



Исследование геометрических параметров режущего инструмента рельсофрезерного поезда



Олег КРАСНОВ



Андрей НЕДБАЙЛО

*Краснов Олег Геннадьевич – АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия.
Недбайло Андрей Викторович – АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия*.*

В статье изложены методы исследований геометрических параметров рабочего инструмента рельсофрезерного поезда после выявления в процессе подконтрольной эксплуатации после фрезерования поперечного профиля рельсов Р65 формы многоугольника и несоответствия требованиям стандарта. Данные методы были апробированы применительно к случаю рельсофрезерного поезда РФП-01. Для устранения причин формирования некачественного поперечного профиля специалистами АО «ВНИКТИ» был проведён комплекс исследований по установлению фактического профиля и подуклонки рабочего инструмента фрезерных колёс – кассет ствёрдосплавными пластинами. Произвольно отобраны по одной кассете с каждого фрезерного колеса. Выполнено измерение геометрических параметров кассет на координатно-измерительной машине. В результате

измерений получены облака точек рабочих поверхностей кассет. Для сжатия и распознавания изображений применено сингулярное разложение матрицы с размером $n \times 3$, где n – количество строк, равное количеству точек в облаке, столбцы – это координаты X, Y, Z . Дальнейшим шагом являлось разбиение облака точек на треугольники при помощи алгоритма Делоне.

С использованием вышеперечисленных приёмов получены линии резания кассет, образующие фактический формируемый профиль рельса. Линии резания совмещались относительно вертикальной оси с профилем рельса Р65 по условию достижения минимального среднеквадратического отклонения. В результате установлены причины некачественного формирования профиля рельсов Р65 после фрезерования и даны рекомендации по их устранению.

Ключевые слова: железная дорога, координатно-измерительная машина, кассеты фрезерного колеса, облако точек, поверхность резания, алгоритм Делоне, сингулярное разложение облака точек поверхности резания кассет.

*Информация об авторах:

Краснов Олег Геннадьевич – кандидат технических наук, заведующий отделом пути и специального подвижного состава АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», Коломна, Россия, vnikti@ptl-kolomna.ru.

Недбайло Андрей Викторович – ведущий инженер отдела пути и специального подвижного состава АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», Коломна, Россия, vnikti@ptl-kolomna.ru.

Статья поступила в редакцию 17.09.2019, принята к публикации 20.12.2019.

For the English text of the article please see p. 44.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ФРЕЗЕРОВАНИЮ РЕЛЬСОВ

Фрезерование рельсов применяется для восстановления формы головки рельсов под требуемый профиль (далее рассматривается случай нового рельса типа Р65), удаления длинных и коротких волнообразных неровностей, снятия дефектного слоя металла на рабочих поверхностях головок рельсов в пути [1–3].

Применительно к российским требованиям критерием выбора вида технологии поверхностной обработки рельсов является глубина контактно-усталостных дефектов: при глубине дефектов менее 0,8 мм применяется шлифование, при глубине от 0,8 до 3,5 мм – фрезерование [4].

Путевые машины механической обработки рельсов должны обеспечивать необходимые стандарты поверхностной обработки, в данном случае предъявляемые к рельсам Р65. Достижение требуемых параметров при изготовлении новых образцов железнодорожной техники, в частности, рельсофрезерных поездов, сопряжено с отладкой оборудования. Для устранения дефектов, выявляемых в ходе испытаний, АО «ВНИКТИ» разработана методика. Цель данной статьи – описание методики исследований геометрических параметров рабочего инструмента рельсофрезерного поезда. Для иллюстрации было использовано исследование, связанное с рельсофрезерным поездом РФП-01.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Условия кейса

Для реализации технологии фрезерования рельсов АО «Калужский завод «Ремпутьмаш» в кооперации с австрийской

фирмой MFL изготовил рельсофрезерный поезд РФП-1, который одновременно выполняет обработку поверхности катания обеих рельсовых нитей на глубину до 3,5 мм за один проход поезда [5]. Разработана инструкция по фрезерованию рельсов в пути и опытный технологический процесс «Работа с применением рельсофрезерного поезда РФП-1» [6; 7].

