

АНАЛИЗ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС, ИЗГОТОВЛЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ПРОИЗВОДСТВА

БАБАЧЕНКО А.И.^{1,2*}, к. т. н.,
КНЬШ А.В.¹, к. т. н.,
КОНОНЕНКО А.А.^{1,2}, к. т. н.,
ДЕМЕНТЬЕВА Ж.А.¹,
ШПАК Е.А.¹,
КЛИНОВАЯ О.Ф.¹

¹ Отдел деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, пл. Ак. Стародубова К.Ф., 1, 49050, Днепропетровск, Украина, тел.+38(056)790-05-14, e-mail: A_Babachenko@mail.ru

² Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49005, Днепропетровск, Украина

Аннотация. *Цель.* Сравнительные исследования макро- и микроструктуры литого колеса и цельнокатаного. *Методика.* Анализовали макро- и микроструктуру железнодорожных колес класса С, изготовленные по стандарту М-107/М-208 производства компании Griffin Wheel и цельнокатаные колеса из стали марки 2, изготовленные по ГОСТ 10791-2011 производства ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ». *Результаты.* Выполнены исследования макро- и микроструктуры литых и цельнокатаных железнодорожных колес. Ввиду особенностей производства литых колес (кристаллизуется обод колеса, подпитываемый жидким металлом через диск, потом кристаллизуются диск и ступица), все наблюдаемые в стальном слитке дефекты литой структуры (направленная дендритная структура, усадочные поры, скопление легирующих и примесных элементов), наблюдаются и в каждом элементе литых железнодорожных колес. Показано, что загрязненность неметаллическими включениями литых колес превышает 3 балл, присутствуют поры, выражена ликвация, микроструктура неоднородна. Микроструктура всех элементов литого колеса состоит из перлита, имеет неоднородное строение – сильно- и слабобравящиеся полосы (участки), что объясняется наличием дендритной ликвации. В цельнокатаных колесах загрязненность включениями не превышала 2 балл, пор не наблюдали, микроструктура однородная. *Научная новизна.* Показано, что загрязненность неметаллическими включениями литых колес превышает 3 балл, присутствуют поры, выражена ликвация, микроструктура неоднородна. В цельнокатаных колесах загрязненность включениями не превышала 2 балл, пор не наблюдали, микроструктура однородная. *Практическая значимость.* Цельнокатаные железнодорожные колеса обладают большей эксплуатационной надежностью, так как по показателям макро- и микроструктуры их качество значительно выше по сравнению с аналогичными показателями литых колес.

Ключевые слова: цельнокатаные железнодорожные колеса, литые железнодорожные колеса, макроструктура, микроструктура, кристаллизация.

АНАЛІЗ МАКРО- І МІКРОСТРУКТУРИ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС, ВИГОТОВЛЕНИХ РІЗНИМИ СПОСОБАМИ ВИРОБНИЦТВА

БАБАЧЕНКО О.І.^{1,2*}, к. т. н.,
КНИШ А.В.¹, к. т. н.,
КОНОНЕНКО Г.А.^{1,2}, к. т. н.,
ДЕМЕНТЬЄВА Ж.А.¹,
ШПАК О.А.¹,
КЛИНОВА О.П.¹

¹ Відділ деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К.Ф., 1, 49050, Дніпропетровськ, Україна, тел.+38(056)790-05-14, e-mail: A_Babachenko@mail.ru

² Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагарина, 4, 49005, Дніпропетровськ, Україна

Анотація. *Мета.* Порівняльні дослідження макро- і микроструктури литого колеса і суцільнокатаного. *Методика.* Аналізували макро- і микроструктуру залізничних коліс класу С, виготовлених за стандартом М-107/М-208 виробництва компанії Griffin Wheel і суцільнокатані колеса зі сталі марки 2, виготовлених за стандартом ГОСТ 10791-2011 виробництва ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ». *Результати.* Виконано дослідження макро- і микроструктури литих і суцільнокатаних залізничних коліс. Зважаючи на особливості виробництва литих коліс (кристалізується обод колеса, з підживленням рідким

