



Режимы обработки профиля поверхности катания колесных пар метровагонов



Игорь ИВАНОВ
Igor A. IVANOV

Дмитрий ПОТАХОВ
Dmitry A. POTAKHOV



Сергей УРУШЕВ
Sergey V. URUSHEV

*Иванов Игорь Александрович – доктор технических наук, профессор Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия.
Урушев Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия.
Потахов Дмитрий Александрович – аспирант ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия.*

Processing Modes of Thread Surface Profile of Metro Cars' Wheelsets
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 89)

Рационализация процесса восстановления профиля поверхности катания колесных пар за счет использования критерия «оптимальной температуры резания», введенного проф. А. Д. Макаровым. Работа инструмента в таком режиме обеспечивает ему наибольшую размерную стойкость (долговечность) и требуемую скорость обработки металла. При этом фигурируют метод подобия, теплофизический и термомеханический подходы, а также метод линейного программирования. Экспериментально выявлено, что с помощью метода подобия рассчитываются режимы, позволяющие не только улучшить свойства режущего инструмента и добиться удовлетворительного стружкообразования, но и продлить эксплуатационный ресурс колёс метровагона.

Ключевые слова: метрополитен, вагон, колесная пара, цельнокатаное колесо, восстановление профиля поверхности катания, режимы резания, оптимальная температура.

Механическая обработка колес вагонов метрополитена помогает восстановлению заданных размеров изношенного при эксплуатации профиля, а у новых колес – формированию геометрии профиля поверхности катания. Технологический процесс восстановления имеет ряд особенностей, обусловленных переменной величиной снимаемого припуска, изменением физико-механических свойств поверхности колес в ходе эксплуатации и сложностью конфигурации их профиля [1, 2]. Ко всему прочему при наличии дефектов поверхности катания вынужденно «под корку» срезается полезный работоспособный слой металла обода, за счет чего значительно сокращается срок службы колеса. Исследованиями [3, 4] установлено, что каждый миллиметр толщины обода поверхности катания соответствует 20–40 тыс. км пробега.

Введение в ГОСТ 10791-2011 новых марок колесной стали с повышенной твердостью обода усложнило оценку их обрабатываемости. Соответственно гостовским

Таблица 1

Механические свойства колесных сталей по ГОСТ 10791-2011

Марка стали	Временное сопротивление обода σ_b , Н/мм ²	Относительное удлинение обода δ , %	Относительное сужение обода ψ , %	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²			Твердость обода на глубине 30 мм, НВ
				обода	диска		
				при 20°C	при 20°C	при – 60°C	
2	910-1110	8	14	20	20	15	≥255
Л	≥930	12	21	30	30	20	280-320

Таблица 2

Характеристики используемого станочного оборудования

Модель колесотокарного станка	Техническая характеристика			Техническое состояние
	Диапазон частот вращения планшайб, об/мин	Диапазоны рабочих подач суппортов станка, мм/мин	Наибольшая глубина резания, мм	
УСВ-125	9,0-27,0	1,6-50,0	10	среднее
КЗТС 1836	3,15-25,0	6,0-80,0	10	среднее

коррекциям проведено сравнение режимов восстановления профиля цельнокатаных колес вагонов метрополитена на основе результатов расчетов с использованием различных подходов: теории подобия [5], теплофизического анализа [6], термомеханического подхода [8], рекомендаций нормативных документов и метода линейного программирования [9, 10]. При этом целью исследования стал поиск рациональных режимов, обеспечивающих снижение себестоимости восстановительной обточкой колес.

1. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ

Для вагонов петербургского метрополитена применяются цельнокатаные колеса из стали марки «2». В ГОСТ 10791-2011 помимо этой марки отражена и марка «Л», в которой меньше содержание углерода по сравнению с традиционными сталями, больше легирующих элементов (марганец, кремний, ванадий, ниобий). Механические свойства подобных колесных сталей приведены в таблице 1. За счет повышения предела прочности в сочетании с высокой ударной вязкостью и трещиностойкостью качество колес из стали «Л» по износу в 1,2 раза выше. К тому же по данным [11] они имеют увеличенный межремонтный пробег без образования выщербин контактно-усталостного происхождения. Расчетный ресурс колес из стали «Л» составляет

1,44 млн км против 1,04 у типовых колес стали марки «2». Иначе говоря, преимущества колес из стали «Л» для петербургских коллег, по-видимому, предмет обсуждения уже в скором будущем.

Новое формирование (переформирование) профиля поверхности катания колесных пар в электродепо «Дачное» Петербургского метрополитена производится на колесотокарном станке Краматорского завода тяжелого станкостроения (КЗТС) модели 1836. Здесь осуществляется и обточка колесных пар старого формирования на станке Рафамет УСВ-125 (модернизированным, с ЧПУ) – см. таблицу 2.

В качестве режущего инструмента использовались чашечные пластины без поверхностного износостойкого покрытия и с типовой формой стружколомающей канавки: Ø30,8 мм черт. 5-61.033 ГОСТ 3882-74 формы RPUX 3010 MOTN из твердого сплава Т14К8 с геометрией переднего угла $\gamma = 10^\circ$, заднего угла $\alpha = 8^\circ$.

Для определения исходной (перед обработкой) твердости ремонтируемых колес применялся твердомер динамический «ТЭМП-2У» (таблица 3) производства НПП «Технотест» (Россия), протарированный с помощью образцовых мер твердости МТБ ГОСТ 9031-78. Измерения твердости материала колеса производились по поверхности катания до и после обточки. Критерием оценки рациональности режимов служили такие показатели





Характеристики портативного твердомера «ТЭМП-2У»

Диапазоны измерения твердости по шкалам				Время одного измерения, сек.	Погрешность показаний твердомера, %
Роквелла	Бринелля	Виккерса	Шора		
22-68 HRC	100-450 HB	100-950 HV	22-99 HSD	1	±5

Таблица 4
Допускаемая шероховатость обработанных поверхностей элементов колесных пар

Наименование элементов и частей колесных пар	Шероховатость поверхности, мкм
Поверхность катания колеса	$Ra \leq 6,3$
Наружная фаска поверхности катания и гребень	$Ra \leq 12,5$
Внутренняя боковая поверхность обода	$Ra \leq 12,5$
Внутренний и наружный торцы ступицы колеса	(по черт.)

процесса, как хорошее стружкообразование и приемлемая стойкость инструмента (3-4 колесных пары на одну позицию пластины).

В каждой отрасли транспорта, где нашли свое применение колесные пары, есть свои руководящие документы, устанавливающие порядок, сроки, нормы и требования их освидетельствования, технического обслуживания и ремонта. На петербургском метрополитене такой руководящий документ – «ПМетро-3/10-1. Инструкция по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию колесных пар электроподвижного состава». Она разработана на основании требований стандарта ГОСТ Р 51255-99».

Среди прочих требований к точности ремонтируемых колес инструкцией регламентируется один из немногих параметров, на который оказывают прямое и (или) косвенное влияние технология восстановления профиля поверхности катания колесных пар, применяемое станочное оборудование и режущий инструмент. Тако-

вым является параметр шероховатости поверхности Ra (среднее арифметическое отклонение неровностей профиля) при обработке на колесотокарных станках новых и старогодных элементов вагонных колесных пар (таблица 4) [12].

Шероховатость по поверхности катания после обточки контролировалась аттестованным портативным профилометром модели SURFTEST SJ-210 (таблица 5) производства «Mitutoyo» (Япония).

