

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи.

Аспирант Е. П. БОНДАРЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
НАПРЯЖЕНИЙ В ГОЛОВКЕ РЕЛЬСА МЕТОДОМ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОТОУПРУГОСТИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертационной работы, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор М. А. ФРИШМАН.

г. ДНЕПРОПЕТРОВСК

1937 г.

НТБ
ДНУЖТ

№118Р

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи.

Аспирант Е. П. БОНДАРЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
НАПРЯЖЕНИЙ В ГОЛОВКЕ РЕЛЬСА
МЕТОДОМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
ФОТОУПРУГОСТИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертационной работы, представленной на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Научный руководитель—
доктор технических наук,
профессор М. А. ФРИШМАН

г. ДНЕПРОПЕТРОВСК
1957 г.

НТБ
ДНУЖТ

811
118p
4406

П Е Р Е Ч Е Н Ь

работ и изданий, в которых опубликованы
материалы диссертации

1. „Исследование касательных напряжений в головке рельса методом фотоупругости“.
Научное сообщение № 1 ДИИТ, 1957 г.
2. „Исследование распределения напряжений в головке рельса“.
Бюллетень технической информации № 2, Днепропетровское областное Общество по распространению политических и научных знаний. Днепропетровск, 1957 г.
3. „Напряжения в головке рельса“.
Сборник научных статей по путевому хозяйству. ДИИТ и ДорНИТО Сталинской ж. д. Днепропетровск, 1957 г.
4. „Исследование распределения напряжений в головке рельса методом пространственной фотоупругости“.
Журнал „Вестник ЦНИИ № 5, Москва, 1957 г

В этих статьях отражено основное содержание диссертации.

ВВЕДЕНИЕ

Двадцатый съезд КПСС в своих Директивах по шестому пятилетнему плану призвал научные и инженерно-технические кадры бороться за технический прогресс всех отраслей народного хозяйства.

Актуальной задачей путевого хозяйства железных дорог в свете этих Директив является борьба за продление срока службы рельсов, за ликвидацию их выхода по порокам и изломам.

Железнодорожный транспорт является одним из крупнейших потребителей металла в нашей стране. Почти одну пятую всего проката в виде рельсов, балок ежегодно получает железнодорожный транспорт.

Ежегодный выход рельсов из пути по изломам и порокам по сети дорог, все еще велик.

Поэтому научные исследования с целью уменьшения выхода рельсов из пути по порокам и изломам имеют важное народнохозяйственное значение.

Эти исследования должны способствовать увеличению срока службы рельсов, повышению их прочности, что особенно важно сейчас, при переходе на высокие скорости движения поездов.

В диссертации проведен анализ выхода рельсов по сети дорог, из которого видно, что современные тяжелые рельсы, в сравнении с легкими, имеют меньший выход. Но, из этого анализа также видно, что основным пороком тяжелых рельсов является внутреннее расслоение головки и что выход по этому пороку современных рельсов в процентном отношении даже увеличился по сравнению с легкими типами. Если у легких типов рельсов выход по этой причине составлял 7—12%, то у рельсов Р50—33%, а у рельсов Р65—52%.

Отсюда вытекает необходимость дальнейшего изучения работы новых рельсов и особенно условий работы головки рельсов.

Почти на протяжении целого века непрерывно ведутся научно-исследовательские работы в области рельсовой проблемы. Несмотря на большое количество проведенных работ остается еще не выясненным целый ряд вопросов и, в частности, причины расслоения головки рельсов.

До сих пор по целому ряду пороков рельсов еще не ясна причина их возникновения. Эти причины связаны либо с качеством

металла, либо с формой рельса. Не вполне ясно также под действием каких напряжений (нормальных или касательных) возникают и развиваются те или иные пороки.

Научно-исследовательские работы по выявлению роли качества металла рельсов в возникновении пороков и изломов не дали вполне определенного ответа. Нередки случаи когда быстро износившийся или изломавшийся рельс имел хорошие характеристики металла и, наоборот, долго служивший рельс имел плохие характеристики металла.

Экспериментальные исследования напряженного состояния рельсов, которые велись в основном по его внешнему контуру, также не смогли объяснить причины образования внутренних пороков.