металом через диск, потім кристалізуються диск і маточина), всі спостережувані в сталевому слитку дефекти литої будови (спрямована дендритна структура, усадочні пори, скупчення легуючих і домішкових елементів), спостерігаються і в кожному елементі литих залізничних коліс. Показано, що забрудненість неметалевими включеннями литих коліс перевищує 3 бал, присутні пори, виражена ліквіація. Мікроструктура всіх елементів литого колеса складається з перліту, має неоднорідне будову - смуги (ділянки), що травляться більш сильно і більш слабо, що пояснюється наявністю дендритної ліквіації. У суцільнокатаних колесах забрудненість включеннями не перевищувала 2 бал, пори не спостерігали, мікроструктура однорідна. **Наукова новизна.** Показано, що забрудненість неметалевими включеннями литих коліс перевищує 3 бал, присутні пори, виражена ліквіація, мікроструктура неоднорідна. У суцільнокатаних колесах забрудненість включеннями не перевищувала 2 бал, пори не спостерігали, мікроструктура однорідна. **Практична значимість.** Суцільнокатані залізничні колеса більш експлуатаційно надійні, так як за показниками макро- і мікроструктури їх якість значно вище в порівнянні з аналогічними показниками литих коліс.

Ключові слова: суцільнокатані залізничні колеса, литі залізничні колеса, макроструктура, мікроструктура, кристалізація.

THE ANALYSIS OF MACRO- AND MICROSTRUCTURE OF THE RAILWAY WHEELS MADE BY DIFFERENT MANUFACTURING METHODS

Babachenko A. I. ^{1,2*}, *Cand. Sc. (Tech.)*

Knysh A. V. ¹, *Cand. Sc. (Tech.)*

Kononenko A. A. ^{1,2}, *Cand. Sc. (Tech.)*

Dement'eva Zh. A. ¹,

Shpak E. A. ¹

Klinovaya O. F. ¹

¹Department of Deformation and Heat Treatment of Constructional Steels of Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Sq. Academician Starodubova, 1, 49050, Dnipropetrovsk, Ukraine,

tel. +38 (056) 790-05-21, +38 (056) 790-57-85, e-mail: a_babachenko@mail.ru

² Department of Heat Treatment of Metals of the National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagaryn avenue, 4, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine

Abstract. Purpose. The comparative studies of macro- and microstructure of the cast and all-rolled wheels. **Methodology.** The analysis of the macro- and microstructure of class C railway wheels, made according to the standard M-107 / M-208 manufacture by GriffinWheel, and all-rolled wheels of steel grade 2, made in accordance with ГОСТ 10791 – 2011 manufacture of PJSC «Interpipe NTRP». **Findings.** The macro- and microstructure studies of cast and all-rolled railway wheels have been carried out. Due to the features manufacture of the cast wheels (at first a rim crystallizes that is filled with liquid metal through a disk, then the disk and hud crystallize) all defects of cast structure (directional dendritic structure, shrinkage cavities, segregation of alloying and impurity elements) are observed in each elements of the cast railway wheels. It has been shown that contamination by non-metallic inclusions of cast wheels is more than 3 points, there are pores, expressed segregation and microstructure is heterogeneous. The microstructure of all elements of the cast wheel consists of pearlite. It has heterogeneous structure – strongly and weakly etched streaks (areas) due to the presence of dendritic segregation. The solid wheels' contamination by non-metallic inclusions did not exceed 2 points, pores are not observed. Their microstructure is homogeneous. **Originality.** It has been shown that contamination by non-metallic inclusions of the cast wheels is more than 3 points, there are pores, expressed segregation, and microstructure is heterogeneous. The contamination by non-metallic inclusions of the all-rolled wheels does not exceed 2 point, pores are not observed, and their microstructure is homogeneous. **Practical value.** The all-rolled railway wheels have greater operational reliability, so long as their quality is significantly higher by parameters of macro- and microstructure compared with those characteristic of the cast wheels.

Keywords: all-rolled railway wheels, cast railway wheels, macrostructure, microstructure, crystallization.