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

Одним из методов физической оптимизации процесса восстановления профиля колеса определен способ по «оптимальной температуре резания», разработанный проф. А. Д. Макаровым [7] и получивший дальнейшее развитие в трудах проф. С. С. Силина, где он присутствует наряду с расчетами рациональных режимов с использованием методов теории подобия [5]. Работа инструмента на оптимальных по температуре резания режимах предполагает наибольшую его размерную стойкость (долговечность) и позволяет сформировать поверхность катания восстанавливаемого колеса с требуемыми свойствами (параметрами), продлить эксплуатационный ресурс колесной пары. По установленной экспериментальным путем «оптимальной температуре» в зоне обточки для заданной технологическими требованиями величины подачи обосновывалась рациональная скорость восстановления профиля колеса для различных значений глубины резания.

Таблица 5

Основные характеристики портативного профилометра SURFTEST SJ-210

Цифровой фильтр	Длина сечения	Базовая длина	Число базовых длин	Параметры вычисления
Фильтр Гаусса, 2CR75, PC75	λ с: 0,08 мм; 0,25 мм; 0,8 мм; 2,5 мм λ s: 2,5 мкм; 8 мкм	0,8 мм; 0,25 мм; 0,8 мм; 2,5 мм	1-10	Ra , Rq , Rz , Rp , $Rmax$ и др.

Теория подобия. Анализ процесса восстановления осуществлялся с использованием шести основных безразмерных критериев подобия, содержащих в себе все базовые параметры технологического процесса механической обработки колеса и характеризующих собой: тепловую активность стружки по отношению к общей затраченной работе, степень пластических деформаций металла снимаемого припуска, тепловую активность инструментального материала по сравнению с тепловой активностью обрабатываемого материала, геометрию срезаемого слоя и др. Использование этих критериев позволяет результат исследования единичного опыта распространять на целую группу подобных ему опытов.

Оптимальная температура процесса при восстановлении профиля колеса определялась по зависимости:

$$\theta_0 = 0,6\theta_{пл} \left(\frac{\lambda}{\lambda_p} \right)^{0,12} \left(\frac{c\rho}{(c\rho)_p} \right)^{0,2} \frac{(\tau_p / \sigma_B)^{0,27}}{(1 + \delta)^{0,05}}, \quad (1)$$

где λ_p и λ – коэффициенты теплопроводности инструментального и обрабатываемого материалов; $c\rho_p$ и $c\rho$ – удельная объемная теплоемкость инструментального и обрабатываемого материалов; $\theta_{пл} = 1490$ °С – температура плавления кобальта; τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу; σ_B и δ – предел прочности и относительное удлинение при растяжении образцов из обрабатываемого материала.

Теплофизический анализ. Для каждого тела решалось дифференциальное уравнение теплопроводности в частных производных 2-го порядка:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \omega \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + v_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + v_z \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (2)$$

где $\theta = \theta(x, y, z, t)$ – температура точки с координатами x, y, z в момент времени t ; v_x, v_y, v_z – проекции на координатные оси вектора скорости перемещения внешнего источника теплоты; $\omega = \lambda/c\rho$ – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала (c – удельная массовая теплоемкость, ρ – плотность).

Чтобы конкретизировать задачу и выбрать решение, к уравнению (2) присоединялись краевые условия, описывающие геометрическую форму и свойства колеса и инструмента, граничные и начальные условия. Для аналитического решения использовался метод источников, предполагавший описание температурного поля в неограниченном теле под действием теплоты, внесенной импульсом в виде мгновенного точечного источника. Это температурное поле описывается выражением:

$$\theta(x, y, z, t) = \frac{Q}{\lambda \sqrt{\omega} (4\pi t)^{3/2}} \exp \left[-\frac{R^2}{4\omega t} \right], \quad (3)$$

где $\theta(x, y, z, t)$ – температура точки тела с координатами x, y, z , возникающая через t секунд после того, как в точке с координатами источника x_n, y_n, z_n имел место тепловой импульс;

$$R = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2} -$$

расстояние от точки до источника.

Термомеханический подход касается некоторых проблем, возникших в механике и теплофизике резания и потребовавших учета взаимосвязи тепловых и механических явлений. К числу таких проблем относятся описание изменения механических свойств в процессе обработки, расчет распределений температуры и контактных нагрузок, теоретическое определение усадки стружки, длины контакта и других характеристик стружкообразования.

