



Укладка бесстыкового пути в сложных климатических условиях



Геннадий СТОЯНОВИЧ
Gennady M. STOYANOVICH

Виктор ПУПАТЕНКО
Victor V. PUPATENKO



Стоянович Геннадий Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Железнодорожный путь и проектирование железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения, (ДВГУПС), Хабаровск, Россия.

Пупатенко Виктор Викторович – кандидат технических наук, доцент ДВГУПС, Хабаровск, Россия.

Laying of Continuously Welded Rail Track in Extreme Climatic Conditions

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 72)

В статье рассмотрены вопросы укладки пути в сложных климатических условиях Забайкальской железной дороги при реализации тяжеловесного движения и внедрении новых локомотивов «Ермак». Установлена взаимосвязь ключевых для конструкции бесстыкового пути показателей: температуры закрепления, годовой амплитуды температур, критического радиуса и скорости движения. Предложены технические решения, обеспечивающие электровозам необходимые динамические, скоростные и другие эксплуатационные характеристики, а также снижение затрат на укладку и содержание бесстыковой конструкции железнодорожного пути.

Ключевые слова: железная дорога, электровоз, бесстыковой путь, критический радиус, температура закрепления плети, Забайкалье, климатические условия.

Проектирование, укладка и содержание бесстыкового пути в сложных природно-климатических и эксплуатационных условиях требуют совершенствования установленных технических норм. Изменение условий эксплуатации бесстыкового пути за счет внедрения электровозов ЗЭС5К «Ермак» при тяжеловесном движении поездов в Забайкалье существенно повлияло на уменьшение допускаемого перепада температуры плетей на охлаждение. Это привело к снижению максимальной температуры закрепления, сужению расчетного интервала и выходу оптимального интервала за границы расчетного.

Решение этой проблемы особенно актуально для Забайкальской железной дороги, поскольку на всем ее протяжении (90%) годовые расчетные перепады температур рельсов превышают 110 °С, достигая экстремальных значений в 118 °С, наибольших для всей сети железных дорог России. Кроме того, кривые участки пути составляют около 40% общей длины.

Для повышения технико-экономической эффективности эксплуатации бесстыковой конструкции пути в таких усло-

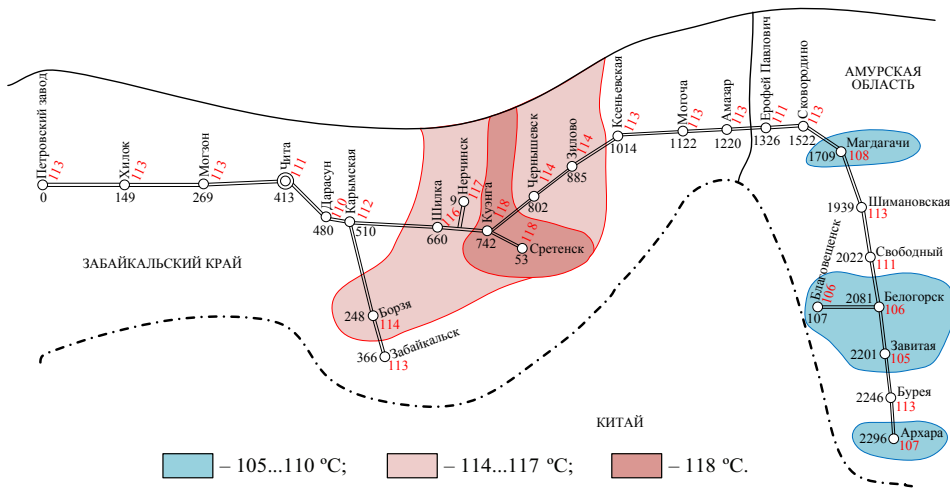


Рис. 1. Схема Забайкальской железной дороги с годовыми амплитудами температур рельсов.

Таблица 1

Расчетные значения температур рельсов в градусах Цельсия

Станции	T _{max}	T _{min}	T _A	Станции	T _{max}	T _{min}	T _A
Завитая	+56	–49	105	Хилок	+58	–55	113
Белогорск	+57	–49	106	Забайкальская	+60	–53	113
Благовещенск	+58	–48	106	Ксеньевская	+57	–56	113
Архара	+56	–51	107	Могоча	+57	–56	113
Магдагачи	+57	–51	108	Оловянная	+60	–53	113
Дарасун	+58	–53	111	Сковородино	+57	–56	113
Свободный	+59	–51	110	Шимановская	+58	–55	113
Тыгда	+58	–53	111	Буря	+60	–53	113
Ерофей Павлович	+57	–54	111	Борзя	+60	–54	114
Чита	+59	–52	111	Зилово	+59	–55	144
Талдан	+60	–52	112	Чернышевск	+57	–57	144
Карымская	+60	–52	112	Шилка	+60	–56	116
Амазар	+58	–55	113	Нерчинск	+60	–57	117
Петровский завод	+58	–55	113	Куэнга	+60	–58	118
Могзон	+58	–55	113	Сретенск	+60	–58	118

виях выполнен анализ действующих норм, на основе теоретических расчетов предложены варианты расширения полигона его укладки и сохранения установленных скоростей движения поездов.

Основные выводы получены с помощью математического моделирования работы плетей, анализа многофакторных зависимостей между критическим радиусом, скоростью движения, температурой закрепления и годовой расчетной температурой рельсов.

На Забайкальской дороге при резко континентальном климате температура воздуха изменяется от –58 °C до +40 °C [1]. Расчетные температуры рельсов и годовые амплитуды их изменения T_A на 30 крупных

и узловых станциях приведены в таблице 1.

На всем протяжении дороги годовые перепады температур рельсов T_A изменяются от 105 °C до 118 °C. В Амурской области общая длина участков пути со значениями T_A от 105 °C до 110 °C составляет около 303 км (10,7%). Остальные участки в Забайкальском крае общей протяженностью около 2528 км (89,3%) имеют температуру T_A от 110 °C до 114 °C. На рис. 1 приведена схема Забайкальской железной дороги с расстояниями между станциями и годовыми амплитудами температур рельсов. Зона наибольших амплитуд от 114 °C до 118 °C расположена на транссибирском направлении между станциями Карым-



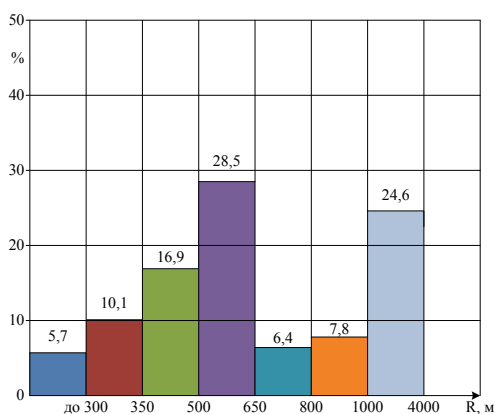


Рис. 2. Распределение кривых участков пути по радиусам.

ская—Шилка западной части дороги и Зилово—Ксеньевская на востоке. В эту зону попадает ветка на Сретенск и часть железной дороги возле станции Борзя.

По всей длине главных путей устроены 9867 кривых протяженностью 2694,69 км, это почти половина совокупного дорожного километража [2].

На Забайкальской дороге уложено и эксплуатируется большое количество кривых малого радиуса (рис. 2). Так, кривые с радиусами 650 м и менее составляют 1651,7 км (61,2% от общей протяженности кривых).

Для обеспечения безопасности движения поездов с заданными скоростями по бесстыковому пути температурно-напряженного типа одним из решающих условий является правильное определение температуры закрепления плетей $t_3(t_{\text{fix}})$ на постоянный режим эксплуатации. Действующие нормы [1] требуют закреплять все плети при оптимальной температуре $t_{\text{опт}}(t_{\text{opt}})$ и разрешают отклонения от неё в пределах $\pm 5^\circ\text{C}$. Для Забайкальской дирекции инфраструктуры, как и для всех дорог Дальнего Востока России, согласно данным таблицы 3 $t_{\text{опт}} = 35 \pm 5^\circ\text{C}$. В то же время на участках с минимальными температурами рельсов $T_{\text{min}} = -50^\circ\text{C}$ и ниже разрешается закреплять плети при температуре $30 \pm 5^\circ\text{C}$. Такие минимальные температуры рельсы имеют практически на всем протяжении Забайкальской железной дороги, кроме участков пути в зоне Благовещенска.

