

УДК 625.151

Применение оптимизационных алгоритмов для усовершенствования конструкции стрелочных переводов

Б. Э. ГЛЮЗБЕРГ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Одной из важнейших задач по совершенствованию технических средств инфраструктуры железных дорог является их оптимизация. В статье рассмотрены постановки и алгоритмы решения задач по оптимизации элементов стрелочных переводов уже на стадии проектирования.

Классифицированы четыре типа задач: оптимизация общих размеров узлов; оптимизация элементов, отказы которых определяются условиями контакта с колесами подвижного состава; оптимизация форм специальных элементов стрелочных переводов, изготавливаемых из прокатных спецпрофилей; оптимизация элементов в случае, когда конструктивные изменения, целесообразные с позиции подходов механики деформированного твердого тела, не могут быть реализованы по технологическим причинам и особенностям компоновки узлов.

Даны рекомендации по математическому аппарату, который целесообразно использовать для решения задач каждого типа. Приведены примеры практического применения предлагаемых методик, позволившие получить значимый экономический эффект.

Методики и реализующие их алгоритмы построены на принципах параметрической оптимизации. Они имеют общий характер. Аналогичные методики и алгоритмы могут быть использованы для решения большого числа задач по оптимизации технических средств железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: стрелочные переводы; методы оптимизации; типы оптимизационных задач; способы поиска оптимумов; примеры реализации

Введение. В настоящее время ведутся работы по созданию нового (пятого) поколения стрелочной продукции для Российских железных дорог. Разрабатываются модельные ряды стрелочных переводов для скоростного и высокоскоростного движения, для линий с интенсивным движением тяжеловесных поездов, ресурсосберегающие конструкции [1].

Стрелочные переводы, как одно из важных технических средств инфраструктуры железных дорог, должны соответствовать потребностям перевозочного процесса. Для этого их модельные ряды, конструкция и эксплуатационные качества должны обеспечивать оптимум требований к устройству и содержанию геометрии рельсовой колеи (ширины колеи, желобов, ординат и т. д.), нормативам износа, ресурсным характеристикам. Одновременно необходимо

минимизировать затраты на изготовление элементов стрелочных переводов [2].

Предлагаемая читателю работа посвящена рассмотрению одного из вопросов оптимизации — оптимизации конструкции элементов и узлов стрелочных переводов. Вопросы оптимизации модельных рядов, унификации конструктивных элементов и другие вопросы структурной оптимизации стрелочной продукции планируется рассмотреть в дальнейших публикациях.

Современные технологии проектирования должны основываться на оптимизации проектируемого объекта. Основу методов оптимизации составляют алгоритмы, используемые для нахождения оптимумов. Такие алгоритмы дают математические методы поиска глобальных и локальных экстремумов [3].

Использование математического аппарата поиска оптимума требует построения целевой функции, определения области ее существования и допустимых значений. Необходимый для этого комплекс исследований составляет инженерное обеспечение задачи оптимизации. В решении конкретных прикладных задач проектирования инженерное обеспечение является определяющим. Результаты инженерных исследований позволяют перейти от общей идеи оптимизации к применению математических или логических алгоритмов нахождения оптимума.

Анализ алгоритмов решения научно-проектных задач по стрелочным переводам показал, что для элементов и узлов стрелочных переводов оптимизационные задачи относятся к классу задач параметрической оптимизации, поэтому понятие оптимума в работе рассматривается как достижение наилучшего сочетания рассматриваемых параметров [4].

Можно выделить четыре типа оптимизационных задач, различающихся по: структуре и набору оптимизируемых параметров; идеям, закладываемым в понятие оптимума; математическому (или логическому) аппарату, пригодному для реализации идеи оптимизации; зависимостям, необходимым для запуска в действие этого аппарата; комплексу инженерных исследований, необходимому для получения таких зависимостей. Соответствующие различия имеют математические постановки

■ E-mail: Glusberg@mail.ru (Б. Э. Глюзберг)

