

**ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
(ОСЖД)**

III издание

Разработано совещанием экспертов
Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу
24-26 сентября 2019 г., Республика Польша, г. Гданьск

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД
по инфраструктуре и подвижному составу
5-7 ноября 2019 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава

Дата вступления в силу: 7 ноября 2019 г.

Примечание. Теряет силу II издание Памятки от 23 октября 2009 г.

P 709

**РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДАМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ
БЕССТЫКОВОГО ПУТИ**

1. Введение

Потребность определения фактических напряжений, возникающих в рельсах бесстыкового пути в результате изменения температуры, появилась одновременно с появлением бесстыкового пути. Первые теории появились в 20-х годах, но пока не удалось создать такого метода измерения, при помощи которого можно было бы определить напряжения без нарушения целостности рельсов.

Причиной этого является то, что рельс является статически непростой конструкцией со сложным поперечным сечением. Напряжения в рельсе и его распределение по его объему и во времени изменяются вследствие воздействия многих усилий, которые накладываются друг на друга. Температура рельса в разных сечениях и по периметру тоже меняется.

Существуют так называемые традиционные методы измерения, которые определяют продольное составляющее напряжения рельса в одном определенном сечении (в одной точке) из продольного перемещения рельса после его разрезки или «только» при его раскреплении. Таким методом является динамометрический метод и экстензометрический метод (измерение изменения длины).

В промышленности за последние десятилетия появились более современные приборы для измерения напряжений в стальных конструкциях, работающие на разных принципах (ультразвук, изотоп, электромагнит и т.д.).

2. Напряженное состояние железнодорожного рельса

2.1. Механические напряжения

Когда говорим о механических напряжениях какого-то тела, необходимо различать напряжения, возникающие от воздействия внешних сил и напряжения, измеряемые в теле при отсутствии внешних воздействий. Эти последние называются остаточными напряжениями. Остаточные напряжения возникают в процессе производства рельса в результате термической обработки и деформаций: прокатки, неравномерного остывания рельса по поперечному профилю, правки. Силы от остаточных напряжений в отдельных, меньших или больших, объемах тела находятся в равновесии.

2.1. Остаточные напряжения рельса, возникающие при производстве

Для рельсов характерно, что по их периметру меняется соотношение поверхности и объема. Таким образом, при производстве в процессе охлаждения даже при равномерном отводе тепла меняется скорость охлаждения по периметру рельса в поперечном сечении. Это вызывает продольное остаточное напряжение, типичная величина которого 100...200 МПа: в головке рельса - растяжение, а в шейке подобной величины – сжатие.

Характерным для рельсов типов 48 кг/пм.....60 кг/пм, изготовленных горячей прокаткой из стали, отлитой кислородной конвертерной технологией, является то, что остаточное производственное напряжение в переходной зоне между головкой и шейкой переходит из растяжения в сжатие.

2.3. Напряжения в лежащем в пути рельсе

Рельс, уложенный в путь, имеющий остаточные производственные напряжения подвергается воздействиям, вызывающим изменение напряжений, независимым от поездных нагрузок. При транспортировке и укладке в кривые малого радиуса рельс подвергается изгибающему усилию, величина которого для рельса типа МСЖД60 и при радиусе кривой $R=400\text{м}$ превышает 40 МПа на кромке подошвы.

Во время закрепления рельса возникают различной величины усилия из-за отличного от идеального положения шпал и скреплений, а также из-за разницы сопротивления балласта на одиночных шпалах. Также могут возникать усилия в результате выполнения сварок, шлифовки, выправочно-подбивочных работ, а также из-за излома и его восстановления.

Меры по содержанию пути могут вызывать с одной стороны дополнительные усилия, а с другой стороны могут привести к временному уменьшению сопротивления пути, перераспределению мест концентраций напряжений.

Напряжения от эксплуатационных нагрузок возникают от:

- статических нагрузок;
- динамических воздействий;
- сопротивлений скольжения, качения и торможения;
- боковых сил в кривых участка;
- грубых неисправностей пути;
- проезда колес с ползунами, которые вызывают кратковременные, но чрезвычайно большие силы.

2.4. Температурные воздействия. Нейтральная температура

В бесстыковом пути температурное расширение рельсов ограничено, поэтому в рельсах возникают продольные сжимающие и растягивающие напряжения в зависимости от того, что исследуемый отрезок рельса на температуре исследования (Т) расширился или укоротился бы.

Температура, при которой в исследуемом отрезке рельса нет температурных напряжений, называется нейтральной температурой (T_n). Нейтральная температура в моменте укладки и закрепления плетей бесстыкового пути совпадает с температурой закрепления (T_z), но в процессе эксплуатации нейтральная температура в каждой точке пути меняется в зависимости от взаимоотношения внешних и внутренних усилий, от их неравновесия.

Величина напряжения, возникающая в результате разницы рассматриваемой и нейтральной температуры, составляет $2,4 \text{ МПа}/^\circ\text{C}$.

Распределение температуры рельса по его периметру на практике редко бывает постоянным. На температуру рельса по его периметру влияет интенсивность и направление солнечного излучения, скорость и направление ветра, температура воздуха и балласта, который в летнее время во второй половине дня остывает медленнее рельса и согревает его снизу. Это влияние отличается при деревянных и при железобетонных шпалах. При сильном ветре и солнечном излучении разница температуры по периметру между защищенной от ветра и облученной стороной и стороной обветренной и теневой рельса может достигнуть 7°C . В результате

меняющейся по периметру температуры термическое напряжение в поперечном сечении не постоянное, т.е. в рельсе возникает изгиб.

Температурное напряжение по длине рельса меняется даже при одинаковых температурных и ветровых условиях. Сопротивление скреплений на отдельных шпалах далеко не одинаковые, а вследствие этого величина температурных напряжений тоже меняется от одной шпалы к другой.

Дополнительное влияние оказывает на продольное распределение температурных напряжений искривленность рельса, полученная в процессе производства, а также отличное от идеального положение во время укладки пути. Таким образом, определение термического напряжения рельса возможно только путем усреднения измерений, выполненных на длине нескольких шпал.

2.5. Изменение распределения напряжений во времени

Экспериментально доказано, что остаточные напряжения меняются во времени в процессе эксплуатации (после укладки в путь). Основной причиной изменения является то, что результирующее напряжение, возникающее при воздействии усилий и остаточных деформаций в некоторых пунктах поперечного сечения рельса, может достичь предела текучести.

Изменение очень значительное на поверхности катания рельса под ударным воздействием колёс (рисунок 1) и на кромках подошвы, особенно на наружной стороне (рисунок 2).

