влияние на усталостную прочность поверхности катания колеса из-за адсорбционного и коррозионного эффектов.

Одна из причин образования частиц износа – неметаллические включения металлургического происхождения, которые являются концентраторами напряжений и деформаций в колесной стали [8–11]. Образованию трещин и частиц износа также способствуют окисление и коррозионное разрушение поверхности катания, причем эти процессы приводят к формированию непосредственно на поверхности катания грубых включений сложных оксидов. Наличие включений и продуктов коррозии существенно повышает скорость образования микротрещин и их объединения, что увеличивает интенсивность износа (усталостного и при трении).

Анализ микроструктуры колесной стали вблизи поверхности катания колес показал, что неметаллические включения и продукты коррозии колесной стали способствуют неоднородному развитию деформации, появлению зон турбулентного течения (рис. 1 а) и способствуют образованию зон с повышенной степенью деформации. Поведение неметаллических включений, находящихся вблизи поверхности катания под влиянием действующих напряжений, зависит от их типа. Они пластичны (сульфиды), либо не подвержены пластическому формоизменению (оксиды, силикаты, карбонитриды титана).

Неметаллическое включение, расположенное вблизи поверхности катания колеса, находится в сложном напряженном состоянии, определяемом системой контактных, динамических и циклических напряжений. Возникающий в процессе эксплуатации колеса градиент температур вблизи поверхности катания приводит к неоднородному распределению деформаций в стальной матрице и сил, действующих на включение.

В условиях высоких давлений и циклически изменяющихся температур взаимодействие контактирующих поверхностей включения и стальной матрицы происходит путем установления механического контакта и развития диффузионных процессов. Механический контакт устанавливается в результате сглаживания неровностей поверхностей включения и матрицы колесной стали путем развития контактного трения их поверхностей друг относительно друга, препятствующего их относительно перемещению. Такое трение является кинематическим сухим трением скольжения [8].

Проанализированы условия трения на межфазных границах неметаллическое включение – матрица стали [6]. Контактное трение усиливает неоднородность деформации матрицы колесной стали вблизи включений, что может оказать влияние не только на уровень напряжений, действующих на включение, но и на схему напряженного состояния [8]. В процессе контактного взаимодействия включений и стальной матрицы возможно вращение включений (рис. 1 а), что вызывает моментные напряжения и способствует локальным пластическим поворотам в стальной матрице в результате ее вихревого течения.

В процессе совместной деформации системы включение – матрица вблизи поверхности катания колеса образуется характерная волокнистая зеренная структура колесной стали (рис. 1 а). Волокна матрицы огибают включение (металлургического либо коррозионного происхождения) с одной стороны, если оно непосредственно выходит на поверхность катания, либо с двух сторон, если оно находится вблизи поверхности катания. В первом случае волокна матрицы постепенно «наезжают» на включение (рис. 1 б, д, м), которое служит тормозом для движущихся волокон, выгибаются и нередко закручиваются в петли или спирали. Во втором случае волокна матрицы огибают включение с двух сторон, при этом возможно расслоение вдоль

межфазных границ раздела включение–матрица (рис. 1 *в, е, н*).

Происходит неоднородная деформация: те волокна, которые столкнулись с включением, останавливаются и в этом месте возникает повышенная концентрация напряжений, а находящиеся выше и ниже слои матрицы деформируются в направлении течения матрицы колесной стали. При этом на границах включение – матрица концентрируются сжимающие и сдвиговые напряжения, способные разрушить включение, если они превысят предел прочности включений (металлургического либо коррозионного происхождения) при сжатии (рис. 1 *б, г, ж, з, о*).

При ускоренном торможении в условиях резкого повышения температуры следует учитывать возможную роль проскальзывания вдоль межзеренных границ в аустените и межфазных границ включение – матрица в развитии деформации вблизи поверхности катания колеса [8]. Следует отметить, что неметаллические включения нередко являются центрами локального обезуглероживания стали, что вызывает структурную неоднородность и влечет за собой неоднородное развитие пластических сдвигов, а также образование микротрещин и частиц износа.

Необходимо рассмотреть еще один аспект влияния легкоплавких неметаллических включений на образование частиц износа вблизи поверхности катания железнодорожных колес в условиях экстренного торможения и локального разогрева поверхности катания до температур, соответствующих аустенитной области, когда может произойти оплавление и даже плавление легкоплавких железо-марганцевых сульфидов и сульфидных эвтектик [8–12]. Тогда возможно проявление локальной сульфидной красноломкости, когда резко снижаются пластичность и прочность колесной стали.