Чтобы получить оценки прочности и устойчивости бесстыкового пути в су-

ществующих условиях, определить допустимые скорости движения грузовых поездов и критические радиусы кривых, выполнены многовариантные расчеты и анализ режимов эксплуатации. Установлена взаимосвязь расчетных температур закрепления при различных скоростях движения и годовых амплитудах температур, параметров плана железнодорожной линии (радиусов кривых) с учетом допусков.

Границы и величину расчетного интервала закрепления рельсовых плетей $\Delta t_3(\Delta t_{\text{fix}})$ определим по формулам [1]:

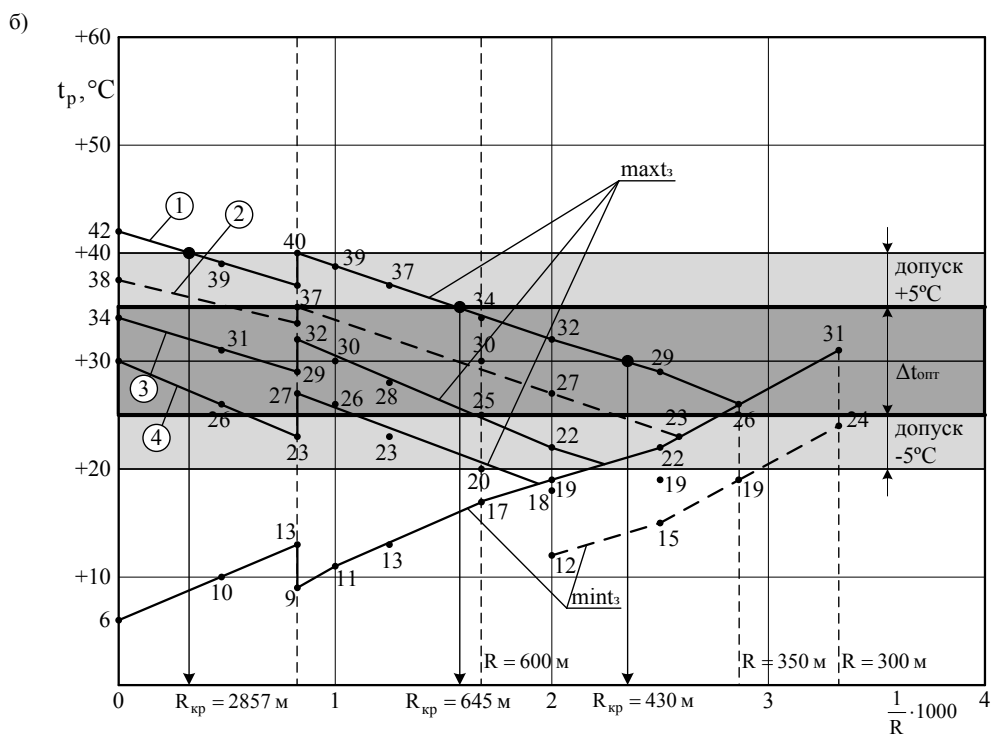
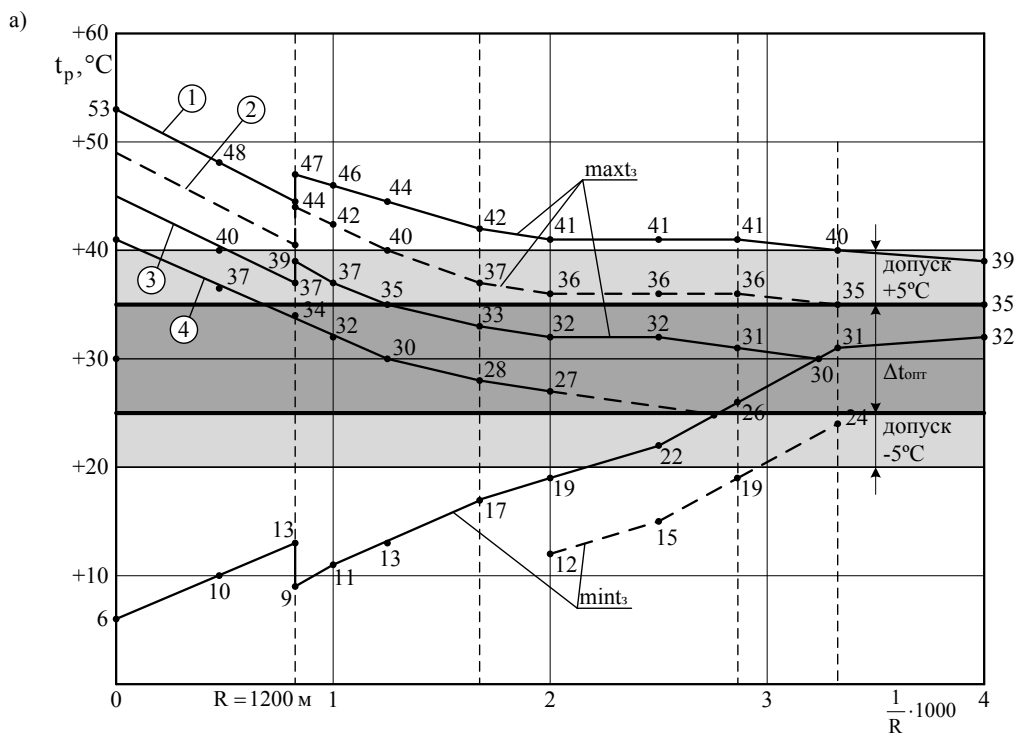
$$\begin{aligned} \min t_3 &= T_{\text{max}} - [\Delta t_y], \\ \max t_3 &= T_{\text{min}} - [\Delta t_p], \\ \Delta t_3 &= \max t_3 - \min t_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\min t_3$, $\max t_3$ — соответственно самая низкая и самая высокая температуры закрепления; T_{max} , T_{min} — максимальная и минимальная температура рельса [1, приложение 3]; $[\Delta t_y]$ — допускаемое повышение температуры рельсовых плетей по условию устойчивости пути [1, табл., п. 2.1]; $[\Delta t_p]$ — допускаемое понижение температуры рельсовых плетей по условию прочности рельса [1, табл., п. 2.2].

По зависимости (1) определены расчетные температуры закрепления бесстыковых плетей при проходе электровозов ВЛ-80 и «Ермак» со скоростями движения 60, 70, 80 и 90 км/ч (рис. 3). Для удобства построения зависимостей по оси абсцисс отложена кривизна $1/R$, где R — радиус кривой. При кривизне 0,83 получен скачок в несколько градусов в температурах закрепления за счет перехода при $R \leq 1200$ м на эпюру шпал с 1840 шт./км на 2000 шт./км. Различным фоном на рис. 3 выделена оптимальная температура закрепления в пределах от $+25^\circ\text{C}$ до $+35^\circ\text{C}$, допуски в большую сторону до $+40^\circ\text{C}$ и в меньшую сторону до $+20^\circ\text{C}$.

Сопоставление расчетных и оптимальных температур закрепления плетей при годовой амплитуде $T_A = 118^\circ\text{C}$ позволяет сформулировать вывод о том, что при проходе грузовых поездов с электровозами ВЛ-80 и «Ермак» возникают существенные ограничения по скоростям движения в зависимости от температуры закрепления на прямых и кривых участках пути.

На рис. 3 наглядно показано уменьшение расчетного интервала закрепления



① - $V=60$ км/ч; ② - $V=70$ км/ч; ③ - $V=80$ км/ч; ④ - $V=90$ км/ч

Рис. 3. Расчетные и оптимальные температуры закрепления бесстыковых плит при проходе электропоездов со скоростями 60–90 км/ч: а) ВЛ-80; б) «Ермак».



