

УДК 625.143.2:625.144.6

Рудюк А. С.  
Антоненко А. В.

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРАВКИ РЕЛЬСОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ СОВРЕМЕННОГО УРОВНЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ

В настоящее время на скоростных участках пути, совмещенных с грузовым движением, скорости движения пассажирских поездов достигают 200 км/ч, а на специализированных высокоскоростных магистралях – до 350 км/ч [1]. Подсчитано, что такие поезда в 10 раз экономичнее самолетов и в 5 раз – автомобилями [2]. Наиболее значительные достижения в этой области имеют Франция, Япония и Германия.

Для реализации высоких скоростей движения поездов требуются рельсы с более совершенными геометрическими характеристиками. Одной из самых значительных компонент, входящих в общую вертикальную динамическую нагрузку от колес на рельсы, является вертикальная сила инерции необрессоренных масс. При этом степень динамического воздействия зависит от глубины, длины и формы неровностей на поверхности катания головки рельсов. Начальные неровности на поверхности головки рельса способствуют возникновению различных дефектов: неравномерной волнообразной деформации, смятию и коротких изолированных неровностей-рифлей.

Одним из важнейших показателей качества железнодорожных рельсов, определяющих в значительной степени их эксплуатационную стойкость и допустимую скорость движения поездов, является также прямолинейность и остаточное напряженное состояние рельсов. Увеличение скоростей движения поездов вызывает ускорение развития волнообразной деформации головки и образование волнообразного износа, что предъявляет повышенные требования к прямолинейности рабочих поверхностей рельсов и их внутреннему напряженному состоянию.

Образование начальных волнообразных неровностей на поверхности катания головки рельсов в вертикальной плоскости зависит от жесткости клетей прокатного стана, эксцентриситета расточки валков, износа калибров, температуры прокатки, режима работы роликоправильной машины (РПМ).

Правка металла – одна из основных отделочных операций, значительно улучшающая качество проката по прямолинейности, геометрии поперечного сечения и влияющая на уровень остаточных напряжений.

В работах [3–4] режимы правки рельсов определяли путем приближенных расчетов на основании производственного опыта обслуживающего персонала. Это приводило к получению значительного количества рельсов с неудовлетворительным качеством по прямолинейности. Настройку РПМ, как правило, осуществляли таким способом, при котором создаются максимальные упругопластические деформации профиля. В результате этого возрастает уровень остаточных напряжений. Установлено [5–6], что остаточные напряжения снижают пластичность материала и могут привести к разрывам сплошности, особенно в местах их концентрации. Появление остаточных напряжений в результате холодной правки снижает работоспособность изделия при воздействии на него силовых факторов, совпадающих по направлению с остаточными напряжениями, и приводит к контактно-усталостным дефектам рельсов в процессе их эксплуатации.

Несмотря на то, что рельсы по кривизне и прочностным характеристикам различны, настройка машин обычно остается неизменной в течение всего процесса правки целой партии рельсов. Такой режим не обеспечивает стабильного выправления всех рельсов, поэтому их доправляют на штемпельных прессах. Следствием такой доправки являются новые глубокие неровности по поверхности катания головки рельсов.

Качество правки проката зависит, при прочих равных условиях, от материала, термообработки и исходной кривизны, а также от основных параметров настройки роликоправильных машин и калибровки роликов [3, 7].

В работах ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» [8–10] изложена методика расчета режимов правки проката, обеспечивающая прямолинейность готовой продукции при минимальных пластических деформациях и оптимальном уровне остаточных напряжений. В расчете учитываются упрочнение металла при упругопластическом изгибе, остаточные напряжения – в исходном состоянии и от предыдущих перегибов и др.

Недостатком методики является то, что при определении изгибающих моментов в процессе правки используется теорема о трех моментах теории упругости, что приводит к заниженным до 20–25 % расчетным значениям величины прогибов. Это не позволяет использовать его в системах автоматизированного управления процессом правки при изменении параметров выпрямляемых рельсов.

Целью работы является совершенствование технологии правки рельсов и конструкций правильных машин с тем, чтобы исключить, по возможности, доправку концов рельсов на прессах и обеспечить высокую прямолинейность при минимально возможных деформациях.