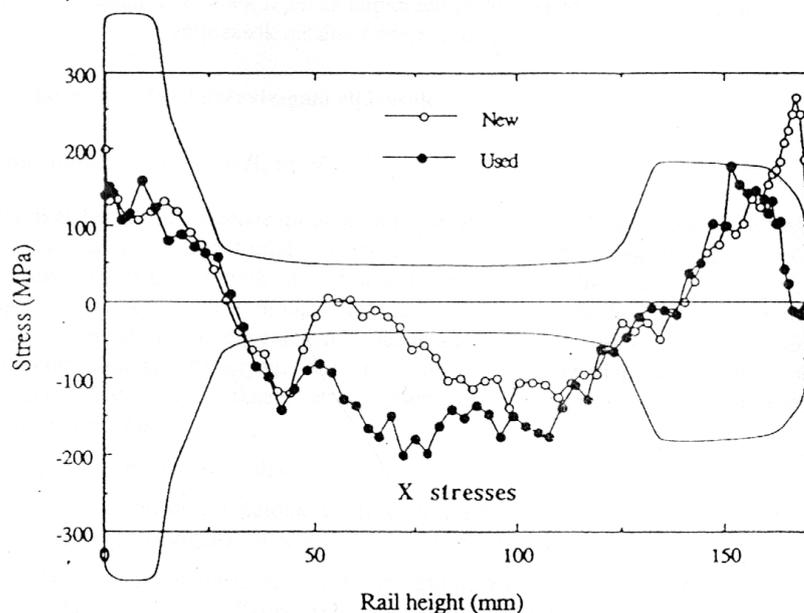


Рисунок 1. Изменение в процессе эксплуатации продольных остаточных напряжений рельса в одном сечении
1 – новый рельс, 2 – бывший в эксплуатации рельс

На основании опыта остаточные напряжения в зоне нулевых напряжений, т.е. на границе головки и шейки рельса при воздействии сил не меняется, или меняется минимально. Причина этого малое - около нуля – остаточное напряжение, большое поперечное сечение и маленький момент из-за близости оси инерции.

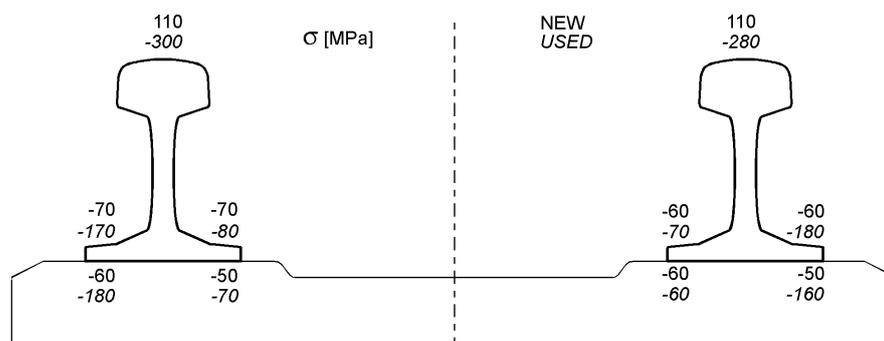


Рисунок 2. Изменения продольных остаточных напряжений, происходящие на головке и кромке подошвы рельса, лежащего в пути под действием движения за несколько месяцев

Перечисленные воздействия происходят не одновременно. Хорошо построенный и содержанный бесстыковой путь имеет большие запасы прочности, но могут возникнуть такие местные условия, когда напряжения накладываются и этот запас уменьшается. Целью измерения напряжений и есть выявление таких мест.

3. Неразрушающие методы определения напряжений

3.1. Измерение механических напряжений

Механическое напряжение непосредственно не измеряется. Самым старым методом для косвенного определения напряжения является измерение деформаций. На основании измерений деформаций можно вычислить напряжения, применив зависимости теоретического сопромата при известных свойствах материалов.

Традиционные методы такого измерения – механические измерители деформации:

3.1.1. Устройство MS-02 ¹

Принцип измерения основан на механическом измерении (базового) расстояния между двумя точками тела.

Для того, чтобы произвести измерение необходимо устроить на рельсах бесстыкового пути измерительную базу. Второй базой является короткий элемент (металлический стержень) из идентичного с рельсом материала.

Длина измерительной базы должна быть такой, чтобы на экстензометре сразу велся отсчет величины силы в «кН».

Конструкция прибора дает возможность регулировки расстояния между измерительными стержнями прибора.

Разница между длиной измерительной базы на рельсе и свободным удлинением базового стержня прибора соответствует величине напряжения в рельсе – в кН.

$$\Delta l = (l_{\text{prib}} - l_{\text{rels}}) \rightarrow \sigma_{\text{baza}} = \frac{\Delta l}{l_{\text{baza}}}$$

¹ Польская разработка

$$P_{rels} = \sigma_{baza} \times F_{rels} = F_{rels} \times E \frac{\Delta l}{l_{baza}}$$

где:

E – модуль упругости стали,

F_{rels} – площадь поперечного сечения рельса,

P_{rels} – продольная сила в рельсе между двумя стержнями измерительной базы

Δl – приращение длины.

Прибор имеет длину 42,5 см и цифровую считывающую систему.

Стержни измерительной базы крепятся в отверстиях, высверленных в шейках рельсов на их нейтральной оси.

Другие подвижные стержни, находящиеся на неподвижных стержнях измерительной базы, дают возможность регулирования длины базы с точностью 0,005 мм.

Прибор нельзя применять во время дождя и при температуре ниже -5°C . Каждый год прибор должен быть проверен на контрольном рельсе.

Измерительные пункты необходимо устанавливать в разных местах пути: перед семафорами, переездами, стрелочными переводами, мостами на мостовых брусках, в крутых кривых и других. Во время измерения не нужно измерять температуру рельсов.

Подготовка участков пути к измерениям:

- выбор мест для измерительной базы;
- определение с помощью шаблона на рельсах мест расположения осей измерительных стержней с точностью 0,5 мм;
- сверление отверстий для стержней (по два для каждой измерительной базы);
- вложение стержней в отверстия и их закрепление;
- обнуление измерительной базы.

Размещение отверстий на базовом участке рельса и схема монтажа стержня указана на Рисунок 3 и 4.

Точность отсчета на приборе соответствует разнице температуры в $0,5^{\circ}\text{C}$. В каждом измерительном пункте производят три измерения и определяют среднюю арифметическую величину.

Преимущества системы:

- легкий способ измерений;
- непосредственный отсчет величины сил в рельсах;
- не требуется наличия и использования документации пути;
- большая точность измерений;
- выявление действительной силы в рельсах (в том числе в случаях лопнувших рельсов и регулировки напряжения).