Таблица 2

Величины критических радиусов кривых и интервалы температур закрепления плетей при $T_A = 118\text{ }^{\circ}\text{C}$

V, км/ч	Электровоз ВЛ-80			Электровоз «Ермак»		
	$R_{кр}$, м	границы Δt_3		$R_{кр}$, м	границы Δt_3	
		min t_3	max t_3		min t_3	max t_3
60	300	+30	+40	444	+20	+30
70	350	+26	+36	533	+18	+28
80	400	+22	+32	600	+16	+26
90	500	+17	+27	800	+13	+23
60	363 ^{*)}	+25	+35	645	+25	+35
70	800	+25	+35	2000	+25	+35
80	2000	+25	+35	∞	+25	+34
90	4000	+25	+35	∞	+25	+30

Примечание: ^{*)} по условию устойчивости пути на выброс.

Таблица 3

Снижение допускаемого по условию прочности рельсов понижения температуры Δt_p , $^{\circ}\text{C}$ для электровозов «Ермак»

V, км/ч	Прямая	Кривая радиусом, м									
		2000	1200	1000	800	600	500	400	350	300	250
Секционный электровоз «Ермак»											
60	11	9	8	7	7	8	9	12	15	17	20
80	11	9	7	7	7	8	10	13	15	17	—
100	11	9	7	7	7	8	9	—	—	—	—
Электровоз Э5К											
60	8	9	8	9	9	11	13	18	21	25	31
80	8	9	9	8	9	11	14	20	22	27	—
100	8	9	8	8	9	11	14	—	—	—	—

рельсовых плетей Δt_3 ($\Delta t_{\text{фик}}$) до нуля с уменьшением радиусов кривых и повышением скоростей движения поездов. Если принять минимальный интервал закрепления плетей $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, то можно определить критические радиусы $R_{кр}$ и границы интервала закрепления. Результаты расчета этих параметров приведены в таблице 2.

В кривых участках пути при радиусах меньше $R_{кр}$ бесстыковой путь по условиям прочности и устойчивости укладывать нельзя. По данным таблицы 2 видно существенное ограничение для укладки бесстыкового пути в кривых с повышением скоростей движения, особенно при оптимальном интервале закрепления $\Delta t_{\text{опт}}$ в пределах от $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Электровоз «Ермак» в 1,5 раза и более увеличивает критические радиусы при интервале закрепления за пределами оптимального и не имеет права двигаться со скоростью более 75 км/ч на прямых, со скоростью 70 км/ч — при $R > 2000$ м, со скоростью 60 км/ч — при

$R > 645$ м, если плети были закреплены при температуре $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Внедрение в эксплуатацию нового секционного электровоза 3ЭС5К «Ермак» уменьшило расчетный интервал закрепления плетей за счет снижения величины Δt_p на $7\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а односекционного Э5К — на $8\text{--}31\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с ВЛ-80 (таблица 3).

Точно так же при эксплуатации электровоза «Ермак» должна была понизиться верхняя граница интервала закрепления $\max t_3$ (рис. 3), что подтверждено расчетами. Повышенное силовое воздействие на путь электровоза 3ЭС5К по сравнению с электровозом ВЛ-80 связано с увеличением у «Ермаков» неподрессоренной массы до 41 кН на колесо и изменением конструкции подвески тягового двигателя.

Если закрепить бесстыковые плети при верхней границе оптимального интервала температур $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, то движение электровоза ВЛ-80 на кривых участках пути с радиусом от 250 до 800 м возможно со скоро-

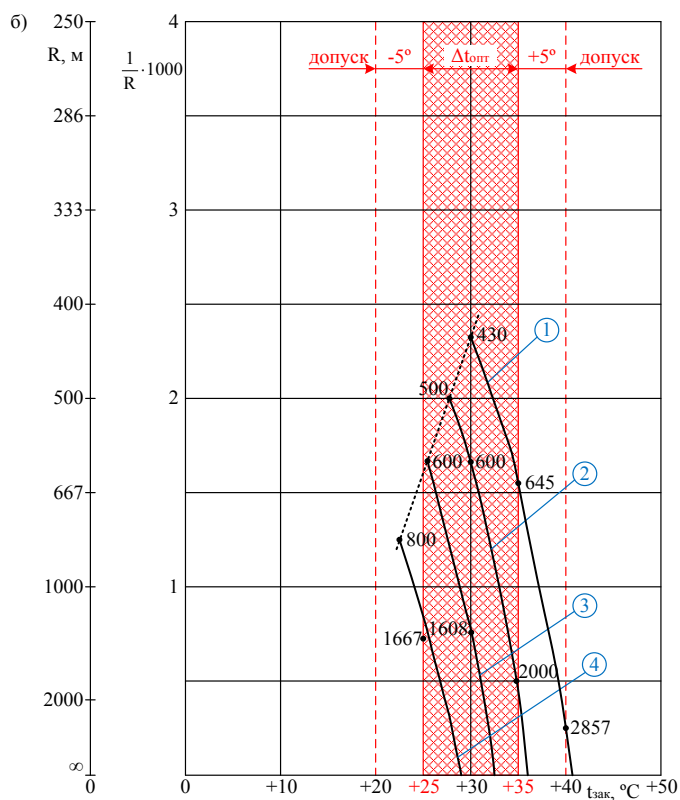
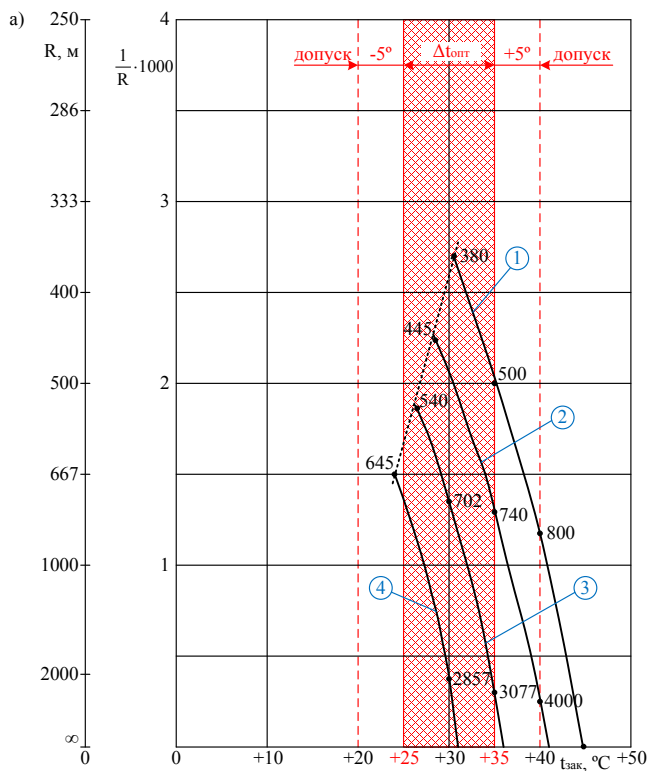


Рис. 4. Зависимость критического радиуса от температуры закрепления плетей при проходе электровоза «Ермак»:
а) при $T_A = 113 ^\circ\text{C}$;
б) при $T_A = 118 ^\circ\text{C}$.

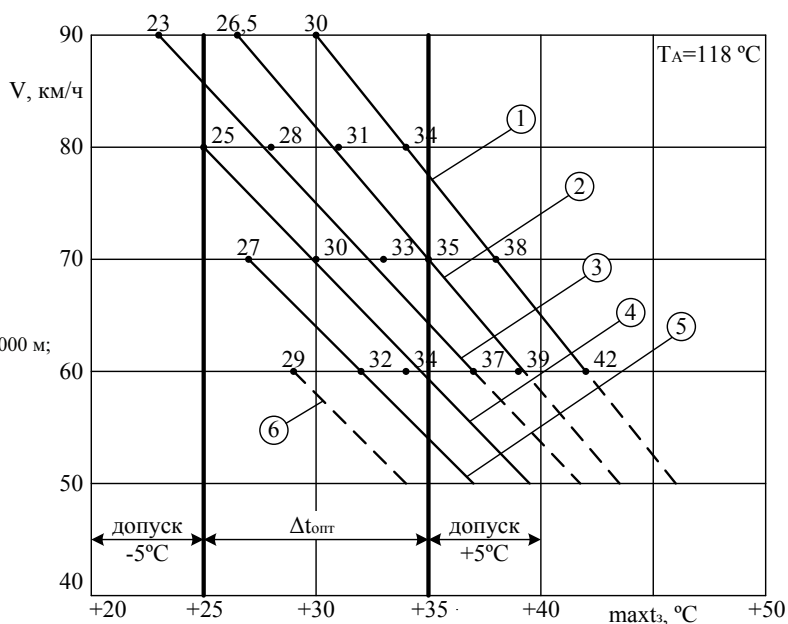


① - $V=60$ км/ч; ② - $V=70$ км/ч; ③ - $V=80$ км/ч; ④ - $V=90$ км/ч



Рис. 5. Зависимость скорости движения электровоза «Ермак» от максимальной температуры закрепления плетей при:

- ① – $R = \infty$ (прямая); ② – $R = 2000$ м;
 ③ – $R = 800$ м; ④ – $R = 600$ м;
 ⑤ – $R = 500$ м; ⑥ – $R = 400$ м.



