

УДК 539.374

С.С. Макаревич, профессор; А.И. Гарост, доцент

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И КОРРОЗИЯ СТАЛИ

The influence of residual stresses on steel corrosion is given on the example of the rail deformed to the limiting state in two main plains and remained in sweet water for 50 years.

Исследовался характер коррозионных разрушений, находящихся в напряженном состоянии изделий из углеродистой стали при длительном воздействии на них пресной воды.

Во время взрыва рельс Р-24 узкоколейной железной дороги был изогнут в двух главных плоскостях изгибающими моментами M_x и M_y (рис. 1). В таком виде он пролежал в реке 50 лет. Рельс существенно повредила коррозия (рис. 2), причем степень поражения различных участков существенно отличается.

Химический состав исходного, не поврежденного коррозией металла (% мас.): С – 0,41; Si – 0,112; Mn – 1,15; S – 0,094; P – 0,083; Cr – 0,0656; V – 0,0469. Такой состав соответствует стали 40Г (ГОСТ 4543-71).

Однако в наиболее растворенной части рельса (пятка) химический состав принципиально отличается от приведенного выше (% масс.): С – 0,0687; Si – 0,102; Mn – 1,20; S – 0,094; P – 0,083; Cr – 0,0656; V – 0,0469. Такой состав соответствует стали 09Г (ГОСТ 4543-71). Коррозия металла протекает на поверхности, и следы продуктов коррозии в его объеме не обнаруживаются. Рельсы изготавливают методом прокатки однородного металла, поэтому такое изменение химического состава, вероятно, связано с малоизученными коррозионными процессами.

Структура неповрежденного коррозией металла (образцы для исследований вырезались в головке рельса на значительном расстоянии от изгиба) ферритоперлитная с округлыми включениями неизвестного происхождения (рис. 3, а), в то же время в наиболее прородированной изогнутой части (пятка рельса) включений перлита значительно меньше (рис. 3, б), а округлые включения вытянуты (деформированы при взрыве).

Представляет интерес сопоставить, как связано повреждение рельса коррозией с остаточными напряжениями, возникшими при деформации рельса в результате взрыва. Замеры радиусов кривизны рельса дали следующие результаты: в плоскости XOZ радиус кривизны $\rho_x = 52$ см, в плоскости YOZ радиус кривизны $\rho_y = 60$ см, где Z – ось рельса; X, Y – главные центральные оси инерции поперечного сечения рельса (рис. 1). Положение нейтральной линии ξ определится углом α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \rho_x / \rho_y = 60 / 52 = 1,154; \alpha = 49,09^\circ.$$

Дальнейший расчет будем производить относительно нейтральной линии ξ , которую назовем нейтральной осью. Ось, перпендикулярную оси ξ , обозначим η . Радиус кривизны рельса в плоскости ηOZ будет равен

$$\rho_\eta = (\rho_x \cdot \rho_y) / \sqrt{(\rho_x^2 + \rho_y^2)} = 52 \cdot 60 / \sqrt{(52^2 + 60^2)} = 39 \text{ см.}$$

Если в рельсе возникают только упругие деформации, то напряжение в произвольной точке поперечного сечения можно определить по формуле

$$\sigma = M_\xi \cdot \eta / I_\xi, \quad (1)$$

где M_ξ – изгибающий момент относительно оси ξ ,

$$M_\xi = M_x \cos \alpha + M_y \sin \alpha;$$

I_ξ – момент инерции поперечного сечения рельса относительно оси ξ ;

η – ордината точки, в которой определяется напряжение.