Недостаток системы:

- большая цена прибора;
- большая трудоемкость изготовления измерительной базы;
- требования большой точности и четкости работы.

Большую точность метода подтверждают результаты практических измерений – средняя разница для одного измерительного пункта выдерживает ~ 20 кН, что отвечает разнице температуры $\sim 1^{\circ}\text{C}$.

Технические данные прибора (Рисунок 5):

1. Вес 1,55 кг.

2. Точность отсчета силы в рельсах 5 кН.
3. Сфера рабочих температур: - 5⁰С до +70⁰С.
4. Длина измерительной базы 425 мм.

Эти методы требуют соответствующую подготовку поверхности, нанесённые знаки, риски (тензомер) необходимо защищать от атмосферных воздействий при длительных измерениях, и пригодны только для измерения изменения напряжения после установления базы (наклейки тензометра).

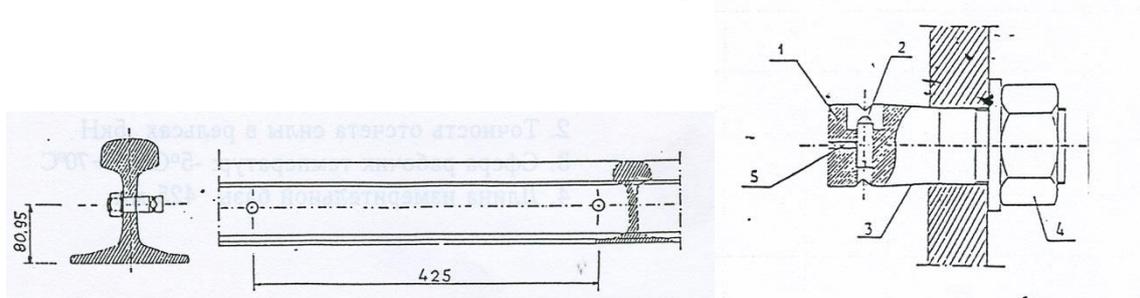


Рисунок 3. Монтаж устройства MS-02

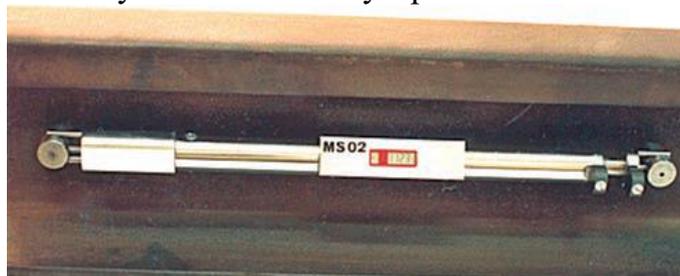


Рисунок 4. Устройство MS-02

3.1.2. Устройство SidePull²

Нейтральная температура рельса (НТ) определяет температурные силы в рельсах бесстыкового пути. Температура рельса без напряжения обычно неизвестна из-за отсутствия измерительной технологии – НТ контролируется железнодорожными компаниями посредством работ по техническому обслуживанию. Метод измерения устройством SidePull разработано на основании усовершенствованной технологии, эта технология была разработана экспертами МАВ в 1970-х годах. Этот так называемый «метод измерения силы» предназначен для определения НТ с высокой точностью без сварки и резки рельсов за 20-25 минут.

При исходной процедуре рельсовые скрепления освобождаются на измеряемой рельсовой нити, и после того, как поставили на ролики, рельс притягивается в сторону закрепленной рельсовой нити. Компонент тягового усилия, перпендикулярного оси пути, смещение рельса и температура рельса измеряются устройством, и вычисляется нейтральная температура с учетом изменения силы при изменении температуры рельса на 1⁰С. Измерение может быть выполнено только в бесстыковом пути при растягивающих усилиях, т. е. там, где предполагаемая

² Венгерская разработка

нейтральная температура рельсов бесстыкового пути выше, чем температура рельса, измеренная во время измерения.

Теория измерения SidePull

Для ознакомления с принципом метода измерения силы, необходимо вытянуть проволоку между фиксированными точками А и В и приложить силу P_0 в средней точке длины l .

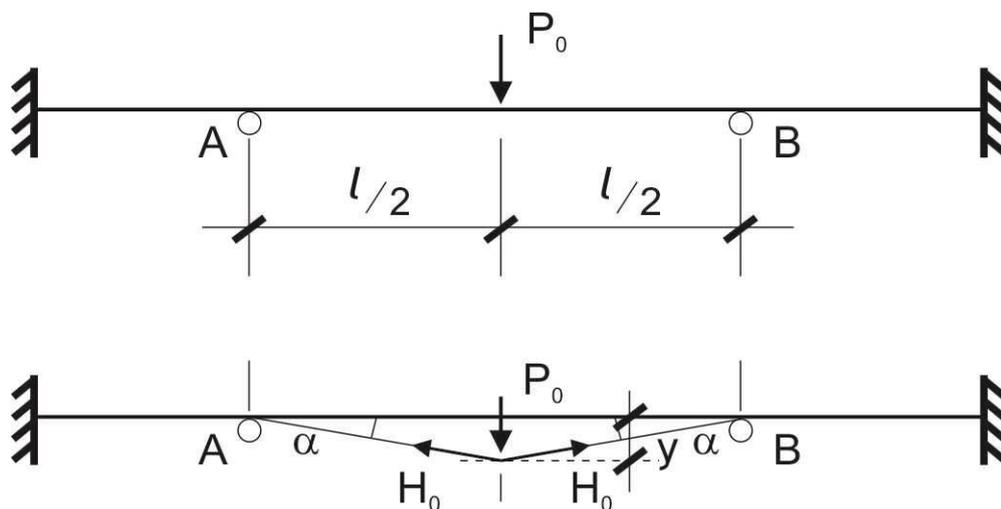


Рисунок 5. Расклад сил без напряжения в рельсе

В результате проволока смещается в направлении линии действия силы, удлиняется, создаются продольные силы величиной H_0 и создается равновесие.

$$P_0 = H_0 \cdot \frac{4 \cdot y}{l}$$

$$P_0 = 2 \cdot H_0 \cdot \sin \alpha$$

Тогда сумма проекций сил H_0 на линию действия P_0 равна силе P_0 .