Передача теплоты описывалась дифференциальным уравнением (2), вытекающим из закона сохранения количества тепловой энергии и основного закона теплопроводности (закона Фурье) с граничными условиями всех четырех родов [8]:

- 1) когда задана температура поверхности тела в виде функции времени;
- 2) когда задана плотность теплового потока на поверхности тела в виде функции времени;
- 3) когда задан закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой;
- 4) когда заданы условия теплообмена на поверхности раздела с другим твердым телом в предположении идеального теплового контакта.



Рис. 1. Сравнение экспериментально и теоретически полученной скорости восстановления профиля колеса, эксплуатируемого на подвижном составе метрополитена, при использовании чашечного резца с режимами $s = 1,1$ мм/об, $t = 3$ мм.

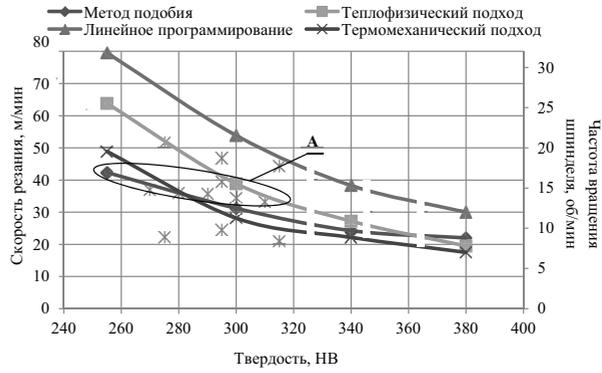
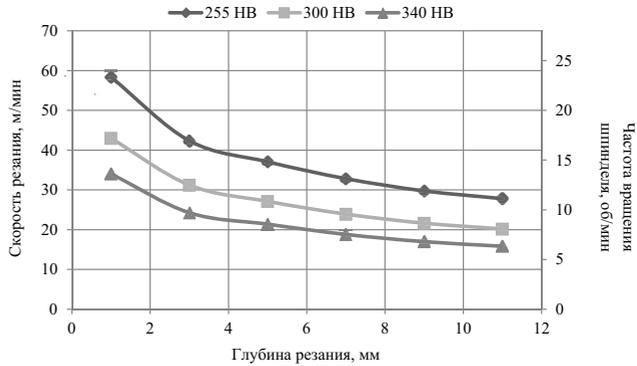


Рис. 2. Влияние глубины резания на скорость восстановления профиля колес для стали различной твердости при использовании чашечного резца с подачей $s = 1,1$ мм/об.



Особенностью данного подхода является использование определяющего уравнения, которое учитывает изменение свойств обрабатываемого материала при высоком уровне скорости деформации, изменяющихся деформациях и температурах, характерных для процесса восстановления профиля колеса:

$$\frac{\tau}{S_b} = AK_\varepsilon \varepsilon_p^m \exp(-B_\tau \Delta T'), \quad (4)$$

где S_b – действительный предел прочности; K_ε и B_τ – эмпирические константы, характеризующие влияние скорости деформации и температуры на предел текучести τ ; m – показатель деформационного упрочнения; ε_p – деформация; A – коэффициент, вычисляющийся через линейную конечную деформацию и показатель деформационного упрочнения; $\Delta T' = T - T_0$ – приращение гомологической температуры ($T = \Theta_d / T_{пл}$, $T_0 = 273 / T_{пл}$); Θ_d – температура деформации.

При расчете температур на рабочих поверхностях твердосплавного инструмента решалось дифференциальное уравнение теплопроводности (2). Температура передней поверхности определялась результатом действия двух быстро движущихся источников теплоты. Один равномерно распределен в зоне стружкообразования, другой располо-

жен на поверхности контакта инструмента со стружкой. Температура задней поверхности – результат действия трех источников теплоты: зоны стружкообразования, застойной пластической области и зоны фаски износа. Температура резания берется как средняя на площадке контакта по передней и задней поверхностям инструмента.