При проведении испытаний рельсофрезерного поезда РФП-1 как на правом, так и левом рельсах имело место формирование ломаного профиля с понижением поверхности катания к внешней стороне рельсов. Данная закономерность наблюдалась на всех профилях. Происходило формирование острого угла в зоне сопряжения обработанной и необработанной поверхности [8; 9]. Типичный ломаный профиль головки рельса после фрезерования представлен на рис. 1. Красным цветом (на соответствующую линию указывает верхняя стрелка в левой и правой частях рисунка) на рисунке обозначен новый рельс Р-65 по ГОСТ 51685-2013, зелёным (нижняя стрелка) – профиль рельса после фрезерования.

Анализ поперечного профиля рельса, формируемого при фрезеровании, показал необходимость того, что нужно условно разбить поперечный профиль на несколько зон. Границы зон фиксируются буквами алфавита.

Установлено, что:

- профили совпадают полностью в зоне на рабочей выкружке боковой грани (на участке от А до Б);
- на внутренней боковой грани профиля (рабочая грань) вслед за выкружкой (от Б до В) вместо радиуса сопряжения

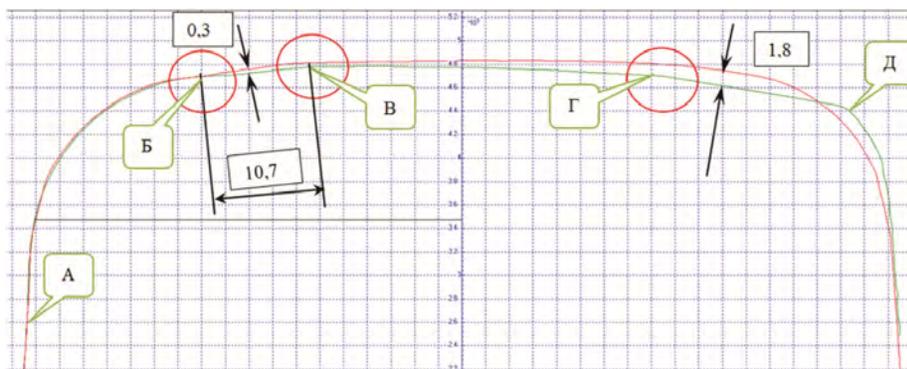


Рис. 1. Поперечные профили нового рельса Р65 и отфрезерованного рельса после фрезерования одновременно двумя секциями рельсофрезерного поезда СФ-1 + СФ-2, подуклонка 1:20 [8; 9].



Рис. 2. Координатно-измерительная машина Fusion-6 производства FARO.
[Электронный ресурс]:
http://www.metrologi.ru/img/flash/browyri/trexmer_kontr/kim_faro/fusion_arm5.pdf.
Доступ 20.10.2019.



80 мм образуется прямой участок шириной 10,7 мм, формирующий продольную полосу, с глубиной в средней части до 0,5 мм;

- на участке от В до Г, который определяется радиусом 500 мм головки рельса, отфрезерованный профиль имеет угловое смещение по часовой стрелке по отношению к исходному профилю, что возможно при расхождении осей симметрии рельса и фрезерного колеса;

- на внешней поверхности головки рельса (нерабочей грани) вместо плавной поверхности симметричной рабочей грани имеет место поверхность с переломом профиля в точках Г и Д. На участке Г–Д образована наклонная площадка с занижением от заданного профиля до 2 мм.

Таким образом, поперечный профиль, формируемый при фрезеровании рельсофрезерным поездом РФП-1, совпадает с заданным профилем Р65 только в зоне рабочей выкружки, в остальных местах он не соответствует требуемому очертанию.

АЛГОРИТМ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ФРЕЗЕРНЫХ КОЛЁС

Для установления причин формирования профиля с отклонением от нового профиля рельса Р65 встала необходимость определения геометрических параметров

поверхностей резания кассет фрезерных колёс рельсофрезерного поезда РФП-1 для оценки степени отклонения профилей. Объектом исследований являлись четыре кассеты, демонтированные с четырёх фрез: две – с секции фрезерной № 1 и две – с секции фрезерной № 2 [10]. Определение геометрических параметров кассет производилось с помощью координатно-измерительной машины (КИМ), в нашем случае – Fusion-6 производства FARO (рис. 2)¹.

Конструкция КИМ FARO похожа на строение человеческой руки. Имеет плечевой, локтевой и кистевой суставы. На плечевом суставе располагается крепёжная плита, с помощью которой машина устанавливается на плоскую поверхность. На кистевом суставе монтируется измерительный щуп.