Если к центральной точке проволоки будет приложена возрастающая сила P_0 , то смещение «у» в сторону действия силы также будет увеличиваться. Поскольку для малых углов $\sin \alpha$ приблизительно равно $\tan \alpha$ ($\sin \alpha \cong \tan \alpha$), можно рассчитать силу P_0 , необходимую для создания смещения «у».

$$P_0 = 2 \cdot H_0 \cdot \sin \alpha = 2 \cdot H_0 \cdot \tan \alpha$$

$$\tan \alpha = \frac{y}{l/2} = \frac{2 \cdot y}{l}, \text{ это подставляя в: } P_0 = 2 \cdot H_0 \cdot \tan \alpha = 2 \cdot H_0 \cdot \frac{2 \cdot y}{l} = H_0 \cdot \frac{4 \cdot y}{l}$$

$$P_0 = H_0 \cdot \frac{4 \cdot y}{l}$$

где:

P_0 – сила, необходимая для создания смещения "у" (Н)

H_0 – компонент боковой силы в проволоке (Н)

y – максимальное смещение проволоки между двумя фиксированными точками (мм)

l – расстояние между фиксированными точками (мм)

Если проволока предварительно натянута силой H_1 :

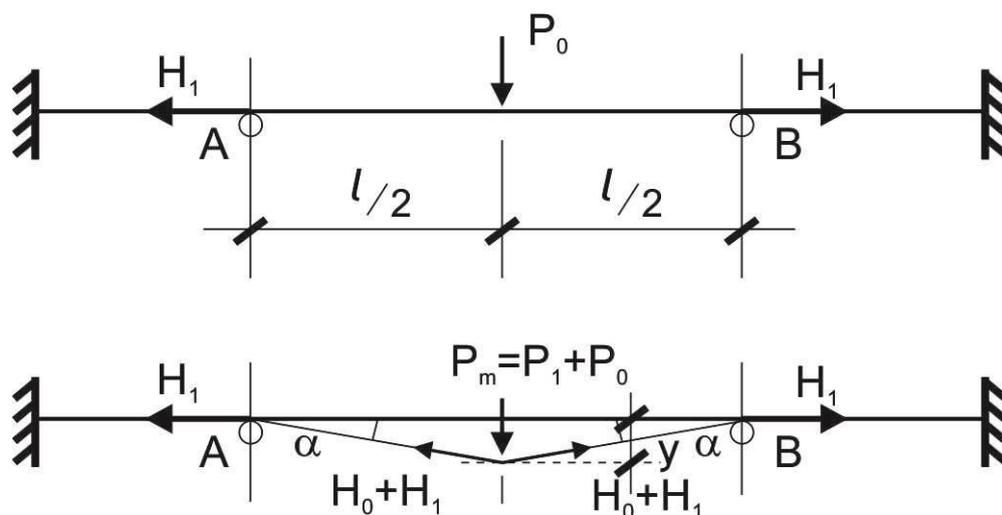


Рисунок 6. Расклад сил, если в рельсе было напряжение

тогда для создания такого же смещения требуется большая сила P_m – а именно сила P_1 , превышающая силу P_0 . В проволоке действует сила $H_0 + H_1$.

Чтобы определить силу натяжения в проволоке, закрепленной на расстоянии l , к центру свободной от напряжения проволоки сначала нужно приложить нарастающую силу P до тех пор, пока не произойдет смещение "у", и тогда измерить силу P_0 , относящуюся к смещению "у".

Когда в проволоке имеется растягивающая сила H_1 , необходимо опять создать смещение "у" с возрастающей силой P и измерить соответствующую этому смещению силу P_m .

$$P_m = P_0 + P_1$$

Где:

P_m – сила натяжения, отчитанная на динамометре [кН]

P_0 – усилие, необходимое для изгиба нерастянутого проволока [кН]

P_1 – требуемая дополнительная сила [кН]

Зная P_m , получим P_1 , а затем можно рассчитать в проволоке первоначальную, до приложения бокового нагружения силу H_1 :

$$P_1 = P_m - P_0$$

$$P_1 = H_1 \cdot \frac{4 \cdot y}{l}$$

По примеру $P_0 = H_0 \cdot \frac{4 \cdot y}{l}$, см. как выше, то есть:

$$H_1 = P_1 \cdot \frac{l}{4 \cdot y}$$

Эти соотношения относятся не только к проволоке, но и к рельсу. Единственное отличие состоит в том, что рельсы имеют жесткость, поэтому здесь требуется приложить изгибающую силу. Однако эта изгибающая сила одинакова как для рельса без напряжений, так и для рельса с температурными напряжениями.



Рисунок 7. Схема измерения силы на практике

Сила P_0 , необходимая для перемещения ненапряженного рельса "у", определяется экспериментально с помощью метода измерения силы.

На основании результатов экспериментов сила P_0 может быть вычислена как функция "у" и l по формуле.

Измерение с помощью SidePull и измерительной программы

Измерение выполняется следующим образом. Сначала рельсовые крепления удаляются на коротком участке измеряемой рельсовой нити. Освобожденный от креплений и поднятый на опорные ролики рельс подпирают боковыми упорными стержнями. Участок притягивается с заданным значением смещения в направлении неразболченного рельса. Измеряют силу, необходимую для перемещения рельса в боковом направлении, значение смещения и температуру рельса.