Метод линейного программирования был построен на основе зависимостей, рекомендуемых нормативными документами, и использовался для нахождения параметров процесса восстановления, подчиняющихся ограничивающим условиям: по режущим возможностям инструмента, по требованиям к мощности процесса и шероховатости и др. Совокупность критерия оптимальности и ограничений образовала математическую модель процесса восстановления профиля поверхности катания колеса:

$$\left. \begin{aligned} x_1 + y_v x_2 &\leq b_1, & (1 + n_p)x_1 + y_p x_2 &\leq b_2 \\ x_1 &\geq b_3, & x_1 &\leq b_4, & 2x_2 &\leq b_5 \\ x_2 &\geq b_6, & x_2 &\geq b_7 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где x_1, x_2 – управляемые переменные; $b_1 \dots b_7$ – правые части (свободные члены) неравенств; y_p, x_p, n_p – показатели влияния s, t, v на силу резания.

Сравнение результатов расчета скорости резания для стали твердостью 255 НВ при $s = 1,1$ мм/об.

Глубина t , мм	Скорость резания v , м/мин			
	Метод подобия	Теплофизический подход	Линейное программирование	Термомеханический подход
3	42,35	63,85	79,58	48,90
5	37,07	64,48	74,39	38,01
7	32,83	63,72	69,42	32,59
9	29,75	63,89	65,34	29,73
11	27,80	63,20	61,39	27,88

Были определены такие значения режимных параметров процесса, отвечающих системным ограничениям (5), при которых величина машинного времени, являющаяся их целевой функцией $f_0 = C_0 - x_1 - x_2$ (C_0 – постоянный коэффициент), приняла бы наименьшее значение при обработке колесной пары с требуемыми параметрами качества ее поверхности.

3. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ПРИМЕНЯЕМЫХ РЕЖИМОВ

Измерения показали, что распределение твердости на поверхности катания (и по сечению обода) новых колес из стали марки «2» по ГОСТ 10791 доходит до уровня марки «Л», 310-330 НВ. Поэтому в случае обточки колес повышенной твердости из стали марки «Л» по ГОСТ 10791-2011 в первом приближении в качестве рациональных годятся режимы для стали марки «2».

Обобщенные графические зависимости влияния твердости колесной стали «2» на скорость резания, полученную при условии обеспечения «оптимальной температуры» процесса, принятой $870 \pm 10^\circ\text{C}$, отображаются в виде вогнутых кривых различной кривизны (рис. 1), снижающихся при увеличении твердости колесной стали. Подача $s = 1,1$ мм/об. определена требованиями к шероховатости обработанной поверхности.

Как видно из рис. 1, наименьшие значения скорости соответствуют термомеханическому подходу и методу подобия, причем до твердости колесной стали порядка 280 НВ метод подобия дает меньшие значения скорости, а после 280 НВ – уже термомеханический подход. Средние зна-

чения получены на основе теплофизического подхода. Наибольшие значения скорости резания зафиксированы при использовании метода линейного программирования. Это можно объяснить тем, что режимы рассчитаны на основе общемашиностроительных нормативов [10] при условии обеспечения наименьшего машинного времени на обработку одной колесной пары, не учитывая в явном виде температуру, возникающую в зоне резания и ее влияние на износ режущего инструмента.

В численном виде результаты теоретического исследования процесса восстановления цельнокатаных колес подвижного состава метрополитена при условии использования режущего инструмента чашечной формы из твердых сплавов группы применения Р и М на различных глубинах резания представлены в таблице 6.