Введение

На современном этапе развития промышленности железнодорожные колеса могут производиться различными способами. В процессе изготовления в зависимости от технологических параметров происходит формирование макро- и микроструктуры изделия. Известно, что комплекс механических

свойств изделия определяется конечной макро- и микроструктурой, формируемой при его изготовлении.

Цель работы

Сравнительные исследования макро- и микроструктуры литого колеса и цельнокатаного.

Материал и методика исследования

Для исследований были выбраны литые колеса класса С, изготовленные по стандарту М-107/М-208, а в качестве сравнительных – цельнокатанные колеса из стали марки 2, изготовленные по ГОСТ 10791-2011. Для проведения работы в депо «Мудреная» (Приднепровская железная дорога) были отобраны три колесные пары, сформированные из литых железнодорожных колес производства компании Griffin Wheel. В качестве материала для сравнения были выбраны железнодорожные колеса производства ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ», изготовленные из сталей марки 2 по ГОСТ 10791 из слитков мартеновской вакуумированной стали. Химический состав исследуемых колес представлен в таблице.

Таблица

Химический состав исследуемых колес

Марка стали	Содержание элементов, мас. %							
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	V
марка С	0,72	0,76	0,46	0,01	0,013	0,08	0,04	≤0,005
марка 2	0,61	0,74	0,35	0,007	0,005	0,09	0,04	–

Результаты исследований

Выявление макроструктуры проводили по ГОСТ 10243 на поперечных темплетках горячим травлением в 50% водном растворе соляной кислоты.

Процесс затвердевания слитка углеродистой стали при разливке завершается образованием трех основных зон: мелкозернистая корочка, зона столбчатых кристаллов, зона равноосных кристаллов. Жидкий металл имеет больший удельный объем, чем твердый, поэтому металл, залитый в форму, уменьшается в объеме при кристаллизации, что приводит к образованию пустот, называемых дефектами усадочного происхождения, которые концентрируются, в основном, в осевой зоне слитка [1]. После завершения затвердевания усадочные раковины обычно окружены наиболее загрязненным металлом, в котором наблюдаются микро- и макropоры, пузыри, скопления легирующих и примесных элементов. Такие структурные особенности слитка наблюдаются и в литом железнодорожном колесе. Кроме того, ввиду особенностей их производства (кристаллизуется обод колеса, подпитываемый жидким металлом через диск, потом кристаллизуются диск и ступица), все три зоны, наблюдаемые в стальном слитке, наблюдаются и в каждом элементе литого колеса (рис. 1, а).

При производстве цельнокатанных железнодорожных колес, изготовленных из слитков металла, применяют операцию горячей пластической деформации, которая исправляет большинство дефектов литой структуры, повышает качество металла путем преобразования литой структуры в деформированную, тем самым убирает анизотропию свойств обода и ступицы колеса и формирует

благоприятную направленную структуру в диске (рис. 1, б).

Требованиями ГОСТ 10791-2011 не допускается наличие флокенов, расслоений, трещин, корочек, остатков усадочных раковин и недопустимых ликваций. Анализ макротемплетов анализируемых литых железнодорожных колес показал отсутствие перечисленных выше дефектов. При этом в макроструктуре каждого элемента колеса наблюдается осевая пористость (рыхлость).