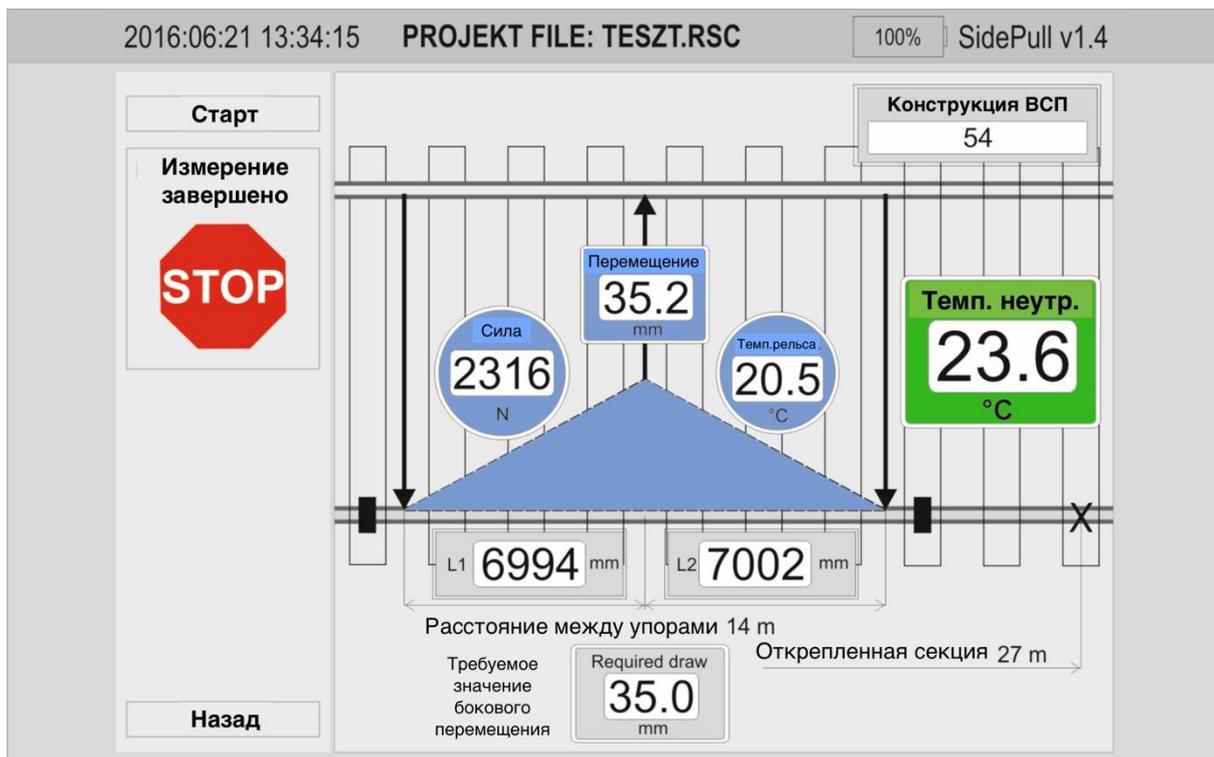


Рисунок 8. Схема метода измерения силы появляется в программе измерений во время измерения

Программное обеспечение SidePull предназначено для оценки и сохранения результатов измерений нейтральной температуры. Данные об усилии, смещении и температуре при измерении всегда отображаются на экране прибора. Данные места измерения и расстояние между упорными стержнями вводятся в компьютер вручную. Программа измерений выдает предупреждение, когда требуемое значение смещения с помощью устройства будет достигнуто.

Данные, собранные во время измерения, автоматически сохраняются, и результаты могут быть распечатаны в совокупности, если это необходимо.

Компоненты SidePull:

1. Боковые упорные стержни;
2. Ролики под рельс;
3. Датчик температуры;
4. Датчик смещения;
5. Датчик измерения силы;
6. Измерительная электроника;
7. Натяжной элемент;
8. Транспортная коробка;
9. Промышленный Windows планшет.



Рисунок 9. SidePull при поперечном смещении рельсовой нити

Требования к обслуживающему персоналу устройства SidePull

- 1-2 человека, для отметки точек измерения, выполнения измерения устройством SidePull, для оформления чертежей и заметок. Каждый участок отмечается только один раз. Квалификация персонала: обученный работник.

- 1-2 человека для снятия креплений, подъема рельсов, затем затяжки болтов, квалификация: не требуется.

Калибровка SidePull

Измерительные элементы SidePull (динамометр, измеритель смещения и термометр) должны периодически калиброваться производителем.

Измерение с помощью SidePull

- Для измерения SidePull требуется «окно».
 - Обозначение 7 измерительных точек на рельсе, как показано на рисунке 3, симметрично от центральной точки с расстояниями ~ 7 м, ~ 7,6 м и ~ 14 м.

Шаги измерения:

- Удаление креплений на измеряемой рельсовой нити на длине ~ 27 м.

- Поднятие рельса и размещение опорных роликов под рельс в точках на ~ 7,6 м.

- Размещение упорных стержней между рельсами в точках на ~ 7 м.

- Установка натяжного элемента с динамометром.

- Установка датчика перемещения и датчика температуры.

- Включение SidePull и планшета, установка соединения Bluetooth и запуск программы измерения SidePull.

- Измерение точного расстояния между центральной точкой и точками на расстоянии 7 м и ввод этих расстояний в измерительное программное обеспечение. - Программное обеспечение рассчитывает необходимое смещение.

- Увеличение силы тяги, пока не будет достигнуто требуемое смещение.

Программное обеспечение измерения SidePull отображает результат нейтральной температуры и сохраняет результаты в хранилище данных.

Эффективность SidePull

- Одно измерение SidePull занимает 30 минут с участием 4 работников и 1 час с участием 2 работников.

- Оптимальная скорость при работе SidePull составляет 8-16 измерений/1 смена, в зависимости от расстояния между точками измерения.

Условия применения устройства SidePull

- Измерение SidePull можно использовать только в том случае, если температура рельса ниже предполагаемой нейтральной температуры на измеряемом участке бесстыкового пути.

- Устройство SidePull использовать только на прямых участках пути.

- В летнее время измерение с SidePull следует проводить рано утром или ночью.

- Технология SidePull не имеет ограничений, если температура рельса ниже НТ.

Устройство SidePull используется также при калибровке прибора RailScan для определения фактической нейтральной температуры (см. раздел 3.2.1.).

3.2. Определение изменения напряжений измерением магнитного шума Баркгаузена

При намагничивании ферромагнитных материалов возникает высокочастотный электромагнитный и акустический ответный сигнал, который и называется шумом Баркгаузена. Его величина зависит от структуры и напряженного состояния материала.

Исследование напряжений при помощи измерения магнитного шума Баркгаузена основано на зависимости между величиной магнитного шума Баркгаузена и напряженного состояния исследуемой части материала. Магнитный шум Баркгаузена исходит из поверхности материала (1 мм).

Зависимость между величиной магнитного шума и напряженным состоянием исследуемой части материала определяется т.н. калибровочным измерением, выполняемым на полученном из исследуемого материала или идентичном по

химическому составу и текстуре образце. Этот метод измерения тоже чувствителен на результирующее напряженное состояние. Измерение магнитного шума Баркгаузена было применено в разных областях, в том числе для определения напряженного состояния мостов и больших стальных конструкций.

При этих исследованиях предметом исследования явилось результирующее производственных, сборочных и от собственного веса напряжений исследуемой конструкции или его элемента. На Рисунке 7 показано распределение остаточных производственных напряжений на поверхности рельса типа МСЖД54 перед укладкой в путь, после калибровки на образцах, взятых из подошвы и шейки рельса.