В каждом суставе имеются датчики угловых перемещений. В режиме реального времени КИМ рассчитывает углы поворота каждого из 12 датчиков угла поворота и координаты измерительного щупа в пространстве.

КИМ осуществляет измерения в рабочей зоне 1800 мм при повторяемости изме-

¹ Мобильные координатно-измерительные машины FARO Quantum Arm. https://www.vivtech.ru/production/kim_faro/faro_arm/.

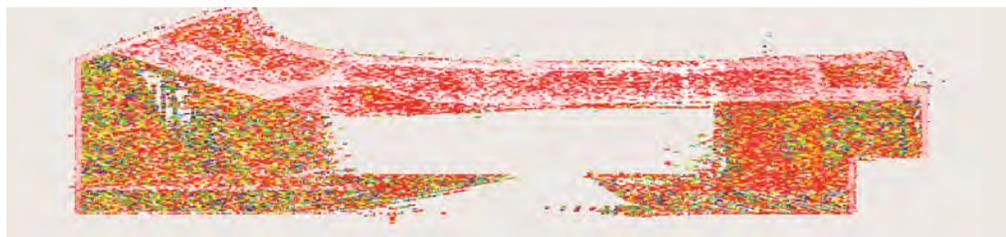


Рис. 3. Облако точек кассет в изометрии с видом боковой поверхности кассеты и поверхности резания [11].

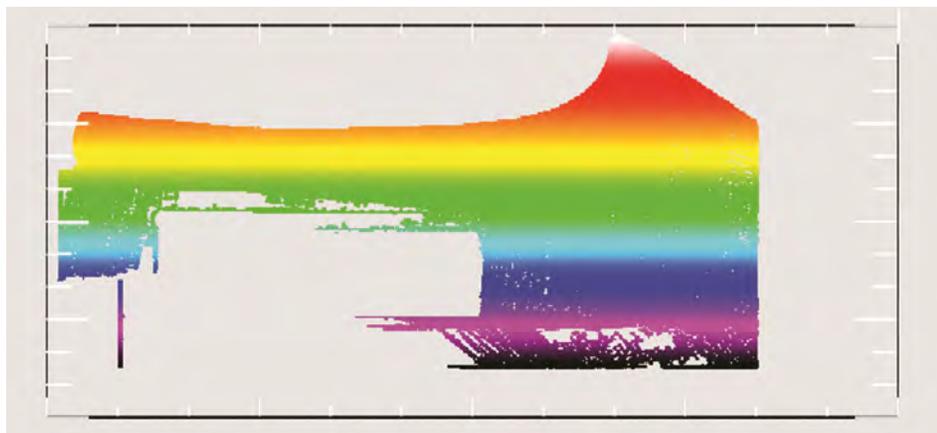


Рис. 4. Построенная по данным облака точек линия резания кассеты в плоскости YZ [11].

рения точки 0,036 мм с погрешностью линейных измерений $\pm 0,051$ мм.

Проведено полное измерение четырёх кассет фрезерных колёс рельсофрезерного поезда РФП-01.

В результате измерений получено облако точек для каждой кассеты. Результаты измерений облака точек рабочей поверхности кассеты представлены на рис. 3.

Из полученного в результате измерений общего облака точек выделены облака точек для каждой из твёрдосплавных пластин. По каждому облаку точек с помощью матричных преобразований (сингулярное разложение) [12] и с использованием алгоритма Делоне [13; 14] (разбиение облака точек на треугольники) определялись точки, лежащие в горизонтальной и вертикальной плоскостях твёрдосплавных пластин.

По отобранным точкам выводилась формула плоскости вида:

$$x \cdot \cos a + y \cdot \cos b + z \cdot \cos c - p = 0,$$

где a, b, c — углы вектора нормали плоскости к осям X, Y, Z .

Форма линии кромки резания твёрдосплавной пластины определялась как пересечение передней вертикальной и горизонтальной плоскостей. Вокруг полученной прямой отобраны реальные точки из исходного облака точек. Путём совмещения кромок резания всех пластин на кассете получена линия резания кассеты, образующая фактический формируемый профиль рельса (профиль резания кассеты). Результаты построения линии резания кассеты показаны на рис. 4.

По пространственным координатам облака точек построено изображение кассет в изометрии. Построенное по облаку точек изображение твёрдосплавных пластин на рабочей поверхности кассеты представлено в изометрии на рис. 5.

