

УДК 621.791.13:621.771.014

Загорянский В. Г.

УПРАВЛЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС

Основой технологического процесса получения биметаллических медно-алюминиевых элементов, используемых в энергетике, электрометаллургии, электротехнической промышленности, является изготовление плакированием взрывом биметаллических листов толщиной 8–10 мм с последующей их холодной прокаткой.

Биметалл алюминий + медь, получаемый плакированием взрывом, по характеру взаимодействия металлов в зоне соединения относится к слоистым металлическим композициям, металлы которых образуют при их взаимодействии химические соединения (хрупкие интерметаллиды) [1]. К таким сочетаниям относятся также сталь + титан, сталь + алюминий, сталь + цирконий, медь + титан).

Даже незначительные отклонения от оптимальных режимов плакирования (повышенные параметры соударения) приводят тому, что объем отдельных участков хрупких интерметаллических фаз в переходной зоне соединения растет вплоть до образования непрерывного слоя расплавов по всей поверхности контакта.

Такое же негативное влияние на объем образования интерметаллидов оказывает и процесс последующего нагрева, в том числе и термической обработки [2].

Хрупкие интерметаллиды существенно снижают прочность соединений и вызывают их разрушение как в процессе самого плакирования взрывом под действием отраженных от свободной поверхности волн растяжения, так и в процессах последующих технологических переделов. Кроме снижения прочности при отклонениях от оптимального режима плакирования возможно также отклонение формы получаемых листов в связи с трудностями контроля их изгиба и коробления в процессе импульсного нагружения при плакировании.

Последующая пластическая деформация прокаткой полученного плакированием взрывом биметалла позволяет в значительной степени повысить его прочность и точность формы [1, 2].

Особенностью процесса прокатки биметаллов с несимметричным расположением слоев является изгиб в вертикальной плоскости конца полосы, выходящего из валков. Это происходит вследствие неравномерной послойной деформации, выражающейся в различной степени вытяжки основного и плакирующего слоев [2]. В результате в полосе возникают большие остаточные напряжения, а кривизна полосы часто достигает значений, близких к кривизне валков; валок оковывается полосой, и возникает опасность вторичного захвата.

Ранее в работах [2–5] была рассмотрена проблема минимизации влияния неравномерной послойной деформации при несимметричной прокатке. К влияющим факторам относятся соотношение толщин слоев в биметалле, механические свойства слоев, их взаимное расположение в биметалле, величина и направление сил межслойного трения, величина и направление контактного трения, параметры очага деформации. Получение прямолинейных биметаллических полос обеспечивает прокатка с рассогласованием окружных скоростей валков [2].

Отметим, что для композиции алюминий + медь отсутствуют данные о величинах обжатий, коэффициентах рассогласования и других параметрах холодной прокатки биметалла, обеспечивающих получение прямолинейных полос.

Целью работы является обоснование, с учетом взаимосвязей между влияющими факторами при пластической деформации, параметров холодной прокатки полученного плакированием взрывом биметалла алюминий + медь, обеспечивающих получение прямолинейных полос при достаточной прочности соединения слоев.

Отметим, что определен [2] диапазон оптимальных относительных обжатий при прокатке данной композиции ($\varepsilon > 40\%$), имевшей изначально низкую прочность (из-за отклоне-

ния параметров плакирования от оптимальных). В результате сдвига и дробления включений интерметаллической фазы обнажались ювенильные поверхности, т. е. создавались новые активированные центры схватывания, что привело к возрастанию прочности соединения.

При определении параметров процесса прокатки обычно принимают допущение, что полоса входит в валки и выходит прямо, двигаясь по оси прокатки без отклонений, справедливо для процесса симметричной прокатки.

Деформации при пластическом течении распределяются в объеме тела неравномерно, вследствие влияния сил трения на поверхностях контакта с инструментом, наличия внешних недеформируемых зон и т. д. [6]. Характер и закономерности распределения деформаций в объеме пластически деформируемого тела являются сложными вопросами теории обработки металлов давлением. С достаточной для практики точностью деформация однородного металла при пластическом деформировании может быть принята равномерной.

Равномерная деформация при пластическом деформировании биметаллов встречается намного реже. При прокатке биметалла (случай двух слоев) относительная деформация по высоте слоя с меньшим сопротивлением деформации (ε_m) будет больше относительной деформации по высоте слоя с большим сопротивлением деформации (ε_n), а также общей относительной деформации биметалла ($\varepsilon_{общ}$) [6]:

$$\varepsilon_m > \varepsilon_{общ} > \varepsilon_n, \quad (1)$$

где $\varepsilon_m = \frac{\Delta h_m}{h_{мисх}}$, $\Delta h_m = h_{мисх} - h_{мбм}$, $h_{мисх}$ – толщина металла с меньшим сопротив-

лением деформации в исходном пакете;

$h_{мбм}$ – толщина металла с меньшим сопротивлением деформации в биметалле;

$\varepsilon_n = \frac{\Delta h_n}{h_{нисх}}$, $\Delta h_n = h_{нисх} - h_{нбм}$, $h_{нисх}$ – толщина металла с большим сопротивлени-

ем деформации в исходном пакете;

$h_{нбм}$ – толщина металла с большим сопротивлением деформации в биметалле;

$\varepsilon_{общ} = \frac{\Delta h}{h}$, $\Delta h = \Delta h_m + \Delta h_n$, $h = h_{мисх} + h_{нисх}$.