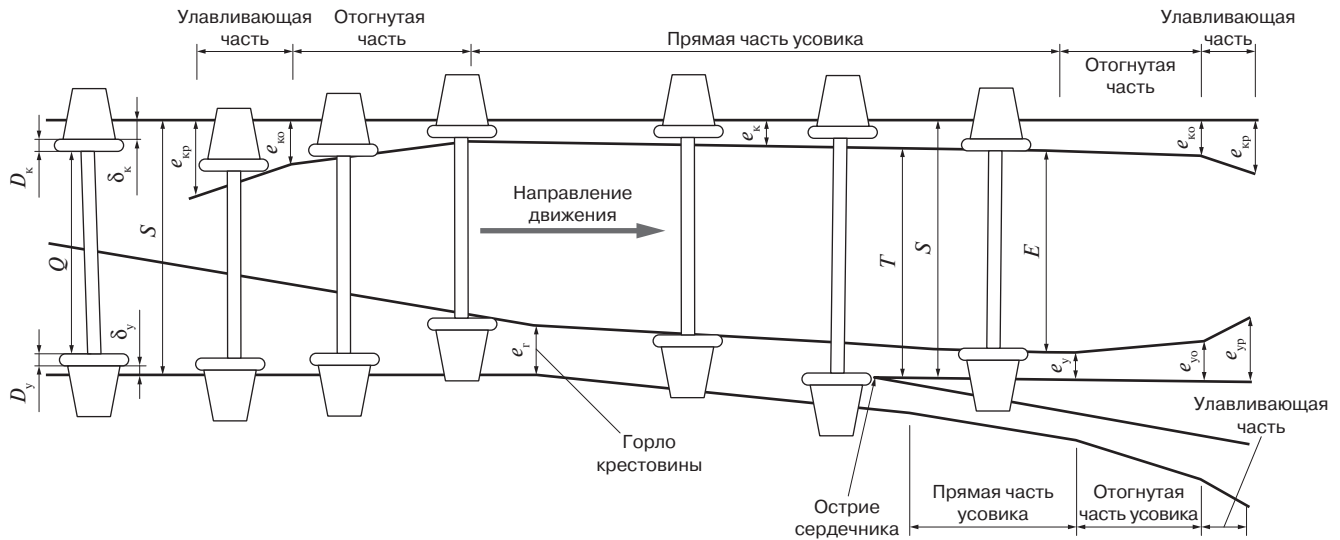


Рис. 1. Прохождение колесных пар по крестовине
Fig. 1. Wheel passage over the frog

задач и комплексы их инженерного обеспечения для каждого типа задач.

Первый тип задач — задачи по оптимизации общих размеров узлов стрелочных переводов.

К этому типу задач относятся задачи о нахождении оптимальных сочетаний размеров колеи, желобов и специальных размеров, определяющих взаимное положение элементов узла стрелочного перевода.

Пространство оптимизируемых параметров $\{\vec{S}\}$ в таких задачах представляет собой область возможных значений векторов $\vec{S} = (S, e_1, \dots, e_r, T_1, \dots, T_l)$, где S, e, T — соответственно величины ширины колеи, желобов и специальных размеров узла; t, l — число нормируемых параметров.

Целевая функция для этой задачи выражает условие поиска пересечения диапазонов допустимых значений нормируемых параметров (полиэкстремальная задача).

Условия функционирования узла накладывают на переменные ограничения в виде критериев безопасности, прочности, устойчивости и динамики взаимодействия пути и подвижного состава.

Математическая формулировка оптимизационной модели задачи первого типа имеет вид

$$\begin{cases} \{\vec{S} | A(\vec{S}) = 1\} \in \{\vec{S}\}, \vec{S} \in R^{1+l+t}; \\ \frac{1}{P_q(\vec{S})} - N \geq 0, q = \overline{1, n}; \\ \frac{[\sigma]_r}{\max \sigma(\vec{S})} - 1 \geq 0, r = \overline{1, m}; \\ \frac{[K_d]_u}{\max K_d(\vec{S})} - 1 \geq 0, u = \overline{1, h}, \end{cases}$$

где $A(\vec{S})$ — целевая функция; $P_q(\vec{S}), \sigma(\vec{S}), K_d(\vec{S})$ — вероятности возникновения условий нарушения безопасности движения; уровни напряжений и показателей динамики для данного значения $\vec{S}$; q, r, u — числа нормируемых показателей каждого типа; величина в квадратных скобках означает допустимое значение.

Условие $A(\vec{S}) = 1$ выражает одновременное выполнение требований всех ограничений. Для нахождения оптимума в этой задаче может быть использован любой алгоритм поиска глобального экстремума.

Величины $(\max \sigma)$ и $(\max K_d)$ могут быть получены с помощью результатов прямых экспериментов в пути либо с помощью математических моделей, описывающих взаимодействие пути и подвижного состава в пределах стрелочного перевода.

Для определения вероятностей возникновения неблагоприятных явлений $P_q(\vec{S})$ необходимы специальные математические модели, позволяющие рассчитывать особенности движения колесных пар по стрелочному переводу, опирающиеся на статистические данные о распределениях размеров колесных пар, размеров узлов стрелочных переводов и на экспериментальные данные о корреляциях между положением колесных пар в колее и упругими деформациями взаимодействующих элементов.