В настоящей работе приведена методика расчета режимов правки железнодорожных рельсов тяжелых типа Р65 и ОР65 текущего производства ПАО «МК «Азовсталь» на горизонтальной РПМ.

При расчете режимов правки рельсов были приняты следующие гипотезы и допущения:

- гипотеза плоских сечений, согласно которой поперечные сечения полосы при изгибе поворачиваются, оставаясь плоскими;
- сечение профиля при упругопластическом изгибе может иметь две зоны деформации (упругую и пластическую);
- при расчете нормальных напряжений в элементах профиля принимается линейная схема напряженно-деформированного состояния;
- профиль изгибается таким образом, что на длине, равной шагу роликов, радиус изгиба остается постоянным;
- система «правильные ролики – выпрямляемый профиль» находится в равновесии при таком перемещении роликов, при котором разность работы внешних сил ( $P$ ) под подвижными роликами и работы деформации профиля принимает минимальное значение (принцип минимума полной потенциальной энергии системы [11–13]).

На базе принятых гипотез и допущений разработан алгоритм расчета режимов правки рельсов на роликоправильных машинах с реализацией на ПК. В основу расчета положены вариационные принципы механики, базирующиеся на принципах минимума полной потенциальной энергии системы. Рассмотрена система «правильные ролики – выправляемый профиль», которая находится в равновесии при полном перемещении роликов, при котором разность работы внешних сил под подвижными роликами и работы деформации профиля принимает минимальное значение. Задача состоит в нахождении таких  $f_j$  ( $j = 2, 4, 6$ ), которые при заданных  $P_j$  минимизируют функцию:

$$\sum_{j=2,4,6} P_j f_j - \sum_{i=1}^6 A_i(f_i) = \min, \quad (1)$$

где  $P_j$  – усилие правки на  $j$ -м перемещаемом ролике в вертикальной плоскости относительно нулевого положения, мм;

$f_j$  – перемещение  $j$ -го подвижного ролика в вертикальной плоскости относительно нулевого положения, мм;

$f_i$  – перемещение  $i$ -го ролика в вертикальной плоскости: для подвижного вычисляется по линейной интерполяции;

$A_i(f_i)$  – работа упругопластической деформации изгиба на длине, равной шагу роликов в функции перемещения роликов, Нм.

Выбор усилий  $P_i$  производится с помощью ПК по достижению остаточного радиуса величины, равной или больше заданной.

Радиус кривизны на длине, равной шагу роликов, постоянен,  $A_i(f_i)$  вычисляется интегрированием выражения:

$$A_i(f_i) = l \int_0^H \varepsilon_{пол}(y) \sigma(y) b(y) dy, \quad (2)$$

где  $l$  – шаг роликов, мм;

$b(y)$  – ширина элементарной площадки, мм;

$\varepsilon_{пол}(y)$  – деформация на элементарной площадке, зависящая от радиуса изгиба на участке с номером  $i$  (а тем самым и от  $f_i$ ) и от эпюры остаточных деформаций от предыдущего изгиба;

$\sigma(y)$  – напряжение на элементарной площадке, зависящее от  $\varepsilon_{пол}(y)$ .

Расчет интеграла (2) производится путем разбиения сечения профиля по высоте на «к» частей (рис. 1), который для «к»-го сечения будет иметь следующий вид:

$$A_i(f_i) = l \sum_{K=1}^K \varepsilon_{полiK} \sigma_{iK} b_K \frac{H}{K}. \quad (3)$$