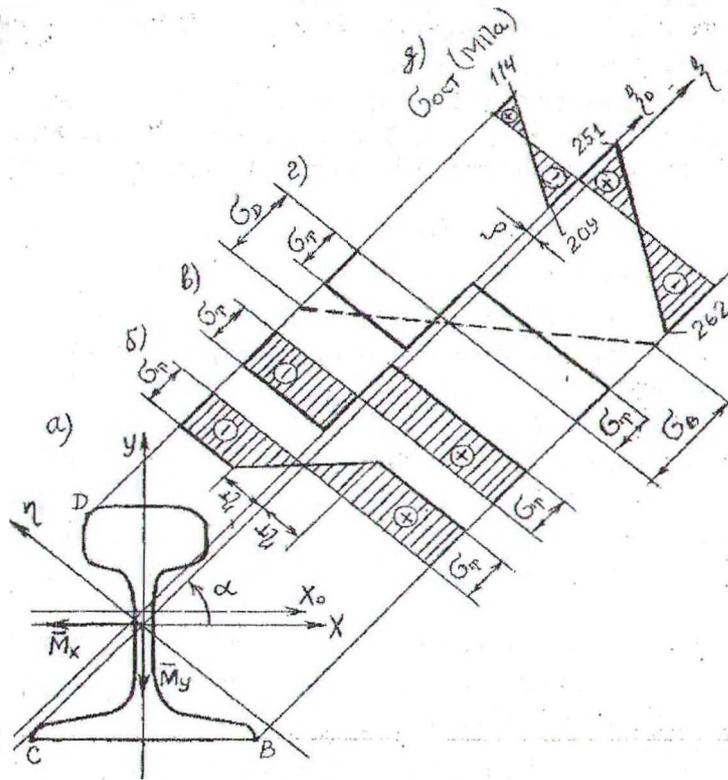


Рис. 1. Эпюры напряжений:

а – сечение рельса; б – напряжения при наличии упругих и пластических деформаций; в – напряжения в предельном состоянии; г – напряжения при нагружении и разгрузке; д – остаточные напряжения

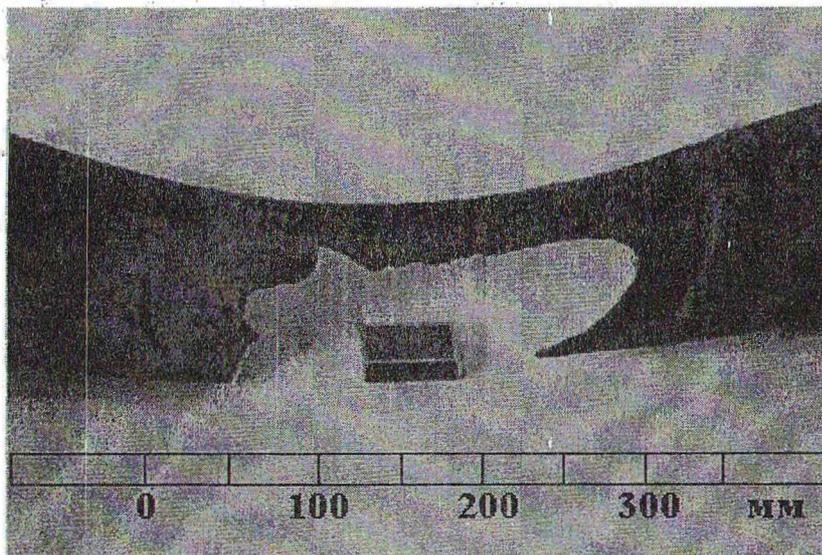


Рис. 2. Рельс, подвергшийся 50-летней коррозии

Для рельса Р-24 площадь поперечного сечения $A = 32,7 \text{ см}^2$, $I_x = 468 \text{ см}^4$, $I_y = 80,6 \text{ см}^4$. Тогда

$$I_\xi = I_x \cos^2 \alpha + I_y \sin^2 \alpha = 468 \cos^2 49,09^\circ + 80,6 \sin^2 49,09^\circ = 246,7 \text{ см}^4.$$

Рельсы узкоколейных железных дорог изготавливались из стали с временным сопротивлением $\sigma_B = 450\text{--}550 \text{ МПа}$ и с пределом текучести $\sigma_T = 220\text{--}240 \text{ МПа}$. Примем $\sigma_T = 230 \text{ МПа}$.

