

перечному сечению, что не всегда оговаривается НД, но, безусловно, повышает технологичность катанки при волочении, даже при наличии промежуточной термообработки в метизных цехах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство углеродистой катанки / В. В. Филиппов, А. Б. Стеблов, С. А. Исаков // Литье и металлургия. – 2000. – № 1. – С. 65 – 75.
2. Новая технология двухстадийного охлаждения проката на стане 150 после реконструкции / А. А. Горбанев, Е. А. Евтеев, Б. Н. Колосов и др. // Сталь. – 1997. – № 10. – С. 56 – 59.
3. Зюзин В. И. Освоение технологии воздушного патентирования катанки на стане 150 // Сталь. – 2001. – № 6. – С. 84 – 87.
4. Управление свойствами катанки на современном проволочном стане / В. С. Емченко, Е. А. Евтеев, А. А. Горбанев и др. // Черметинформация. – 1993. – № 11. – С. 24 – 27.

УДК 621.762

Ю. Л. БОБАРИКИН, канд. техн. наук,
Н. В. СЕЛИВОНЧИК, С. В. ШИШКОВ,
А. М. УРБАНОВИЧ (ГГТУ им. П. О. Сухого)

КРИТЕРИЙ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО СОЕДИНЕНИЯ СЛОЕВ ПРОКАТЫВАЕМОГО БИМЕТАЛЛА

Процесс плакирования прокаткой стальной основы другими металлами позволяет получать композиционный многослойный материал, используемый при изготовлении подшипников скольжения, изделий с защитными покрытиями и т. п. Способ заключается в совместной прокатке стальной полосы и плакирующего порошкового покрытия, наносимого на поверхность основы, и в последующей термообработке для спекания порошкового слоя и его окончательного закрепления на поверхности полосы. Этот метод нанесения на металлическую основу покрытия плакированием или совместной пластической деформацией основы и порошкового плакирующего материала достаточно перспективен вследствие высокой производительности и малой энергоемкости. Основная проблема заключается в получении качественного соединения слоев, так как именно оно во многом обеспечивает эксплуатационные характеристики композиционного материала. Для качественного соединения необходимо выполнение следующего условия на стадии совместной прокатки:

$$t_{\text{д}} \geq t_{\text{а}} \geq t_{\text{р}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{д}}$ – время совместной пластической деформации или перемещения контактных точек через зону деформации в процессе прокатки, с; $t_{\text{а}}$ –

время активации процессов схватывания в зоне соединения, с; t_p – время релаксации остаточных напряжений, с.

Время совместной пластической деформации

$$t_d = l_d / \dot{\vartheta}_{II}, \quad (2)$$

где l_d – длина очага деформации при прокатке, определяемая зависимостью $l_d = \sqrt{R\Delta h}$ (R – радиус валков; Δh – абсолютное обжатие полосы); $\dot{\vartheta}_{II}$ – скорость деформирования прокатки.

Для определения времени активации используется зависимость [1]

$$t_a = Lb / \dot{\epsilon}S, \quad (3)$$

где L – путь движения дислокации до барьера, равный $\rho^{-1/2}$ (ρ – плотность дислокаций в зоне контакта, $1/m^2$), м; b – вектор Бюргера для материала менее пластичной основы, м; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации металла в зоне соединения, s^{-1} ; S – изменение площади активного центра в месте выхода дислокаций к зоне соединения, m^2 , которое равно [1]:

$$S = \pi r^2, \quad (4)$$

r – радиус активного центра, м:

$$r^2 = 1/4 \rho. \quad (5)$$

Скорость деформации металла в зоне соединения

$$\dot{\epsilon} = \epsilon_i / t_d, \quad (6)$$

где ϵ_i – интенсивность поверхностной деформации основы:

$$\epsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma_i. \quad (7)$$

Интенсивность сдвиговой деформации можно найти по формуле, определяющей γ_i в декартовой системе координат:

$$\gamma_i = \frac{2}{3} \sqrt{(E_x - E_y)^2 + (E_y - E_z)^2 + (E_z - E_x)^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}, \quad (8)$$

где E_x, E_y, E_z – относительные удлинения; $E_x + E_y + E_z = 0$; $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ – относительные сдвиги.