стью не более 70 км/ч, со скоростью 80 км/ч – при $R > 800$ м, со скоростью 90 км/ч – при $R > 1467$ м. При закреплении плетей с учетом допуска (+40 °C) зона укладки бесстыкового пути существенно сужается: скорость 60 км/ч допустима при $R > 300$ м; $V = 70$ км/ч – при $R > 800$ м; $V = 80$ км/ч – при $R > 2000$ м; $V = 90$ км/ч – только на прямых участках пути.

Еще более значительное уменьшение зоны укладки бесстыкового пути дает электровоз «Ермак» (рис. 3б) при $t_3 = +40$ °C. Со скоростью 60 км/ч можно двигаться на участках пути с $R > 2857$ м, скорость движения поездов 65 км/ч возможна только на прямых.

Приведенные результаты показывают, что закрепление плетей при температурах, соответствующих верхней зоне оптимального интервала закрепления или зоне допуска, значительно ограничивает сферу применения бесстыкового пути, поскольку на таких участках требуется ограничение допускаемых скоростей движения поездов.

Смещение температуры закрепления в нижнюю часть разрешенного диапазона расширяет зону укладки бесстыкового пути. Так, при $t_3 = +40$ °C электровоз «Ермак» может двигаться со скоростью до 90 км/ч на прямых и кривых до критического радиуса 1000 м.

При определении оптимальной температуры закрепления бесстыковых плетей

дополнительно учитываются допускаемые изменения температуры рельсовых плетей при работе путевых машин и при производстве путевых работ, а также наивысшая допускаемая температура закрепления плетей по условиям прочности болтов в стыке и величине зазора при изломе плети. Согласно [1], при температурах ниже –45 °C и применении типовых стыковых болтов максимальная температура закрепления составляет +30 °C.

На условия укладки и содержания бесстыкового пути влияют следующие показатели: температура закрепления t_3 , годовая амплитуда колебаний температур T_A , радиус кривой R , ими определяется скорость движения локомотива V . Выполненные расчеты помогли установить взаимосвязь этих параметров. Полученные зависимости, приведенные на рис. 4–6, позволяют определить допускаемую скорость движения поездов с электровозами «Ермак» для условий эксплуатации в разных климатических зонах в пределах Забайкальской железной дороги.

Так, из данных, представленных на рис. 6, следует, что со скоростью 90 км/ч электровозу ЗЭС5К можно двигаться в кривых $R > 467$ м при $T_A = 105$ °C, а в более суровых климатических условиях (при $T_A = 113$ °C) – уже в кривых радиусом не менее 645 м. На тех участках Забайкальской

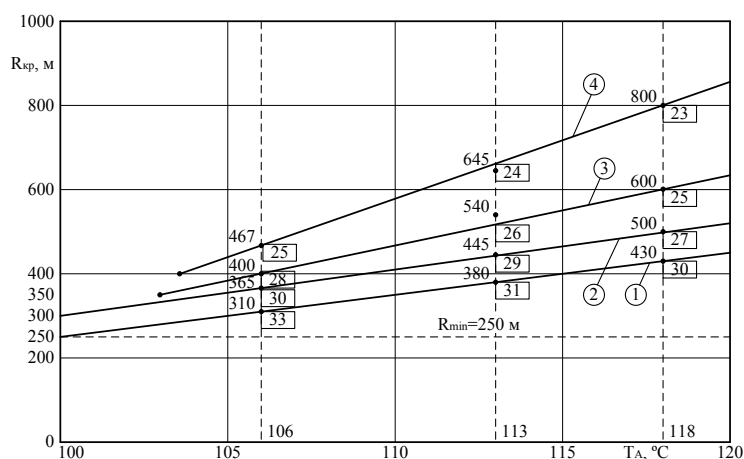


Рис. 6. Зависимость критического радиуса от годового перепада температуры рельсов при скорости электровоза «Ермак»:

- ① – $V=60$ км/ч; ② – $V=70$ км/ч;
 ③ – $V=80$ км/ч; ④ – $V=90$ км/ч;
 [23] – максимальная температура закрепления плетей.

дороги, где $T_{\Delta}=118$ °С, скорость движения 90 км/ч для поездов с локомотивом «Ермак» возможна только в прямых и кривых радиусом более 800 м. В этом случае максимальная температура закрепления рельсовых плетей должна быть от +25 °С до +23 °С.

В связи с резким снижением верхней границы расчетного интервала закрепления бесстыковых плетей при вводе в эксплуатацию электровоза «Ермак» для расширения полигона укладки бесстыкового пути рекомендуется изменить подход к выбору расчетных температур рельсов. За расчетную минимальную температуру необходимо брать не экстремальную за весь период наблюдений, а часто повторяющуюся температуру. В случае появления экстремальных или близких к ним температур следует заранее установить на участке временное краткосрочное снижение скорости движения поездов. Такая методика известна [3].

РЕКОМЕНДАЦИИ

Для расширения полигона укладки бесстыкового пути на Забайкальской железной дороге и повышения скоростей движения можно предложить следующие технические решения.

1. Снизить оптимальный интервал закрепления бесстыковых плетей от $+25 \pm 5$ °С до $+20 \pm 5$ °С.

2. За расчетное значение $T_{\min}$ принять не экстремальную величину, а более высо-

кое значение, с учетом повторяемости минимальных температур. В тот период времени, когда возможны температуры, близкие к экстремальной, необходимо определить допускаемые скорости движения поездов.

3. Снизить $\min t_3$ в кривых малого радиуса на 4–7 °С за счет дополнительных мероприятий, предусмотренных инструкцией [1]. Расширить применение этих мероприятий до радиуса 500 м (штриховая линия на рис. 3).

4. Предусмотреть сезонную разрядку напряжений в бесстыковых плетях в кривых малого радиуса с учетом технико-экономического обоснования.

5. Подготовить технические решения по снижению динамического воздействия нового электровоза 3ЭС5К «Ермак» до уровня, по крайней мере, соответствующего показателям электровоза ВЛ-80.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 29 декабря 2012 г. № 2788р. – М., 2012. – 138 с.
2. Минченко В. А. Эксплуатация комбинированной решетки на Забайкальской дороге // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 8. – С. 12–13.
3. Стоянович Г. М. Расчеты верхнего строения пути на прочность и устойчивость: курс лекций. – Хабаровск: ДВГУПС, 2013. – 79 с.
4. Клименко Л. В. Фундамент бесстыкового пути // Мир транспорта. – 2009. – № 2. – С. 28–31. ●

Координаты авторов: **Стоянович Г. М.** – oif@festu.khv.ru, **Пупатенко В. В.** – pvv@festu.khv.ru.

Статья поступила в редакцию 29.05.2015, принята к публикации 27.08.2015.





LAYING OF CONTINUOUSLY WELDED RAIL TRACK IN EXTREME CLIMATIC CONDITIONS

Stoyanovich, Gennady M., Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia.
Pupatenko, Victor V., Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia.

ABSTRACT

The article considers issues of track laying in extreme climatic conditions of Trans-Baikal region, features of heavy trains and new locomotives of Ermak type operations at Zabaikalskaya railway [Trans-Baikal branch of JSC Russian Railways]. The interrelation of key indicators for the construction of continuously

welded rail track (CWR) is set. They include stress-free temperature, annual temperature amplitude, critical radius and speed of traffic. Technical solutions are suggested that provide electric locomotives with necessary dynamic, speed and other performance characteristics, as can allow well as reduction of the cost of laying and maintenance of CWR.

Keywords: railway, electric locomotive, continuously welded rail track, CWR, critical radius, temperature of strings fixing, Trans-Baikal region, climatic conditions.