Таким образом, инженерное обеспечение задачи оптимизации основных размеров узла стрелочного перевода заключается в разработке математической модели, позволяющей рассчитывать вероятности явлений, возникающих при движении колесных пар по узлу, получении статистики размеров колесных пар и размеров узла стрелочного перевода, получении экспериментальных (или расчетных) данных по

величинам напряжений в элементах узла и показателей динамики взаимодействия пути и подвижного состава на стрелочном переводе.

Современные нормы геометрических параметров стрелочных переводов для железных дорог России разрабатываются с использованием описанного выше алгоритма. Иллюстрацией его применения может служить решение задачи о размерах желобов контррельсовых узлов. (Задача является частью задачи о размерах колеи и желобов в крестовинных узлах.)

На рис. 1 приведена схема размеров крестовинно-го узла стрелочного перевода.

Аргумент целевой функции представляет собой вектор из восьми компонентов — подлежащие оптимизации размеры ширины колеи (один параметр), размер желобов в лимитирующих местах контррельса (пять параметров) и предельные по безопасности расстояния от контррельса до сердечника и усовика крестовины (два параметра):

$$\vec{S} = (S, e_{кп1}, e_{ко1}, e_k, e_{ко2}, e_{кп2}, T, E).$$

Ограничения являются запреты набегания колес на улавливающую часть контррельса, на острие сердечника крестовины, на «нерабочий» усовик до горла. Вероятность этих явлений должна быть менее одного случая за планируемое число циклов прохода колесных пар N :

$$P((\delta_k + D_k)_i \geq e_{ко}) \leq \frac{1}{N},$$

$$P((e_k + T) \geq Q_i) \leq \frac{1}{N},$$

$$P((\delta_y + D_y)_i \geq e_r) \leq \frac{1}{N}, i = 1, \dots, N.$$

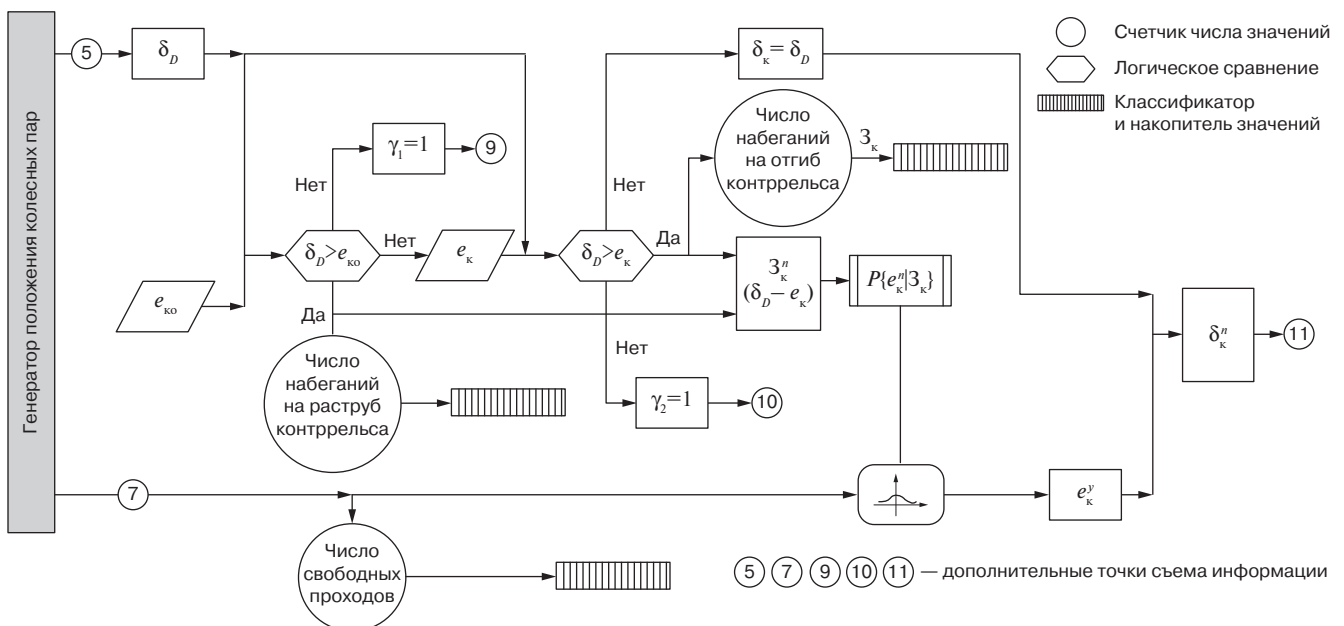


Рис. 2. Анализ явления в желобе контррельса
Fig. 2. Event analysis in the flangeway of guard rail

Помимо этого, должна обеспечиваться прочность контррельса в наиболее нагруженных точках: $\max \sigma(\vec{S}) \leq 330 \text{ МПа}$.