Для формулы (8) относительные удлинения и сдвиги определяются по формулам:

$$E_x = \frac{\partial U_x}{\partial x}; E_y = \frac{\partial U_y}{\partial y}; E_z = \frac{\partial U_z}{\partial z}; \quad (9)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x}; \gamma_{yz} = \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y}; \gamma_{zx} = \frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial z}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial x \partial z},$$

где U_x, U_y, U_z – проекции перемещения точек, находящихся на контактной поверхности с инструментом в очаге деформации.

Таким образом, главной задачей при установлении интенсивности сдвиговой деформации на контактной плоскости деформируемой основы является определение выражений перемещений точек поверхности, движущихся по этой плоскости в очаге деформации от начала пластической деформации, и затем дальнейшее дифференцирование этих выражений. Интенсивность сдвиговой деформации определяет величину пластического сдвига в очаге деформации, где происходит совместная пластическая деформация основы и плакирующего слоя. Анализируя перемещения точек на дуге контакта при прокатке полосы (рис. 1), получим следующие зависимости:

для зоны отставания

$$U_x = -(1 - S_{II})AR \cos\left(\frac{B}{2}\right) - \frac{A^2}{2(\alpha - \alpha_{II})} R \cos\left(\frac{B}{2}\right); \quad (11)$$

$$U_z = -(1 - S_{II})AR \sin\left(\frac{B}{2}\right) - \frac{A^2}{2(\alpha - \alpha_{II})} R \sin\left(\frac{B}{2}\right);$$

для зоны опережения

$$U_x = -(\alpha_{II} - \varphi) R \cos\left(\frac{C}{2}\right) - \frac{S_h D^2}{2\alpha_{II}} R \cos\left(\frac{C}{2}\right); \quad (12)$$

$$U_z = -(\alpha_{II} - \varphi) R \sin\left(\frac{C}{2}\right) - \frac{S_h D^2}{2\alpha_{II}} R \sin\left(\frac{C}{2}\right),$$

где $A = \alpha - \arcsin \frac{x}{R}$; $B = \alpha + \arcsin \frac{x}{R}$; $C = \alpha_{II} + \arcsin \frac{x}{R}$;

$D = \alpha_{II} - \arcsin \frac{x}{R}$; S_{II} – отставание; S_h – опережение; R – радиус валков; α – угол прокатки; α_{II} – нейтральный угол.

Относительные сдвиги:
для зоны отставания

$$\gamma_{zx}^{от} = (1 - S_n) \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \left[\sin \frac{B}{2} - \frac{A}{2} \cos \frac{B}{2} + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \frac{A}{(\alpha - \alpha_n)} \left[\sin \frac{B}{2} - \frac{A}{2} \cos \frac{B}{2} \right] \right]; \quad (15)$$

для зоны опережения

$$\gamma_{zx}^{оп} = \frac{Sh}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \left[1 - \frac{\arcsin \frac{x}{R}}{\alpha_n} \right] + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}} \left[\sin \frac{C}{2} - \frac{D}{2} \cos \frac{C}{2} \right]. \quad (16)$$

Интенсивность сдвиговой деформации при прокатке для зоны отставания в соответствии с (8) равна

$$\gamma_i^{от} = \frac{2}{3} \sqrt{4 \left(E_y^{от} \right)^2 + \frac{3}{2} \left(\gamma_{zx}^{от} \right)^2}; \quad (17)$$

для зоны опережения

$$\gamma_i^{оп} = \frac{2}{3} \sqrt{4 \left(E_x^{оп} \right)^2 + \frac{3}{2} \left(\gamma_{zx}^{оп} \right)^2}. \quad (18)$$