Линия резания кассеты, образующая фактический профиль рельса после обработки, и профиль рельса Р65 по ГОСТ-51 685-2013 [15] совмещались относительно вертикальной оси рельса по условию максимального совпадения контуров, то есть до



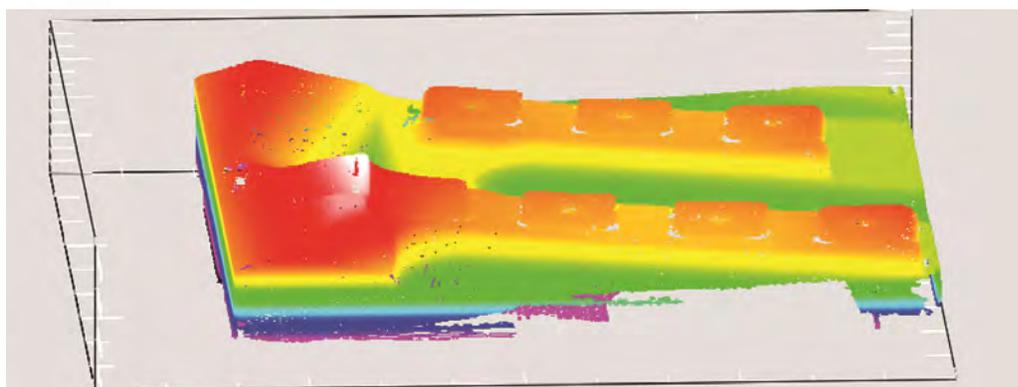


Рис. 5. Построенное по данным облака точек изображение кассеты с твердосплавными пластинами в изометрии в координатах XYZ [11].

Таблица 1

Результаты расчётов подуклонки по поверхности резания фрез [12]

№	Номер кассеты	Угол поворота, °	Подуклонка
1	383_84	1,5	1:38
2	383_54	1,3	1:44
3	384_15	1,7	1:34
4	384_74	1,8	1:32

достижения минимального среднеквадратичного отклонения (СКО). Наложением линии резания кассеты, образующей фактический профиль рельса Р65 после обработки, и профиля рельса Р65 получено положение вертикальной оси Z кассеты.

По результатам наложения профилей линий резания кассеты и профиля рельса Р65 определялся угол между осью симметрии поперечного профиля рельса и вертикальной осью Z линии резания кассеты, образующей фактический профиль рельса после обработки, на основании которого определялась фактическая подуклонка.

Построенные в соответствии с методикой обработки результатов измерений линии резания совмещались с новым профилем рельса Р65 до достижения минимального СКО между накладываемыми профилями. Результаты совмещения и расчёт подуклонки поверхности резания кассет представлены в табл. 1.

Таким образом, рассчитанные по результатам измерений на выбранных кассетах по одной с каждой фрезы величины подуклонки изменялись в пределах от 1:32 до 1:44. Полученные значения подуклонки близки к нормативному устройству европейской рельсовой колеи – 1:40 и не соот-

ветствует требованиям [16], определяющим для российских железных дорог значение подуклонки 1:20.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Результаты совмещения поверхности катания рельса Р65 и линии резания, полученной с помощью измерений, которые аппроксимированы по самой «высокой» линии выступов неровностей, то есть профиль Р65 и профиль, развёрнутый до фактической поверхности резания, для всех четырёх кассет показали:

- профиль резания кассеты № 1 имеет поверхность, близкую к профилю Р65;
- профиль резания кассеты № 2 имеет поверхность, отличающуюся от профиля Р65 более значительно с учётом износа режущих граней пластин;
- профиль резания кассеты № 3 имеет поверхность, ещё более отличающуюся от профиля Р65, с учётом более сильного износа режущих граней твёрдосплавных пластин;
- профиль резания кассеты № 4 имеет местные горизонтальные участки с большими выступами, образуемые в результате неправильной настройки пла-

стин 1 и 3 ряда № 1 и пластин 2 и 3 ряда № 2 кассеты.

ВЫВОДЫ

1. Для установления причин формирования профиля рельса Р65 после фрезерования поездом РФП-1 выполнены измерения геометрических параметров поверхностей резания кассет фрезерных колёс с применением высокоточной координатно-измерительной машины.

2. Разработана методика определения геометрических параметров режущего инструмента фрезерных колёс с преобразованием облака точек методом сингулярного разложения и построения 3D-моделей кассет с использования алгоритмов Делоне.