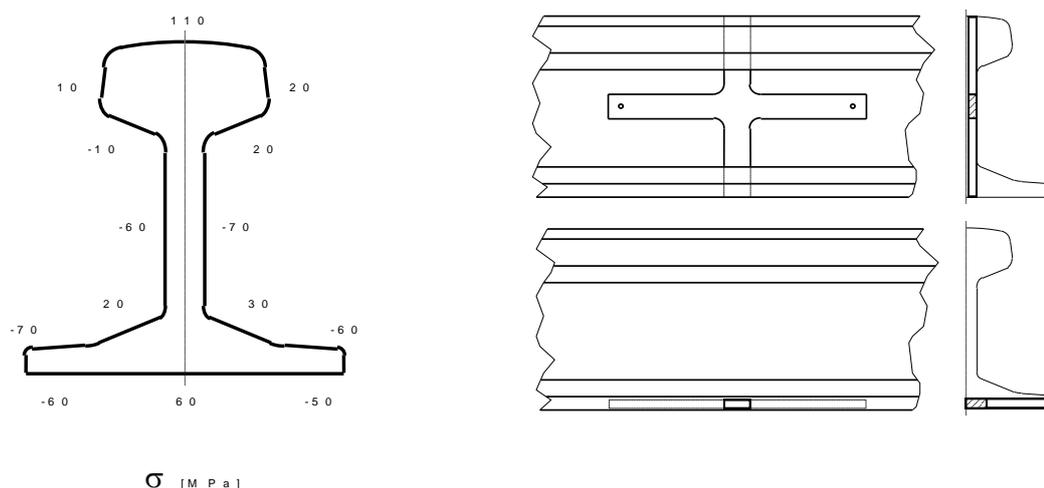


Рисунок 10. Распределение остаточных производственных напряжений в одном сечении рельса типа МСЖД54, определенное при помощи измерения магнитного шума Баркгаузена (слева). Калибровка на образцах, взятых из подошвы и шейки рельса (справа).

3.2.1. Применение теории шума Баркгаузена - определение нейтральной температуры прибором RailScan³

3.2.1.1. Принцип измерения

Работа прибора **RailScan** основана на принципе измерения магнитного шума Баркгаузена. Измеренной поверхностью является нулевая - с точки зрения производственного остаточного напряжения - часть рельса на переходе шейки в головку. Изменение по времени остаточного напряжения на этой части рельса относительно небольшое, на основании экспериментальных измерений практически можно им пренебрегать. **RailScan** на основании измеренного шума Баркгаузена определяет некоторую магнитную характеристику (Рисунок 11.).

Измерение необходимо выполнять при двух разных температурах. Эти две разные температуры вызывают в бесстыковом пути теоретически вычисляемое изменение напряжения. Выполненные в тех самых пунктах и при двух разных напряженных состояниях измерения означают для данного пункта определенную калибровку, определяя при этом чувствительность на напряжение измеренной в данном пункте магнитной характеристики. Таким образом, каждый пункт рельса получает индивидуальную калибрацию, которая *не зависит* от меняющейся структуры материала или от остаточного производственного напряжения. *Критическим* пунктом этой калибровки является *состояние нулевого напряжения*.

³ Венгерская разработка

Для состояния нулевого напряжения не может быть характерным какое-то определенное значение шума Баркгаузена из-за меняющейся структуры из пункта в пункт и меняющегося распределения остаточного напряжения.

Однако экспериментами можно исследовать зависимость между чувствительностью на напряжение определенной в измеренном пункте магнитной характеристики и характерным значением магнитной характеристики, определенным при нулевом напряженном состоянии. Эти эксперименты проводятся на рельсах одного и того же производителя, типа и прочности, но разного времени службы (новых и старогодных).

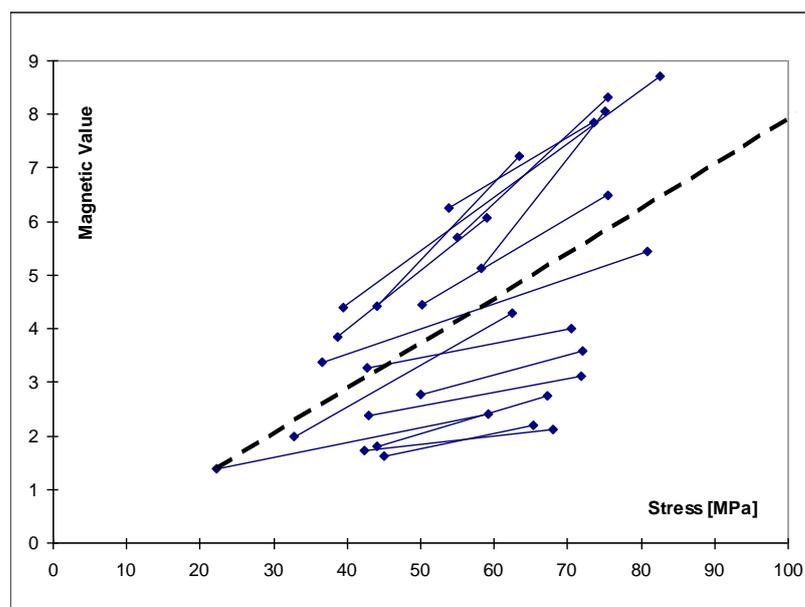


Рисунок 11. Зависимость от напряжений магнитной характеристики, вычисленной на основании измерений магнитного шума Баркгаузена при исследовании новых и старогодных рельсов с помощью растягивающего прибора.

3.2.2. Прибор RailScan



Рисунок 12. Прибор RailScan

Прибор **RailScan** состоит из передвигаемой по рельсу тележки, с монтированной на тележке центральной измерительной единицей и измерительной головкой (Рисунок 9). Центральная единица имеет фольговую клавиатуру и измерительную электронику с компьютерным управлением. Энергоснабжение прибора обеспечивается от наружного аккумулятора.

Измерительная головка съемная, состоит из двух частей, которые во время измерения прижимаются к шейке рельса, и имеет размеры, соответствующие типу рельса. Подвеска позволяет её фиксирование независимо от степени вертикального износа рельса. Температура рельса измеряется при помощи рельсового термометра с малой температурной инертностью, прикрепленного к измерительной головке.

3.2.3. Выполнение измерения при помощи прибора RailScan

Измеряемые сечения на рельсе необходимо предварительно нанести метки краской для возможности повторения измерений. Расстояние между измеряемыми пунктами целесообразно выбрать так, чтобы по каждому 21-36 метровому рельсовому звену было по 4-5 измеряемых пунктов, и чтобы эти пункты не оказались близко к сварным швам и изолирующим стыкам (минимальное расстояние от них три шпальных ящика), это дает измерения через каждые 4-10 шпальных ящиков. Это необходимо потому, что во многих случаях измеренное в пути напряжение показывает периодическое распределение по заводской длине рельсов. В этом случае правильную нейтральную температуру пути можно получить только при достаточно частом измерении. Измерения, выполненные в непосредственной близости от сварных швов, показывают локальное влияние напряженного состояния в зоне сварки и только в меньшей степени среднее напряжение и нейтральную температуру пути.

Перед серийными измерениями необходимо провести калибровку прибора для данного типа рельса. Для этого необходимо выбрать участок с известной нейтральной температурой бесстыкового пути, а для точного определения «известной» нейтральной температуры можно применить *метод измерения устройством SidePull* (см. раздел 3.1.2.). Точность известной нейтральной температуры влияет на точность прибора на данном типе рельсов.