Background. Design, laying and maintenance of CWR in extreme climatic and operating conditions require improvement of previously set technical standards. Changes in operating conditions of CWR (or long-welded rails, LWR) in Trans-Baikal region is due to the start of operation of electric locomotives 3ES5K «Ermak» for heavy train traffic. It significantly influenced the reduction of acceptable thermal gradients of rail strings in cooling-down phase. This led to a decrease in the maximum fastening and anchorage temperature, narrowing of calculated interval and positioning of optimal interval beyond calculated border.

The solution to this problem is particularly acute for the Zabaikalskaya Railway, as within its entirety (90%) annual allowable temperature differences of rails exceed 110 °C, reaching extreme values of 118 °C, which is the highest index for the entire railway network of Russia. Moreover, the curved track sections occupy about 40% of the total length.

Objective. The objective of the research was to analyze existing rules if railway operations in Trans-Baikal region in order to search for solutions resulting in improvement of technical and economic performance of CWR in extreme climatic conditions. The research also comprised computation and theoretical calculations to develop suggestions regarding en-

hancement of CWR operation zone in the region and maintaining of previously set speed values of train traffic.

Methods. The main conclusions were obtained by mathematical simulation of LWR strings, analysis of multivariate dependencies between crucial radius, speed, ambient temperature during fastening and anchoring (later on called fixing temperature), and annual allowable temperature of rails.

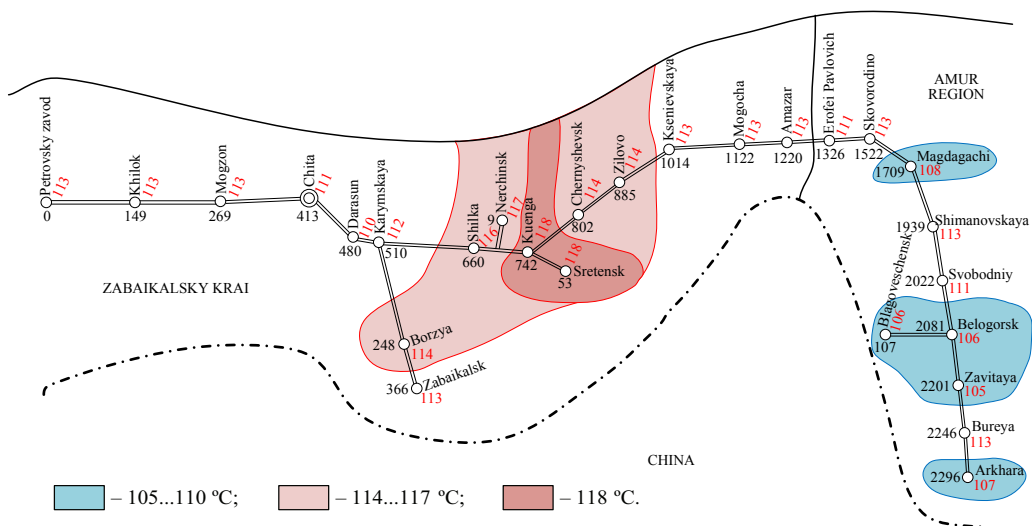
Results. Trans-Baikal railway is in the zone of the sharply continental climate, and temperature during the year ranges from -58 °C to +40 °C [1]. Calculated temperatures of rails and annual changes in their amplitude T_A at 30 large and hub stations are shown in Table 1.

Throughout the railway annual temperature differences of rails T_A vary from 105 °C to 118 °C. In the Amur region the total length of track sections with values T_A from 105 °C to 110 °C is about 303 km (10,7%). The remaining sections in the Trans-Baikal region with a total length of about 2528 km (89,3%) have T_A from 110 °C to 114 °C. Pic. 1 shows a diagram of the Trans-Baikal Railway with distances between stations and annual temperature amplitudes of rails. The area of the largest amplitudes from 114 °C to 118 °C is located on the TransSiberian section between stations Karymskaya – Shilka of the western

Table 1

Calculated temperature values of rails in degrees Celsius

Stations	T_{max}	T_{min}	T_A	Stations	T_{max}	T_{min}	T_A
Zavitaya	+56	-49	105	Khilok	+58	-55	113
Belogorsk	+57	-49	106	Zabaikalskaya	+60	-53	113
Blagoveschensk	+58	-48	106	Ksenievskaya	+57	-56	113
Arkhar	+56	-51	107	Mogocha	+57	-56	113
Magdagachi	+57	-51	108	Olovyannaya	+60	-53	113
Darasun	+58	-53	111	Skovorodino	+57	-56	113
Svobodniy	+59	-51	110	Shimanovskaya	+58	-55	113
Tygda	+58	-53	111	Bureya	+60	-53	113
Erofei Pavlovich	+57	-54	111	Borzya	+60	-54	114
Chita	+59	-52	111	Zilovo	+59	-55	144
Taldan	+60	-52	112	Chernyshevsk	+57	-57	144
Karymskaya	+60	-52	112	Shilka	+60	-56	116
Amazar	+58	-55	113	Nerchinsk	+60	-57	117
Petrovsky zavod	+58	-55	113	Kuenga	+60	-58	118
Mogzon	+58	-55	113	Sretensk	+60	-58	118



Pic. 1. Scheme of Trans-Baikal railway with annual temperature amplitudes of rails.

part of the railway and stations Zilovo and Ksenievskaya in the eastern part of the railway. This area includes auxiliary line to Sretensk and part of the railway near the station Borzya.

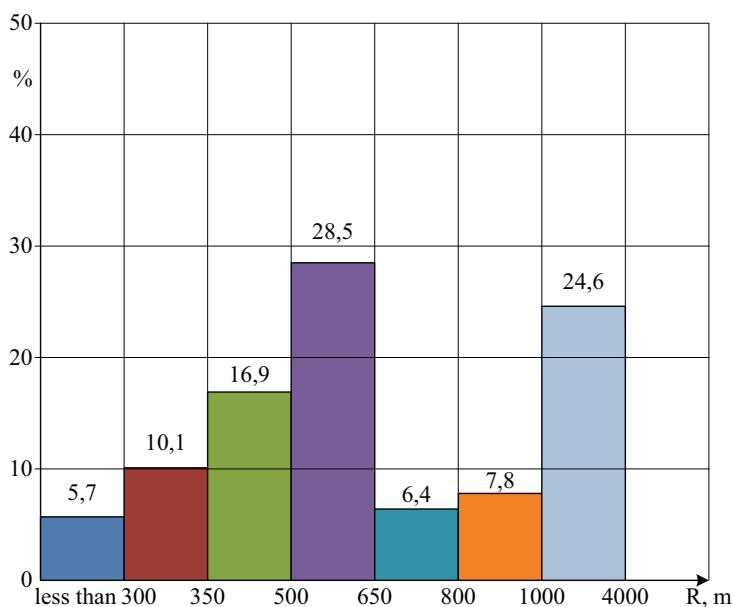
The entire length of the main track comprises 9867 curves with the length of 2694,69 km, representing almost half of the total road mileage [2].

A large number of small-radius curves are also laid and operated within Trans-Baikal railway (Pic. 2). Thus, the curves with radii of 650 m or less amount to 1651,7 km (61,2% of the total length of curves).

Since CWR in the region is of a temperature-stress type, correct identification of temperature of fastening and anchoring of LWR strings, intended for permanent operations, is a key condition of ensuring traffic safety at an approved speed. Current regula-

tions [1] require to fix all the LWR strings at the optimum temperature t_{opt} while allowed deviations from it should not exceed $\pm 5^\circ\text{C}$. For infrastructure department of Trans-Baikal railway, as well as for all railways in the Russian Far East, according to Table 3 $t_{opt} = 35 \pm 5^\circ\text{C}$. At the same time in areas with a minimum temperature of rails $T_{min} = -50^\circ\text{C}$ and below it is allowed to fix the LWR strings at a temperature of $30 \pm 5^\circ\text{C}$. **Rails have such minimum temperature all over the Zabaikal Railway**, except for track sections in the area of Blagoveshchensk.