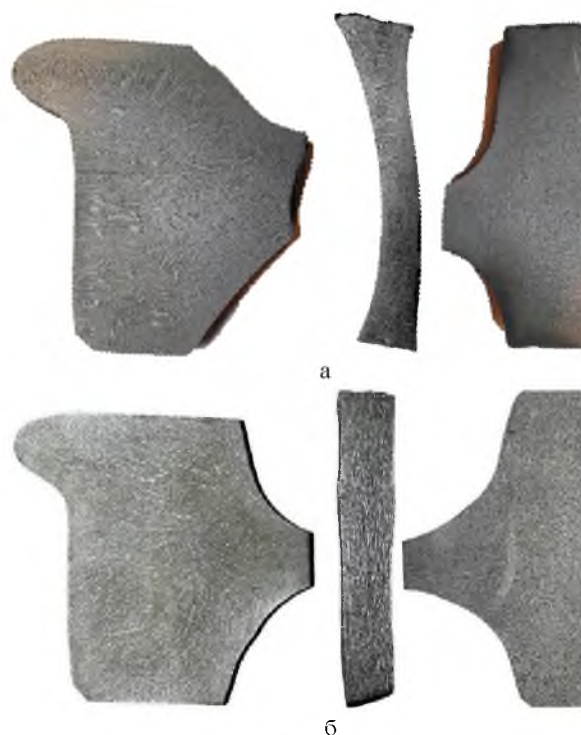


Рис. 1. Макроструктура литого (а) и цельнокатаного (б) колеса / The macrostructure of the cast (а) and all-rolled (б) railway wheels

Изучение микроструктуры проводили в ободе и диске. Оценка загрязнённости включениями металла исследуемых колес выполнена в соответствии с ГОСТ 1778 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений». Максимальный балл неметаллических включений в исследованных образцах определен по методу Ш. Во всех элементах литого колеса оценку выполняли по сульфидам марганца, т.к. они занимают максимальную площадь шлифа. Средний балл сульфидных включений в ободе литого колеса составляет 3 балл (рис. 2, а, б), что превышает требования ГОСТ 10791-2011. Размер неметаллических включений в других элементах колеса ГОСТ 10791-2011 не регламентирует, но проведенные исследования показали, что средний размер сульфидов в них составляет 3,5 балл (рис. 2, в, г). Кроме сульфидов в металле литого колеса присутствуют сложные неметаллические включения – оксисульфонитриды. Они очень мелкие и расположены, в основном, в междендритном

пространстве, в то время как сульфиды расположены как в междендритном пространстве, так и по телу дендрита (рис. 2, а-г). Установлено, что во всех элементах колеса присутствуют мелкие несплошности (поры).

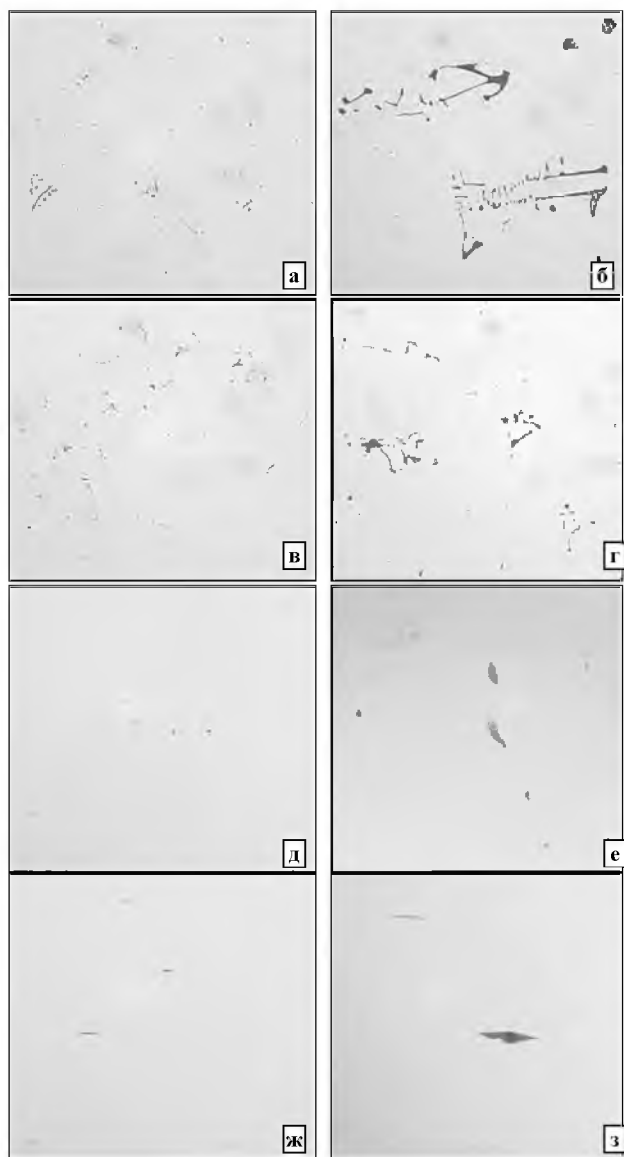


Рис. 2. Неметаллические включения в различных элементах литого колеса: а, б – обод; в, г – диск; и цельнокатаного: д, е – обод; ж, з – диск; а, в, д, ж – $\times 100$; б, г, е, з – $\times 400$ / Non-metallic inclusions in the various elements of cast wheels: а, б - rim; в, г - disk; and s all-rolled: д, е - rim; ж, з - disk; а, в, д, ж - $\times 100$; б, г, е, з - $\times 400$.