Инженерное обеспечение задачи состоит в определении напряжений в контррельсах при различном положении колес в желобе и построении методики определения вероятностей неблагоприятных явлений при проходе колес через крестовину. Зависимость напряжений в контррельсе от положения колес определялась экспериментально, непосредственно в пути.

Вероятности рассчитывались двумя способами — прямым расчетом по «методу условных вероятностей» и с помощью статистического эксперимента на ЭВМ. Модель для проведения статистического эксперимента показана на рис. 2.

Результаты оптимизации и адекватность модели проверена экспериментально. Результаты проверки иллюстрирует рис. 3.

Хорошая сходимость результатов позволила использовать методику решения задач по оптимизации геометрических размеров для всех стрелочных переводов.

Второй тип задач, возникающих при проектировании стрелочных переводов, — оптимизация элементов узла в случае, когда отказы элемента вызываются износом и дефектами контактно-усталостного происхождения. К этому типу задач относятся задачи по проектированию оптимальных профилей рабочих поверхностей крестовин и остриев стрелочных переводов. Цель оптимизации профиля рабочей поверхности элемента заключается в получении максимальной его наработки до отказа.

Пространство оптимизируемых параметров ($\vec{\Pi}$) в такой задаче представляет собой область значений

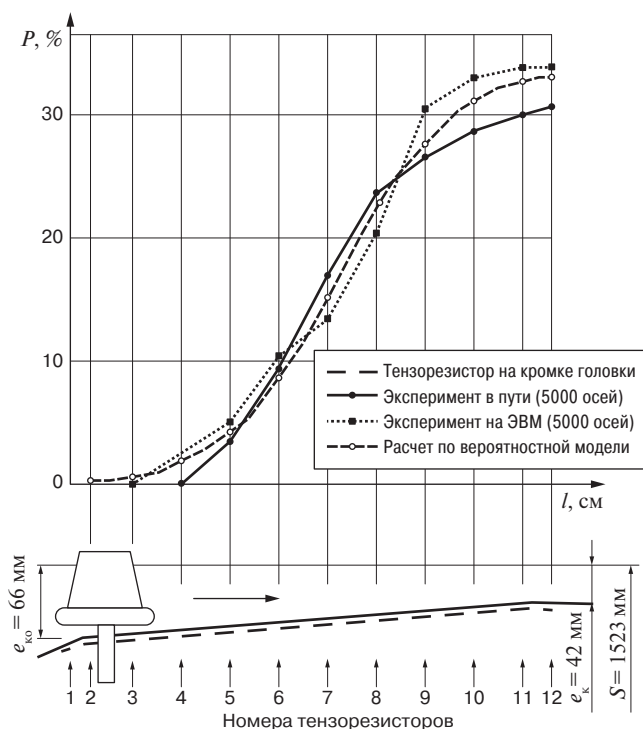


Рис. 3. Вероятность набегания колес на контррельс
Fig. 3. Probability of wheel climbing on guard rail

координат точек профилей рабочих поверхностей элемента $\bar{P} = [P_1(T=0), \dots, P_n(T=0)]$, где $P_n(T=0)$ — координаты профиля рабочей поверхности элемента в n характерных точках нового элемента (при наработке $T=0$).

Технология изготовления элемента или особенности его работы в пути требуют взаимосвязи между отдельными координатами рабочих поверхностей. Эти взаимосвязи накладывают на переменные ограничения. Другой тип ограничений выражает условие отсутствия или ограничения размеров и вида повреждений в элементе. Математическая формулировка оптимизационной модели для таких задач имеет вид

$$\begin{cases} \min \{-T_n[\bar{P}(T=0)]\}, \bar{P} \in R^n; \\ P_i(T=0) - \psi_{ij}[\bar{P}(T=0)] = 0; i, j = \overline{1, n}; \\ 1 - \varphi_m(T) \geq 0 | m = \overline{1, n}; \\ 0 \leq T \leq T_n, \end{cases}$$

где T_n — целевая функция (наработка до нормируемого износа); ψ_{ij} — функция взаимосвязи координат профиля в точках i и j ; φ_m — функция, характеризующая накопление повреждений.

Для решения задач второго типа целесообразно использовать алгоритмы нелинейного программирования. В отличие от ранее рассмотренной для этой задачи основная трудность реализации оптимизационных алгоритмов заключается в вычислении функций износа и поврежденности для каждого значения компонент вектора $\bar{P}$. Поэтому инженерное обеспечение задачи

оптимизации форм рабочих поверхностей элемента (по условию его максимально возможной наработки на отказ по износу и дефектам) состоит в изучении процессов износа и повреждаемости и построении их математических моделей, позволяющих расчетным путем определять функции износа и повреждаемости в процессе работы элемента в пути при любом первоначально задаваемом профиле его рабочих поверхностей $\bar{P}$ ($T=0$). При этом математические модели износа и повреждаемости должны учитывать вероятностный характер воздействия колес подвижного состава на элементы стрелочного перевода, характеристики которого получаются с использованием моделей движения колесных пар через соответствующий узел. Для этого могут быть использованы модели, разработанные для решения первого типа задач.