To obtain estimates of strength and stability of CWR in the current circumstances, to determine allowable speed of freight trains, and minimum radii of curves, multiple calculations and analysis of the operating conditions are conducted. The interrelation of



Pic. 2. Distribution of curved track sections according to the radii.



Table 2

The critical radii of curves and intervals of fixing temperature of strings at $T_A = 118^\circ\text{C}$

V, km/h	Electric locomotive VL-80			Electric locomotive «Ermak»		
	R_{cr} , m	boundaries Δt_{fix}		R_{cr} , m	boundaries Δt_{fix}	
		min t_{fix}	max t_{fix}		min t_{fix}	max t_{fix}
60	300	+30	+40	444	+20	+30
70	350	+26	+36	533	+18	+28
80	400	+22	+32	600	+16	+26
90	500	+17	+27	800	+13	+23
60	363 ^{*)}	+25	+35	645	+25	+35
70	800	+25	+35	2000	+25	+35
80	2000	+25	+35	∞	+25	+34
90	4000	+25	+35	∞	+25	+30

Note: ^{*)} at the condition of track stability to distortion.

Table 3

Reduction of allowable by the terms of rail strength reduction of temperature Δt_d , $^\circ\text{C}$ for electric locomotives «Ermak»

V, km/h	Straight section	Curve with a radius, m									
		2000	1200	1000	800	600	500	400	350	300	250
Sectional electric locomotive «Ermak»											
60	11	9	8	7	7	8	9	12	15	17	20
80	11	9	7	7	7	8	10	13	15	17	—
100	11	9	7	7	7	8	9	—	—	—	—
Electric locomotive E5K											
60	8	9	8	9	9	11	13	18	21	25	31
80	8	9	9	8	9	11	14	20	22	27	—
100	8	9	8	8	9	11	14	—	—	—	—

calculated temperature allowing fastening works with account for different speeds and annual temperature amplitudes, parameters of the railway line (curve radius) with account for permissible allowance is established.

Borders and the estimated value of the interval of fastening of CWR strings Δt_{fix} is determined by formulas [1]:

$$\begin{aligned} \min t_{fix} &= T_{max} - [\Delta t], \\ \max t_{fix} &= T_{min} - [\Delta t], \end{aligned} \quad (1)$$

$\Delta t_{fix} = \max t_{fix} - \min t_{fix}$ are respectively, the lowest and the highest fixing temperature; T_{max} , T_{min} are maximum and minimum temperature of the rail [1, annex 3]; $[\Delta t]$ is permissible temperature increase of CWR strings at the condition of stability of track [1, table, p. 2.1]; $[\Delta t_d]$ is permissible temperature decrease of CWR strings at the condition of the rail strength [1, table, p. 2.2].

Using dependence (1) estimated CWR fixing temperatures are determined for electric locomotives VL-80 and «Ermak» passing at speeds of 60, 70, 80 and 90 km/h (Pic. 3). For the convenience of constructing dependencies curvature if $1/R$ is shown on the x-axis where R is radius of the curve. When the curvature of 0,83 is obtained a leap of a few degrees in fixing temperature is obtained due to transition at $R \leq 1200$ m of distribution of sleepers from 1840 pcs/km to 2000 pcs/km. Different backgrounds in Pic. 3 mark optimum fixing temperature ranging from 25°C to 35°C , permissible allowances upward to $+40^\circ\text{C}$ and downward to $+20^\circ\text{C}$.

Comparison of calculated and optimum fixing temperature of CWR strings with an annual amplitude

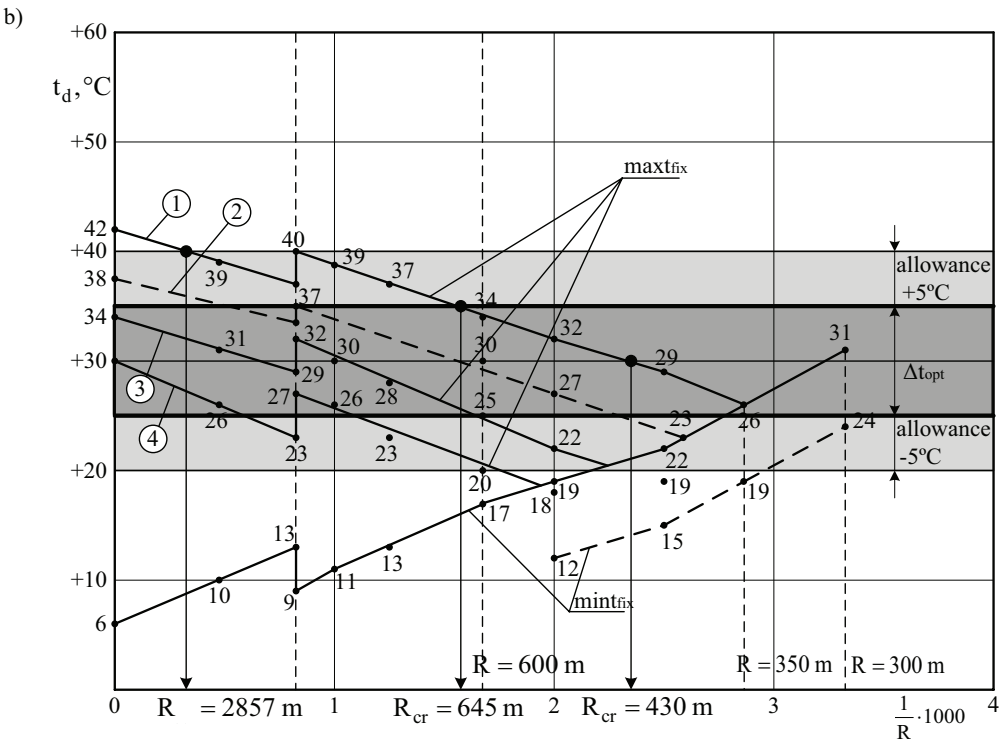
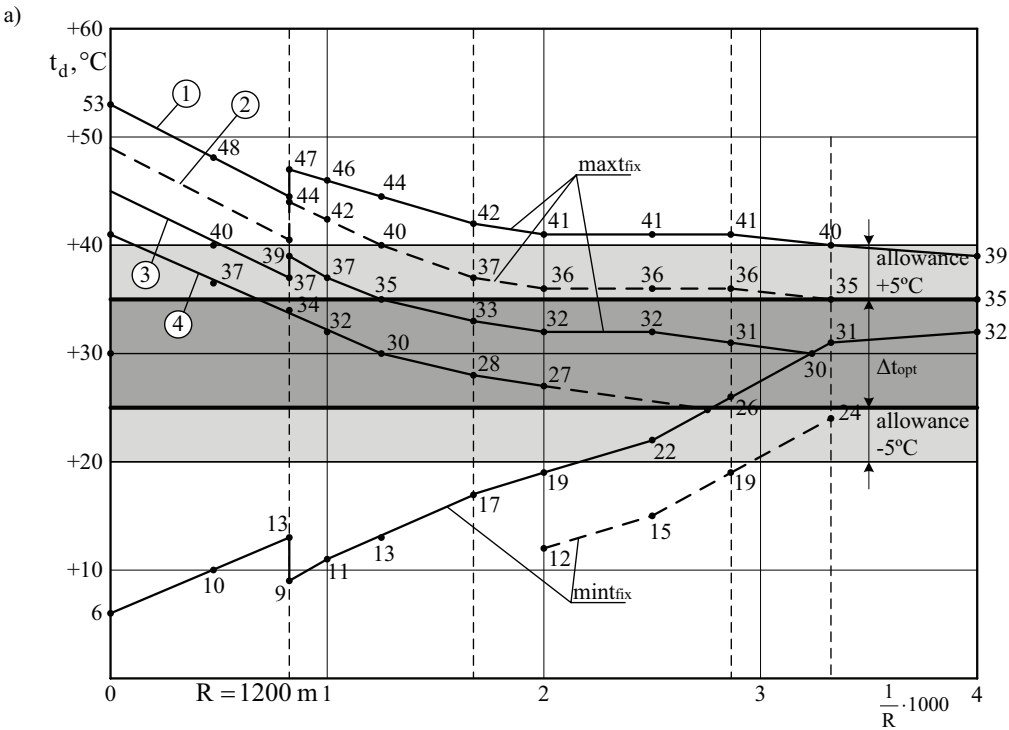
$T_A = 118^\circ\text{C}$ allows us to formulate the conclusion that at the passage of freight trains with electric locomotives VL-80 and «Ermak» there are significant restrictions on the travel speed depending on fixing temperature on straight and curved track sections.