Сульфидные включения в цельнокатаном колесе из слитка мартеновской стали (рис. 2, д-з) не превышают 2 балл, что соответствует требованиям ГОСТ 10791-2011. Они имеют более округлую форму, чем в литом колесе, что оказывает менее негативное влияние на показатели надежности, чем сульфидная эвтектика, наблюдаемая в литом колесе, имеющая ленточную форму. Остальные

неметаллические включения очень мелкие, поэтому балл их не определялся.

Микроструктуру выявляли травлением микрошлифов в 3-4 % спиртовом растворе азотной кислоты. Микроструктура всех элементов литого колеса состоит из перлита, имеет неоднородное строение – сильно- и слаботравящиеся полосы (участки), что объясняется наличием дендритной ликвации (рис. 3).

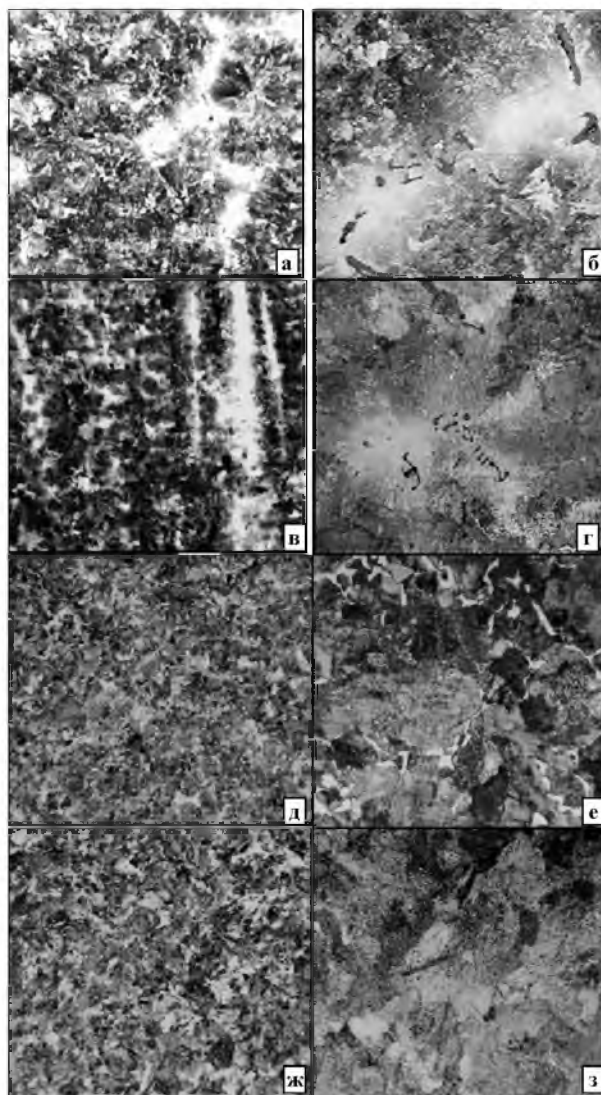


Рис. 3. Микроструктура различных элементов литого колеса: а, б – обод; в, г – диск; и цельнокатаного: д, е – обод; ж, з – диск; а, в, д, ж – $\times 100$; б, г, е, з – $\times 400$ / The microstructure of the various elements of cast wheels: а, б - rim; в, г - disk; and s all-rolled: д, е - rim; ж, з - disk; а, в, д, ж - $\times 100$; б, г, е, з - $\times 400$.

По форме и направлению данных участков четко видны столбчатые и равноосные дендриты литой структуры, которые были выявлены при исследовании макроструктуры (рис. 3, а-г).