Значения компонентов, входящих в выражения для определения интенсивности сдвига, тем больше, чем меньше отставание S_n , больше опережение S_h и меньше значение текущей координаты x , т.е. чем ближе рассматриваемая точка находится к выходу из валков. В соответствии с этим при нанесении тонких плакирующих покрытий для наибольшего сдвига в зоне деформации необходимо увеличивать зону опережения и соответственно уменьшать зону отставания. Максимальная интенсивность сдвиговой деформации достигается на выходе из валков, где суммируется сдвиг, достигнутый в конце зоны отставания со сдвигом, полученным в конце зоны опережения, при этом для зоны отставания в формулу (17) необходимо подставлять $x = R \sin \alpha_n$, а в формулу (18) $x = 0$, т.е.

$$\gamma_i = \gamma_i^{от} + \gamma_i^{оп}. \quad (19)$$

Время релаксации определяется согласно [1]

$$t_p = t_0 \exp \left(\frac{U}{kT} \right), \quad (20)$$

где t_0 – период собственных колебаний атомов около равноосного положения ($t_0 = 10^{-13}$, с); k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – температура в очаге деформации, К; U – энергия активации процесса, контролирующего релаксацию внутренних напряжений.

Энергия активации процесса определяется согласно [6] для процессов, протекающих при $T \leq 0,5T_{пл}$, как энергия термически активируемых процессов (поперечное скольжение, пересечение дислокаций, трение в решетке, обусловленное силами Пайерлса), а для процессов при $T \leq 0,5T_{пл}$ – как энергия активации самодиффузии.

Изменение температуры металла в процессе формоизменения зависит от затрачиваемой на деформацию работы и интенсивности теплоотвода от заготовки в окружающее пространство.

Уравнение теплового баланса заготовки в процессах плакирования имеет следующий вид:

$$Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5. \quad (21)$$

Здесь Q_1 – мощность, затрачиваемая на нагрев заготовки,

$$Q_1 = c\gamma V (T - T_0), \quad (22)$$

где c – удельная теплоемкость материала основы, Дж/(кг·К); γ – плотность материала основы, 1/м², м³; $V = blh_{cp}$ – объем очага деформации, м³

(рис. 1) (l – протяженность очага деформации: $l = \sqrt{R\Delta h - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2}$;

$h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2}$); T_0 – начальная температура, К; T – средняя температура металла в очаге деформации, К;

Q_2 – мощность, выносимая из очага деформации конвекцией:

$$Q_2 = c\gamma S_k \vartheta_n (T - T_0), \quad (23)$$

где S_k – площадь пятна контакта очага деформации с воздухом, м² (рис. 1): $S_k = 2l(h_{cp} - l_d)$;

Q_3 – тепловая мощность, отдаваемая заготовкой инструменту:

$$Q_3 = \alpha S_k^I (T - T_0), \quad (24)$$

где S_k^1 – площадь пятна контакта очага деформации с инструментом, m^2 (рис. 1): $S_k^1 = 2bl_d$ (b – ширина очага деформации, m); α – коэффициент теплоотдачи от очага деформации инструменту;

Q_4 – тепловая мощность, выносимая из очага деформации в недеформируемую часть заготовки:

$$Q_4 = \alpha S_k^{11} (T - T_0), \quad (25)$$

где S_k^{11} – площадь пятна контакта очага деформации с недеформируемой частью заготовки, m^2 (рис. 1): $S_k^{11} = b(h_0 + h_1)$;

Q_5 – тепловая мощность упругой деформации:

$$Q_5 = 0,1Q_i; \quad (26)$$

Q_i – полная тепловая мощность деформации, которая определяется через тепловую мощность пластической деформации и тепловую мощность сил контактного трения:

$$Q_i = Q_T + Q_{II}, \quad (27)$$

где Q_T – тепловая мощность сил контактного трения:

$$Q_T = A_T \dot{\epsilon}, \quad (28)$$

A_T – работа сил контактного трения; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, которая определяется по зависимости (6); Q_{II} – тепловая мощность пластической деформации:

$$Q_{II} = A_{II} \dot{\epsilon}, \quad (29)$$

A_{II} – работа пластической деформации.

