

¹⁾Белорусский государственный университет, Минск

²⁾Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ КОЛЕСО-РЕЛЬС

Щербаков С.С.¹⁾, Кухарев Л.П.²⁾, Жук Р.С.¹⁾, Прибыток Д.Г.¹⁾

Stress states of various models of wheel-rail system was studied by photoelasticity method. Roller-roller, roller-ring, ring-ring systems were considered. Distributions of photoelastic isochromes were deciphered by the means of specially developed program. Analysis of the distribution of the maximal tangential stresses for the models of wheel-rail system is performed.

Поляризационно – оптический метод исследования напряжений метод основан на свойстве большинства прозрачных изотропных материалов (стекло, целлулоид, желатин, пластмассы – оптически чувствительные или пьезооптические материалы) становиться при деформации оптически анизотропными, т.е. на возникновении искусственного двойного лучепреломления (т.н. пьезооптического эффекта) [1,2,3]. При этом главные значения тензора диэлектрической проницаемости в пределах упругости линейно связаны с главными напряжениями. Так, например, для пластинки, нагруженной в своей плоскости, одно главное напряжение σ_3 , направленное нормально к пластинке, равно нулю и одна из главных плоскостей оптической симметрии совпадает с плоскостью пластинки. Если на пластинку в круговом поляризаторе падает свет перпендикулярно к её плоскости, то интенсивность света, прошедшего анализатор A , будет равна [1]

$$I = I_0 \sin \frac{\pi \Lambda}{\lambda}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность света, прошедшего поляризатор P , λ – длина волны света лампы S полярископа, $\Lambda_l = Cd(\Delta\sigma) = Cd(\sigma_1 - \sigma_2)$ – оптическая разность хода, d – толщина пластинки, σ_1 и σ_2 – главные напряжения, C – т. н. относительный оптический коэффициент напряжений.

Данное уравнение (уравнение Вертгейма) – основное при решении плоских задач поляризационно–оптического метода исследования напряжений. При просвечивании монохроматическим светом в точках интерференции изображения модели, в которых $\Lambda_l = m\lambda$ (m – целое число), наблюдается погашение света; в точках, где $\Lambda_l = (2m+1)\lambda/2$ – максимальная освещённость.

На изображении модели получают светлые и тёмные полосы разных порядков m (картина полос) [1,2,3]. Точки, лежащие на одной и той же полосе, имеют одинаковую Λ_l , т. е. одинаковые $\Delta\sigma = 2\tau_{\max} = \Lambda_l Cd$ (где τ_{\max} – максимальное касательное напряжение).

При белом свете точки с одинаковыми τ_{\max} соединяются линиями одинаковой окраски – изохромами. Чтобы получить значения $\Delta\sigma$ (или τ_{\max}), в данной точке достаточно определить C для материала модели и измерить компенсатором Λ_l или можно определить σ_0 модели и подсчитать порядок полосы m ($\sigma_0 = \lambda/Cd$ – разность главных напряжений в модели, вызывающих разность хода $\Lambda_l = \lambda$; C и σ_0 получают при простом растяжении, сжатии или чистом изгибе образцов из материала модели). Т. к. при нормальном просвечивании плоской модели можно получить только разность главных напряжений и их направление, то для определения σ_1 и σ_2 в отдельности существуют дополнительные, физико-механические способы измерения $\sigma_1 + \sigma_2$, а также графовычислительные методы разделения σ_1 и σ_2 по известным $\sigma_1 - \sigma_2$ и их направлению, использующие уравнения механики сплошной среды.

Описанный выше метод фотоупругости был использован для изучения нагруженности трибофатических систем [4] ролик-кольцо и кольцо-кольцо, а также контактной пары ролик-ролик. Все рассматриваемые системы были изготовлены из оргстекла. Особенностью данных систем является то, что они являются моделями системы колесо-рельс.

