П. М. КАЛАШНИКОВ

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ВПИСЫВАНИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА УЗКОКОЛЕЙНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В КРИВЫЕ ПРИ ВЫВОЗКЕ ЛЕСА В ХЛЫСТАХ

Основным вопросом геометрического вписывания экипажей существующих параметров в кривые является определение наименьшего геометрического радиуса кривого пути, в котором при данном уширении и зазоре устанавливается экипаж.

На железных дорогах широкой колеи наименьший геометрический радиус кривого пути в основном определяется геометрическими размерами локомотива.

Совершенно другое положение на дорогах узкой колеи. При вывозке леса в хлыстах с применением специального подвижного состава (например, сцепов ЦНИИМЭ-ДВЗ) и мотовозов в качестве локомотива наименьший геометрический радиус устанавливается по подвижному, а не по тяговому составу.

Задачу геометрического вписывания подвижного состава в кривые можно разбить на две самостоятельные:

1) определение наименьшего геометрического радиуса R_{min} для существующего подвижного состава;

2) установление оптимальных размеров частей вновь проектируемого подвижного состава по заданному минимальному радиусу кривой.

Рассмотрим вопрос установления наименьшего геометрического радиуса для существующего подвижного состава. Определение R_{min} будем производить графическим и аналитическим путем.

А. Графическое определение наименьшего геометрического радиуса

Положение сцепа, груженного хлыстами, в кривой показано на схеме (рис. 1). Сцеп изображен в виде осевой линии, установленной в «колее зазоров». Колея зазоров δ равна величине нормального зазора $\delta_н$ в прямом участке пути плюс уширение колеи $\delta_к$ для данного радиуса кривой.

Так как минимальный геометрический радиус кривой меньше 100 *м*, то для узкоколейных железных дорог (у. ж. д.) $\delta = \delta_н + \delta_к = 15 + 14 = 29$ *мм*.

Перпендикуляр *АО*, восстановленный из середины сцепных приборов, проходит через центр кривой пути и делит фигуру на две равные симметричные части. В то же время перпендикуляр *СО*, восстановленный из середины базы сцепа (2 *Т*), также проходит через центр кривой. Следовательно, для нахождения центра кривой пути при данной установке подвижного состава достаточно восстановить перпендикуляры из середины сцепного прибора и базы сцепа (точки *А* и *С*). Точка пересечения перпендикуляров и будет центром кривой. При этом нет необходимости вычерчивать полный сцеп, а вполне достаточно вычертить половину или в некоторых случаях четверть сцепа — от точки C до точки A.

На величину наименьшего геометрического радиуса пути влияют следующие элементы подвижного состава (рис. 1):

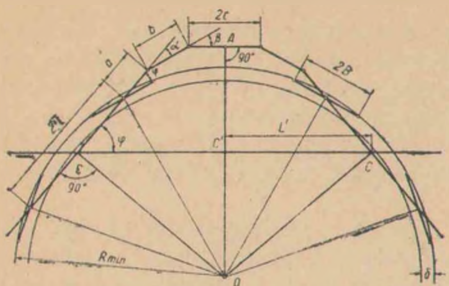

Рис. 1

1) база сцепа (расстояние между шкворнями тележек) — $2T$;

2) база тележек (расстояние между осями тележек) — $2B$;

3) расстояние от шкворня тележки до центра поворота буфера (у сцепов ЦНИИМЭ-ДВЗ, ЭМ-60) или до центра поворота коромысла упряжного прибора (у сцепов из платформ «Лесосудмашстрой» и др.) — a;

4) длина буфера от центра поворота до поворота коромысла упряжного прибора (для платформ «Лесосудмашстрой» и некоторых других $b=0$) — b;

5) длина цепей упряжного прибора или расстояние между центрами поворота коромысел упряжного прибора двух сцепов — $2c$;

6) максимально возможный угол поворота буфера — α;