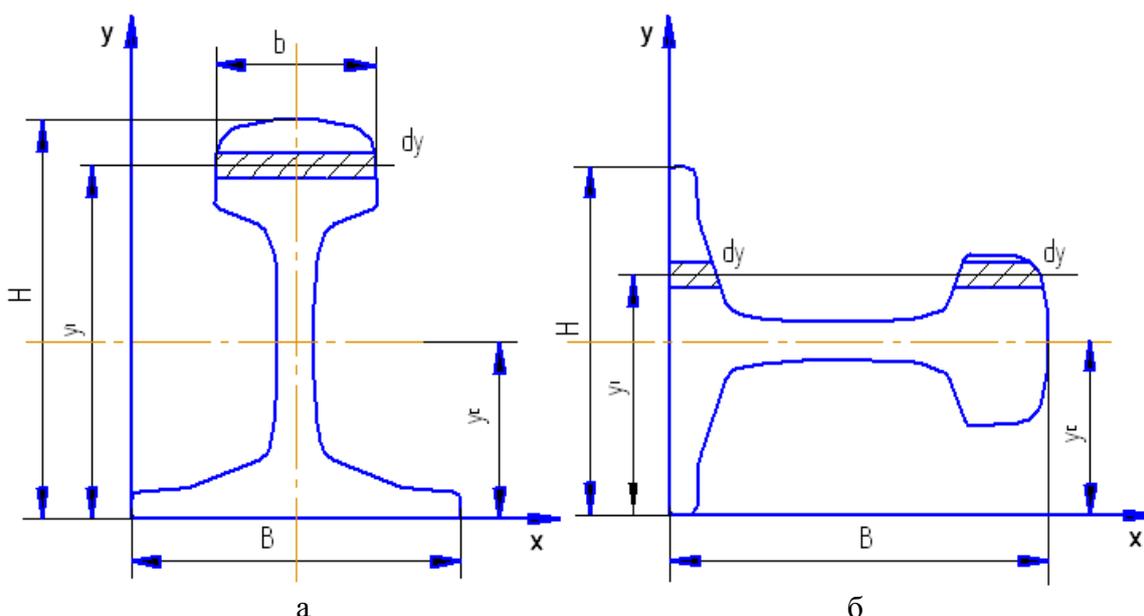


Рис. 1. Поперечное сечение профиля и схема деления его на элементарные площадки: а – при правке в плоскости большей жесткости; б – при правке в плоскости меньшей жесткости

Величины  $f_j$  и  $P_j$  входящие в (1) вычисляются на ПК методом покоординатного спуска. Задание первоначальных значений  $P_j$  производится по методике, изложенной в работе [14]. Начальные значения для  $f_j$  задаются, исходя из практической целесообразности.

При изменении геометрических или механических параметров выправляемого проката с целью повышения производительности процесса настройки и улучшения качества готовой продукции перемещение роликов производят по способу, основанному на использовании математического выражения:

$$\Delta f_j = 0,0078 \Delta P_j \frac{l^4}{C_j H^2},$$

вывод которого производится также из принципа минимизации полной потенциальной энергии системы.

Для расчета режимов правки по разработанному алгоритму использована программа Mathcad.

Расчетные режимы правки рельсов (смещение ролика равное разности между номинальной высотой данного типа рельса и настроечным прогибом рельса данным роликом) типа Р65 и ОР65 на горизонтальной РПМ в трех вариантах приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные режимы правки рельсов типа Р65 и ОР65 на ГРПМ

Тип рельса	Вариант правки	Смещение роликов, мм		
		2	4	6
Р65, ОР65	1	12,5	10,0	2,5
	2	13,0	10,5	3,5
	3	13,5	11,0	4,5

Для оценки пригодности разработанной методики расчета режимов правки проведена отработка расчетных режимов правки рельсов типа Р65 и ОР65 в рельсобалочном цехе ПАО «МК «Азовсталь» и сравнение результатов правки рельсов по расчетным значениям прогибов и по существующей технологической инструкции (ТИ 232-16-2004).

Роликоправильная машина консольного типа с горизонтальными роликами предназначена для правки железнодорожных рельсов в плоскости большей жесткости. Горизонтальная РПМ расположена первой по ходу технологического процесса. Схема расположения роликов горизонтальной РПМ представлена на рис. 2.

