

УДК 621.762.4:621.791

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛАКИРОВАНИЯ СТАЛИ ПРОКАТКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПОРОШКАМИ

Ю. Л. БОБАРИКИН⁺, Н. И. СТРИКЕЛЬ, А. М. УРБАНОВИЧ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, пр. Октября 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

Изучены основные закономерности плакирования стали прокаткой металлическими порошками без предварительного нагрева. Даны рекомендации по совершенствованию данного технологического процесса.

Введение

Процесс плакирования прокаткой стальной основы алюминием, медью и другими металлами позволяет получать композиционный многослойный материал, используемый в дальнейшем для изготовления подшипников скольжения, изделий с защитными покрытиями и др. Способ заключается в одновременной прокатке стальной основы, например, в виде полосы и плакирующего порошкового металла, наносимого на поверхность основы. Наносимый рабочий плакирующий слой может иметь различные функциональные назначения, он может иметь антифрикционные, износостойкие, защитные и другие свойства. Способ позволяет экономить дорогостоящие материалы за счет использования относительно дешевой основы, а также является высокопроизводительным и малоэнергоёмким процессом. Основной проблемой данного процесса является получение качественного работоспособного соединения слоев. Для решения этой проблемы разработаны основные закономерности образования соединения при плакировании прокаткой.

Получение качественного соединения между плакируемой сталью и плакирующим слоем связано с проведением определенной последовательности технологических операций, реализуемых с соблюдением определенных режимов. Основной особенностью плакирования стали порошковыми покрытиями является совместная прокатка стали и порошка без предварительного нагрева. Это связано с исключением окисления порошкового материала, так как проводить прокатку в защитной среде с применением нагрева экономически не выгодно. Более целесообразно проводить дополнительный нагрев после прокатки.

В этой связи определены следующие основные технологические операции плакирования: подготовка поверхности стали, совместная про-

катка порошка и стали, термообработка плакированной стали, уплотняющая прокатка.

Перед плакированием поверхность полосовой стали подвергается обработке вращающейся металлической щеткой. Такая обработка позволяет очистить поверхность от загрязнений и получить шероховатость, способствующую сцеплению с плакирующим порошковым слоем за счет увеличения поверхности контакта и за счет элементов механического сцепления.

Следующим технологическим переходом является совместная прокатка стальной подложки и порошка (рис. 1).

Целью этой операции является формирование слоя покрытия из порошка и его схватывание. Операция термообработки плакированной стали порошковым покрытием позволяет спечь порошковый слой и одновременно закрепить его более прочными связями с поверхностью стали. После термообработки дополнительная уплотняющая прокатка калибрует размеры и форму полосы, искажённую после спекания, уплотняет порошковый слой и улучшает адгезию покрытия дополнительной механической активацией.

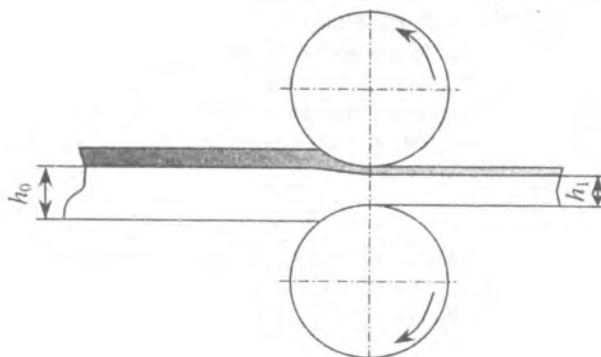


Рис. 1. Схема плакирования стали порошковым слоем прокаткой

⁺ Автор, с которым следует вести переписку.

Постановка задачи и её решение

Каждая из перечисленных операций существенно влияет на качество плакируемого слоя. Однако, основная доля ответственности за качество покрытия, несомненно, ложится на операцию совместной прокатки полосовой стали и порошка плакирующего материала. Для того чтобы формируемый слой во время прокатки соединился с поверхностью стали необходимо, чтобы время деформации материалов в очаге деформации между волками не превышало время активации зоны соединения, которое, в свою очередь, не должно превышать время релаксации внутренних напряжений соединяемых материалов, получивших после деформации дополнительное упрочнение. Если допустить, что время активации меньше времени совместной деформации, то металл не схватывается в зоне контакта, и соединение не образуется. Если же это условие выполняется, но не выполняется условие достаточной разгрузки внутренних напряжений, т. е. релаксации, то после прокатки остаточные напряжения вызовут большие упругие остаточные деформации, которые могут разорвать имеющиеся узлы схватывания, образованные при активации, и разрушить соединение. В этой связи необходимо процесс прокатки проводить с учётом выполнения указанных условий. Но для этого необходимо определить длительность протекания рассматриваемых процессов в зоне контакта.