7) максимально возможный угол поворота коромысел упряжного прибора — β, зависящий от размеров коромысла и его расстояния от передней стенки сцепа;

8) максимально возможный угол поворота оси тележки относительно оси сцепа — φ, для подвижного состава у. ж. д. зависит от длины скользунов тележек;

9) максимально возможный угол поворота коника (или оси пачки хлыстов относительно оси сцепа) — ψ, зависит от величины скользунов коника;

10) величина забега реборд — b';

11) положение подвижного состава в кривой, характеризующееся углом γ;

12) подвижность коника или хлыстов, дающая возможность изменять расстояние между кониками — $l(l = L - L')$,
где

$$2L = 2(T + a + b + c),$$

L — расстояние между точками $C - C'$.

Для подвижного состава у. ж. д. пункты 8, 9 и 12 не ограничивают в большинстве случаев величину R_{min}.

Рассмотрим определение R_{min} в зависимости от различных ограничивающих факторов и положения экипажа в кривой.

Экипаж в кривой может занимать следующие положения.

I. Хордальное положение

а) ограничивающими факторами являются углы поворота α и β

Для определения $R_{\min}$ необходимо вычертить половину сцепа (в виде осевой линии) в масштабе 1:10, 1:20, отложив максимально возможные углы α и β. После этого восстановить перпендикуляры с середины базы сцепа (точки C) и с конца упряжного прибора (точка A). Пересечение перпендикуляров даст точку O (центр кривой). Соединив точки $Д$ и $Д'$ (центры шкворней сцепа) с центром O прямой, необходимо отложить от точек $Д$ и $Д'$ по перпендикуляру к прямым $ДО$ и $Д'O$ отрезки, равные B (половине базы тележки) (рис. 2). Обозначим концы базы тележек буквами E и E'. Расстояние EO и будет наименьшим геометрическим радиусом $R_{\min}$. Наименьший геометрический радиус определен без учета забега реборд колес. При необходимости определения $R'_{\min}$ с учетом забега реборд колес следует по найденному значению $R_{\min}$ и углу набегания β' определить величину забега реборд b'. Для этого продолжим линии $ДE$ и $Д'E'$ в обе стороны на величину b' и получим точки K и K'. Прямая KO будет новым значением наименьшего геометрического радиуса $R'_{\min}$. При этом и величина забега b' изменится, но очень незначительно. Дальнейшее уточнение значения наименьшего геометрического радиуса практически нецелесообразно. Если же требуется получить более точное значение $R'_{\min}$ с учетом забега реборд колеса, то следует после получения его величины определить новое значение забега b'', отложить его от точек E и E' и получить уточненное значение $R''_{\min}$. Делать это до тех пор, пока не получим значения $R_{\min}$ требуемой точности. Величину b' можно вычислить по имеющимся приближенным или точным формулам или получить с графиков забегов реборд колес.

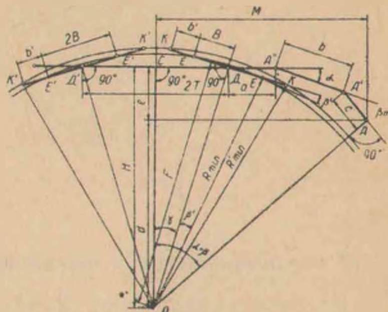

Рис. 2

б) ограничивающим фактором является угол ψ

Угол ψ является ограничивающим фактором в том случае, если сумма углов $\alpha_{\max} + \beta_{\max}$ больше угла ψ. В этом случае производим следующие построения. Проводим горизонтально прямую линию $C—C'$. Из точки C под углом ψ проводим прямую, на которой в масштабе вычерчиваем размеры сцепа. При этом, если $\alpha_{max} < \psi < \alpha_{max} + \beta_{max}$, то откладываем максимальное значение угла α, а угол β принимаем такой величины, чтобы прямая $A - A'$ была параллельна прямой $C - C'$ (рис. 3,*а*). Это достигается отложением угла β, равного $\beta = \psi - \alpha_{max}$. Если же $0 < \psi < \alpha_{max}$, то откладывается угол α, равный углу ψ, с тем чтобы прямая $A - A' - A''$ была параллельна прямой $C - C'$. При этом угол $\beta = 0$ (рис. 3,*б*). Дальнейшее построение ведется по методике, изложенной в пунктах а) и б).