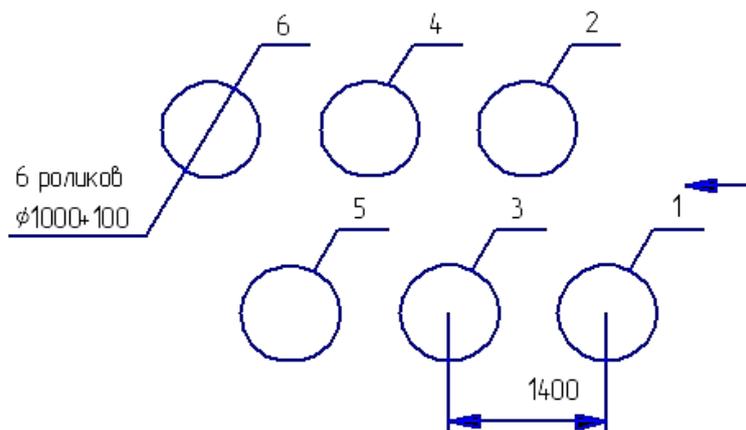


Рис. 2. Схема расположения роликов горизонтальной РПМ

Перед отработкой расчетных режимов в РБЦ комбината была произведена замена правильных роликов и настройка горизонтальной РПМ.

Правка производилась по действующей технологической инструкции (ТИ) и по следующим вариантам в соответствии с табл. 1.

В поверхностно-закаленных рельсах, прошедших правку, допускаются остаточные напряжения, которые обуславливают расхождение паза, получаемого разрезкой шейки рельсовой пробы вдоль ее нейтральной оси. Для определения влияния каждого варианта правки рельсов в горизонтальной РПМ на величину остаточных напряжений были выправлены три рельса с одного ручья закалочной машины.

Результаты испытаний проб на остаточные напряжения сведены в табл. 2.

Таблица 2

## Результаты испытаний проб на остаточные напряжения

Вариант правки	Расхождение паза, мм (остаточные напряжения)
1	3,9
2	3,5
3	1,6
Действующая ТИ	2,8

По результатам испытания проб на остаточные напряжения вариант 1 правки в дальнейшем не применяли из-за высокого расхождения паза. Рельс с остаточными напряжениями, которые обуславливают расхождение паза на величину 3,9 мм, был переведен в промышленный.

Из табл. 2 видно, что наименьшее расхождение паза (1,6 мм) при испытаниях на остаточные напряжения имеет проба после правки рельсов по варианту 3. Согласно ДСТУ 4344:2004 рельсы с величиной расхождения паза до 2,0 мм классифицируются как рельсы высшей категории.

Для определения влияния режимов правки на кривизну рельсов проведена правка 30 рельсов по вариантам 2 и 3 и по действующей ТИ.

При правке корректировка смещений 6-го ролика фактически составила: вариант 2 8–10 мм, вариант 3 6–7 мм.

Результаты обработки измерений горизонтальной (по хорде) и вертикальной (вниз и вверх по хорде) концевой кривизны рельсов и одиночных местных деформаций (прогибов) на длине 1,5 м по всей длине рельса по разным вариантам правки приведены в табл. 3.

Измерение кривизны рельсов производилось контрольной линейкой длиной 1,5 м в соответствии с нормативно-технической документацией.

Таблица 3

## Результаты обработки измерений кривизны рельсов

Вариант правки	Концевая кривизна рельсов, мм						Одиночные местные деформации	
	горизонтальная (по хорде)		вниз (по хорде)		вверх (по хорде)			
	min	max	min	max	min	max	min	max
2	0,1	0,3	0,0	0,2	0,0	0,2	0,1	0,4
3	0,1	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,1	0,3
ТИ 232-16-2004	0,1	0,4	0,0	0,2	0,0	0,3	0,1	0,5

Из табл. 3 следует, что при правке по варианту 3 рельсы имеют наименьшие величины искривлений как по концевой кривизне, так и по местным одиночным деформациям (прогибам) на длине 1,5 м по всей длине рельса. По ДСТУ 4344:2004 не допускается концевая кривизна рельсов вниз по хорде. Правка по варианту 3 дала наименьший процент выхода рельсов с концевым искривлением вниз по хорде.

## ВЫВОДЫ

Разработана методика расчета режимов правки рельсов, обеспечивающая требуемую прямолинейность при минимальных деформациях выправляемых рельсов под роликами. При разработке алгоритма расчета использован принцип минимизации потенциальной энергии системы, что позволяет повысить точность расчетных данных и улучшить качество рельсов по прямолинейности.