Сумма работ пластической деформации A_{II} и сил контактного трения A_T определяет работу деформирующих сил при пластической деформации A_p , т. е.

$$A_p = A_{II} + A_T. \quad (30)$$

Величину A_{II} можно найти по формуле

$$A_{II} = \iiint_V k \gamma_i dV, \quad (31)$$

где k – постоянная пластичности; γ_i – интенсивность деформаций сдвига в деформируемом объеме.

Величина интенсивности деформаций сдвига в деформируемом объеме для процесса прокатки определяется по зависимости

$$\gamma_i = \ln \left(1 - \frac{\Delta h}{h_0} \right). \quad (32)$$

Подставляя выражение для V и уравнение (32) в (31) и проинтегрировав, получим формулу для работы пластической деформации процесса прокатки

$$A_{\text{п}} = klbh_{\text{ср}} \ln \left(1 - \frac{\Delta h}{h_0} \right). \quad (33)$$

Величину $A_{\text{т}}$ можно определить по формуле

$$A_{\text{т}} = \iint_F \left(\tau_{\text{к}}^x U_x + \tau_{\text{к}}^y U_y + \tau_{\text{к}}^z U_z \right) dF, \quad (34)$$

где F – площадь контакта, на которой действуют силы трения; $\tau_{\text{к}}^x, \tau_{\text{к}}^y, \tau_{\text{к}}^z$ – проекции элементарных сил трения на оси прямоугольной системы координат; U_x, U_y, U_z – перемещения точек по контактной поверхности вдоль осей координат.

В выражении (34) необходимо найти величину контактного касательного напряжения $\tau_{\text{к}}$. Существует несколько вариантов его определения. Однако с учетом того, что рассматривается процесс плакирования и в очаге деформации присутствуют нормальные контактные напряжения значительной величины, представляется возможным принять положение Э. Зибеля

$$\tau_{\text{к}} = 2fk, \quad (35)$$

где f – коэффициент контактного трения.

С учетом этого получено выражение для работы сил контактного трения процесса прокатки

$$A_{\text{т}} = 2bfk \left[\int_{l_n}^l \left(\cos \left(\arcsin \left(\frac{x}{R} \right) \right) U_x^{\text{от}} + \frac{x}{R} U_z^{\text{от}} \right) dx - \int_0^{l_n} \left(\cos \left(\arcsin \left(\frac{x}{R} \right) \right) U_x^{\text{он}} + \frac{x}{R} U_z^{\text{он}} \right) dx \right], \quad (36)$$

где l_n – протяженность зоны опережения, м; $U_x^{\text{от}}, U_z^{\text{от}}, U_x^{\text{он}}, U_z^{\text{он}}$ – величины перемещений точек по контактной поверхности вдоль осей координат, полученные по зависимостям (11) и (12).

После подстановки уравнений (22) – (30) в выражение (21) и соответствующих упрощений получим формулу для определения средней температуры в очаге деформации для прокатки

$$T = T_0 + \frac{0,9\epsilon A_p}{c\gamma(bh_{cp} + 2\vartheta_{II}(h_{cp} - l_a)) + 2\alpha b(l_a + h_{cp})} \quad (37)$$