Деформации слоев будут тем более различны, чем больше разница в сопротивлении деформации слоев [6]. При прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков влияние одновременно всех факторов деформации на изгиб полосы может быть выражено отношением скоростей пластического течения основного и плакирующего слоев биметалла [2]. Различие в скоростях пластического течения слоев биметалла при прокатке и приводит к изгибу полосы. При этом полоса изгибается в сторону слоя, имеющего меньшую скорость течения, то есть, если установлен понижающий редуктор от приводного нижнего валка, в сторону верхнего валка. Это определяет при прокатке такую установку полосы биметалла, чтобы слой с большим сопротивлением деформации соприкасался с нижним валком.

Геометрические параметры (изгиб) переднего конца полосы в вертикальной плоскости можно вычислить по известным параметрам процесса прокатки (геометрическим и кинематическим параметрам очага деформации, условиям трения на валках и др.) [4].

Скорости пластического течения основного и плакирующего слоев биметалла (соответствуют скорости на выходе из валков для нижней и верхней границ полосы) [2]:

$$v_{11} = v_1(1 + S_1), \quad (2)$$

$$v_{12} = v_2(1 + S_2), \quad (3)$$

где v_1 , v_2 – окружные скорости ведущего (имеющего большую окружную скорость – приводного нижнего) и ведомого (имеющего меньшую окружную скорость – верхнего) валков;

S_1, S_2 – соответствующие величины опережения.

Условие получения прямолинейной биметаллической полосы при прокатке с рассогласованием окружных скоростей валков будет иметь вид:

$$\frac{v_{11}}{v_{12}} = \frac{v_1(1+S_1)}{v_2(1+S_2)} = 1. \quad (4)$$

При несимметричной прокатке с изменением относительного обжатия опережение S_1 по отношению к ведущему валку меняется мало, а опережение S_2 меняется значительно. Таким образом, при заданном рассогласовании скоростей валков v_1/v_2 , можно выбрать обжатие, при котором удовлетворяется условие (4) и полоса не будет изгибаться.

Отметим, что получение прямолинейных полос биметалла медь–титан толщиной 1,2 мм обеспечивалось прокаткой с рассогласованием окружных скоростей валков $v_1/v_2 = 1,09$ и при относительном обжатии 15–18 % [2].

В работе [7] теоретически обоснованы и в работе [8] экспериментально подтверждены оптимальные режимы плакирования взрывом биметалла алюминий–медь толщиной 10 мм (толщина алюминия–основы – 8 мм, плакировки–меди – 2 мм). Зависимость прочности соединения слоев от относительного обжатия для биметалла алюминий–медь определена [2] для соединений с заведомо низкой прочностью после плакирования взрывом, обусловленной отклонением параметров соударения от оптимальных. Отметим, что данная зависимость носит иллюстративный характер, так как в работе [2] не указаны ни толщины полученного плакированием взрывом биметалла, ни насколько параметры соударения отличались от оптимальных. На данном этапе исследований интерес вызывает поиск таких значений рассогласования окружных скоростей валков при прокатке, при которых обеспечивается получение прямолинейной биметаллической полосы с относительными обжатиями, приводящими к получению толщин полос равных или близких к используемым в промышленности [1].

При прокатке полученных плакированием взрывом по оптимальным режимам биметаллических полос использовался стан дуо с диаметром валков 200 мм и частотой вращения нижнего приводного валка 0,5 мин⁻¹. Крутящий момент на верхний валок передавался через дополнительный редуктор со съемными шестернями, что позволило получить рассогласование окружных скоростей валков (табл. 1). Изгиб полосы определялся путем измерения кривизны полосы – максимального расстояния от плоскости, на которую она опирается, до нижней части прогиба. Кривизна измерялась относительно полной длины полосы после прокатки (в табл. 1. приведены средние по трем измерениям значения).