Алгоритм оптимизации апробирован на разработке геометрии рабочих поверхностей крестовин массового производства для стрелочных переводов Российских железных дорог [5].

В качестве инженерного обеспечения алгоритма использовались зависимости износа и дефектообразования в зоне контакта крестовины с колесами от главного фактора, их определяющего [6]. Главный фактор определялся с помощью факторного анализа (по методу Л.Л.Терстоуна (L. L. Thurstone)) с дальнейшей его идентификацией на основе прямых испытаний.

Из 10 факторов, в наибольшей степени влияющих на работу крестовин, главным является «суммарное динамическое воздействие». Силы в контакте колеса — крестовина для расчета главного фактора в каждом сечении крестовины определялись расчетным путем на основе модели динамики взаимодействия пути и экипажа, описываемой системой нелинейных дифференциальных уравнений (до 10-го порядка).

Вероятность возникновения повреждений определялась на основе принципа суммирования повреждений [7]. Зависимости износа от величины действующих сил получены по результатам наблюдений за работой партий крестовин в различных условиях эксплуатации.

Задача решалась в статистическом аспекте с учетом реального разброса значений характеристик металла и технологических особенностей изготовления крестовин. В качестве математического обеспечения алгоритма оптимизации использовался метод скользящего допуска.

Результаты оптимизации апробированы с помощью наблюдений за специально выпущенными партиями крестовин (показаны на рис. 4 и 5), подтвердивших эффективность найденного технического решения.

К третьему типу оптимизационных задач, возникающих при проектировании узлов стрелочных переводов, относится оптимизация форм специальных

элементов стрелочных переводов, изготавливаемых методом прокатки. Это задачи о проектировании профилей поперечных сечений острякового, контрольного и других видов проката, а также отливок, используемых при изготовлении стрелок и крестовинных узлов.

Цель этой оптимизации заключается в минимизации расхода материала на изготовление элемента при обеспечении заданной его прочности.

Параметры поперечных сечений оптимизируемых элементов стрелочных переводов целесообразно задавать в виде набора размеров, привязанных к определенной системе координат. При таком подходе пространство оптимизируемых параметров $\{\vec{B}\}$ состоит из векторов $\vec{B} = [b_1(y), \dots, b_n(y)]$, где y — уровень, на котором задается размер b ; n — число точек разбиения сечения.

Ограничения в данном случае являются критерии прочности элемента, условия его размещения в узле и определяющие соотношения размеров.

Математическая формулировка оптимизационной модели задачи третьего типа выглядит так:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^{n-1} 0,5(b_i + b_{i+1})\Delta y_i, i = \overline{1, n}; \\ [\vec{\sigma}] - \vec{\sigma}(\vec{B}) \geq 0, \vec{B} \in R^n; \\ \vec{K}_{1,2} \geq \vec{B} \geq \vec{K}_2, \end{cases}$$

где $\vec{K}_{1,2}$ — ограничения размеров, определяющие допускаемые граничные соотношения; $\vec{\sigma}$ — напряжения, действующие в элементе; b_i — ширина сечения на уровне y_i .

Для нахождения оптимума в этой задаче целесообразно использовать алгоритм поиска локально оптимальных форм.

Такой расчет может быть произведен с помощью математических моделей напряженно-деформированного состояния элемента, которые могут быть разработаны, например, с использованием метода конечных элементов или метода граничных интегральных элементов.

В случаях когда необходим анализ напряженно-деформированного состояния элемента при подвижных нагрузках, наиболее целесообразным путем является разработка специальных моделей элементов, опирающихся на конкретизированные модели механики деформированного твердого тела.

Инженерное обеспечение задачи оптимизации заключается в выборе подхода и построении математической модели напряженно-деформированного состояния элемента, а также в определении параметров ограничений предельных размеров элемента.