Pic. 3 clearly shows a decrease in the calculated interval of fixing of rail strings Δt_{fix} to zero with decreasing radius of curves and increase in train speeds. If we take the minimum interval of fixing of CWR strings as 10°C , it is possible to determine critical radius R_{cr} and boundaries of the fixing interval. Results of calculation of these parameters are given in Table 2.

In curved track sections at radii smaller than R_{cr} CWR under the terms of the strength and stability cannot be laid. According to Table 2 there is a significant limitation for laying CWR in curves with increasing speeds, especially at the optimum fixing interval Δt_{opt} between $+25^\circ\text{C}$ to 35°C . Electric locomotive «Ermak» increases by 1,5 or more times critical radii in the fixing range beyond optimal and is not allowed to move at a speed of over 75 km/h on the straight sections, with a speed of 70 km/h if $R > 2000$ m, at a speed of 60 km/h if $R > 645$ m, if CWR strings were fixed at the temperature $+35^\circ\text{C}$.

The introduction of the new sectional electric locomotive 3ES5K «Ermak» has reduced the estimated interval of fixing of strings by reducing the value Δt_d by $7-20^\circ\text{C}$, and single-section E5K – by $8-31^\circ\text{C}$ compared to VL-80 (Table 3).

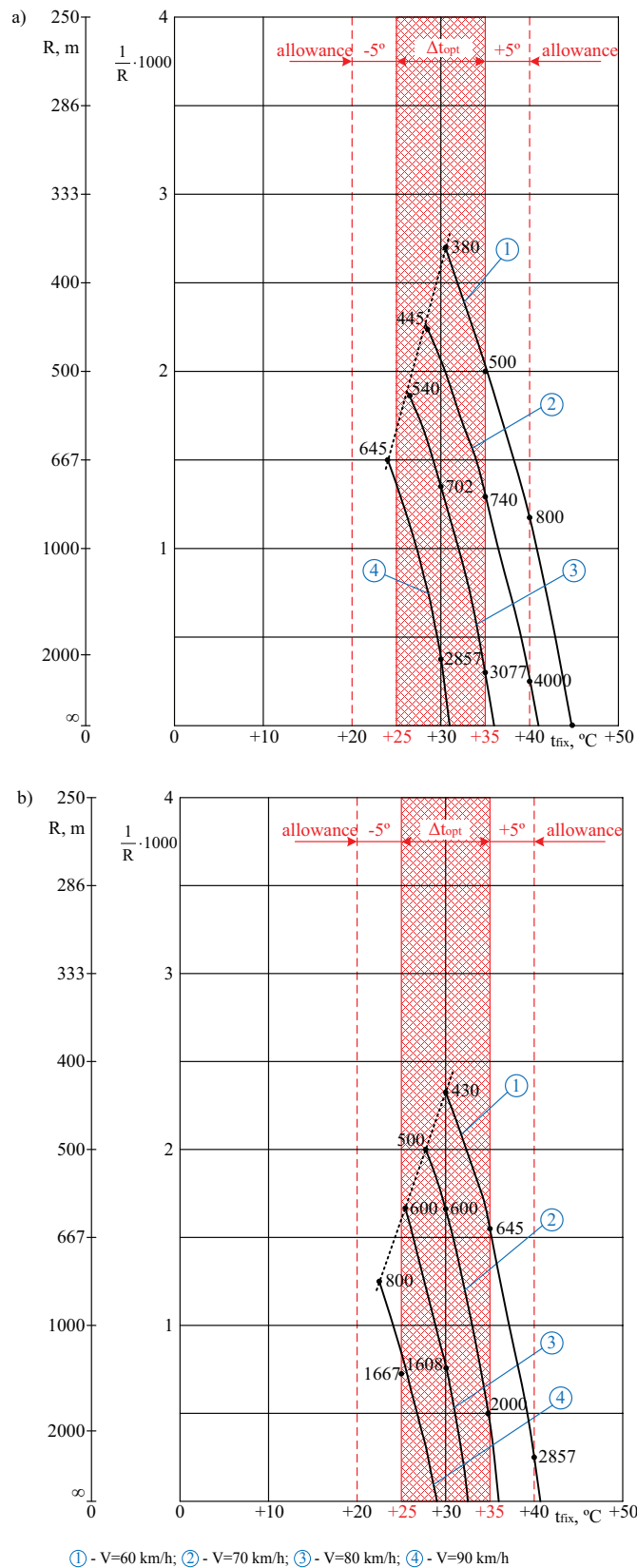
Similarly, in the operation of electric locomotive «Ermak» the upper limit of fixing interval $\max t_{fix}$ should decrease (Pic. 3), and that is confirmed by calculations. The increased force impact on the track by



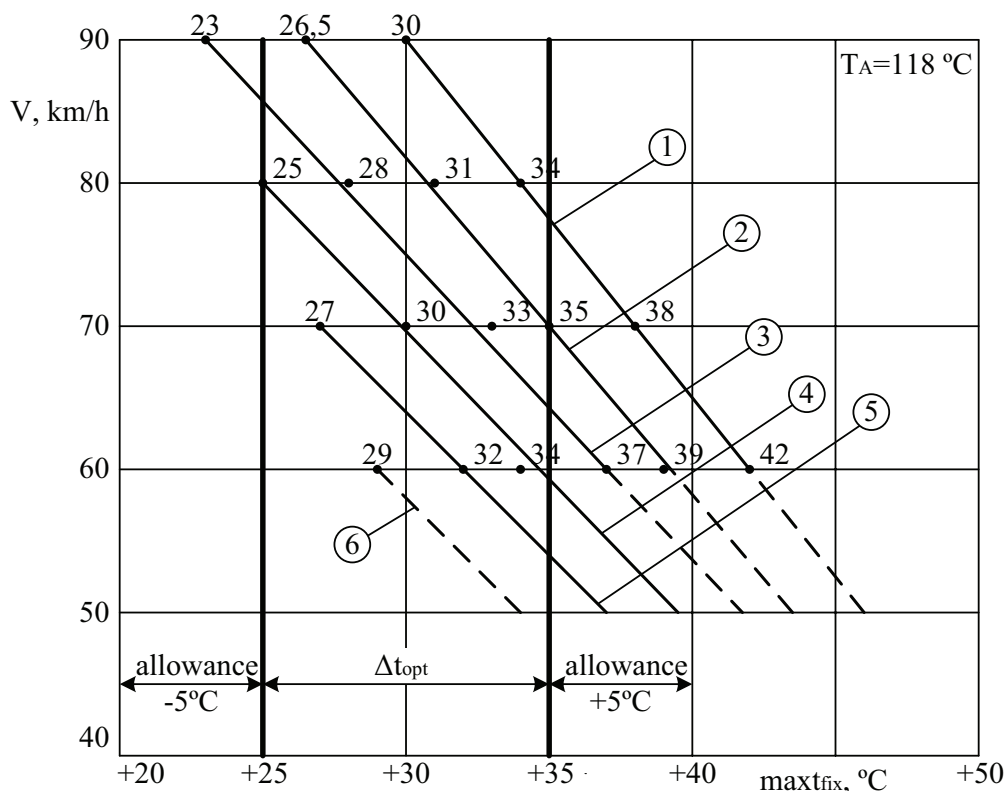
① - $V=60$ km/h; ② - $V=70$ km/h; ③ - $V=80$ km/h; ④ - $V=90$ km/h

Fig. 3. Calculated and optimum fixing temperatures of CWR strings for the traffic of electric locomotives at speeds of 60–90 km/h: a) VL-80; b) «Ermak».





Pic. 4. The dependence of the critical radii on fixing temperature of CWR strings for the traffic of electric locomotive «Ermak»: a) at $T_A = 113$ °C; b) at $T_A = 118$ °C.