Для определения зависимости типа (1) между интенсивностью света, прошедшего анализатор и $\Delta\sigma$ сжимался квадратный образец толщины $d=4$ мм со стороной $a=40$ мм. Модуль упругости оргстекла равен 3000 МПа. Полученные напряжения в образце были

$$\Delta\sigma = \sigma_1 = F_N / (ad), \quad \sigma_2 = 0, \quad \sigma_3 = 0, \quad (2)$$

Для различных нагрузок (напряжений) наблюдалась различная яркость освещенности образца (рисунок 1).

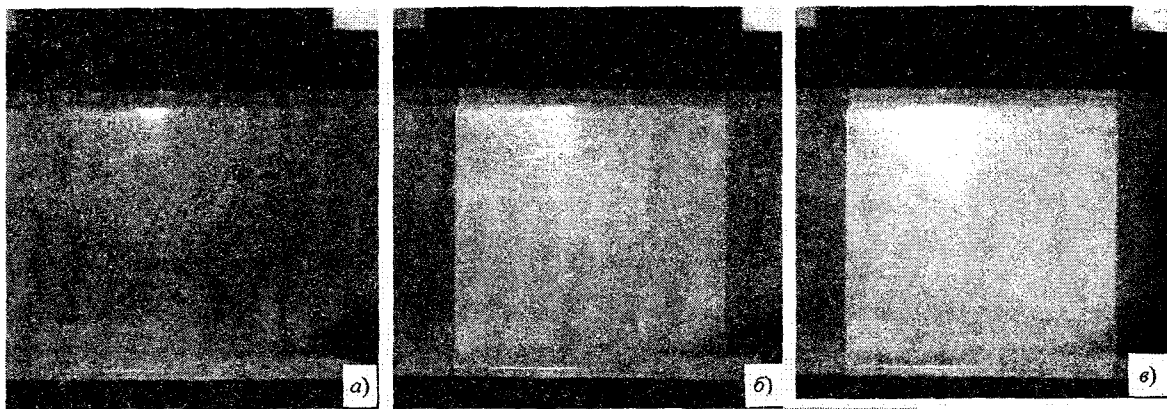


Рисунок 1 – Интенсивность света при а) $F_N=18$ Н ($\Delta\sigma = 1.125 \cdot 10^5$ Па), б) $F_N=3038$ Н ($\Delta\sigma = 1.898 \cdot 10^7$ Па), в) $F_N=3038$ Н ($\Delta\sigma = 3.758 \cdot 10^7$ Па)

В равномерно освещенной области квадрата было найдено среднее значение интенсивности света для каждой конкретной нагрузки. По полученным значениям была построена зависимость $\Delta\sigma(I)$ в виде аппроксимирующего экспериментальные данные полинома:

$$\Delta\sigma = -2.472 + 5.133I - 34954.9I^2 + 83.094I^3, \quad (3)$$

Максимальному значению $\Delta\sigma_{\max}^0 = 3.758 \cdot 10^7$ Па соответствует интенсивность света 190 (рисунок 2).

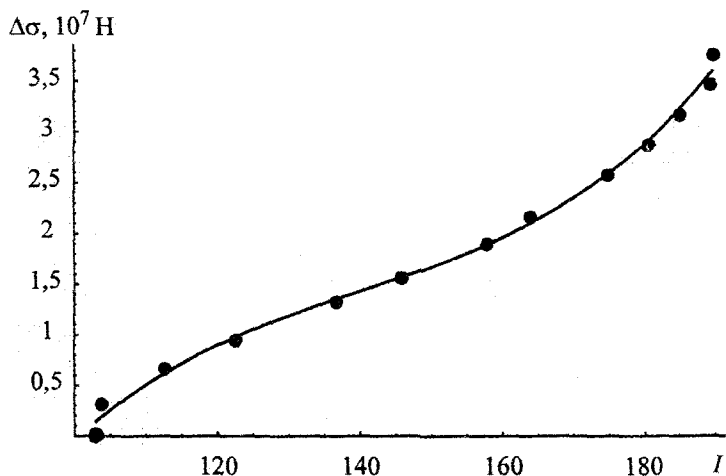


Рисунок 2 – Разность главных напряжений для четверти волны изменения интенсивности света

Рассмотрим теперь две системы ролик-кольцо, а также системы кольцо-кольцо и ролик-ролик. Диаметры ролика и кольца 0,07 м, ширина кольца 0,007 м.