Примером применения оптимизационного алгоритма третьего типа является оптимизация пластин-

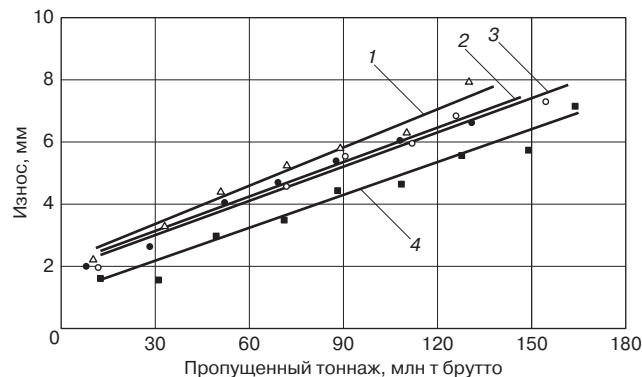


Рис. 4. Износ усовиков крестовин с различными вариантами рабочих поверхностей:
1 — исходный вариант; 2, 3 — профили по принципу «припуск на наклон»; 4 — оптимизированный профиль
Fig. 4. Wing wear of frogs with different options of working surfaces:
1 — reference sample; 2, 3 — “allowance for cold hardening” profile; 4 — optimized profile

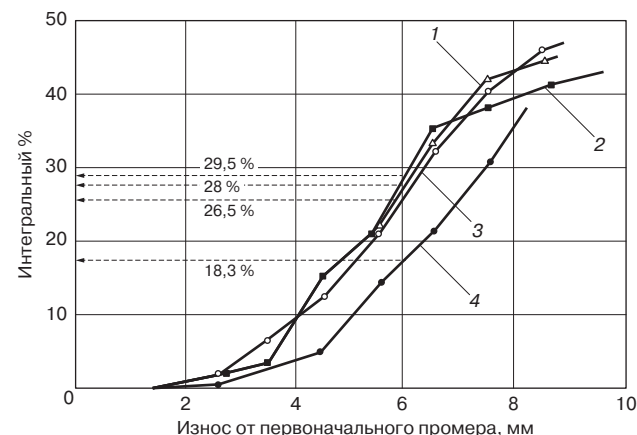


Рис. 5. Поражаемость крестовин выкрашиваниями:
1 — исходный вариант; 2, 3 — профили по принципу «припуск на наклон»; 4 — оптимизированный профиль
Fig. 5. Frog perishability to spalling:
1 — reference sample; 2, 3 — “allowance for cold hardening” profile; 4 — optimized profile

чатых контрольных прокатных спецпрофилей. Для получения инженерного обеспечения задачи оптимизации была разработана методика расчета напряжений в контроле из спецпрофиля. Контроль рассматривался в виде пластины Кирхгоффа — Лява с отдельным изучением напряженно-деформированного состояния вблизи точки контакта колеса и контроля [8].

Целевая функция выражает минимизацию площади сечения пластины $\sum_{i=1}^{n-1} 0,5(b_i + b_{i+1})\Delta y_i$.

Ограничения по прочности имеют вид $\max \sigma(x, y) \leq 330$ МПа [9]. Ограничения по размерам определяются способом закрепления контроля в узле.

Исходное и оптимизированное сечения проката РК65 показаны на рис. 6. Аналогичным образом были оптимизированы и прокатные спецпрофили РК50 и РК75. Прямая экономия металла по результатам оптимизации составила 10–13%.

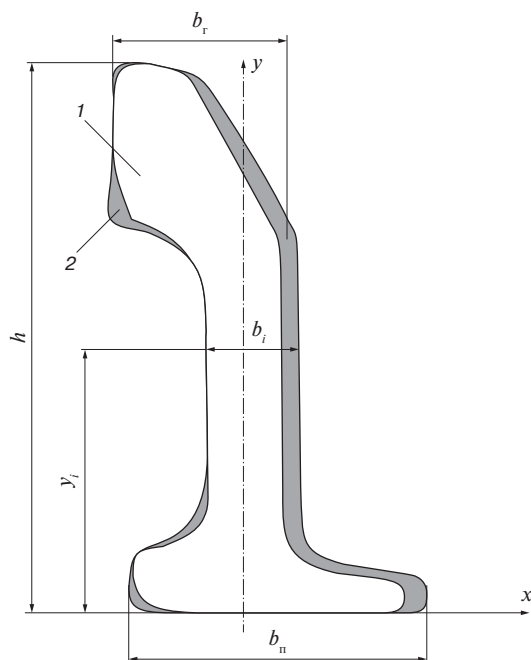


Рис. 6. Контрольный спецпрофиль РК65:
1 — оптимизированный профиль; 2 — исходный профиль
Fig. 6. Special guard rail profile RK 65:
1 — optimized profile; 2 — reference profile