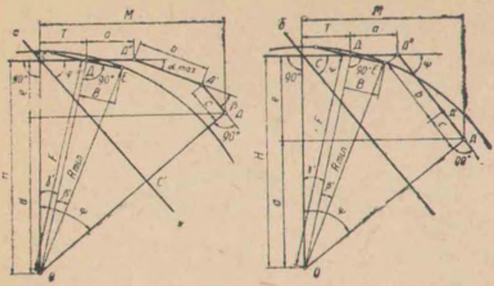

Рис. 3

в) ограничивающими факторами являются углы поворота α, β и φ

В этом случае, как и в случае а), вычерчиваем в масштабе размеры сцепа в виде осевой линии. Проводим перпендикуляры из точек *А* и *С*. Соединяем прямой точки *Д* и *Д'* с точкой *О* (рис. 4). От точки *Д* вправо и точки *Д'* влево под углом φ откладываем величину *В*. Получаем точки *Е* и *Е'*. Прямые *ЕО* или *Е'О* и являются наименьшим геометрическим радиусом R_{min}, определенным без учета забега реборд колеса. Если требуется учесть забег реборд колеса, то, как и в первом случае, по определенному значению R_{min} и углу набегания β' вычисляем значение забега b' и откладываем его от точек *Е* и *Е'* на продолжении прямых *ДЕ* и *Д'Е'*. Получаем точки *К* и *К'*. Прямая *ОК* или *ОК'* является новым значением наименьшего геометрического радиуса R_{min}.

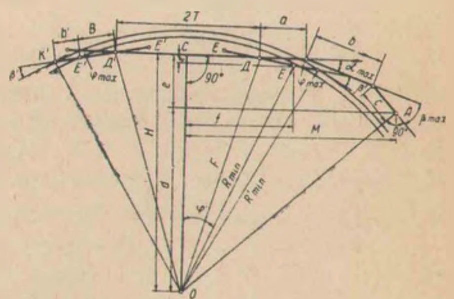

Рис. 4

II. Перекосное положение экипажа

а) ограничивающими факторами являются углы поворота α и β

Для определения R_{min} (рис. 5) откладываем в масштабе прямую *Д' — Д*, равную базе сцепа 2 *Т*. Из точки *Д'* (как центра) радиусом 2 *Т* проводим от точки *Д* засечку вниз настолько, чтобы хорда ее была равна в масштабе колее зазоров δ, получим точку *Д''*. Через точки *Д''* и *Д'* проводим прямую и на ней вычерчиваем размеры сцепа, откладывая максимальные значения углов α и β. Из точек C и A'' восстанавливаем перпендикуляры. Точка пересечения перпендикуляров O_1 и есть центр кривой пути. Соединяем точки $Д''$ и $Д'$ с точкой O_1. От точек $Д''$ и $Д'$ перпендикулярно линиям $Д''O_1$ и $Д'O_1$ откладываем в обе стороны отрезки, равные B (половине базы тележки), получаем точки E'' и E'. Линия $E'O_1$ и есть R_{min} без учета забега реборды колеса.

Величину δ правильно было бы откладывать по линии $Д''' — Д''$, но так как угол α''' очень мал, то можно принять хорду $Д — Д''$, равную прямой $Д''' — Д''$.