Исследования расслоения головки и образования светлых и темных пятен в рельсах, проведенные в ЦНИИ Р. С. Николаевым, установили, что образование этих пороков начинается не снаружи контура, а внутри головки.

В диссертации показано, что для установления причин расслоения головки рельсов необходимы исследования напряженного состояния не только по контуру, но и внутри всего поперечного сечения рельса.

Исследования распределения напряжений внутри поперечного профиля рельса до недавнего времени почти не велись как у нас, так и за границей.

Ранее проведенные немногочисленные исследования этого вопроса методом фотоупругости ограничились исследованиями на пластинках (так называемой плоской задаче теории упругости). Эти исследования, конечно, не могли дать действительной картины распределения напряжений в рельсе как объемном теле, а также не смогли объяснить причины внутренних расслоений в головке рельса.

Целью настоящей работы является исследование напряженного состояния рельса, как объемного тела методом пространственной фотоупругости.

I. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с поставленными целями исследования в диссертационной работе был принят поляризационно-оптический метод (метод фотоупругости).

Этот метод является единственным из существующих методов экспериментального исследования напряжений, который позволяет провести определение напряжений внутри поперечного сечения детали.

В связи с синтезированием в 1951—1953 годах новых оптических материалов—«Михм-Имеш» и «фотостерита» метод фотоупругости обогатился новым способом «замораживания», позволяю-

щим вести исследование с высокой точностью на объемных моделях.

Метод фотоупругости уже вышел из той начальной стадии, когда результаты носили только качественный характер. В настоящее время этот метод является мощным средством количественного исследования распределения напряжений.

Основой поляризационно-оптического метода является свойство оптически активных, изотропных материалов при деформации становится двойколучепреломляющими, т. е. оптически анизотропными. Эта временная оптическая анизотропия легко измеряется методом фотоупругости и дает возможность получать напряжения в любой точке детали.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВНУТРИ ГОЛОВКИ РЕЛЬСА Р50*)

Для проведения экспериментальных исследований на моделях принят основной тип верхнего строения по существующей классификации—рельс Р50 (ГОСТ № 7174—54 г.), шпал 1840 штук на километр, подшпальное основание—щебень. В качестве колесной нагрузки принята статическая нагрузка, действующая на рельс по середине шпального пролета, приложенная с эксцентриситетом к оси рельса на 18 мм и равная 10000 кг.

Применение материала «Михм-Имаш» для модели дало возможность провести эксперимент способом «замораживания».

Модель рельса выполнена в геометрическом масштабе 1/4. Длина модели рельса равна 45 см.

Выполнить модель такой длины целиком из оптически активного материала, из-за недостаточных размеров имеющегося блока, не представилось возможным, поэтому модель была по концам надставлена плексиглазом того же профиля.

Моделирование упругого основания произведено силами, вычисленными по известным формулам балки на упругом основании.

Процесс «замораживания» проведен по методике Института машиноведения Академии Наук СССР.

Разрезка «замороженной» модели произведена на перпендикулярные и горизонтальные срезы.

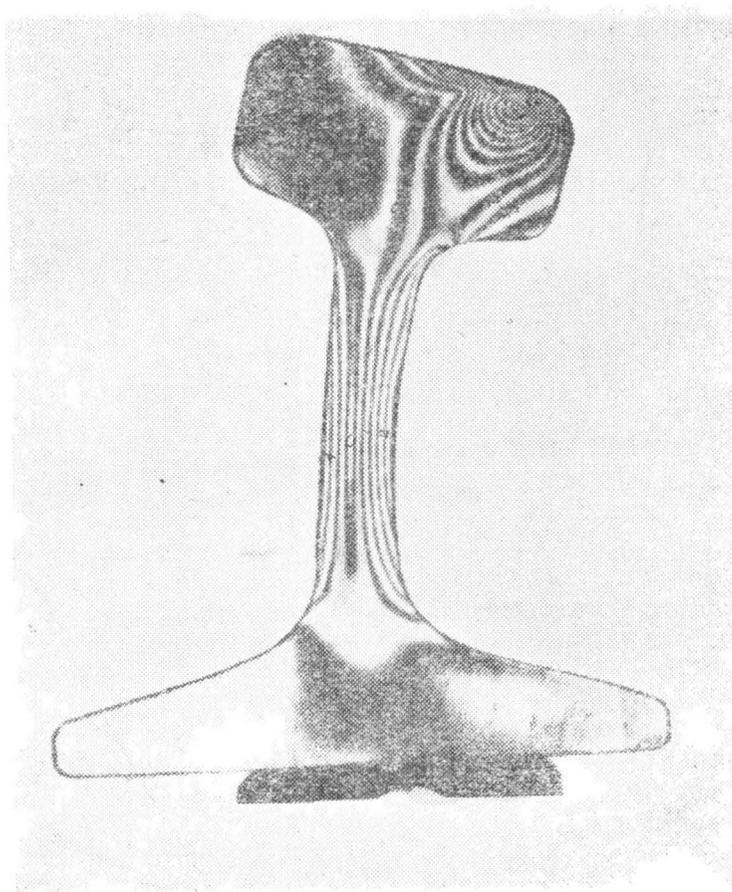
В результате просвечивания 16 срезов на поляризационно-оптической установке была получена картина полос и изоклин в разных сечениях рельсов.