Рассматриваемая сталь является достаточно пластичной, и в этом случае для расчетов за пределами упругости можно использовать схематизированную диаграмму растяжения идеального упругопластического тела [1].

При достаточно большом изгибающем моменте M_z в рельсе будут возникать и упругие, и пластические деформации (рис. 1, б). В соответствии с принятой схематизированной диаграммой, напряжения в пластической зоне будут изменяться по линейной зависимости:

$$\sigma = (\eta / \rho_\eta) \cdot E, \quad (2)$$

где E – модуль упругости стали ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа).

Для границы области текучести $\eta = \eta_T$, а $\sigma = \sigma_T$.

Подставляя эти значения в формулу (2), определим расстояние от оси ξ до зоны текучести для исследуемого рельса

$$\eta_T = (\xi \cdot \rho_\eta) / E = 230 \cdot 0,39 / 2,1 \cdot 10^5 = 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ мм}.$$

Это очень малая величина по сравнению с размерами поперечного сечения рельса. Поэтому будем считать, что пластические деформации распространены по всему сечению. Эпюра напряжений для этого случая представлена на рис. 1, в. Ее можно использовать для определения остаточных напряжений [1]. Состояние, представленное на рис. 1, в, называют предельным.

При появлении пластических деформаций нейтральная ось ξ незначительно смещается. Для определения положения нейтральной оси ξ_0 в предельном состоянии используем условие равенства нулю нормальной силы:

$$\int_{A_p} \sigma_T dA - \int_{A_c} \sigma_T dA = 0,$$

где A_p и A_c – площади растянутой и сжатой частей поперечного сечения рельса.

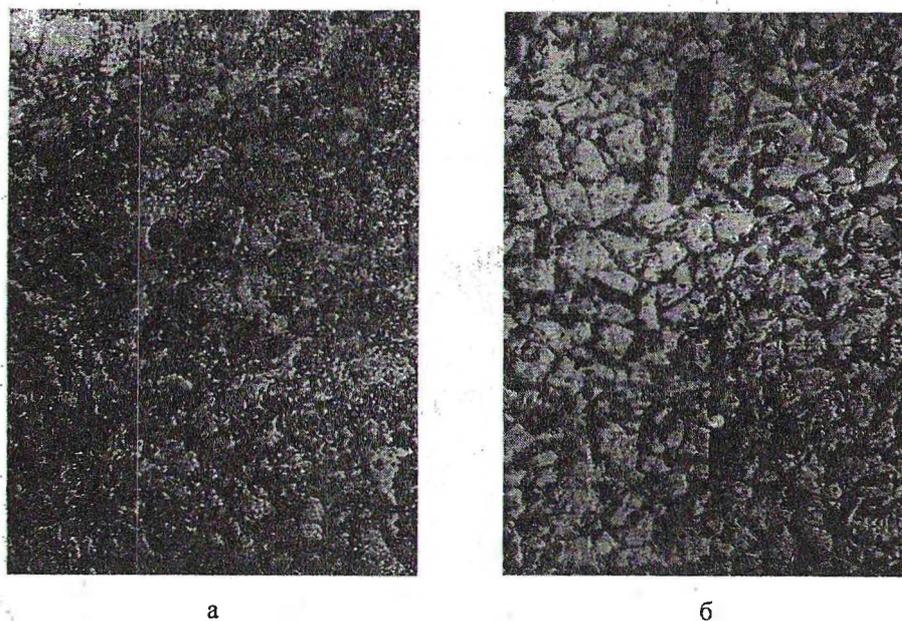


Рис. 3. Микроструктура стали ($\times 100$):

а – неповрежденного металла в головной части рельса; б – в месте интенсивной коррозии в изогнутой части пятки рельса

Из последнего выражения следует, что $A_p = A_c$, т. е. ось ξ_0 делит поперечное сечение рельса на две равные части. Подсчёты показывают, что ось ξ_0 смещена от оси ξ на величину $\delta = 3$ мм в сторону обуха рельса.