Если поверхность катания колеса нагревается до высоких температур, сульфидные включения плавятся (рис. 1 *р*), происходит резкая локализация деформации стали и возникает множество трещин, т. е. происходит разрушение стали при достижении относительно невысоких степеней деформации. Жидкие прослойки легко вытягиваются параллельно поверхности катания колеса, между ними распространяются трещины, способствующие образованию частиц износа.

Вблизи неметаллических включений и продуктов коррозии колесной стали частицы износа имеют вид петель, спиралей, аналогичных стружкам при резании (рис. 1 *п*).

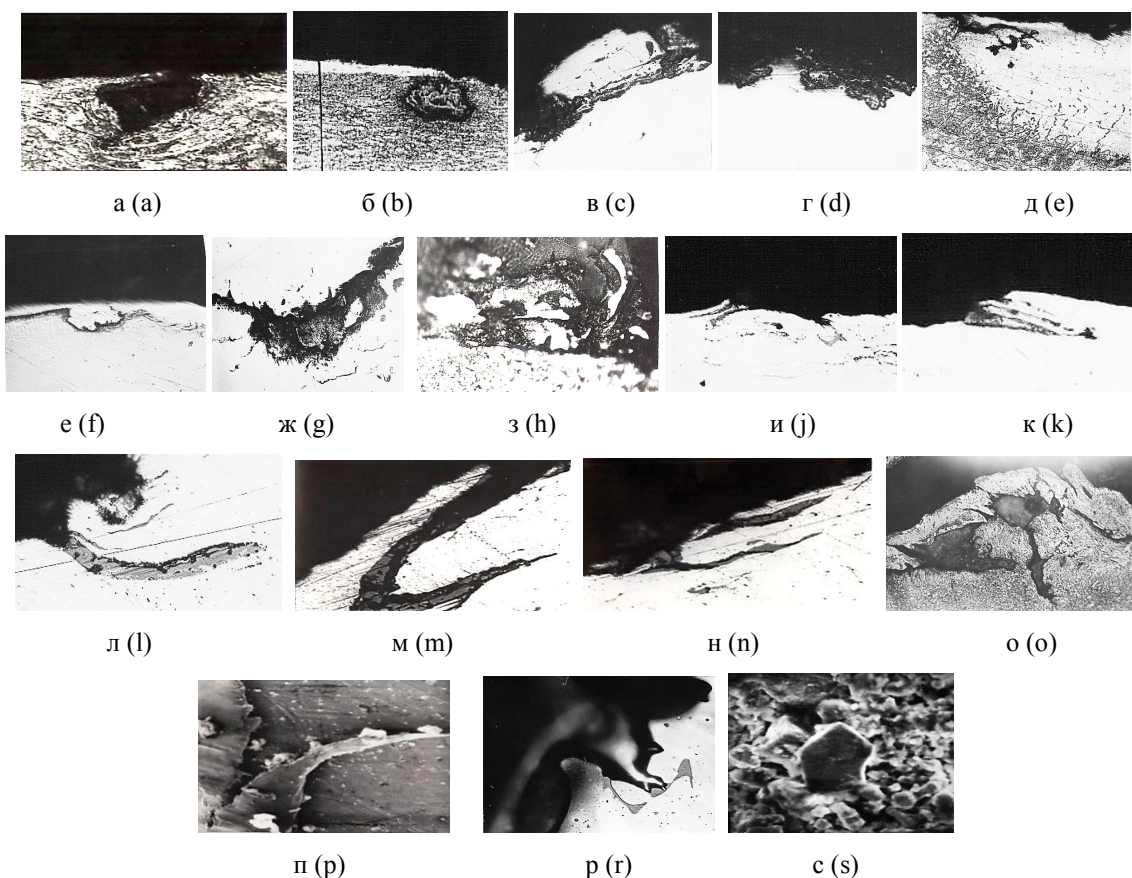


Рис. 1. Локализация деформации (*а*) и формирование частиц износа вблизи продуктов коррозии колесной стали (*б–з*) и неметаллических включений (*и–п*) на поверхности катания железнодорожных колес: *а – з, ж – м, о – × 400, д, е, н, п – × 200* / Fig. 1. Localization of deformation (*a*) and the formation of wear particles near the corrosion products of wheel steel (*b–z*) and non-metallic inclusions (*p*) on the rolling surface of railway wheels: *a – g, f – m, o – × 400, d, e, n, p – × 200*

Такую форму они принимают благодаря остаточным напряжениям, связанным с неоднородным распределением дислокаций по толщине частиц износа, образовавшихся вблизи включений [5]. По данным работы [4], такие частицы износа предшествуют повреждению и обнаруживаются, главным образом, на поверхности катания перед локальным разрушением. В случае локальной сульфидной красноломкости стали в участках поверхности катания, где прошло оплавление сульфидных включений, наблюдается множество частиц износа как спиральной формы, так и компактной неправильной формы (рис. 1 с), что вызвано наличием множества микротрещин в этих зонах, а также дроблением частиц износа вследствие сильной локализации деформации.