*) Эксперимент проведен в оптической лаборатории института машиноведения Академии Наук СССР.

3. РЕЗУЛЬТАТ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОЛОВКИ РЕЛЬСА

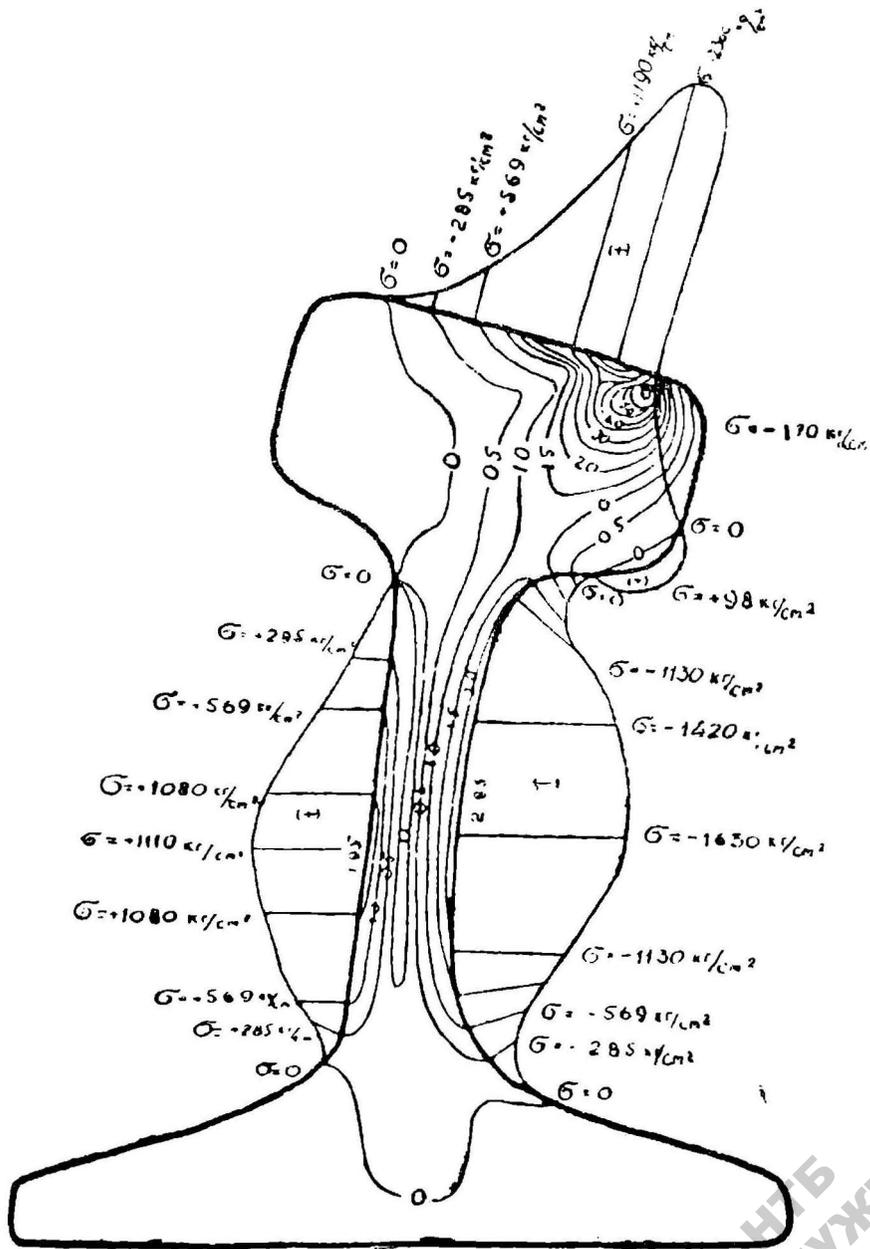
В диссертации приводится анализ картины полос всех срезов, на основании которого установлено, что наиболее напряженным срезом является средний срез № 1, находившийся непосредственно под нагрузкой.