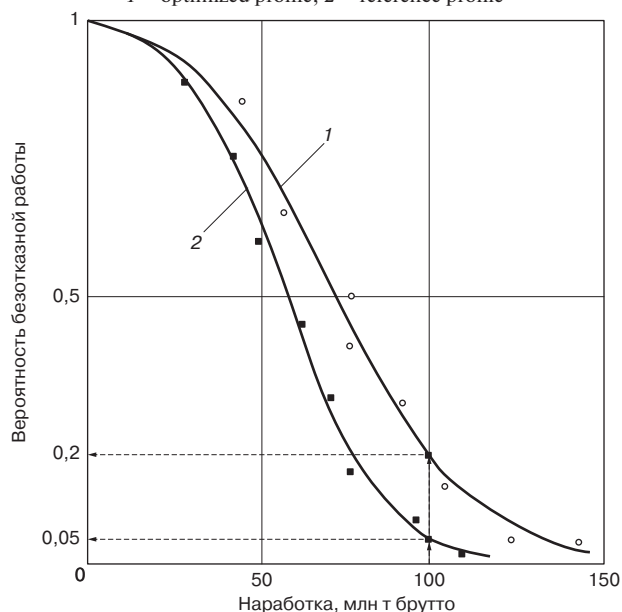


Рис. 7. Вероятность безотказной работы литой части крестовин:
1 — оптимизированный вариант; 2 — исходный вариант
Fig. 7. The probability of failure-free operation of cast part of frogs:
1 — optimized sample; 2 — reference sample

Четвертым типом оптимизационных задач для элементов стрелочных переводов являются задачи об их усилении в случае, когда конструктивные изменения, целесообразные с позиции подходов механики деформированного твердого тела, не могут быть реализованы по технологическим причинам, особенностям компоновки узлов или другим причинам. К задаче этого типа на стрелочных переводах относится в основном выбор

конструкции хвостовой части крестовины типа общей отливки сердечника и наиболее изнашиваемой части усювиков, цельнолитых и моноблочных крестовин и т. д.

Пространство оптимизируемых параметров в данном случае совпадает с пространством конструктивных решений для рассматриваемого объекта $\{\bar{A}\} = \bigcup_{i=1}^n \bar{A}_i$, где $\bar{A}_i$ — конструктивное решение, которое может быть решением задачи.

Задача решается в статистическом аспекте с учетом фактических распределений параметров прочности, получаемых в процессе изготовления изделий.

Ограничения формируются как условия выполнения требований, предъявляемых к техническому решению.

Изменение конструктивного решения влияет на распределение отказов элементов в пути, поэтому в качестве целевой функции, подлежащей минимизации, необходимо использовать функцию, связанную с интегральной вероятностью отказов элементов.

Математическая формулировка задачи оптимизации для элементов с ограниченным набором конструктивных решений имеет вид

$$\begin{cases} \min = [P(\bar{A})], \bar{A} \in \prod_{j=1}^m B_j; \\ \sum_{j=1}^m k_j(\bar{A}) - m = 0, \end{cases}$$

где m — число конструктивных и других требований к техническому решению; $k_j(\bar{A}) = 1$ при выполнении 1-го требования.

В связи с ограниченностью набора допустимых конструктивных решений поиск оптимума может быть выполнен путем непосредственного сравнения значений величины целевой функции по каждому из рассматриваемых вариантов технического решения, однако для этого необходим аппарат, позволяющий рассчитывать вероятностные распределения отказов как для существующих, так и для опытных конструктивных решений элемента.

Такой расчетный аппарат представляет собой математическую модель, которая исходя из влияния конструктивного изменения на рассматриваемые показатели (например, на уровень изгибных напряжений в хвостовой части крестовин) позволяет определять распределения отказов элементов. Построение такой модели составляет инженерное обеспечение оптимизационной задачи данного типа.

Пример применения такого алгоритма — оптимизация конструкции литой части крестовин в зоне стыков с примыкающими рельсами. Как видно из рис. 7, изменение геометрии и конструкции крестовин позволило увеличить вероятность безотказной работы (по этому виду отказов) крестовин типа Р50 при повышенных осевых нагрузках в 4 раза.

Закключение. Следует отметить, что в зависимости от особенностей работы узла или элемента возможны различные методики решения оптимизационной задачи, однако разбиение на типы задач и общая структура решения для всех узлов единообразны.

Рассмотренные оптимизационные алгоритмы успешно применяются при проектировании стрелочных переводов российского производства. Их использование позволяет экономить металл, расходующийся на изготовление прокатных спецпрофилей и литых деталей, дает возможность увеличить сроки службы, прочность и долговечность элементов стрелочных переводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глюзберг Б. Э. Стратегия исследований и разработок в области стрелочного хозяйства // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 2. С. 11 – 12.
2. Глюзберг Б. Э. Основные направления развития стрелочных переводов для ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2012. № 3. С. 18 – 23.

Application of optimization algorithms to improve the design of turnouts

B. E. GLYUZBERG

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. One of the most important tasks for improving the infrastructure facility of railways is its optimization. Currently, work is underway to create a new (fifth) generation of turnout products for Russian Railways. A model range of turnouts of resource-saving design is developed for rapid and high-speed traffic, as well as for the lines with dense traffic of heavy trains. The article describes the formulation and algorithms for solving optimization of turnout elements at the design stage.