Измерительная программа позволяет измерить 50 сечений в одном измерительном блоке. Длина такого участка может быть 100.....300 м, время измерения 20.....30 мин. При измерении измерительную головку нужно прижимать к рельсу при помощи рычага. О правильности прижатия информирует измерение воздушного зазора. На сильно изношенном рельсе, например, если боковой износ доходит до нижней 16-и миллиметровой части боковой грани рельса, измерение выполнить невозможно.

В процессе измерения на экране прибора можно следить за изменением значения магнитной характеристики, вычисленной из результатов измерений. Эти значения пропорциональны механическому напряженному состоянию данного сечения и характеристикам рельсовой стали.

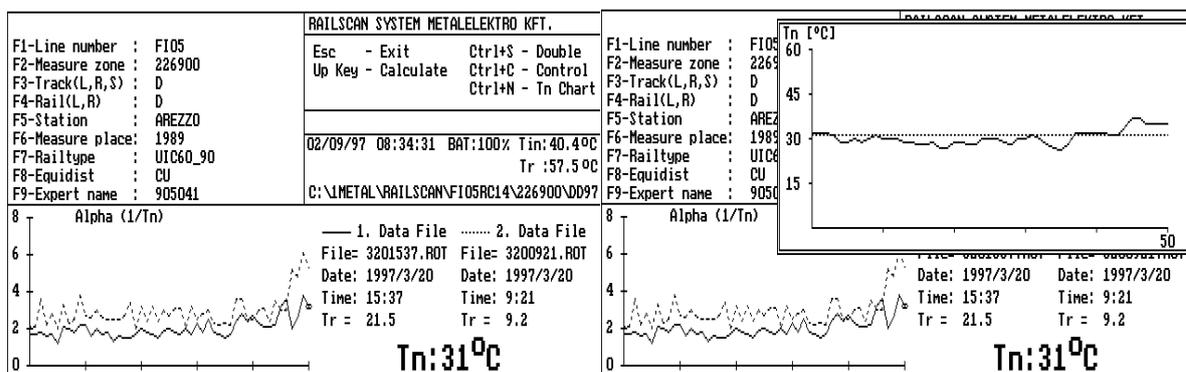


Рисунок 13. Результаты измерений, проявленные на экране прибора RailScan: распределение магнитных характеристик, относящихся к двум измерительным температурам и пропорциональных с распределением нейтральной температуры (слева) и распределение вычисленной нейтральной температуры (справа)

Вычисление нейтральной температуры возможно по двум измерениям, выполненным при разных температурах. Разница температур при этих двух измерений должна быть не менее 7°C . Отображение этих двух измерений на одном графике позволяет определить дышащие участки (при изменении температуры не меняется напряжение). После этого на экране уже можно определить и распределение нейтральной температуры (Рисунок 13.). Измерение можно повторить в любое время и можно сопоставить с выполненным ранее измерением при температуре, отличающейся больше чем на 7°C .

3.3. Применение прибора RailScan

Область применения прибора **RailScan** очень широка при контроле состояния бесстыкового пути и при контроле выполнения путеремонтных работ. Прибором весьма экономично можно исследовать длинные участки с соответствующей частотой измеренных пунктов. Так как точность прибора удовлетворительная, то он успешно применялся в научных исследованиях по нейтральной температуре бесстыкового пути.

Примеры практического применения

Примеры сгруппированы по количеству измерений, начиная от исследования локальных воздействий до контроля нескольких километровых участков пути.

- Локальным в пути является концентрация напряжений, вызванная сваркой, выполненной без раскрепления рельса. Растягивающее напряжение, возникающее вследствие усадки материала сварного шва, локально повышает нейтральную температуру. Исследование явления целесообразно ограничить измеряемым участком длиной 30...60 м (измерение через 1- 2 шпальных ящика). Концентрация напряжений - если не было выполнено её распределение - сама распределяется в зависимости от перепадов температуры и от движения в течении нескольких недель.
- Контроль выполненной ранее разрядки напряжений осуществляется на выделенных симметрично относительно замыкающей сварки участках пути. Измерения выполняются через 6-10 шпальных ящиков. Принятые на практике

участки разрядки с длиной 400-600 м можно контролировать с 2-3 измерительными участками.

- Часто требуется полностью измерить длинные участки пути, например, после очистки балласта балластоочистительной машиной. Это можно исследовать на состыкованных измерительных участках с измерениями через 8 – 12 шпальных ящиков. Более быстрое, но менее подробное исследование означает измерительный процесс, выполненный с 5-6 измерениями по заводским длинам рельсов (по 21...36 м), при пропуске 1-2 звеньев. Таким методом можно достигать производительность измерений в 1-1,5 км/ч.

Исследование перераспределений напряжений, например, исследование тормозных участков требует повторных по времени измерений. Место и длину этих участков во многих случаях можно установить достаточно точно, например, перед станциями, но на перегоне целесообразно исследовать более длинный участок, чем предложено.

3.4. Точность измерений прибора RailScan, условия, влияющие на точность измерений прибора RailScan

Измерением магнитного шума Баркгаузена исследуется напряженное состояние поверхностного слоя рельса (0...1 мм), поэтому, если измеренная поверхность – переход шейка/головка – имеет дефекты, измерение приводит к неправильному результату. В случае неправильного положения измерительных головок прибор даёт акустический сигнал.

Источником ошибок при измерении может быть неточное измерение температур, а также распределение температуры по периметру рельса и вследствие этого изменение температурного напряжения.

Точность измерений прибора: $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$

4. Метод маячных шпал⁴

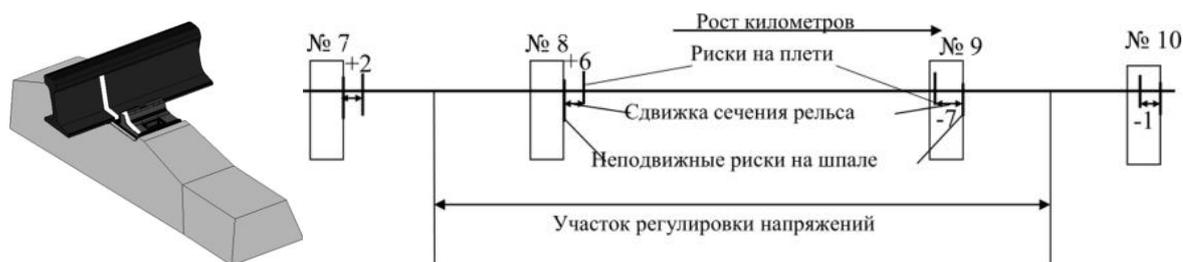


Рисунок 11. «Маячная» шпала для контроля угона пути

4.1. Измерения продольных подвижек рельсовых плетей относительно «маячных шпал», устраиваемых в соответствии с «Техническими указаниями по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути» через 100 м (против пикетных столбиков), позволяют простыми средствами установить как фактическую температуру закрепления $t_{фз}$, так и фактическое температурно-напряженное состояние $\sigma_{тф}$ рельсовых плетей и сравнить их соответственно с начальной температурой закрепления t_3 и расчетным значением температурно-режимного состояния σ_t .