Из рисунка 3 видно, что если в системах ролик-кольцо максимальная разность на внутренней поверхности кольца составляет примерно

$$\Delta\sigma_{\max} \approx m\Delta\sigma_{\max}^0 = 5 \times 3.758 \cdot 10^7 = 1.879 \cdot 10^8 \text{ Па}, \quad (4)$$

то в системе кольцо-кольцо она почти в два раза меньше

$$\Delta\sigma_{\max} \approx 3 \times 3.758 \cdot 10^7 = 1.127 \cdot 10^8 \text{ Па}, \quad (5)$$

а в системе ролик-ролик максимальная разность примерно в два раза меньше

$$\Delta\sigma_{\max} \approx 2 \times 3.758 \cdot 10^7 = 7.516 \cdot 10^7 \text{ Па}, \quad (6)$$

и находится этот максимум под поверхностью контакта.

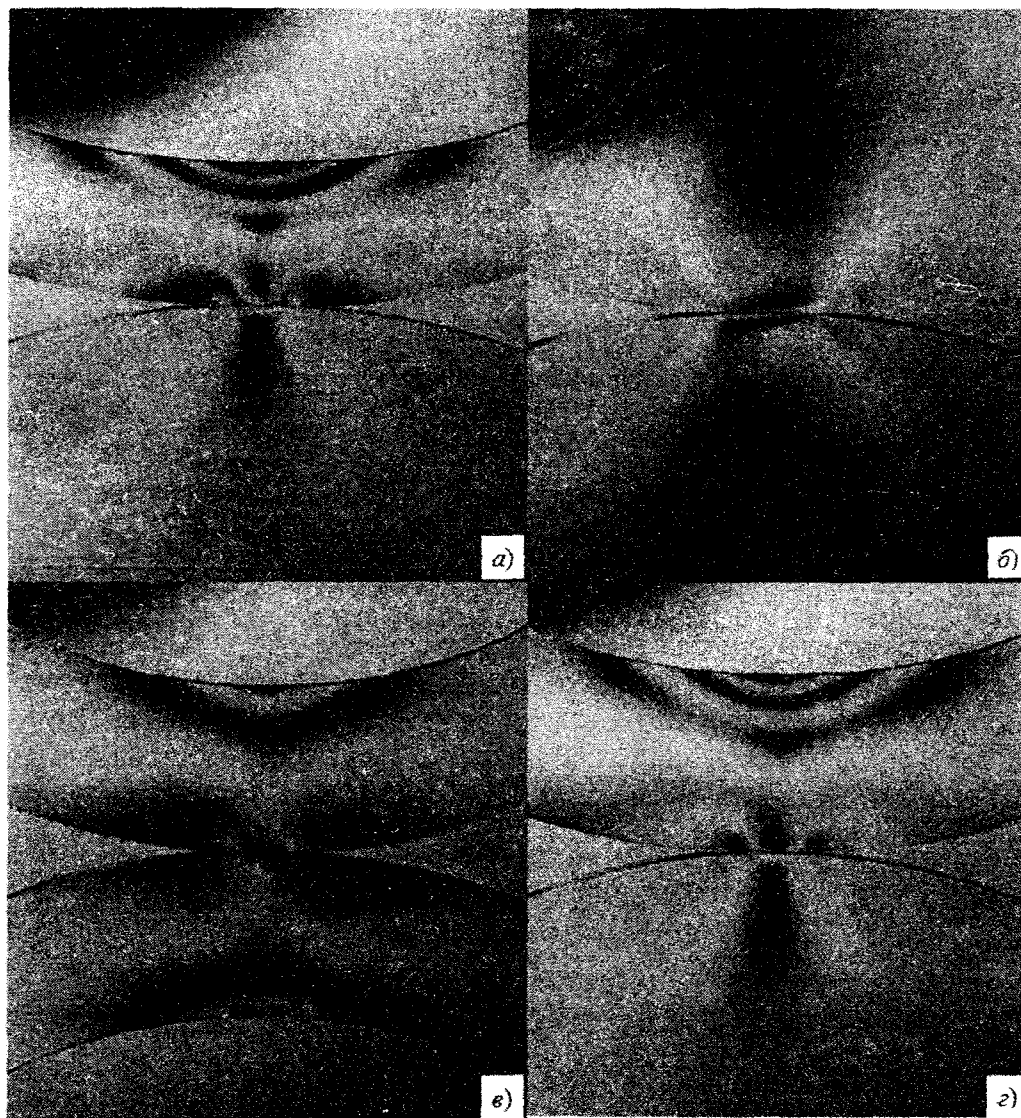


Рисунок 3 – Распределения изохром для $\delta_c \approx 2$ мм в системах
 а) ролик-кольцо (испытание на разлом, $F_N=437.4$ Н), б) ролик-ролик ($F_N=1441$ Н),
 в) кольцо-кольцо ($F_N=289.8$ Н), г) ролик-кольцо ($F_N=472.1$ Н)