Для достижения достаточного уровня прочности при холодной деформации необходимо иметь также достаточное условие активации схватывания. Причем если активация достаточна, т. е. успевает произойти в полной мере, то уровень падения остаточных напряжений может быть невелик. На основании экспериментальных исследований определен достаточный и транспортабельный уровень адгезии. Для этого уровня необходимо найти время релаксации и уровень падения остаточных напряжений, который можно оценить величиной kt_p (k – коэффициент, определяющий уровень падения остаточных напряжений). Определив k , можно рекомендовать соблюдение условия прокатки, обеспечивающее достаточный уровень адгезии:

$$t_a \geq kt_p \quad (38)$$

Для пары сталь – медный порошок слой минимально допустимым углом перегиба при испытании на прочность через перегиб является угол 35° . Ниже этого значения при дальнейшем спекании остаточные напряжения разрушают соединение. Прочность, соответствующая углу 35° , получена при прокатке с режимами:

$$\vartheta_{II} = 40,28 \text{ мм/с}; h_0 = 1,6 \text{ мм}; h_1 = 0,86 \text{ мм}; \epsilon = 0,52.$$

При расчете с учетом указанных режимов по формулам (3) и (20) время активации $t_a = 0,056$ с, а время релаксации $t_p = 1,755 \cdot 10^6$ с. Тогда для получения устойчивого значения заданной прочности необходимо соблюдение равенств: $t_a = kt_p$, $k = 0,056 / 1,755 \cdot 10^6 = 3,191 \cdot 10^{-8}$.

Для других вариантов плакирования с иными деформационно-скоростными режимами прокатки этих материалов необходимо соблюдение условия

$$t_a \geq 3,191 \cdot 10^{-8} t_p \quad (39)$$

Величина должна экспериментально определяться для каждой пары биметалла.

В результате проведенных исследований разработаны критерии получения качественного соединения прокаткой плакируемой основы с плакирующим покрытием, который учитывает влияние термомеханических воздействий на обрабатываемые материалы. Найденный критерий позволяет назначать режимы прокатки в соответствии с условием (1), параметры кото-

рого определяются по формулам (2), (3) и (20). Соблюдение полученного условия достигается варьированием технологических режимов плакирования: интенсивностью деформации, скоростью деформации, геометрией очага деформации и начальной температурой соединяемых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каракозов Э. С., Орлова Л. М., Пешиков В. В. Диффузионная сварка титана. – М.: Металлургия, 1977. – 272 с.
2. Громов А. В. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1978. – 360 с.
3. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
4. Бобарикин Ю. Л., Стрикель Н. И., Урбанович А. М. Основные закономерности плакирования стали прокаткой металлическими порошками // *Материалы, технологии, инструменты*. – Т. 5 (2000). – № 1. – С. 62 – 65.
5. Изотермическое деформирование металлов / С. З. Фиглин, В. В. Бойцов, Ю. Г. Калпин и др. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
6. Гарафало Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1968. – 304 с.

УДК 621.778

В. В. ФИЛИПОВ, канд. техн. наук (РУП БМЗ),
А. В. СТЕПАНЕНКО, академик (ФТИ НАНБ),
А. В. ВЕДЕНЕЕВ, и **И. И. КРЫМЧАНСКИЙ** (РУП БМЗ),

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИВИЗНЫ И КРУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ПОСЛЕ СВИВКИ В МЕТАЛЛОКОРД

Свитые в канат (металлокорд) проволоки испытывают внешнее воздействие со стороны соседних проволок в слое и соседних слоев. Уровень упругих напряжений, обусловленных этими внешними воздействиями, существенно влияет на эксплуатационные характеристики витых изделий. Для правильного подбора параметров свивки (величина натяжения проволок при размотке, деформации в торсионном устройстве и преформаторе и т. д.) важно знать соотношение остаточной упругопластической деформации проволок и деформации, вызванной отмеченными воздействиями.

Авторами работы [1] предложена методика аналитического определения деформаций проволок после свивки с использованием аппарата тензорного исчисления. Но для такого расчета необходимо определить действующие при свивке натяжения, а также соотношение полной и остаточной деформаций при совместном действии растяжения, изгиба и кручения. Решение этих задач само по себе проблематично.

При сегодняшнем уровне развития теории вряд ли возможно выполнение достаточно точных расчетов без привлечения эмпирических данных.