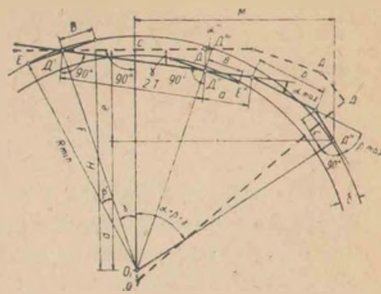

Рис. 5

Построение можно сделать по-другому, с тем чтобы иметь точное значение колеи зазоров δ. Для этого проводим одну кривую радиуса $ОД$, а вторую кривую радиуса $ОД — \delta$. После этого делаем засечку радиусом 2 T (центр засечки $Д'$) и получаем на внутренней кривой точку $Д''$. Через точки $Д'$ и $Д''$ проводим прямую линию и на ней вычерчиваем размеры сцепа. Откладываем от точек $Д'$ и $Д''$ в обе стороны перпендикулярно прямым $ОД'$ и $ОД''$ отрезки, равные B, получим точки E' и E''. Расстояние OE' и есть R_{min}. Расстояние OE'' будет внутренним радиусом. При этом построении колея зазоров будет отложена точно.

Из приведенных рисунков видно, что во всех случаях положения экипажа в кривой центр кривой лежит на перпендикуляре, восстановленном из середины базы сцепа (точки C). За наименьший геометрический радиус для данного экипажа нужно считать наибольший из найденных R_{min}.

При этом R_{min} для одиночного экипажа определяется при перекосном положении, а для сцепленных — при хордальном.

Б. Аналитическое определение наименьшего геометрического радиуса

I. Хордальное положение экипажа

а) ограничивающими факторами являются углы поворота α и β

Наименьший геометрический радиус кривой R_{min} определится из соотношения (рис. 2)

$$R_{min} = \frac{F}{\cos \beta'},$$

где F — длина прямой $ДO$;

β' — угол $ДОЕ$, он же угол набегания колеса на рельс.

В свою очередь угол β' равен

$$\beta' = \mathrm{arctg}\,\frac{B}{F}$$

без учета забега реборд колеса или

$$\beta' = \mathrm{arctg}\,\frac{B + b'}{F}$$

с учетом забега реборд колеса,

где B — половина базы тележки;

b' — забег реборды колеса.

Забег реборды колеса определим по формуле

$$b' = r'\,\mathrm{tg}\,\alpha''\beta',$$

где r' — радиус колеса + 10 *мм;*

α'' — угол наклона бандажа к горизонтальной оси (для колес подвижного состава у.ж.д. $\mathrm{tg}\,\alpha'' = 1{,}732$);

β' — угол набегания колеса на рельс в радианах.

Длину прямой $ДО = F$ определим из соотношения

$$F = \frac{H}{\cos\gamma'},$$

где H — длина перпендикуляра OC;

γ' — угол $СОД$ и угол $A''ДЕ$ (угол поворота оси тележки относительно оси сцепа).

Угол γ' равен

$$\gamma' = \mathrm{arctg}\,\frac{T}{H},$$

где T — половина базы сцепа.

В свою очередь

$$H = d + e,$$

где e — проекция сцепа на вертикальную ось

$$e = b\sin\alpha + c\sin(\alpha + \beta),$$

$$d = \frac{M}{\mathrm{tg}(\alpha + \beta)},$$

где M — проекция половины сцепа на горизонтальную ось.

$$M = T + a + b\cos\alpha + c\cos(\alpha + \beta).$$

Пример. Определить R_{min} для сцепа ЦНИИМЭ-ДВЗ, имеющего следующие размеры: $2T = 5{,}7$ *м*; $a = 2{,}4$ *м*; $b = 1{,}2$ *м*; $c = 0{,}25$ *м*; $\alpha_{max} = 11°30'$; $\beta_{max} = 19°10'$; $2B = 1{,}3$ *м*; $r' = 0{,}25 + 0{,}01 = 0{,}26$ *м*.