3. В результате выполненных исследований геометрических параметров линии резания кассет установлены причины повторяющихся недостатков сформированного после фрезерования профиля рельса:

- несоответствие величины фактической подуклонки кассет нормативному номиналу подуклонки рельсов, установленному на российских железных дорогах;
- некачественно проведённая настройка режущих граней пластин на измерительном столе;
- отсутствие проверки на радиальное биение.

Величины фактической подуклонки кассет близки к нормативному устройству европейской рельсовой колеи (1:40), но не к российской (1:20).

Фактическая подуклонка на произвольно выбранных кассетах на четырёх фрезерных колёсах имеет разброс от 1:32 до 1:44.

Производителям рельсофрезерного поезда даны соответствующие рекомендации.

Показанная в статье методика исследования геометрических параметров режущего инструмента представляется достаточно универсальной (при адаптации вводимых целевых значений к соответствующему стандарту) для применения в условиях железных дорог различных стран.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nagelkrämer, P., Wolff, K.-D. Fräsen und Schleifen in einem Arbeitsgang – DB Netz AG zeigt Profil [Milling and grinding in a single operation – DB Netz AG shows its mettle]. Eisenbahningenieur, April 2006, Vol. 57, Iss. 4, S. 20–22. [Электронный ресурс]: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=2022>. Доступ 08.07.2019.

2. Hartleben, D. Die neue Schienenfräse SFU04 für Vollbahnen und Metro-Netze im Einsatz. Eisenbahningenieur, September 2008, Vol. 59, Iss. 9, S. 38–44. [Электронный ресурс]: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=20006>. Доступ 08.07.2019.

3. Diest, von K. High-Speed Grinding: Schienenschleifen nach Fahrplan. ZEVrail, 2010, No. 5, pp. 164–169. [Электронный ресурс]: <https://www.zevrail.de/artikel/high-speed-grinding-schienenschleifen-nach-fahrplan>. Доступ 08.07.2019.

4. Janicki, J. Instandhaltung der Fahrweganlagen. Deine Bahn, 2010, pp. 48–52. [Электронный ресурс]: <https://www.system-bahn.net/unkategorisiert/instandhaltung-der-fahrweganlagen/>. Доступ 08.07.2019.

5. Поезд рельсофрезерный РФП-1: техн. задание: утв. ОАО «РЖД» 22.09.2008.

6. Инструкция по шлифовке и фрезерованию рельсов в пути и стационарных условиях: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2014 г. № 3185р в ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 03.06.2019 № 1088р. – 72 с.

7. Работы с применением рельсофрезерного поезда РФП-1: опытный технологический процесс: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 07.06.2011 г. № 417у-11.

8. Анализ полученных результатов приёмочных испытаний РФП-1: отчёт о НИР: И-35-14 / ОАО «ВНИКТИ». – Коломна, 2014. – 181 с.

9. Анализ полученных результатов приёмочных испытаний РФП-1: отчёт о НИР: И-12-16 / ОАО «ВНИКТИ». – Коломна, 2016. – 125 с.

10. О проведении измерений поверхности резания кассет фрезерных колёс рельсофрезерного поезда РФП-1: отчёт о НИР: И-01-17 / АО «ВНИКТИ». – Коломна, 2017. – 29 с.

11. Расчёт построения поверхности резания кассет фрезерных колёс рельсофрезерного поезда РФП-01 / АО «ВНИКТИ». – Коломна, 2017. – 27 с.

12. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. 2nd edition, Cambridge, Cambridge univ. press, 1992, 994 p. [Электронный ресурс]: https://www.ccc.uchile.cl/cinetica/pcordero/MC_libros/NumericalRecipesinC.pdf. Доступ 08.07.2019.

13. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и её применение. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с. [Электронный ресурс]: <http://www.inf.tsu.ru/library/Publications/2002/09.pdf>. Доступ 08.07.2019.

14. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение / Пер. с англ. С. А. Вичеса, М. М. Комарова. – М.: Мир, 1989. – 478 с. [Электронный ресурс]: <http://www.bookshare.net/index.php?author=preparata-f&book=1989&category=math&id1=4>. Доступ 08.07.2019.

15. ГОСТ Р 51685-2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (с изменением № 1). – Взамен ГОСТ Р 51685-2000; введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 95 с. [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774917.pdf>. Доступ 08.07.2019.

16. Инструкция по текущему содержанию пути: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 г. № 2288р. – М., 2016. – 286 с.