Картина полос первого среза показана на фиг. 1.



Фиг. 1

По этой картине полос установлено, что наиболее напряженным элементом рельса является головка, в которой порядок полосы наибольший.



Фиг. 2

ЧІБ
ДНУЖТ

Максимум касательных напряжений находится ниже плоскости катания. Головка работает не по всей плоскости, а лишь со стороны приложения силы.

Касательные напряжения в головке распространяются по окружности. Местные напряжения в головке имеются только в первом срезе, в соседних срезах их уже не видно. Следовательно, местные напряжения ограничиваются незначительной зоной контакта головки рельса с бандажом колеса.

На основании картины полос среза № 1 получены его контурные напряжения. Эпюра контурных напряжений показана на фиг. 2. При анализе эпюры контурных напряжений видно, что шейка рельса со стороны оси пути испытывает сжатие и что наибольшие напряжения в ней соответствуют сечению, расположенному выше подошвы приблизительно на 7 см. К подошве и к головке эти напряжения быстро падают.

Из анализа эпюры контурных напряжений в срезе № 1 можно заключить, что в местах перехода от головки рельса к шейке и от шейки к подошве, концентрации напряжений у рельсов Р50 (ГОСТ 7174—54) нет.

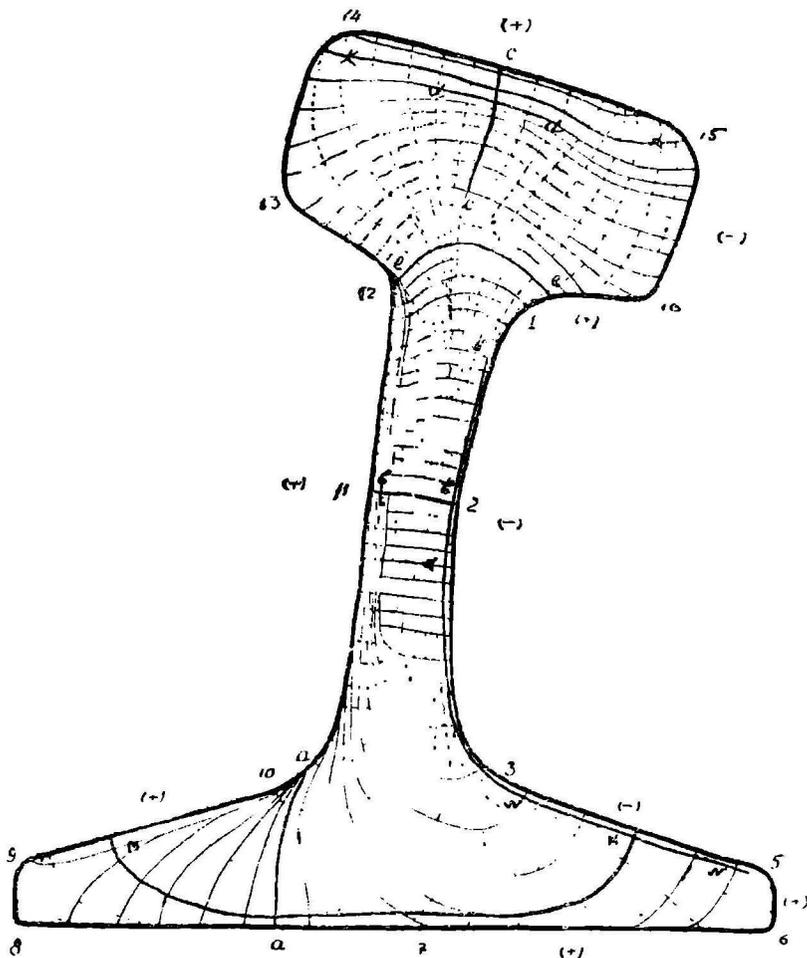
Распределение напряжений в шейке рельса Р50 принципиально отличается от распределения напряжений у легких типов. Если у легких типов рельсов максимум напряжений находился под головкой и быстро падал к середине шейки, то в шейке рельса Р50 напряжения под головкой уменьшились, но зато возросли в середине шейки.