Four types of tasks are classified: optimization of the general sizes of turnout units; optimization of elements which failures are defined by conditions of contact with wheels of a rolling stock; optimization of forms of special elements of the railway turnouts manufactured from special rolling profiles; optimization of elements in a case when constructive changes, reasonable from the approach of mechanics of the deformed solid body, cannot be realized for the technological reasons and features of configuration of units.

Recommendations about mathematical apparatus which is reasonable for using for the solution of problems of each type are made. The examples of practical application of the offered techniques which have allowed gaining significant economic effect are given.

Techniques and implementing algorithms are constructed on the principles of parametrical optimization. It has the common nature. Similar techniques and algorithms can be used for the solution of a large number of optimization tasks of technical means of railway transport.

The considered optimization algorithms are successfully applied at designing railway turnouts of Russian production. Its use allows saving the metal spent for production of special rolling profiles and cast details; it also gives the chance to increase life cycles, strength and durability of elements of railway turnouts.

Keywords: turnouts; optimization methods; types of optimization tasks; options for searching minimums; implementation examples

■ E-mail: Glusberg@mail.ru (B. E. Glyuzberg)

3. Половинкин А. И. Алгоритмы оптимизации проектных решений. М.: Энергия, 1976. 264 с.

4. Египко В. М., Акимов А. П., Горин Ф. Н. Процедуры и методы проектирования автоматизированных систем научных исследований. Киев: Наукова думка, 1982. 175 с.

5. Глюзберг Б. Э., Калачев А. М., Королев В. В. Повышение эксплуатационных качеств крестовин стрелочных переводов за счет изменения их геометрии в контакте «колесо — рельс» // Наука и техника транспорта. 2004. № 1. С. 70 – 81.

6. Окунь Я. Факторный анализ. М.: Статистика, 1974. 200 с.

7. Коллинз Д. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. М.: Мир, 1984. 624 с.

8. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Физматгиз, 1963. 635 с.

9. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. М.: Мир, 1980. 604 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ГЛЮЗБЕРГ Борис Эйнихович,
д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией
«Стрелочное хозяйство», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 28.12.2015 г., принята к публикации 25.01.2016 г.

REFERENCES

1. Glyuzberg B. E. *Strategiya issledovaniy i razrabotok v oblasti strelochnogo khozyaystva* [Research and development strategy for turnout facilities]. Put' i putevye khozyaystvo, 2011, no. 2, pp. 11 – 12.

2. Glyuzberg B. E. *Osnovnye napravleniya razvitiya strelochnykh perevodov dlya OAO "RZhD"* [The main directions of development of turnouts for JSC "Russian Railways"]. Zheleznodorozhnyy transport, 2012, no. 3, pp. 18 – 23.

3. Polovinkin A. I. *Algoritmy optimizatsii proyektnykh resheniy* [Algorithms for optimization of design solutions]. Moscow, Energiya Publ., 1976, 264 p.

4. Egipko V. M., Akimov A. P., Gorin F. N. *Protsedury i metody proyektirovaniya avtomatizirovannykh sistem nauchnykh issledovaniy* [Procedures and methods of designing automated systems of scientific researches]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1982, 175 p.

5. Glyuzberg B. E., Kalachev A. M., Korolev V. V. *Povyshenie ekspluatatsionnykh kachestv krestovin strelochnykh perevodov za schet izmeneniya ikh geometrii v kontakte "koleso — rel's"* [Improving performance of frogs of turnouts due to changes in their geometry in contact "wheel — rail"]. Nauka i tekhnika transporta, 2004, no. 1, pp. 70 – 81.

6. Okun' Ya. *Faktornyy analiz* [Factor analysis]. Moscow, Statistika Publ., 1974, 200 p.

7. Collins D. *Povrezhdeniye materialov v konstruktsiyakh. Analiz, predskazaniye, predotvrashcheniye* [Damage to materials in structures. Analysis, prediction, prevention]. Moscow, Mir Publ., 1984, 624 p.

8. Timoshenko S. P., Voynovskiy-Kriger S. *Plastinki i obolochki* [Plates and shells]. Moscow, Fizmatiz Publ., 1963, 635 p.

9. Kapur K., Lamberson L. *Nadezhnost' i proyektirovaniye sistem* [Reliability and system designing]. Moscow, Mir Publ., 1980, 604 p.

ABOUT THE AUTHOR

GLYUZBERG Boris Eynikhovich,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of laboratory "Turnouts and switches", JSC "VNIIZhT"

Received 28.12.2015

Accepted 25.01.2016