Согласно данным работы [2] в ликвационных микрообъемах углеродистой стали (0,42 – 0,50 % С)

содержание марганца на 50 % выше, чем в микрообъемах без видимой ликвации. Повышенное содержание марганца в этих объемах способствует понижению коэффициента термодинамической активности углерода и увеличению его концентрации [3], в них часто наблюдаются как одиночные неметаллические включения, так и их скопления (пластичные сульфиды, силикаты глобулярные, сложные комплексные включения и т.д.). Неметаллические включения располагаются, в основном, в междендритном пространстве.

Микроструктура обода литого колеса состоит в основном из сфероидизированного перлита. Количество пластинчатого перлита и расстояние между пластинками в самом перлите увеличивается от обода к ступице. Количество доэвтектоидного феррита настолько мало, что его можно увидеть только при большом увеличении, в виде очень тонких прослоек по границам зерен.

Микроструктура цельнокатаного железнодорожного колеса более однородна, чем литого (рис. 3, д-з). Химическая неоднородность выражена слабо. Микроструктура ферритно-перлитная, однородная. Количество феррита в структуре больше, чем в литом колесе за счет меньшего содержания углерода. Равномерность структуры достигается благодаря влиянию горячей пластической деформации и последующей термической обработки, которые приводят к повышению структурной однородности металла в сравнении с литой структурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Явойский В. И., Левин С. Л., Баптизманский В. И. и др. *Металлургия стали*. – М.: Metallurgy, 1973. – 816 с.
Yavovskiy V.I., Levin S.L., Baptizmanskiy V.I. and others. *Moscow, Steel Metallurgy*, 1973. – 816 p.
2. Левченко Г.В., Ершов С. В., Дёмина Е. Г. и др. Трансформация дендритной структуры на всех этапах производства железнодорожных осей // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 2. – С. 74 – 76.
Levchenko G.V., Ershov S.V., Demina E.G., and others. *Transformatsiya dendritnoy struktury na vseh etapah proizvodstva zheleznodorozhnykh osey* [Transformation of the

Научная новизна и практическая значимость.

Показано, что загрязненность неметаллическими включениями литых колес превышает 3 балл, присутствуют поры, выражена ликвация, микроструктура неоднородна. В цельнокатаных колесах загрязненность включениями не превышала 2 балл, пор не наблюдали, микроструктура однородная

Цельнокатаные железнодорожные колеса обладают большей эксплуатационной надежностью, так как по показателям макро- и микроструктуры их качество значительно выше по сравнению с аналогичными показателями литых колес.

Выводы

1. Установлена высокая загрязненность неметаллическими включениями, особенно сульфидными, литых колес. Средний размер сульфидных включений в ободке колеса равен третьему баллу, что превышает требования ГОСТ 10791-2011, в других элементах колеса – 3,5 балл. Во всех элементах колеса (в т.ч. и в ободке) обнаружены поры, что является недопустимым дефектом по ГОСТ 10791-2011.

2. Показано, что микроструктура цельнокатаного железнодорожного колеса более однородна, чем литого колеса. В цельнокатаном колесе ликвационная неоднородность выражена слабо, поры в ободке и других элементах колеса отсутствуют.

dendritic structure at all stages of production of railway axles] – *Metallurgical and Mining Industry*, 2008, no. 2, pp. 74-76.

3. Жуков А. А. Термодинамические аспекты оптимизации состава комплекснолегированных сталей // *Основы литейных сплавов: труды XIV совещания по теории литейных процессов*. – Москва: Наука. – 1970. – С. 82 – 85.

Zhykov A. A. *Termodinamicheskie aspektu optimizatsii sostava kompleksnolegirovaniy staley* [Thermodynamic aspects of optimization of complex alloy steel] – *Basics of casting alloys: Proceedings XIV Conference on the Theory of casting processes*. – Moscow: Nauka, 1970, pp. 82-85.

Статья рекомендована к публикации д-ром.техн.наук, проф. В.В. Парусовым (Украина); д-ром.техн.наук, проф. Л. Н Дейнеко (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015