Определим предельный изгибающий момент через напряжения, соответствующие предельному состоянию рельса:

$$M_{\text{пр}} = M_{\xi_0} = \int_{A_p} \sigma_T \eta \, dA - \int_{A_c} \sigma_T \eta \, dA = \sigma_T (S_{\xi_0(p)} - S_{\xi_0(c)}),$$

где $S_{\xi_0(p)}$, $S_{\xi_0(c)}$ – значения статических моментов относительно нейтральной оси ξ_0 растянутой и сжатой частей поперечного сечения рельса.

Для рассматриваемого рельса $S_{\xi_0(p)} = -42900 \text{ мм}^3$, $S_{\xi_0(c)} = 32640 \text{ мм}^3$. Тогда предельный сгибающий момент

$$M_{\text{пр}} = 230 \cdot 10^6 (-32640 - 42900) \cdot 10^{-9} = -17370 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Примерно такой же сгибающий момент появился в рельсе в результате деформирования его взрывом. После взрыва изгибающий момент исчез, но в рельсе остались остаточные напряжения. Согласно теореме о разгрузке, остаточные напряжения равны разности между истинными напряжениями в упругопластической стадии, возникшими в рельсе при взрыве, и теми напряжениями, которые создались бы в ней моментом $M_{\text{пр}}$ при предположении об идеальной упругости материала. На рис.1, в эпюра напряжений при нагружении показана сплошной линией, а эпюра напряжений при разгрузке – пунктирной.

Определим остаточные напряжения в характерных точках В, С, D рельса. Ординаты этих точек в системе координат $\xi_{0п}$ равны :

$$\eta_B = -69,86 \text{ мм}, \eta_C = -0,34 \text{ мм}, \eta_D = 48,80 \text{ мм}.$$

Тогда

$$\sigma_{B(\text{ост})} = \sigma_T - (M_{\text{пр}} \cdot \eta_B) / I_{\xi} = 230 \cdot 10^6 - (-17370 \cdot (-69,86 \cdot 10^{-3})) / (246,7 \cdot 10^{-8}) = -262 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$\sigma_{C(\text{ост})} = \sigma_T - (M_{\text{пр}} \cdot \eta_C) / I_{\xi} = 230 \cdot 10^6 - (-17370 \cdot (-0,34 \cdot 10^{-3})) / (246,7 \cdot 10^{-8}) = 228 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$\sigma_{D(\text{ост})} = -\sigma_T - (M_{\text{пр}} \cdot \eta_D) / I_{\xi} = -230 \cdot 10^6 - (-17370 \cdot 3 \cdot 10^{-3}) / (246,7 \cdot 10^{-8}) = 114 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Остаточные напряжения у оси ξ_0 будут равны:

а) выше оси ξ_0

$$\sigma_{\text{ост}} = -\sigma_T - (M_{\text{пр}} \cdot \delta) / I_{\xi} = -230 \cdot 10^6 - (-17370 \cdot 3 \cdot 10^{-3}) / (246,7 \cdot 10^{-8}) = -209 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

б) ниже оси ξ_0

$$\sigma_{\text{ост}} = \sigma_T - (M_{\text{пр}} \cdot \delta) / I_{\xi} = 230 \cdot 10^6 - (-17370 \cdot 3 \cdot 10^{-3}) / (246,7 \cdot 10^{-8}) = 251 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Исследования рельса после извлечения из воды показали, что наибольшей коррозии подверглись участки с большими растягивающими остаточными напряжениями. Особенно пострадала подошва рельса, прилегающая к точке С, и стенка рельса ниже оси ξ_0 , что подтверждается фотографией (рис. 2).

Таким образом, при проектировании стальных конструкций и машин, работающих в условиях, способствующих коррозии, следует избегать остаточных растягивающих напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1968 – 400 с.