На основании картины изоклин, построенных при помощи оптического метода для 1 среза была получена в плоскости перпендикулярной оси рельса картина изостат (линий действия главных напряжений). Картина изостат показана на фиг. 3.

По изостатической картине установлены знаки напряженного состояния по контуру рельса, показанные по участкам на фигуре 3. Установление знаков по изостатической картине согласуется со знаками, определенными другими методами экспериментального исследования.

Изостатическая картина позволяет довольно просто, путем сравнения очертания изломов с ней, определить под действием каких напряжений (нормальных или касательных) начался и развивался тот или иной порок. На основании сравнения очертания изломов и очертания изостат, а также очертания изломов и картины полос возможно определить, что является причиной излома—дефекты металла рельса или напряженное состояние, зависящее от формы рельса.

На основании этих сравнений можно сделать следующие выводы:



Фиг. 3

1. Если очертание излома в рельсе не соответствует очертанию изостат (см. фиг. 3) и картине полос (фиг. 1), то, следовательно, причиной его является порок металла.

2. Если очертание излома в рельсе соответствует очертанию изостат, то в этом случае есть основание полагать, что излом развивался под действием главных напряжений. Для установления причин излома в этом случае требуется более детальное обследо-

вание плоскостей излома, центров излома, зон начала излома, установление наличия неметаллических включений, флокенов и других пороков металла.

Указанное требование связано с тем, что в данном случае возможно сочетание порока металла (наличие первоначального концентратора или слабого места в металле) и развития дефекта под действием главных напряжений. В случае наличия таких концентраторов напряжений, излом рельса связан с качеством металла, несмотря на то, что очертание излома соответствовало очертанию изостат. Если таких концентраторов не обнаружено, то, следовательно, излом возник и развивался под действием главных напряжений.

3. Если очертание излома в рельсе соответствует картине полос, то в этом случае есть основания полагать, что излом развивался под действием касательных напряжений. Для установления причины излома рельса в данном случае требуется также обследование наличия пороков металла, как и в предыдущем случае. Если концентраторов напряжений из-за пороков металла не обнаружено, то, следовательно, излом возник и развивался под действием касательных напряжений.

Образование «светлого» пятна в головке рельса и развитие его в «темное», повидимому, происходит под действием касательных напряжений, так как его очертание хорошо согласуется с очертанием картины полос (линий равных касательных напряжений) см. фиг. 1.

Вычисление напряжений в головке рельса, по данным оптического исследования, произведено по методике Института машиноведения Академии Наук СССР.

В результате анализа полученных напряжений в четвертой главе диссертации даны следующие выводы:

1. Головка рельса, непосредственно под грузом, испытывает объемное сжатие.

2. Нижние волокна головки рельса испытывают незначительное растяжение.

3. Максимальные касательные напряжения в горизонтальной плоскости в головке рельса находятся на расстоянии 3—5 мм от плоскости катания.