## Выводы

Вблизи неметаллических включений и продуктов коррозии колесной стали частицы износа имеют форму петель и спиралей. Они образуются вследствие локализации деформации вблизи включений и наволакивания металла матрицы на включения, а также в результате расслоения межфазных границ включение – матрица. Такие частицы обнаруживаются, главным образом, на поверхности катания перед локальным разрушением. В случае проявления локальной сульфидной красноломкости образуется множество частиц износа как спиральной формы, так и компактной неправильной формы, что вызвано наличием множества микротрещин в этих зонах, а также дроблением частиц износа вследствие сильной локализации деформации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Есаулов В. П. Конструкции железнодорожных колес мира : монография / [В. П. Есаулов, А. И. Козловский, А. Т. Есаулов, М. И. Староселецкий]. – Днепропетровськ : Січ, 1997. – 428 с.
2. Таран Ю. Н. Структурные изменения в ободьях железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания / Ю. Н. Таран, В. П. Есаулов, С. И. Губенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 9. – С. 101–105.
3. Таран Ю. Н. Повышение износостойкости железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания / Ю. Н. Таран, В. П. Есаулов, С. И. Губенко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 2. – С. 42–44.
4. Марченко Е. А. О природе износа поверхностей металлов при трении : монография / Е. А. Марченко. – Москва : Наука, 1979. – 118 с.
5. Suh N. P. The Delamination Theory of Wear / N. P. Suh // Wear. – 1973. – Vol. 23. – № 1. – Pp. 111–124.
6. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог : монография / [А. А. Воробьев, С. И. Губенко, И. А. Иванов и др.]. – Москва : ИНФРА-М, 2011. – 264 с.
7. Лихтман В. И. Физико-химическая механика материалов : монография / [В. И. Лихтман, Е. Д. Щукин, П. А. Ребиндер]. – Москва : Изд. Академии наук СССР, 1962. – 303 с.
8. Губенко С. И. Неметаллические включения в стали : монография / [С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко]. – Днепропетровськ : АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.
9. Губенко С. И. Неметаллические включения и прочность сталей : монография / Губенко С. И. – Германия, Саарбрюкен (Saarbrücken) : LAP LAMBERT. – Palmarium academic publishing, 2015. – 476 с.
10. Губенко С. И. Неметаллические включения в стали : монография / [С. И. Губенко, С. П. Ошкадеров]. – Киев : Наукова думка, 2016. – 528 с.
11. Губенко С. И. Межфазные границы включение – матрица в сталях : монография / С. И. Губенко. – Germany – Mauritius, Beau Bassin. – Palmarium academic publishing, 2017. – 506 с.
12. Денисенко О. І. Розподіл температури одновимірного зразка в умовах місцевої термообробки / О. І. Денисенко, В. І. Цоцко, І. М. Спиридонова, Б. Г. Пелешенко // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. 9. – № 1 (2008). – С. 181–184.

## REFERENCES

1. Esaulov V.P., Kozlovsky A.I., Esaulov A.T. and Staroseletsky M.I. *Konstruksii zaliznichnih kolis svitu* [Design of railway wheels of the world]. Dnipropetrovsk: Sich Publ., 1997, 428 p. (in Russian).
2. Taran Yu.N., Esaulov V.P. and Gubenko S.I. *Strukturnie izmeneniya v obodiakh zheleznodorozhnykh koles s raznim profilem poverhnosti kataniya* [Structural changes in the rims of railway wheels with a different tread profile]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of universities. Ferrous metallurgy]. 1989, no. 9, pp. 101–105. (in Russian).
3. Taran Yu.N., Esaulov V.P. and Gubenko S.I. *Povishenie iznosostojkosti zheleznodorozhnykh koles s raznim profilem poverhnosti kataniya* [Increasing the wear resistance of railway wheels with a different tread profile]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. 2000, no. 2, pp. 42–44. (in Russian).
4. Marchenko E.A. *O pripode iznosa poverhnostej metallov pri rtenii* [On the nature of the wear of metal surfaces in friction]. Moscow: Nauka Publ., 1979, 118 p. (in Russian).
5. Suh N.P. The Delamination Theory of Wear. *Wear*, 1973, vol. 23, no. 1, pp. 111–124.
6. Vorobiov A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A. and etc. *Resurs i remontprigodnost kolesnih par podvixhnogo sostava zheleznykh dorog* [Resource and maintainability of wheel sets of rolling stock of railways]. Moscow: INFRA-M, 2011, 264 p. (in Russian).
7. Lihtman V.I., Zchukin E.D. and Pebinder P.A. *Phiziko-himicheskaja mehanika materialov* [Physico-chemical mechanics of materials]. Moscow: Academy of Science of the USSR, 1962, 303 p. (in Russian).
8. Gubenko S.I., Parusov V.V. and Derevianchenko I.V. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Dnipropetrovsk: ART-PRESS Publ., 2005, 536 p. (in Russian).
9. Gubenko S.I. *Nemetallicheskie vkluchenija i prochnost stali* [Non-metallic inclusions and strength of steel]. – Saarbrücken : LAP LAMBERT, Palmarium academic publishing, 2015, 476 p. (in Russian).
10. Gubenko S.I. and Oshkadepov S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. – Kyiv : Naukova dumka, 2016, 528 p. (in Russian).

