

А.Н. САВОСЬКИН, д-р. техн. наук, профессор, МИИТ (Россия)
Н.Н. ЛЯПУШКИН, канд. физ.-мат. наук, доцент, МИИТ (Россия)

КИНЕТИКА ПРОЦЕССА СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСО-РЕЛЬС

Розглянуто фізичну модель процесу взаємодії колеса і рейки в часі, що включає стадію встановлення механічного контакту, у результаті якого створюються активні центри, на їхніх поверхнях, і стадію фізичного контакту, що викликає утворення вузлів схоплювання між колесом і рейкою. Запропоновано вираз, що дозволяє обчислити силу зчеплення колеса і рейки.

Рассмотрена физическая модель процесса взаимодействия колеса и рельса во времени, включающая стадию установления механического контакта, в результате которого создаются активные центры, на их поверхностях, и стадию физического контакта, вызывающего образование узлов схватывания между колесом и рельсом. Предложено выражение, позволяющее вычислить силу сцепления колеса и рельса.

The process of a wheel and a rail coupling is considered as the short-term physical interaction of surfaces of a wheel and a rail according to the basic concepts of solid body physics.

В работе [1] нами была предложена физическая модель сцепления «колесо – рельс», основанная на явлении схватывания, то есть установлении кратковременной физической связи определённых участков контактируемой поверхности «колесо – рельс». В настоящей работе делается попытка рассмотреть процесс образования сцепления во времени.

Известно, что при одновременном действии нормальных W и тангенциальных S сил возможно два случая: $\frac{S}{W} \geq f$ и $\frac{S}{W} \leq f$, где f – коэффициент трения [2]. В первом случае происходит взаимное перемещение сжатых деталей и при значительной скорости их взаимный нагрев и разрушение окисных плёнок на их поверхностях.

При соотношении $\frac{S}{W} \leq f$ не происходит макроперемещений. Однако процесс «схватывания» поверхностей имеет место [3]. В данной работе экспериментально показано, что в результате действия тангенциальных сил прочность сваривания холодной сваркой увеличивается в 3...5 раз. Полученный эффект объясняется облегчением условий пластической деформации при совместном действии нормальных σ и касательных τ напряжений.

По условию Мизеса пластическая деформация наступает под действием τ , входящих в уравнение $\sigma^2 + 3\tau^2 \geq \sigma_m^2$.

Эффективность совместного действия нормальных и тангенциальных сил подтверждается работой С.Б. Айнбиндера [4], в которой показано, что «сдвиг» при сварке и малом нормаль-

ном напряжении, не вызывающем нелинейной деформации, может образовывать узлы схватывания на отдельных участках контактирующих поверхностей, причём прочность на отрыв в этом случае будет не велика.

Таким образом, основная роль в процессе схватывания (установления физической связи между колесом и рельсом) принадлежит пластической деформации в зоне контактирующих поверхностей.

Кинетика процесса сцепления колеса с рельсом представляет собой временную зависимость числа узлов схватывания, величина которых определяется нормальными и тангенциальными напряжениями в зоне контакта и окисными плёнками на их поверхностях. Результирующая скорость процесса схватывания определяется в основном скоростями протекания двух стадий: стадии образования механического контакта и стадии физического взаимодействия поверхностей. Механический контакт достигается пластической деформацией микровыступов за счёт нормальных напряжений и разрушением окисной плёнки, особенно разрушения которой будут рассмотрены отдельно. Подробно остановимся на стадии установления физического контакта, так как именно эта стадия определяет процесс сцепления (число схватываний) «колесо – рельс». В реальном случае образование механического и физического контактов во времени строго не разграничены и частично перекрываются, так как задолго до завершения первой стадии по всей поверхности контакта на отдельных участках становится возможным процесс схватывания. Скорость образования связей, в основ-

ном, зависит от скорости создания активных центров на сближаемых поверхностях. При наличии таких центров схватывание происходит мгновенно с выделением энергии [4].

Образование активных центров в общем случае возможно: механически при удалении части металла; при движении дислокаций, сопровождающих пластическую деформацию; термически при нагреве, сопровождаемом диффузией и самодиффузией, вызывающими искажения кристаллической решётки; бомбардировкой ионами высокой энергии [5].

В случае сцепления колеса с рельсом образование активных центров обусловлено пластической деформацией и нагревом при скольжении колеса по рельсу. Роль дислокаций в процессе схватывания поверхностей подробно рассмотрена в [6, 7, 8]. Плотность дислокаций в зависимости от наклепа в металле достигает $10^6 \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Пластическая деформация возникает за счет появления новых дислокаций. Принципиально важный вывод этих работ – центр схватывания и размер пятна схватывания не ограничиваются точкой выхода дислокаций на поверхность. Фактически, в схватывании участвуют все атомы, расположенные в зоне заметного упругого искажения кристаллической решётки, вызванного выходом дислокаций на поверхность. Линейный размер этого искажения достигает сотых долей миллиметра. Кроме того, совместная деформация колеса и рельса с выходом дислокаций на контактную площадку упрощает процесс схватывания. Схватывание начинается вблизи выхода дислокаций и, продолжаясь далее как «цепная реакция», оно поддерживается освобождающейся поверхностной энергией колеса и рельса и суммируется с энергией упругого искажения. Кинетика сцепления определяется скоростью и числом образующихся активных центров. При увеличении температуры в зоне контакта колеса с рельсом увеличивается число активных центров за счёт диффузии и самодиффузии дефектов в теле колеса и рельса. Число активных центров при температуре 800°C у сильно наклепанного металла возрастает более чем в два раза по сравнению с комнатной температурой.