Определяем проекцию половины сцепа на горизонтальную ось M

$$M = T + a + b\cos\alpha + c\cos(\alpha+\beta) = 2{,}85 + 2{,}4 + 1{,}2\cos 11^\circ 30' + \\ + 0{,}25\cos(11^\circ 30' + 19^\circ 10') = 6{,}64 \text{ м}.$$

Определяем d

$$d = \frac{M}{\operatorname{tg}(\alpha+\beta)} = \frac{6{,}64}{\operatorname{tg}(11^\circ 30' + 19^\circ 10')} = 11{,}2 \text{ м}.$$

Далее определяем проекцию сцепа на вертикальную ось e

$$e = b\sin\alpha + c\sin(\alpha+\beta) = 1{,}2\sin 11^\circ 30' + \\ + 0{,}25\sin(11^\circ 30' + 19^\circ 10') = 0{,}37 \text{ м}.$$

Тогда

$$H = d + e = 11{,}2 + 0{,}37 = 11{,}57 \text{ м}.$$

Находим значение угла γ'

$$\operatorname{tg}\gamma' = \frac{T}{H} = \frac{2{,}85}{11{,}57} = 0{,}246;\ \gamma' = 13^\circ 50';\ \cos\gamma' = 0{,}971.$$

Определим значение F

$$F = \frac{H}{\cos\gamma'} = \frac{11{.}57}{0{,}971} = 11{,}9 \text{ м}.$$

Определяем значение угла β' без учета забега реборд колеса b', так как b' само зависит от угла β',

$$\operatorname{tg}\beta' = \frac{B}{F} = \frac{0{,}65}{11{,}9} = 0{,}0545;\ \beta' = 3^\circ 05';\ \cos\beta' = 0{,}9985.$$

Определим $R_{\min}$ без учета забега реборд колеса

$$R_{\min} = \frac{F}{\cos\beta'} = \frac{11{,}9}{0.9985} = 11{,}92 \text{ м}.$$

Теперь определим $R_{\min}$ с учетом забега реборд колеса. Для этого по найденному значению угла β' находим забег реборды колеса b' по формуле

$$b' = r'\operatorname{tg}\alpha''\beta' = 0{,}26\cdot 1{,}732\cdot 0.0525 = 0{,}0236 \text{ м},$$

где

$$\beta' = \frac{3{,}08\cdot 3.14}{180} = 0{,}0525; \text{ а } \operatorname{tg}\alpha'' = 1{,}732.$$

Тогда уточненное значение угла β''

$$\operatorname{tg}\beta'' = \frac{B + b'}{F} = \frac{0{,}65 + 0{,}0236}{11{,}9} = 0{,}0565, \text{ или } \beta'' = 3^\circ 15', \text{ а } \cos\beta'' = 0{,}998.$$

Наименьший геометрический радиус в этом случае равен

$$R'_{\min} = \frac{F}{\cos\beta''} = \frac{11{,}9}{0{,}998} = 11{,}923 \text{ м}.$$

Таким образом, учет забега реборд колес незначительно увеличил размер $R_{\min}$.

б) ограничивающим фактором является угол ψ

1. При $\alpha_{max} < \psi < \alpha_{max} + \beta_{max}$.

Определение R_{min} ведется следующим образом (рис. 3,*а*). Определяем M по формуле

$$M = T + a + b\cos\alpha_{max} + c\cos\psi.$$

После этого находим значение d

$$d = \frac{M}{\operatorname{tg}\psi},$$

а e — по формуле

$$e = b\sin\alpha_{max} + c\sin\psi,$$

тогда

$$H = d + e.$$

Определим угол γ'

$$\gamma' = \operatorname{arctg}\frac{T}{H};$$

$$F = \frac{H}{\cos\gamma'},$$

тогда угол β' найдем из выражения

$$\beta' = \operatorname{arctg}\frac{B}{F}.$$

После всех этих расчетов определяем значение наименьшего геометрического радиуса

$$R_{min} = \frac{F}{\cos\beta'}.$$

2. При $0 < \psi < \alpha_{max}$.