Для количественной оценки времени совместной деформации можно применить формулу:

$$t_g = \frac{\sqrt{R \Delta h}}{v} \quad (1)$$

Для количественной оценки времени релаксации введем некоторые предположения. В случае плакирования стали порошками более твердых материалов сравнительно со сталью формируемый порошковый слой пслучит растрескивание под действием растягивающих напряжений. Поэтому для успешного плакирования необходимо подбирать порошковые композиции с большей пластичностью по сравнению со сталью. Активация поверхности связана с возникновением поверхностных активных центров, являющихся местом выхода к поверхности дефектов структуры, в частности, дислокаций или деформационными выступами с пачками скольжения. Активный центр представляет собой поля упругих искажений решетки [1]. В активном центре имеет место разрыв межатомных связей и возможность взаимодействия с соединяемым материалом с образованием металлической связи. При плакировании стали более мягкими порошками необходимо образование активных центров на поверхности более твердого из соединяемых материалов, т. е. на стали. В противном случае соединение не образуется, т. к. активность должна возникнуть из двух соединяемых сторон.

В случае, когда активным центром является дислокация с полем напряжений, длительность

активации всей контактной поверхности при любом способе сварки без расплавления, т. е. для описываемого способа, можно выразить в следующем виде [2]:

$$t_a = \frac{\ell b}{\dot{\epsilon} S_a} \quad (2)$$

Величину $\dot{\epsilon}$ можно определить по формуле [3]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v \Delta h}{\sqrt{R \Delta h} h_0} \quad (3)$$

Величина S_a в условиях соединения на воздухе равна площади области, прилегающей к ядру дислокации. Учитывая деформацию полосы обычно в пределах 10–40%, можно принять, что площадь активного центра равна обратной величине плотности дислокаций при данном диапазоне степеней деформаций. Плотность дислокаций можно определить по формуле [3]:

$$\rho_g = 10^8 N^{1/3} \epsilon.$$

Величину ℓ принимают равной $\rho_g^{-1/2}$.

Учитывая, что плакирование производится без значительного дополнительного нагрева, диффузионные процессы активации не присутствуют.

Для количественной оценки времени релаксации внутренних напряжений существуют объективные трудности, встречаемые многими исследователями [4]. Чаще это явление изучают поляризационно-оптическими методами на моделях из прозрачных материалов.

Практически для оценки времени релаксации при высоких температурах деформации используют зависимость в виде [5]:

$$t_p = t_0 \exp\left(\frac{U}{kT}\right) \quad (4)$$

При холодной деформации присутствует только деформационный нагрев. Скорость деформации при плакировании прокаткой не превышает 15 с^{-1} . При таких скоростях холодной деформации тепловыделение существенно не влияет на кинетику физико-химических явлений в макрообъёмах материалов [4]. Поэтому в формуле (4) можно применить упрощенную формулу, определяющую температуру полосы после прокатки с учетом деформационного тепловыделения [7]:

$$T = T_0 + 0,42 P_{cp} V \ln(h_0/h_1) / c_p \quad (5)$$

Величина U в формуле (4) обычно связывают с диффузионными процессами, имеющими место при высокотемпературных деформациях. При холодных деформациях представляется целесообразным связать эту величину с величиной потенциальной энергии упругой деформации. В первом приближении можно утверждать, что эти величины пропорциональны, т. е.