Pic. 5. Dependence of speed of electric locomotive «Ermak» on maximum fixing temperature of CWR strings at:

- ① – $R = \infty$ (straight); ② – $R = 2000\text{ m}$; ③ – $R = 800\text{ m}$; ④ – $R = 600\text{ m}$;
 ⑤ – $R = 500\text{ m}$; ⑥ – $R = 400\text{ m}$.

electric locomotive 3ES5K compared to an electric locomotive VL-80 is associated with growing «Ermak» unsprung weight up to 41 kN per a wheel and with changing of the design of the suspension of the traction motor.

If we fix CWR strings at the upper boundary of the optimal temperature interval of $+35\text{ °C}$, the movement of electric locomotive VL-80 on the curved track sections with a radii from 250 to 800 m is possible at a speed of not more than 70 km/h, at $R > 800\text{ m}$ a permissible speed is of 80 km/h, at $R > 1467\text{ m}$ the speed should not exceed 90 km/h. If CWR strings are to be fixed taking into account the allowance ($+40\text{ °C}$) the zone of laying of CWR substantially narrows: the speed of 60 km/h is possible at $R > 300\text{ m}$; $V = 70\text{ km/h}$ at $R > 800\text{ m}$; $V = 80\text{ km/h}$ at $R > 2000\text{ m}$; $V = 90\text{ km/h}$ can be reached only on straight track sections.

Even more significant reduction in area of laying of CWR is conditioned by electric locomotive «Ermak» (Pic. 3b) at $t_{\text{fix}} = +40\text{ °C}$. With a speed of 60 km/h it is possible to move on sections with $R > 2857\text{ m}$, the train speed of 65 km/h is only possible on straight sections.

These results show that the fixing of CWR strings at temperatures corresponding to the upper zone of the optimum fixing interval or within allowance zone, significantly limits the scope of continuous welded track, since on these sections it is required to limit permissible train speeds.

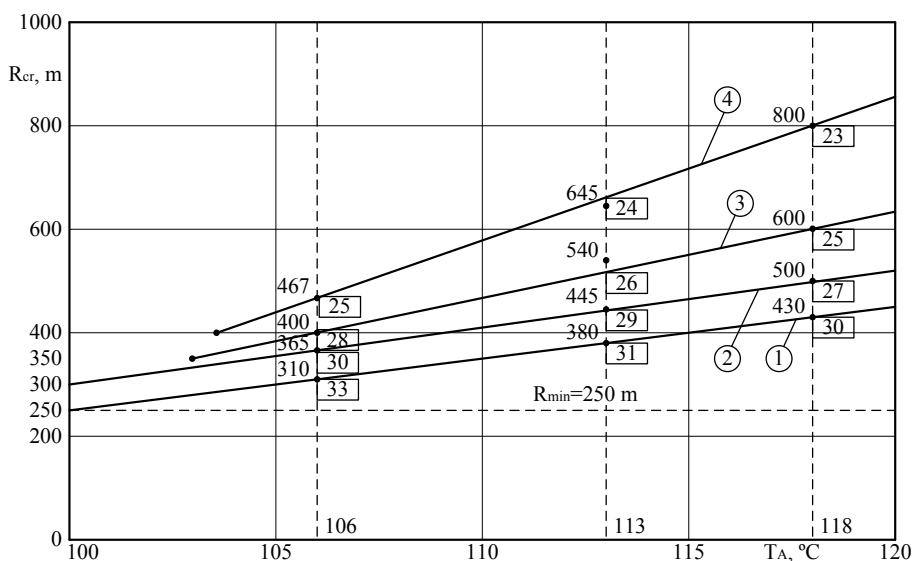
Positioning of the fixing temperature in the lower part of permissible range extends the zone of laying of CWR. Thus, at $t_{\text{fix}} = +40\text{ °C}$ electric locomotive «Ermak» can move at speeds up to 90 km/h on straight and curved sections up to a critical radius of 1000 m.

While determining the optimum fixing temperature of CWR strings, some other additional factors are taken into account: allowable temperature change of rail strings during operation of track machines and engineering works, as well as the highest permissible fixing temperature of strings according to the terms of the strength of bolts in the joint and gap size at the fracture of string. According to [1], at temperatures below -45 °C and applying standard clamp bolts maximum fixing temperature is $+30\text{ °C}$.

Conditions of laying and maintenance of continuous welded track are affected by the following parameters: fixing temperature t_{fix} , annual amplitude of temperature fluctuations T_A , curve radius R , and they determine the speed of movement of the locomotive V . The calculations helped to establish the relationship between these parameters. The obtained dependences are shown in Pic. 4–6, to define permissible speed of trains with electric locomotives «Ermak» for the operating conditions in different climatic zones within the area of Trans-Baikal Railway.

Thus, Pic. 6 shows that at a speed of 90 km/h electric locomotive 3ES5K can move on curved sections $R > 467\text{ m}$ at $T_A = 105\text{ °C}$, it can be operated in more severe climatic conditions (at $T_A = 113\text{ °C}$) – on





Pic. 6. Dependence of critical radius on annual temperature amplitude of rails for the speed of electric locomotive «Ermak» of:

① – $V=60$ km/h; ② – $V=70$ km/h; ③ – $V=80$ km/h; ④ – $V=90$ km/h;

23 – maximum temperature of strings fixing.

curves with a radius of at least 645 m. In areas of Trans-Baikal Railway, where $T_A = 118^\circ\text{C}$, speed of 90 km/h for trains with a locomotive «Ermak» is possible only in straight lines and in curves of a radius greater than 800 m. In this case, the maximum temperature of fixing of CWR strings should be from $+25^\circ\text{C}$ to $+23^\circ\text{C}$.

Due to the sharp reduction in the upper limit of the estimated interval of CWR strings fixing at commissioning of electric locomotive «Ermak» if one wants to expand the landfill of laying of CWR it is recommended to change the approach to the selection of estimated temperature of rails. Often repeated temperature, but not the extreme values observed during the entire period of monitoring, should be considered as an estimated minimum temperature. In the event of approaching to extreme temperatures it is necessary to set in advance on the section temporary short-term decrease in the speed of trains. This method is known [3].

Recommendations. To expand the landfill of laying of CWR at Trans-Baikal railway and to increase traffic speed, the following solutions can be offered.

1. To reduce optimal interval of fixing of CWR strings from $+25\pm 5^\circ\text{C}$ to $+20\pm 5^\circ\text{C}$.

2. As calculated value of T_{min} higher, but not the extreme value should be considered, taking into account the frequency of occurrence of minimum temperatures. In that period of time when possible temperatures are close to the extreme, it is necessary to determine the permissible speed of trains.

3. To reduce $\min t_{fix}$ in curves of small radius by $4-7^\circ\text{C}$ through additional activities under the instruction [1]. To expand the application of these measures to a radius of 500 m (dashed line in Pic. 3).

4. To provide seasonal stress unloading in CWR in curves of small radius, taking into account the feasibility study.

5. To prepare technical solutions to reduce the dynamic impact of the new electric locomotive 3ES5K «Ermak» to a level at least corresponding to the performance of an electric locomotive VL-80.

REFERENCES

1. Guide on structure, laying, maintenance and repair of continuously welded track. Approved by the order of JSC «Russian Railways» on December 29, 2012 № 2788r [Instrukcija po ustrojstvu, ukladke, sodержaniju i remontu besstykovogo puti. Uverzhdena rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 29 dekabrya 2012 g. № 2788r]. Moscow, 2012, 138 p.
2. Minchenko, V. A. Operation of a combined lattice on the Zabaikal Railway [Ekspluatatsija kombinirovannoj reshjotki na Zabajkal'skoj doroge]. Put' i putevoe hozjajstvo, 2008, Iss. 8, pp. 12–13.
3. Stoyanovich, G. M. Calculations of the track superstructure by criteria of strength and stability: a course of lectures [Raschetj verhnego stroenija puti na prochnost' i ustojchivost': kurs lekcij]. Khabarovsk, FESTU publ., 2013, 79 p.
4. Klimenko, L. V. Continuous-Welded Rail Track Bad. World of Transport and Transportation, Vol. 7, 2009, Iss. 2, pp. 28–31.

Information about the authors:

Stoyanovich, Gennady M. – D.Sc. (Eng.), professor at the department of Railway track and design of railways of Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia, oif@festu.khv.ru.

Pupatenko, Victor V. – Ph.D. (Eng.), associate professor of Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia, pvv@festu.khv.ru.

Article received 29.05.2015, accepted 27.08.2015.