Расчет по определению R_{min} ведем в следующем порядке (рис. 3, *б*).

Определяем значение M

$$M = T + a + (b + c)\cos\psi,$$

тогда

$$d = \frac{M}{\operatorname{tg}\psi},$$

значение e находим по формуле

$$e = (b + c)\sin\psi.$$

После этого получим значение H

$$H = d + e.$$

Находим значение угла γ'

$$\gamma' = \operatorname{arctg}\frac{T}{H}.$$

тогда значение F

$$F = \frac{H}{\cos \gamma'}.$$

Затем определим величину угла β' из формулы

$$\beta' = \operatorname{arctg} \frac{B}{F}.$$

Значение наименьшего геометрического радиуса $R_{\min}$ будет

$$R_{\min} = \frac{F}{\cos \gamma'}.$$

в) ограничивающими факторами являются углы поворота α, β и φ

Наименьший геометрический радиус получим из соотношений (рис. 4):

$$R_{\min} = \frac{H - e'}{\cos \varphi'} \text{ или } R_{\min} = \frac{f}{\sin \varphi'},$$

где

$$H = d + e$$

и

$$d = \frac{M}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)};$$

$$M = T + a + b \cos \alpha + c \cos(\alpha + \beta);$$

$$e = b \sin \alpha + c \sin(\alpha + \beta),$$

где e' — проекция половины базы тележки на вертикальную ось

$$e' = B \sin \varphi.$$

В свою очередь угол φ'

$$\varphi' = \operatorname{arctg} \frac{f}{H - e'},$$

где f — проекция половины базы сцепа и тележки на горизонтальную ось

$$f = T + B \cos \varphi.$$

II. Перекосное положение экипажа

а) ограничивающими факторами являются углы поворота α и β

В этом случае наименьший геометрический радиус найдем из соотношения (рис. 5)

$$R_{\min} = \frac{F}{\cos \beta'},$$

где $\beta' = \operatorname{arctg} \frac{B}{F}$.

Значение F найдем из выражения

$$F = \frac{H}{\cos\gamma'},$$

а значение угла γ' будет равно

$$\gamma' = \operatorname{arctg}\frac{T}{H}.$$

Значение H (как и ранее) равно

$$H = d + e,$$

Положение экипажа в кривой	Ограничивающие факторы	Порядок		
		1	2	3
Хордальное	α и β	$M = T + a + b\cos\alpha + c\cos(\alpha+\beta)$	$d = \frac{M}{\operatorname{tg}(\alpha+\beta)}$	$e = b\sin\alpha + c\sin(\alpha+\beta)$
Хордальное	ψ при $\alpha_{max} < \psi < \alpha_{max} + \beta_{max}$	$M = T + a + b\cos\alpha + c\cos\psi$	$d = \frac{M}{\operatorname{tg}\psi}$	$e = b\sin\alpha + c\sin\psi$
Хордальное	ψ $0 < \psi < \alpha_{max}$	$M = T + a + (b + c)\cos\psi$	»	$e = (b + c)\sin\psi$
Перекосное	α и β	$M = (T + a)\cos\gamma + b\cos(\alpha+\gamma) + c\cos(\alpha+\beta+\gamma)$	$d = \frac{M}{\operatorname{tg}(\alpha+\beta+\gamma)}$	$e = (T + a)\sin\gamma + b\sin(\alpha+\gamma) + c\sin(\alpha+\beta+\gamma)$
Хордальное	α, β и φ	$M = T + a + b\cos\alpha + c\cos(\alpha+\beta)$	$d = \frac{M}{\operatorname{tg}(\alpha+\beta)}$	$e = b\sin\alpha + c\sin(\alpha+\beta)$