$$U = aW \quad (6)$$

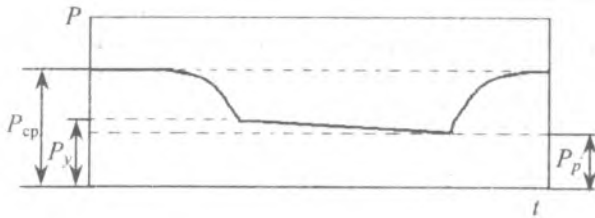


Рис. 2. Принципиальный вид кривой записи измерения усилия прокатки P с остановкой в зависимости от времени t

Величина W определяется по формуле

$$W = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y. \quad (7)$$

Т. к. $\sigma_y = E \varepsilon_y$, где E модуль упругости, то с учетом (7) выражение (6) примет вид:

$$U = \frac{a E \varepsilon_y^2}{2}. \quad (8)$$

С учетом (8) выражение (4) примет вид

$$t_p = t_0 \exp\left(\frac{a E \varepsilon_y^2}{2 k T}\right). \quad (9)$$

Величины a и ε_y определяются экспериментально по разработанной методике с остановкой процесса прокатки посередине полосы с записью на самописце изменения усилия прокатки. Прокатка ведется с максимальной скоростью. В этом случае

получают зависимости, представленные на рис. 2.

Начальный и конечный отрезки линии на рис. 2 соответствуют прокатке с величиной усилия прокатки $P_{сп}$. При остановке прокатки фиксируется упругая составляющая усилия прокатки P_y , с помощью которого можно определить.

$$\varepsilon_y = \frac{P_y}{E b_{сп} \sqrt{R \Delta h}}. \quad (10)$$

Коэффициент a определяется по скорости падения нагрузки от $P_{сп}$ до P_y и от P_y до P_p при остановке процесса прокатки.

При холодной деформации разгрузка внутренних напряжений в e раз не происходит, в отличие от горячей деформации. Плакирование стали осуществляется не с полной релаксацией, так как она имеет высокую релаксационную стойкость. Поэтому достаточная релаксация должна происходить в более пластичном порошковом слое, который может состоять из Pb, Sn, Al, Zn, Cu, Ti.

Результаты экспериментов и выводы

На рис. 3 представлены зоны соединения в плакированной стали 08кп, покрытие из медного порошка ПМС1.

При соблюдении условия $t_g > t_a > t_p$ было получено соединение (рис. 3, а), где видна хорошая адгезия. А при условии $t_g > t_a < t_p$ было получено соединение (рис. 3, б), на котором видно отслоение под действием остаточных напряжений.