11. Gubenko S.I. *Mezhpfaznie granitsi vkluchenie-matritsa I svoisrva stalej* [Interphase boundaries inclusion-matrix and properties of steels]. Germany–Mauritius, Palmarium academic publishing, 2017, 506 p. (in Russian).

12. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M. and Peleshenko B.G. *Rozpodil tempetaruti odnovimirnogo zrazka v umovah mistsevoi termoobrobki* [Temperature distribution of the one-dimensional sample in terms of local heat treatment]. *Fizika i himija tverdogo tila* [Physics and Chemistry of Solid State]. 2008, vol. 9, no. 1, pp. 181–184 (in Ukrainian).

Поступила в редакцію 11.04.2018

Принята в печать 17.04.2018

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240418.32.264

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

ДУБРОВ Ю. И. \*, *д. т. н., проф.*

\* Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [mom@mail.pgasa.dp.ua](mailto:mom@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

**Аннотация. Постановка проблемы.** При моделировании многопараметрических технологий большое, а иногда и непредсказуемое влияние на функцию цели оказывают факторы, которые мы часто относим к случайным. Учёт «случайности» в создаваемых математических моделях, как правило, задаётся совокупностью случайных факторов, при этом учитывается конечномерное их распределение. Такой подход к учету случайности трудно осуществим. Ранее многими авторами проведены многочисленные исследования, которые показали, что моделирование случайности может производиться за счет подключения к процессу идентификации генератора случайных чисел. **Результаты и их обсуждение.** В работе показано, что генератор случайных чисел часто реализуется Природой, и этим самым Природа включает влияние на идентифицируемый процесс случайных факторов. Для того чтобы показать закономерности появления случайных факторов, приводится их геометрическая интерпретация. Рассмотрен механизм работы генератора, реализуемый при моделировании многопараметрической технологии. В статье отмечается, что каждой многопараметрической технологии присуща естественная неполнота формальной аксиоматики. **Выводы.** На реальном примере показано, как в уменьшенном масштабе времени применение способа идентификации приводит к повышению вероятности выявления рациональных управлений многопараметрической технологией.

**Ключевые слова:** генератор случайных чисел; сложная система; математическая модель; случайный поиск; гиперсфера; функция цели

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ДУБРОВ Ю. І. \*, *д. т. н., проф.*

\* Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [mom@mail.pgasa.dp.ua](mailto:mom@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-3213-4893

**Анотація. Постановка проблеми.** У моделюванні багатопараметричних технологій великий, а іноді й непередбачуваний вплив на функцію мети становлять фактори, які ми часто відносимо до випадкових. Урахування «випадковості» у створюваних математичних моделях, як правило, задається сукупністю випадкових факторів, при цьому враховується скінченновимірний їх розподіл. Такий підхід до обліку випадковості важко здійснити. Раніше багато авторів провели численні дослідження, які показали, що моделювання випадковості може проводитися за рахунок підключення до процесу ідентифікації генератора випадкових чисел. **Результати та їх обговорення.** У статті показано, що генератор випадкових чисел часто реалізується Природою, і цим самим Природа включає вплив на ідентифікований процес випадкових факторів. Для того щоб показати закономірності появи випадкових факторів, наводиться їх геометрична інтерпретація. Розглянуто механізм роботи генератора, що реалізується під час моделювання багатопараметричної технології. Наголошується, що кожній багатопараметричній технології властива природна неповнота формальної аксіоматики. **Висновки.** На реальному прикладі показано, як у зменшеному масштабі часу застосування способу ідентифікації зумовлює підвищення ймовірності виявлення раціональних управлінь багатопараметричною технологією.