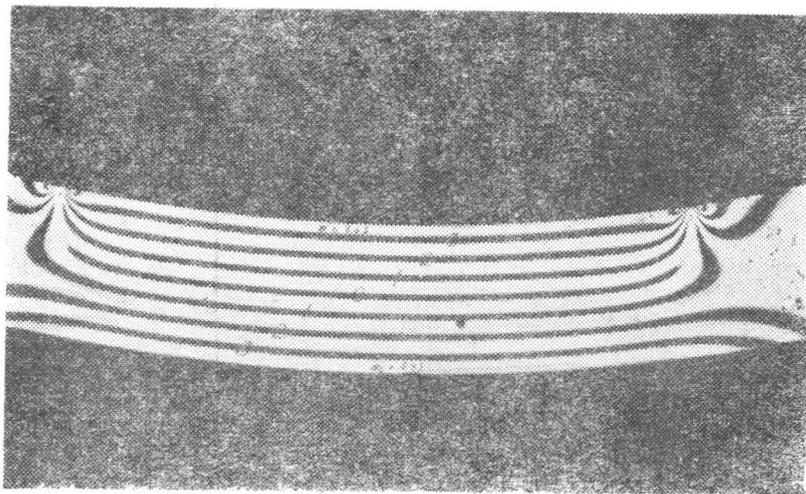
4. Положение максимума касательных напряжений в вертикальной плоскости поперек рельса в головке рельса совпадает с местом обычного начала порока «светлое» пятно.

5. Положение максимума касательных напряжений в плоскости по оси рельса совпадает с обычным местом начала вертикального расслоения головки—посредине головки. Представляют интерес изменения касательных напряжений в зависимости от основных изгибных напряжений.

С этой целью нами методом фотоупругости проведено исследование распределения касательных напряжений в вертикальной плоскости по оси рельса внутри поперечного профиля в зависимости от отношения шпального пролета к высоте рельса. В результате экспериментов получены фотографии картины полос в рельсе как балке.

В диссертации проведен анализ картин полос для отношений $\frac{l}{h} = 5; 1,18$ где l — пролет между шпалами, h — высота рельса.

На фиг. 4 показана картина полос в балке при чистом изгибе.



Фиг. 4

На этой фигуре видно, что полосы при чистом изгибе распределяются по балке равномерно как в сжатой, так и в растянутой зонах.

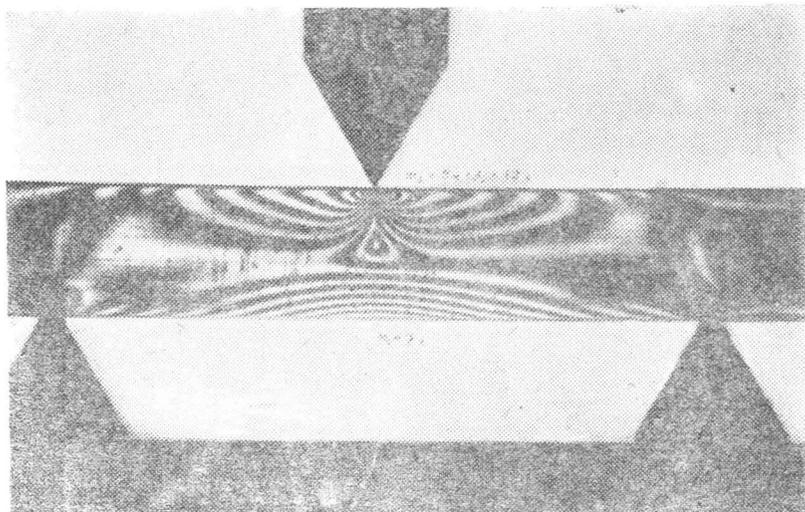
Существующими правилами расчетов верхнего строения пути на прочность рекомендуется формула:

$$\sigma = \frac{M}{W} f \quad [1]$$

По этой формуле наиболее напряженными волокнами являются крайние волокна балки. Ранее было сказано, что пороки «светлое» и «темное» пятна начинаются не снаружи, а внутри поперечного профиля рельса.

Следовательно, формула (1) не отражает действительной картины распределения напряжений в головке рельса.

Картина полос в балке с отношением $\frac{l}{h} = 5$ показана на фигуре 5. Эта картина полос по сравнению с картиной при