Для определения разности напряжений в любой точке испытательной модели (рисунок 4) была разработана специальная программа, принцип работы которой состоит в определении количества волн интенсивности свечения от ближайшей точки, где $\Delta\sigma = 0$ до точки рассмотрения. Если в точке рассмотрения количество

четвертей волны больше некоторого целого m , то к величине $m\Delta\sigma_{\max}^0$ прибавлялось значение $\Delta\sigma$, найденное с помощью формулы (3).

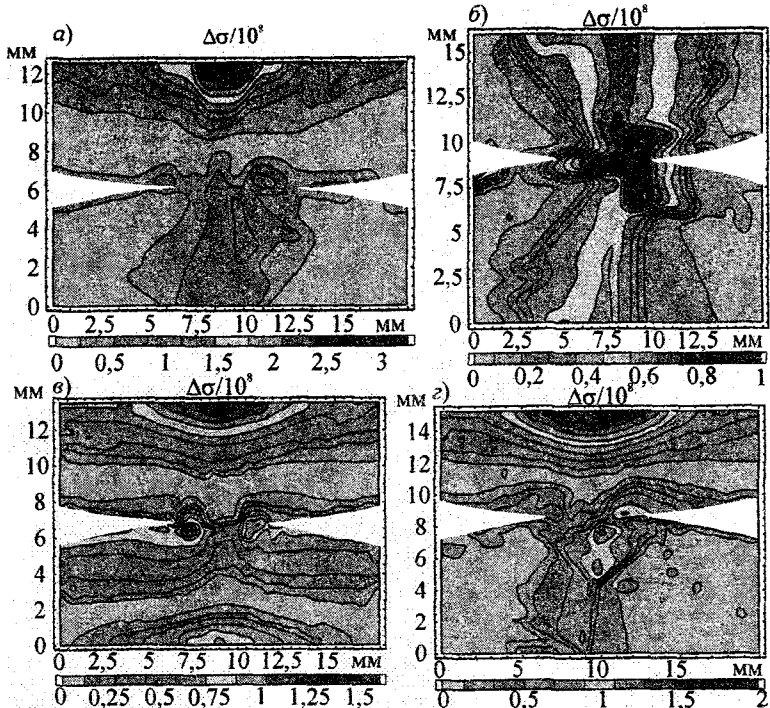


Рисунок 4 – Распределения разности главных напряжений для $\delta_c \approx 2$ мм в системах
 а) ролик-кольцо (испытание на разлом, $F_N=437.4$ Н), б) ролик-ролик ($F_N=1441$ Н),
 в) кольцо-кольцо ($F_N=289.8$ Н), г) ролик-кольцо ($F_N=472.1$ Н)

Из рисунка 4 видно, что разность $\Delta\sigma$ (удвоенные максимальные касательные напряжения $2\tau_{\max}$) примерно в 2 раза больше в кольце (объемно деформируемом элементе) чем в ролике. Максимальные значения $\Delta\sigma$ в целом соответствуют значениям, найденным по формулам (4)–(6).