⁴ На железных дорогах колеи 1520 мм

Расчетные температурные напряжения в плетях определяются формулой:

$$\sigma_t = 2,5 \times \Delta t_{\phi} \text{ [МПа]},$$

где $\Delta t_{\phi} = \Delta t_{\phi} - \Delta t_3$; t_{ϕ} и t_3 - соответственно температуры рельсов в момент контроля подвижек и в момент закрепления петли.

4.2. Отличие фактической температуры закрепления петли от начальной (температура закрепления плети при укладке в расчетном интервале температур), а соответственно и отличие фактических продольных напряжений $\sigma_{t\phi}$ от расчетных σ_t может возникать в плетях при ослаблении их закрепления на шпалах, угоне пути, ремонтных работах с вывеской путевой решетки, рихтовке пути, восстановлении дефектных плетей и т.д.

4.3. Оценка фактической температуры закрепления и фактического напряженного состояния плетей по «маячным» шпалам сводится к определению изменений расстояний между метками (полосами) на верхней части подошвы рельсовой плети и кромками подкладок на этих шпалах за время между укладкой плетей и проведением контрольных измерений.

4.4. Изменение длины участка Δl_i между метками (на смежных «маячных» шпалах) проще всего определять по разнице смещений меток от контрольных кромок подкладок на этих шпалах:

- по левой рельсовой нити:

$$\Delta l_i^{\text{л}} = a_2^{\text{л}} - a_1^{\text{л}}$$

- по правой рельсовой нити:

$$\Delta l_i^{\text{п}} = a_2^{\text{п}} - a_1^{\text{п}}$$

4.5. Измерения подвижек (а) производятся металлической линейкой, штангенциркулем с точностью до 1 мм. Одновременно по головке петли измеряется температура с точность 1°C. Такие точности измерений вполне достаточны при рассматриваемом способе.

4.6. При известной начальной длине участков плети при укладке бесстыкового пути и измеренным изменениям этой длины по формуле

$$\Delta t_3 = \pm 85 \frac{\Delta l_o}{l_o}$$

определяется отклонение фактической температуры закрепления (нейтральной температуры) от начальной температуры закрепления этого участка плети, где:

Δl_o – измеренное фактическое удлинение (с “+”) или укороченное (с “-”) плети, мм;

l_o – расстояние между «маячными» шпалами, мм.

Значение фактической температуры закрепления (нейтральной температуры) плети определяется по формуле:

$$t_{\phi 3} = t_3 \pm \Delta t_3$$

По полученным значениям подвижек Гука рассчитываются изменения продольных напряжений на каждом участке между двумя «маячными шпалами», вызванные изменениями расстояния между ними:

в левой нити:

$$\sigma_{дон.лев.} = \pm E \cdot \varepsilon_{лев.} = \pm E \frac{\Delta l_o^л}{l_o^л} = \pm 210 \frac{(a_2^л - a_1^л)}{l_{о\ лев.}}$$

в правой нити:

$$\sigma_{дон.прав.} = \pm E \cdot \varepsilon_{прав.} = \pm E \frac{\Delta l_o^п}{l_o^п} = \pm 210 \frac{(a_2^п - a_1^п)}{l_{о\ прав.}}$$

В приведенных формулах:

$E = 210$ ГПа – модуль упругости рельсовой стали;

$\varepsilon = \Delta l / l_o$ – относительное удлинение участка между «маячными» шпалами, длиной l_o .

Фактическое напряженное состояние плетей на участке между смежными «маячными» шпалами может определяться двумя путями:

- по фактической температуре закрепления плети (соответственно по левой и правой нитям)

$$\sigma_{\phi} = \pm 25 \Delta t_3$$

- непосредственно по изменению расстояния между «маячными» шпалами соответственно левой и правой рельсовой нитей:

$$\Delta l_o \quad (a_i - a_{i+1})$$

$$\sigma_{\phi} = \pm (\sigma_t \pm \sigma_{дон}) = \pm 25 \Delta t \pm E \frac{\Delta l_o}{l_o} = \pm 25 (t_{\phi} - t_3) \pm E \frac{\quad}{l_{oi}}$$

4.7. Для практических целей линейным работникам собственно напряжения $\Delta \sigma$ малопригодны для использования. Поэтому рекомендуется определять соответствующие этим σ «потери» начальной температуры закрепления и учитывать их для корректировки температурных режимов отдельных работ на бесстыковом пути, связанных с временным ослаблением устойчивости пути.

4.8. Если фактическая температура закрепления плети не выходит за пределы расчетного интервала температур закрепления Δt_3 , установленного для данной плети, то новое значение заносят в паспорт-карту плети и им руководствуются при дальнейшей эксплуатации плети.

Если t_o выходит за пределы Δt_3 , то выявляются зоны растяжения и сжатия плети и производится регулировка напряжений в плети. Регулировка производится со стороны растянутой зоны в сторону сжатого участка плети. При этом участок плети последовательно раскрепляется и простукивается. При необходимости принимаются решения о дополнительном воздействии на плеть, или участок плети, что обеспечило бы возврат ее в первоначальное состояние.

4.9. Учет подвижек плети ведется в специальном журнале при ручном наблюдении. При отсутствии подвижек производится лишь отметка о времени проверки и об отсутствии подвижек. Периодический контроль подвижек плети может проводиться системами видеоконтроля диагностических средств.

5. Заключение

Измерения, выполненные до настоящего времени, доказали, что вследствие изменения продольных сил в рельсах бесстыкового пути меняется и напряженное состояние пути. Наблюдается уменьшение разницы напряжений сжатых и растянутых участков или возникновение концентраций напряжений и их периодическое изменение после сезонных метеорологических изменений. Степень изменений зависит от технического состояния данного верхнего строения пути (рамная жесткость, изношенность рельсов и креплений, прижатие креплений, сопротивление балласта и т.д.).

С помощью приведенных выше методов можно определить напряженное состояние всей сети бесстыковых путей и на этом основании можно выделить те участки, на которых необходимо выполнить разрядку или распределение напряжений, или проводить другие мероприятия (введение ограничения скорости).

В результате исчезает опасность летних выбросов пути, содержание пути станет экономичнее, а движение безопаснее.