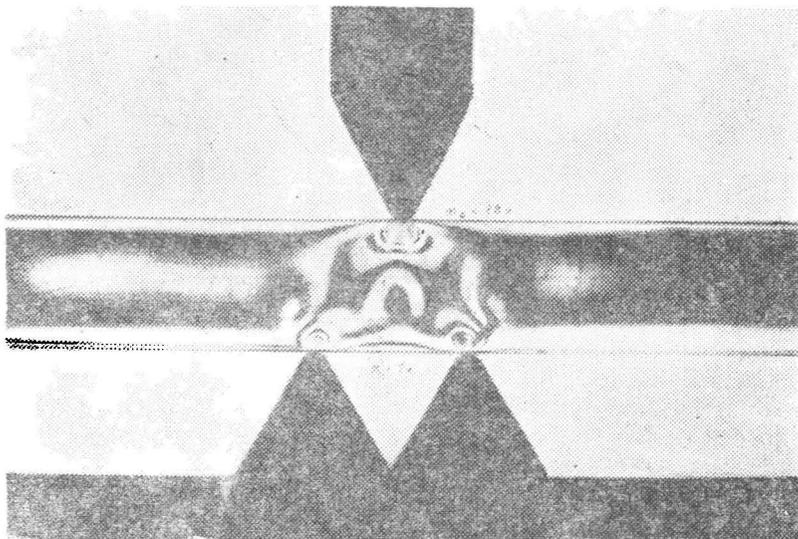
Фиг. 5

чистом изгибе разительно изменилась. Равномерность распределения полос сохраняется только для точек, удаленных от зоны приложения силы. В этих точках количество полос от изгиба балки одинаково как в растянутой, так и сжатой зонах. В месте приложения силы в верхних волокнах балки четко видна картина полос местных напряжений. Общее количество полос в сжатой зоне равно 7, от местных напряжений 5 полосам. Сумма полос в сжатой зоне равна 12 полосам. В растянутой зоне количество полос от изгиба равно 7 полосам. Сумма полос по всей балке как в сжатой, так и растянутой зонах равна 19 полосам.

Картина полос при отношении $\frac{l}{h} = 1,18$ показана на фигуре 6. На фиг. 6 видно, что картина полос при этом отношении изменилась неузнаваемо по сравнению с отношением, показанным на фигурах 4, 5.

На фигуре 6 уже не наблюдается никакой равномерности полос. Полосы почти вертикально поднимаются к точке приложения силы. Количество полос в верхних волокнах балки возросло

до 18, что больше чем при отношении $\frac{l}{h} = 5$ на 50%. Количество полос в растянутой зоне уменьшилось — осталась только 1 полоса.



Фиг. 6

ВЫВОДЫ ПО АНАЛИЗУ КАРТИНЫ ПОЛОС В БАЛКАХ

1. Картина полос в балках, находящихся под действием сосредоточенной нагрузки посередине пролета, резко отличается от картины полос при чистом изгибе.

2. При уменьшении отношения $\frac{l}{h}$ с 5 до 1,18 количество полос в растянутой зоне (в подошве рельса) уменьшается, но увеличивается в сжатой зоне (в головке рельса).

Следовательно, при уменьшении отношения пролета к высоте балки происходит перераспределение касательных напряжений внутри поперечного профиля рельса, с переходом максимума касательных напряжений в верхние волокна балки.

Увеличение касательных напряжений в верхних волокнах балки, при уменьшении изгибных напряжений, можно объяснить сле-

дующим образом, если принять вертикальные напряжения за σ_y а напряжения от изгиба за σ_z , то на основании формулы:

$$\tau_{yz} = \frac{\sigma_y - \sigma_z}{2} \quad [2]$$

при постоянстве σ_y и уменьшении σ_z касательные напряжения должны увеличиться. Эксперимент показал увеличение касательных напряжений в головке рельса.

3. При существующей конструкции пути мощные рельсы работают не как простые балки, а как высокие балки.

4. Мерой уменьшения касательных напряжений в зоне под силой в плоскости по оси рельса является увеличение пролета балки, что даст увеличение основных изгибных напряжений, а следовательно, уменьшит их полуразность.

Приведенные данные по распределению касательных напряжений в рельсе получены экспериментальным путем. Представляет интерес получения аналитических зависимостей этого распределения по оси балки при изменении отношения пролета к высоте балки.

Используя формулы теории упругости о величине радиального давления в полуплоскости, применяя теорию о противодействиях и вычисляя максимальные касательные напряжения, как полуразность главных напряжений, нами получена следующая формула касательных напряжений:

$$\max \tau_{yz} = \frac{P}{\pi t} \left\{ \left[\frac{y}{4c^2} - \frac{1}{y} \right] - \left[\frac{t(\pi l \mu - c)}{2I_p} (y - c) + \frac{1}{2c} \right] \right\} \quad [3]$$

где: P — погонно сосредоточенная нагрузка.
 t — ширина балки.
 c — расстояние от крайнего волокна до нейтральной оси балки.
 y — текущая координата точки, отсчитываемая от верха балки.
 l — расстояние между осями шпал,
 μ — ордината линии влияния для моментов,
 I_p — момент инерции рельса около горизонтальной оси.