Рассмотрим теперь сравнение результатов испытаний с расчетными [4]. На левой части рисунка 5 показан результат эксперимента для систем ролик/ролик (сверху) и ролик/кольцо (снизу). Из сравнения левой и правой частей рисунка 5, видно, что конфигурация фотоупругих изохром в качественном отношении соответствует распределениям деформаций, полученным в результате численно-аналитического расчета.

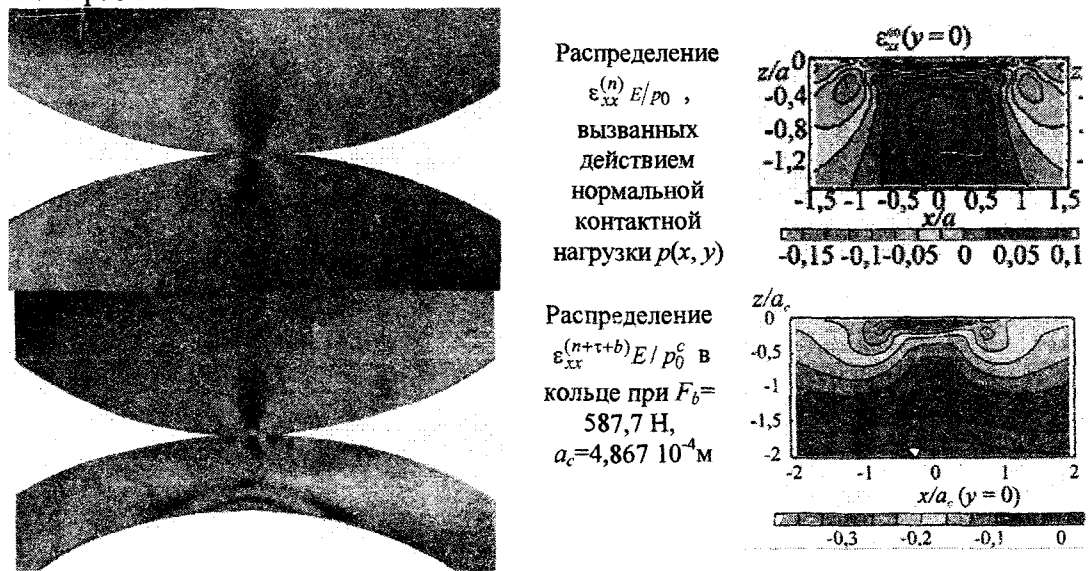


Рисунок 5 – Сравнение фотоупругих изохром с рассчитанными распределениями деформаций

Результаты фотоупругих испытаний показали существенное влияние объемного деформирования на нагруженность моделей системы колесо-рельс. Вследствие объемного деформирования кольца при одинаковой нагрузке перемещение верхней поверхности ролика в системе ролик/кольцо значительно больше, чем в системе ролик/ролик. Из результатов испытаний видно, что рассмотрение системы колесо-рельс как чисто контактной пары может привести к существенно заниженной оценке ее напряженного состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая энциклопедия в 5 томах / гл. редактор А.М. Прохоров. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – Т. 4. – С. 58–59.
2. Стрельчук, Н.А. Метод фотоупругости / Н.А. Стрельчук, Г.А. Хесин. – М.: Стройиздат, 1975. – 312 с.
3. Изучение напряжений методом фотоупругости / Р. Миндлин // Успехи физических наук. – М.,Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. – 1940. – Т. 23, вып. 1. – С. 18–66.
4. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.
5. Щербаков, С.С. Методы анализа напряженного состояния лабораторной модели системы колесо/рельс / С.С. Щербаков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 11. – С. 32–40.

Поступила 25.11.11