По разработанному алгоритму осуществлен расчет режимов правки. Режимы правки отработаны на горизонтальной РПМ рельсобалочного цеха ПАО «МК «Азовсталь».

На основании проведенных исследований в заводскую технологическую инструкцию внесены изменения, касающиеся настроечных прогибов при правке термоупрочненных рельсов типа Р65 на горизонтальной РПМ в плоскости большей жесткости – установлены следующие максимальные смещения роликов: второго – 13,0 мм; четвертого – 11,0 мм; шестого – 5,0 + 3 мм.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самые быстрые поезда в мире. Часть 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.worldmetro.org.ua/2010/12/high\\_speed\\_train\\_1](http://www.worldmetro.org.ua/2010/12/high_speed_train_1).
2. Рейхард В. А. Прямые рельсы / В. А. Рейхард, Е. А. Шур // Путь и путевое хозяйство. – 2002. – № 12. – С. 7–8.
3. Покотилов Ю. П. К вопросу настройки роликовых правильных машин / Ю. П. Покотилов, М. А. Зайков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1965. – № 12. – С. 155–160.
4. Исследование и выбор оптимальных режимов правки рельсов на РПМ / [А. Н. Гаврилюк, А. Н. Слюсаренко, Ю. П. Павленко и др.] // Производство железнодорожных рельсов. – 1976. – С. 56.
5. Исследование служебных свойств опытной партии рельсов с закаленными боковыми гранями головки и освоение промышленной технологии производства, в том числе и правки таких рельсов: отчет о НИР/НИИ «УкрНИИМет»; 2/20-2004. – Х. : Мариуполь, 2004. – 42 с.
6. Разработка, изготовление и монтаж роликоправильной машины усовершенствованной конструкции, обеспечивающей правку термоупрочненных рельсов тяжелых типов по всей длине и на концах : отчет о НИР / УкрНИИМет; рук. раб. канд. техн. наук. Н. Ф. Левченко. – 008/80; Инв. 80012290. – Х. : 1981. – 60 с.
7. Влияние настройки правильной машины на прямолинейность железнодорожных рельсов / М. И. Федоров // Конструирование и технология в тяжелом машиностроении. – Свердловск, 1965. – С. 71–81.
8. Исследование влияния правки объемно-закаленных рельсов в двух плоскостях на их качество и причины поломок рельсов в роликоправильных машинах : отчет о НИР / УкрНИИМет; рук. раб. канд. техн. наук Ю. П. Павленко. – Нр 15/ТМ-75; Инв. Б343909. – Х. : 1974. – 62 с.
9. Освоение технологии правки широкополочных двутавров на УБС / [Н. Ф. Грицук, Г. В. Козлов, В. С. Губерт и др.] // Сталь. – 1983. – № 8. – С. 58–60.
10. Методика расчета режимов правки сортовых профилей, обеспечивающих требуемую прямолинейность и допустимые напряжения / [Ю. Н. Алексеев, Н. М. Воронцов, В. З. Аршавский и др.] // Сортопрокатное производство : отрасл. сб. науч. тр. – Х. : УкрНИИМет, 1974. – Вып. 2. – С. 154–160.
11. Кузьмин А. Д. Определение основных параметров роликовых правильных машин / А. Д. Кузьмин. – М. : Машгиз, 1953. – 28 с.
12. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. И. Безухов. – М. : Высшая школа, 1968. – 505 с.
13. Ильюшин А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – М. : Гостехиздат, 1948. – 346 с.
14. Жученко А. Н. Определение деформации рельсов при правке на роликовых машинах консольного типа / А. Н. Жученко, Н. Ф. Левченко // Производство железнодорожных рельсов и колес : отрасл. сб. науч. тр. – Х. : УкрНИИМет, 1980. – С. 65–69.

Рудюк А. С. – канд. техн. наук, зам. гл. дир. ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»;

Антоненко А. В. – гл. спец. ГП «УкрНТЦ «Энергосталь».

ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» – Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь», г. Харьков.

E-mail: [energostal@energostal.org.ua](mailto:energostal@energostal.org.ua)

Статья поступила в редакцию 10.10.2012 г.