АНАЛИЗ ФОРМУЛЫ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Формула касательных напряжений состоит из двух членов, стоящих в квадратных скобках: Первый член дает величину попе-

речных напряжений, второй—величину напряжений от основного изгиба. Абсолютная величина первого члена зависит, главным образом, от величины отношения $\frac{1}{y}$. При малых значениях (порядка 0,1—1,0 см), это отношение имеет большую величину, что в свою очередь, в основном, и определяет величину касательных напряжений в формуле.

Второй член в формуле входит в нее с обратным знаком. Имея знак минус (для зоны выше нейтральной оси), второй член уменьшает касательные напряжения.

Абсолютная величина второго члена зависит от расстояния между осями шпáл I , высота рельса $h = 2C$ и от его момента инерции I_p . При увеличении I , значение величины $(\pi|y - C)$ изменяется незначительно. Второй член более чувствителен к изменению высоты рельса, так как она входит в кубе в I_p . Следовательно, второй член больше увеличивается от уменьшения C , чем от увеличения I , т. е. на уменьшение касательных напряжений в головке рельса в вертикальной плоскости по оси рельса больше сказывается уменьшение высоты рельса, нежели увеличение расстояния между опорами.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ИЗ РАБОТЫ

Из анализа напряженного состояния головки рельса представляется возможным сделать следующие выводы:

1. Наиболее напряженным элементом поперечного сечения рельса является головка рельса.

2. Головка рельса в рабочей части под колесом испытывает объемное сжатие. У нижней грани головка испытывает незначительное растяжение.

3. Вследствие того, что головка рельса в рабочей части испытывает всестороннее сжатие с максимумом статических напряжений $\sigma = -3500$ кг/см², а металл рельса при объемном сжатии допускает напряжения порядка 35—40 тысяч кг/см², можно заключить, что главные напряжения при однородном металле не могут быть причиной расслоения головки рельсов.

4. Если главные напряжения не могут быть причиной расслоения головки рельсов, то следовательно, такой причиной должны быть касательные напряжения.

5. Существующие правила расчетов рельсов рекомендуют проверять прочность рельса по кромочным напряжениям в подошве. Вследствие того, что головка является наиболее напряженным элементом рельса, следует расчет рельса на прочность вести в основном по напряжениям в головке, а подошву проверять, чтобы напряжения в ней не превосходили допускаемые.

6. Ввиду того, что в настоящее время нет правил расчета напряжений для головки рельса, отсюда вытекает насущная необходимость разработки этих правил.

7. Существующие правила расчета рельсов на прочность базируются на элементарной теории балок, полагая отношение пролета балки к высоте балки больше 5—10, не учитывают происшедшего изменения в современной конструкции пути, в котором это отношение доходит до 2,8. Рельсы в существующей конструкции пути работают не как простые балки, а как высокие балки и расчет напряжений в головке должен вестись с учетом вышеуказанного отношения.

8. Ввиду дальнейшего усиления пути, проводимого в настоящее время за счет увеличения мощности рельсов, их высоты, увеличения количества шпал на километр, а также будущий переход на монолитный путь вызовут дальнейшее уменьшение соотношения междушпального пролета к высоте рельса. Поэтому требуется всестороннее, глубокое изучение роли касательных напряжений для новых рельсов и новых конструкций пути.

9. Ввиду того, что явления расслоения головки и образование «светлых» пятен происходят не по всему рельсу, а только в отдельных местах, надо предположить, что обязательным условием расслоения головки и образование «светлых» пятен является, наряду с касательными напряжениями, наличие металлургических пороков. Эти металлургические пороки являются концентраторами напряжений и слабым местом в головке рельса. Отсюда следует необходимость предъявления более жестких требований к металлургам о повышении прочностных характеристик и устранения металлургических пороков в металле рельсов.

10. Проведенные исследования дадут возможность более полно оценить напряженное состояние рельса.