Таблица 1

Экспериментальные данные при прокатке биметаллической полосы
толщиной 10 мм и шириной 100 мм

| Параметры | | Вариант | | | | |
|---|----------------------------|---------|-------|------|-------|-------|
| | | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 | № 5 |
| Диаметр валков, мм | D_p | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| | D_{on} | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Окружная скорость валков, м/с | v_1 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,31 |
| | v_2 | 0,31 | 0,295 | 0,28 | 0,265 | 0,258 |
| Рассогласование, v_1/v_2 , % | | 0 | 5 | 11 | 17 | 20 |
| Толщина полосы | до прокатки, h_0 , мм | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | после прокатки, h_1 , мм | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Абсолютное обжатие, Δh , мм | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Относительное обжатие, $\varepsilon = \Delta h / h_0$, % | | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Относительная кривизна полосы, % | | 4,6 | 2,7 | 0,7 | 3,4 | 4,1 |

После прокатки изгиб переднего конца полосы происходил в сторону слоя с большим сопротивлением деформированию. При прокатке с одинаковыми окружными скоростями валков относительная кривизна полосы достигала 5 %.

Данные табл. 1 показывают, что с увеличением рассогласования окружных скоростей валков от 0 до 11 % относительная кривизна полосы сначала уменьшается практически до нуля (0,7 %), а при дальнейшем увеличении рассогласования до 17–20 % увеличивается практически до значений при прокатке без рассогласования.

Механические испытания полученных плакированием взрывом композиций алюминий-медь после холодной прокатки проводились в соответствии с известными методиками для биметаллов [1]. В данном случае интерес представляло влияние относительного обжата на прочность соединения слоев. Было принято одно значение – 10 % (табл. 1).

Изменение прочности на отрыв слоев медно-алюминиевого композита после прокатки показало, что $\sigma_{отр}$ для трех образцов лежит в пределах 71–83 МПа, что на 11–13 % ниже аналогичных свойств композиций, полученных плакированием взрывом [8].

Испытание на срез соединений показало, что разрыв соединения происходит не по границе соединения, а по наименее прочному материалу пары – алюминию, прочность на разрыв составила 68–52 МПа. В этом случае отличие от аналогичных свойств композиций, полученных плакированием взрывом [8], составляет 20–23 %, тем не менее, эти значения удовлетворяют требованиям, предъявляемым к биметаллу.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что при холодной прокатке с относительным обжатием 10 % биметалла алюминий-медь толщиной 10 мм, полученного плакированием взрывом по точно выдержанным оптимальным режимам, для получения прямолинейных полос необходимо рассогласование окружных скоростей валков порядка 11 %. Данная степень обжата незначительно нарушает полученную плакированием взрывом прочность соединения слоев биметалла.

В дальнейшем предполагается исследовать диапазон величин относительных обжатий биметаллических полос, полученных плакированием взрывом по режимам, отличным от оптимальных, для получения прочного соединения слоев, и величины рассогласования окружных скоростей валков при прокатке для получения прямолинейных полос.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобелев А. Г. *Технология слоистых металлов [Текст] : учеб. пособ. / А. Г. Кобелев, И. Н. Потапов, Е. В. Кузнецов. – М. : Металлургия, 1991. – 248 с.*
2. Воронов С. В. *Пластическая деформация слоистых композиционных материалов [Текст] / С. В. Воронов, Д. Г. Девейно // Порошковая металлургия. – 1982. – № 12. – С. 47–70.*
3. Луценко В. А. *Математическое моделирование процесса прокатки биметаллических листов [Текст] / В. А. Луценко // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії та машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 93–95.*
4. Максимов Е. А. *Исследование крутящих моментов и изгиба переднего конца полосы при несимметричной прокатке толстых листов [Текст] / Е. А. Максимов // Металлургические процессы и оборудование. – 2008. – № 3. – С. 46–49.*
5. *Процесс прокатки [Текст] / М. А. Зайков, В. П. Полухин, А. М. Зайков, Л. Н. Смирнов. – М. : МИСИС, 2004. – 640 с.*
6. Голованенко С. А. *Производство биметаллов [Текст] / С. А. Голованенко, Л. В. Меандров. – М. : Металлургия, 1966. – 304 с.*
7. Драгобецкий В. В. *Расчет режимов сварки взрывом слоистой медно-алюминиевой композиции [Текст] / В. В. Драгобецкий, В. Г. Загорянский, В. Е. Загорянский // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ : СХУ імені Володимира Даля, 2012. – № 13 (184). – Ч. 1. – С. 60–69.*
8. *Про испытання медно-алюмінієвих композицій, отриманих плакуванням вибухом [Текст] / В. Г. Загорянский, В. В. Драгобецкий, В. В. Костин, В. М. Бугайчук // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2012. – Випуск 5 (76). – С. 67–71.*

Загорянский В. Г. – канд. техн. наук, доц. КрНУ им. М. Остроградского.

КрНУ им. М. Остроградского – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг.

E-mail: zagor_vlad@ukr.net

Статья поступила в редакцию 22.02.2013 г.