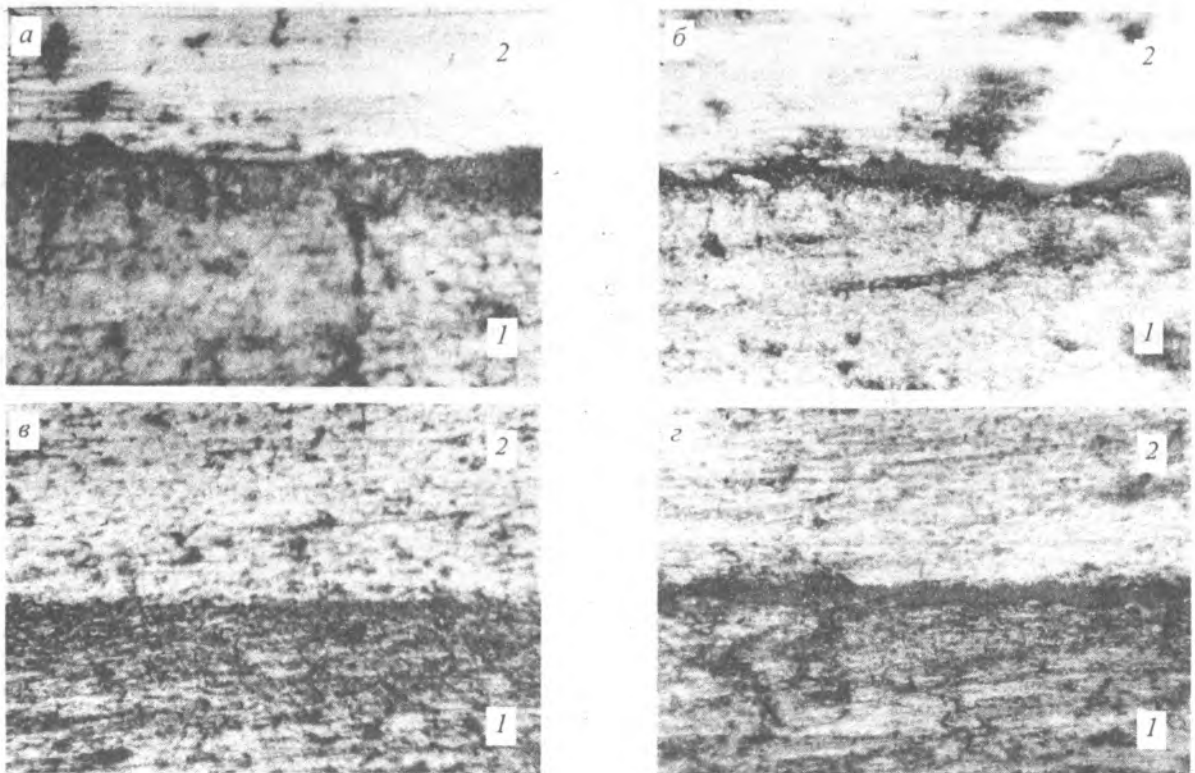


Рис. 3. Зона соединения после прокатки (а, б) и прокатки с последующей термообработкой (в, г): 1 – основа; 2 – плакирующий слой. Увеличение $\times 500$

Для получения требуемой адгезии покрытия к основе проводилась дополнительная термообработка в защитных средах, которая за счет диффузионных процессов улучшает качество соединения (рис. 3, в), полученного прокаткой (рис. 3, а). В случае если имелось расслоение после прокатки (рис. 3, б), то и после спекания дефект сохранялся (рис. 3, з).

Таким образом, в результате проведенных исследований определены основные закономерности плакирования стали прокаткой порошковыми материалами. Плакирующий материал может быть представлен и в виде тонкого компактного материала.

Обозначения

R – радиус прокатных валков; Δh – абсолютное обжатие стальной полосы; v – линейная скорость вращения валков; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации в зоне соединения; b – модуль вектора Бюргерса; S_a – площадь активного центра; ℓ – путь движения дислокации до барьера; h_0 – высота стальной полосы до прокатки; t_0 – период собственных колебания атомов около равновесного положения в твёрдом теле [6], $t_0 = 10^{-13}$ с; $k = 1$ МН/(м²·°С) – постоянная Больцмана; U – энергия активации

процесса, контролирующего релаксацию внутренних напряжений; T – абсолютная температура; T_0 – температура полосы до прокатки, $T_0 = 293$ К; P_{cp} – среднее давление прокатки; V – объем полосы; c – удельная теплоемкость металла полосы; ρ – плотность металла полосы; W – потенциальная энергия упругой деформации; a – коэффициент пропорциональности; ϵ_y – величина упругих деформаций; b_{cp} – средняя ширина полосы; N – исходная плотность дислокаций; ϵ – степень деформации.

Литература

1. Багин В. А., Квасницкий В. Ф., Котельников О. И. и др. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки: Учебник для ВУЗов. Москва: Машиностроение (1991)
2. Каракозов Э. С. Соединение металлов в твердой фазе. Москва: Металлургия (1976)
3. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. Пер. с англ. Москва: ИЛ. (1962)
4. Красулин Ю. Л., Назаров Г. В. Микросварка давлением. Москва: Металлургия (1976)
5. Кракозов Э. С., Орлова Л. М., Пешков В. В. и др. Диффузионная сварка титана. Москва: Металлургия (1977)
6. Френнел Я. И. Введение в теорию металлов. Издание четвертое. Ленинград: Наука (1972)
7. Грудев А. П. Теория прокатки. Учебник для ВУЗов. Москва: Металлургия (1988)

Bobarikin Y. L., Strikel N. I., Urbanovich A. M.

Main regularities of steel cladding by joint rolling with metal powders.

Main regularities of steel cladding by joint rolling with metal powders without preliminary heating have been studied. The recommendations for the process improvement have been developed.

Поступила в редакцию 23.06.1999.

© Ю. Л. Бобарикин, Н. И. Стрикель, А. М. Урбанович, 2000.