где e — проекция сцепа от точки $Д$ до точки E на вертикальную ось

$$e = (T + a)\sin\gamma + b\sin(\alpha+\gamma) + c\sin(\alpha+\beta+\gamma),$$

где γ — угол поворота сцепа в кривой

$$\gamma = \operatorname{arctg}\frac{\delta}{2T}.$$

Величину d определим по формуле

$$d = \frac{M}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta + \gamma)},$$

где M — проекция половины сцепа на горизонтальную ось

$$M = (T + a)\cos\gamma + b\cos(\alpha + \gamma) + c\cos(\alpha + \beta + \gamma).$$

Следовательно, величина наименьшего геометрического радиуса для сцепа ЦНИИМЭ-ДВЗ мало зависит от его положения в кривой и от угла поворота φ.

Таблица 1

определения R_{min}				
4	5	6	7	8
$H = d + e$	$\gamma' = \operatorname{arctg}\frac{T}{H}$	$F = \frac{H}{\cos\gamma'}$	$\beta' = \operatorname{arctg}\frac{B}{F}$	$R_{min} = \frac{F}{\cos\beta'}$
»	»	»	»	»
»	»	»	»	»
»	»	»	»	»
»	$f = T + B\cos\varphi$	$e' = B\sin\varphi$	$\varphi' = \operatorname{arctg}\frac{f}{H - e'}$	$R_{min} = \frac{H - e'}{\cos\varphi'}$

Очень сильно изменяется значение R_{min} для сцепа ЦНИИМЭ-ДВЗ при ограничении угла поворота коника относительно поперечной оси сцепа (в случае заклинивания поворотного устройства коника). Резкое уменьшение угла ψ при входе в кривую пути может привести к сходу подвижного состава с рельс. Поэтому при прохождении состава по кривым малого радиуса необходимо постоянно следить за исправностью механизма подвижки коника.

Кроме того, необходимо произвести расчеты по применяемым на участке типам подвижного состава, выявить ограничивающие вписываемость факторы, наметить пути их устранения и разработать правила эксплуатации.

С целью облегчения пользования предлагаемой методикой по определению R_{min} все расчеты сведены в табл. 1.

При проектировании нового подвижного состава следует задаться всеми его размерами и, пользуясь табл. 1, определить по всем ограничивающим факторам R_{min}. В случае выявления отдельных размеров, ухудшающих вписываемость, привести их в соответствие с остальными.

Рассмотренные выше характеристики R_{min} подвижного состава позволяют оценить соответствие между собой геометрических размеров отдельных элементов экипажа, влияющих на вписывание. Влияние возникающих сил взаимодействия между колесами и рельсом при прохождении экипажей по кривому участку пути не учитывается.

Таким образом, геометрическая оценка показывает только те элементы подвижного состава, которые могут ограничивать вписываемость в кривые (существующий подвижной состав) и целесообразность приведения их в соответствие между собой (существующий и вновь проектируемый подвижной состав).

П. Д. МОХОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СИЛ ДЛЯ МАРОК СТАЛЕЙ 20Х, 12ХН3А и 18ХГТ

Одним из важнейших показателей, определяющих поведение металла при пластической деформации, является коэффициент трения.

Коэффициент трения между инструментом и металлом при пластической деформации сильно отличается по величине от коэффициента трения при скольжении, причем природа коэффициента трения при деформации несколько иная, чем коэффициента трения при скольжении. Если в последнем случае скользящая поверхность не подвергается никаким физическим изменениям, то в первом случае, наоборот, в соприкосновение вступают все новые и новые группы кристаллов деформируемого металла. Таким образом, поверхностное состояние металла все время изменяется как за счет вступающих в работу кристаллов вследствие увеличения трущейся поверхности, так частично и за счет наклепа поверхностного слоя. Более точно изучить природу коэффициента трения деформации возможно путем исследования энергетического состояния трущейся поверхности в процессе ее пластического деформирования.