В работе [9] методом конечных элементов были получены распределение нормальных σ и тангенциальных τ напряжений на контактной площадке «колесо – рельс». Максимальное значение нормального напряжения $\sigma_{\text{max}} = 1589 \text{ Мпа}$ в центре «фактического» пятна при нагрузке на ось 300 кН , на периферии этого пятна напряжения составляют от 800 до 956 Мпа в зависимо-

сти от состояния поверхности бандажа. Минимальные значения тангенциальных напряжений на поверхности данного пятна касания составляют 130 Мпа по поперечной и 142 Мпа по продольной осям. При указанных значениях нормальных и тангенциальных напряжений, в соответствии с условием Мизеса, по всей площади фактического пятна касания колеса и рельса в последнем возникает пластическая деформация. Это означает, что выполняется необходимое условие для возникновения активных центров по всей поверхности площадью $S_0 = \pi a v = 1,46 \text{ см}^2$, $a = 6,95 \text{ мм}$; $v = 6,68 \text{ мм}$. Достаточным условием для возникновения физической связи «колесо – рельс» является отсутствие окисной плёнки на поверхности рельса. Безусловно, в силу различных причин на отдельных участках поверхности контакта выполняется достаточное условие для образования «мостиков» физической связи, но число их, по-видимому, незначительно. На наш взгляд, единственный способ очистки контакта от окисной плёнки – пробуксовка (принудительное скольжение). Количественно пробуксовка определяется относительной скоростью скольжения колёсной пары $\varepsilon = v_c / (v_c + v)$. По-видимому, сила сцепления колеса с рельсом пропорциональна числу неразрушенных «мостиков» (центров захвата), число которых равно $N = N_3 - N_p$, где N_3 – число центров захвата на площадке S_0 ; N_p – число разрушенных центров на той же площадке. Тогда сила сцепления $F_{\text{сц}}$ может быть записана в виде

$$F_{\text{сц}} = F_i(N_3 - N_p),$$

где F_i – суммарная сила взаимодействия отдельного центра захвата на контактной площадке. Число центров захвата найдем по формуле

$$N_3 = n_d S_0 \varepsilon,$$

где S_0 – фактическая поверхность контакта; n_d – концентрация дислокаций.

Примем $n_d = 10^9 \text{ см}^{-2}$; $\varepsilon = 0,04$. Тогда $N_3 = 5 \cdot 10^7$. Число центров разрушения $N_p = F_k / F_i$, где F_k – касательная сила тяги.

Допустим, что $F_k = 30 \text{ кН}$. Величину F_i найдем как $F_i = f_i N_{\text{ц}}$, где f_i – сила взаимодействия между структурными единицами рельса и колеса, равная силе взаимодействия структурных единиц (атомов в металле); $N_{\text{ц}}$ – число возможных точек захвата.

Число структурных единиц найдем из выражения

$$N_{\text{ц}} = \frac{S_w}{S_i},$$

где S_i – площадь действия сил структурной единицы; S_w – площадь искажения кристаллической решетки на поверхности рельса, связанная с выходом дислокации на поверхность, в пределах которой устанавливается взаимодействие между атомами колеса и рельса.

Радиус искажения составляет порядка 10^{-6} м. Радиус действия сил атомов в металле (r_0) составляет порядка 10^{-10} м. Тогда

$$N_{\text{ц}} = \pi(10^4 r_0)^2 / (\pi r_0)^2 = 10^8.$$

Примем, что сила взаимодействия атомов в металле f_i равна силе взаимодействия атомов связи колеса и рельса:

$$f_i = \frac{u_0}{N_A 2r_0} = 10^{-9} \text{ н},$$

где u_0 – энергия связи в металле, порядка 10^6 Дж/моль.

В этом случае $f_i = 10^{-11}$ н, $F_i = f_i N_{\text{ц}} = 10^{-3}$ н; N_A – число Авагадро.

Значение силы сцепления колеса с рельсом равно:

$$F_{\text{сц}} = F_i(N_s - n_p) = 10^{-3}(5 \cdot 10^7 - 30 \cdot 10^3 / 10^{-3}) = 20.$$

Эта величина полностью соответствует обычным представлениям о величине силы сцепления, реализуемой при нагрузке от одного колеса на рельс 100 кН и коэффициенте сцепления 0,2.

Таким образом, на основе предложенной физической модели удалось получить величину силы сцепления соответствующую реальным

значениям, наблюдаемым на практике. Это означает, что предложенная физическая модель правильно описывает процесс сцепления колеса с рельсом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савоськин А. Н., Ляпушкин Н. Н. К вопросу о механизме сцепления колесо-рельс подвижного состава // Тез. научн.-практ. конф. «Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути» – М.: Интекст, 2003. – 192 с.
2. Гельдман А. С. Основы сварки давлением. – М.: Машиностроение, 1970. – 312 с.
3. Красулин Ю. Л. Роль дислокаций при образовании соединения при сварке // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1965. – № 7.
4. Айбиндер С. Б. Холодная точечная сварка листового металла // Сварочное производство. – 1963. – № 7.
5. Караказов Э. С. О кинетике процесса образования соединения при сварке в твёрдом состоянии // Физика и химия обработки металлов. – 1968. – № 3.
6. Рыкалин Н. Н., Красулин Ю. Л. Физические и химические проблемы соединения материалов // Изв. АН СССР: Неорганические материалы. – № 1. – 1965.
7. Дьяченко В. В., Никифоров Г. Д. О механизме образования соединений при сварке и пайке // Сварочное производство. – 1967. – № 12.
8. Логинова А. Я., Макаров В. А. Холодная сварка стали // Сварочное производство. – 1966. – № 9.
9. Петров С. Ю. Закономерности протекания процессов при работе трибосистемы колodka – колесо – рельс // Автореф. ... д.т.н. – М., МИИТ. 2002.