На рис. 1 изображены точечные выборки, полученные экспериментальным путем при восстановлении профиля колеса на ремонтном предприятии. В области «А» они отражают экспериментальные значения скорости резания в условиях хорошего стружкообразования (по виду стружки) и рациональной стойкости инструмента (по количеству обточек). Образовывающаяся стружка скалывания в отличие от других ее видов более транспортабельна для утилизации и не оказывает непрерывно меняющегося давления на режущий инструмент, не вызывает его дополнительную вибрацию и ухудшение качества обработанной поверхности. В то же время в области повышенных твердостей различия в расчетных значениях рациональной





Таблица 7

Скорость восстановления профиля цельнокатаного колеса Ø785 мм при использовании чашечного реза при подаче $s = 1,1$ мм/об

Твердость, НВ	Скорость резания v , м/мин					
	$t = 1$ мм	$t = 3$ мм	$t = 5$ мм	$t = 7$ мм	$t = 9$ мм	$t = 11$ мм
255	58,36	42,35	37,07	32,83	29,75	27,80
300	42,98	31,22	27,12	23,92	21,63	20,19
340	34,04	24,26	21,38	18,80	16,98	15,83
380	27,23	19,41	17,10	15,04	13,59	12,67

скорости составляют от 15 до 88%, что свидетельствует о необходимости уточнения расчетной модели.

В численном виде рекомендуемые режимы восстановления профиля колеса для значений НВ в 255, 300, 340 и перспективные 380 представлены в таблице 7, и в зависимости от твердости колесной стали для различных глубин резания они переданы в ремонтное производство в виде номограмм (рис. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Различные значения твердости колесных пар вагонов метрополитена по сечению обода определяют изменение расчетной величины скорости резания. Как при интенсивных режимах восстановления, соответствующих достаточно большим значениям сечения срезаемого слоя, так и при режимах резания со сравнительно небольшой толщиной срезаемого слоя при увеличении твердости стали рассчитанная скорость существенно уменьшается.

2. Несколько завышенные данные расчетов, полученные на основе метода линейного программирования, объясняются ориентацией этого способа на параметры производительности технологического процесса механической обработки, при этом он не учитывает в явном виде температурно-износные процессы, сопровождающие восстановление профиля колеса.

3. Установлено, что расчет методом подобия в рассматриваемом диапазоне изменения режимов резания при восстановлении профиля колес дает наиболее рациональные режимы, обеспечивающие

приемлемую стойкость режущего инструмента и условия стружкоотвода.

4. В случае обточки колес повышенной твердости из стали марки «Л» по ГОСТ 10791-2011 в первом приближении в качестве рациональных можно использовать режимы, полученные для колес из стали марки «2».

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов А. Ф., Иванов И. А., Ситаж М. Восстановление профиля поверхности катания колесных пар. – СПб.: ПГУПС, 2000. – 128 с.
2. Потахов Д. А. Использование на подвижном составе колесных пар повышенной твердости // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – № 1. – С. 139-147.
3. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог: Монография / Под ред. И. А. Иванова. – М.: Инфра-М, 2011. – 264 с.
4. Богданов А. Ф., Чурсин В. Г. Эксплуатация и ремонт колесных пар вагонов. – М.: Транспорт, 1985. – 270 с.
5. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
6. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
7. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
8. Васин С. А., Верещака А. С., Кушнер В. С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 448 с.
9. Лунгу К. Н. Линейное программирование. Руководство к решению задач. – М.: Физматлит, 2005. – 128 с.
10. Локтев А. Д., Гушин И. Ф., Батуев В. А. и др. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: Справочник в 2-х т. – Том 1. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с.
11. Больше скорости российским поездам // Евразия Вести. – 2014. – № 6. – С. 18.
12. ПМетро-3/10-1. Инструкция по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию колесных пар электроподвижного состава. – СПб.: ОЭВРЗ-Вагонмаш, 2012. – 196 с. ●

Координаты авторов:

Иванов И. А. – ivanov_1_7@mail.ru, Потахов Д. А. – demon_511@inbox.ru, Урушев С. В. – ktehmet@pgups.edu.

Статья поступила в редакцию 21.10.2014, актуализирована 24.07.2015, принята к публикации 02.03.2015/26.07.2015.