

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР ИЗ КРИСТАЛЛИТОВ РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА С ПОМОЩЬЮ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ В ВАКУУМЕ

*Б.В. Бори, А.Ф. Ванжа, А.Т. Лопата, И.М. Неклюдов, С.В. Шевченко*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина*

Рассмотрены процессы, протекающие при сварке в твердой фазе разнородных материалов, содержащих легко окисляемые металлы и сплавы различного химического состава. Изучены силы, действующие на материалы, собранные в пакет, на примере многослойной структуры Ti-Nb-Cu-St.Steel. Исследован массоперенос одного материала в другой с помощью электронной растровой микроскопии и металлографии.

Многослойные структуры с кристаллитами различного химического состава являются специфическим типом композиционных полиметаллов и играют важную роль в современном технологическом прогрессе, особенно в таких областях, как атомная энергетика, аэрокосмическая, криогенная [1-3]. Химический и фазовый состав, форма, размеры и другие характеристики кристаллитов и границ раздела оказывают определяющее влияние на свойства материалов [4]. Необходимость получения объемных многослойных заготовок весом до 10 кг и более, не содержащих в местах соединений интерметаллидных включений, пор, микротрещин и других дефектов структуры – актуальная задача, решение которой позволит расширить применение многослойных материалов конструкционного назначения. Перспективным методом производства композиционных материалов слоистого типа является метод пакетной прокатки металлов в вакууме. В этом случае реализуется сварка в твердой фазе разнородных материалов, содержащих легко окисляемые металлы и сплавы [2,5].

Особенно важным при создании новых перспективных материалов является понимание процессов, протекающих при сварке многослойных структур различного химического состава.

Одним из аспектов в исследовании процессов, возникающих при сварке материалов при прокате, является изучение сил, действующих на материалы, собранные в пакет. В зависимости от свойств этих материалов возможно существование двух вариантов:

1 – собранные в пакет для сварки плиты или листы состоят из разнородных материалов, находящихся в соотношении  $\sigma_{s1}(T) > \sigma_{s2}(T)$ , при температуре прокатки (Т), где  $\sigma_{s1}$ ,  $\sigma_{s2}$  – предел текучести свариваемых материалов 1 и 2.

2 – вариант, когда свариваются в пакете материалы, для которых выполняется условие  $\sigma_{s1}(T) = \sigma_{s2}(T)$ .

Для первого случая рассмотрение сил, действующих на пакет материалов (рис. 1), показывает, что на плиты воздействуют силы не только направленные

на деформацию материала, но и на смещение плиты одной относительно другой вдоль оси прокатки.

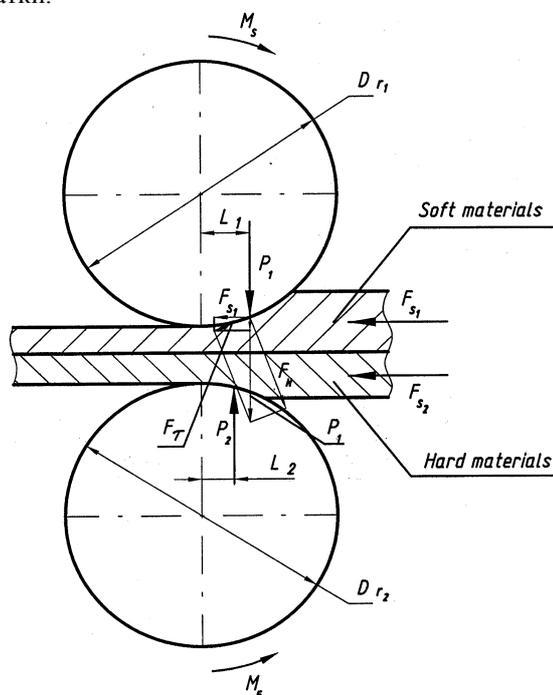


Рис. 1. Силы, действующие на пластины материала в пакете при прокатке

$F_{s1}$ ,  $F_{s2}$  – силы, действующие на пластины в пакете в зависимости от прочностных свойств материалов;  $M_s$ ,  $M_f$  – моменты, возникающие при деформации мягкого и твердого материалов в пакете при сварке;

$P_1$ ,  $P_2$  – силы, действующие в точке приложения усилий при деформации пластин;  $L_1$ ,  $L_2$  – плечо приложения сил  $P_1$ ,  $P_2$ ;  $F_{t1}$ ,  $F_{t2}$  – тангенциальные силы, возникающие при вращении и деформации валками пластин

В процессе совместной прокатки двухслойной полосы из разнородных металлов в очаге деформации в общем случае имеются три зоны:

Первая зона расположена на входе в очаг деформации, где твёрдый металл остаётся жёстким и его толщина не меняется. Вторая зона – где оба металла деформируются пластически и существует межслойное относительное скольжение. Третья – где разнородные металлы соединены друг с другом и межслойное относительное проскальзывание отсутствует.

Проведенный анализ показывает, что разность сил, действующих на каждый из материалов, находящихся в пакете, влияет на качество его сварки. Что же происходит в пакете при действии соответствующих сил на каждый материал?

При прокатке пакета на каждый материал действует усилие ( $F_i$ ), возникающее от крутящих моментов, передающихся от валков.

$$F_1 = C_1 \sigma_{s1}(T) \sin \alpha_1 \cos \alpha_1;$$

$$F_2 = C_2 \sigma_{s2}(T) \sin \alpha_2 \cos \alpha_2,$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – силы, действующие на пластины пакета;  $C_1 = \ell_{d1} \ell_b$  – текущая площадь взаимодействия между пластиной пакета и валком,  $\ell_b$  – длина валка, участвующего в прокатке (как правило, при равномерной толщине листа, эта величина постоянна в процессе прокатки всего пакета);  $\ell_{d1}$  и  $\ell_{d2}$  – длины дуг контакта между валками и деформированными листами металлов

$$\ell_{d1} = R_b f(\alpha_1);$$

$$\ell_{d2} = R_b f(\alpha_2),$$

где  $R_b$  – радиусы валков;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – углы охвата дуги деформации пластины металла валками.

При разности усилий  $F_1 > F_2$  один материал начинает скользить по другому, что приводит к очистке от окислов поверхностей, разогретых до температуры прокатки ( $T$ ). Это способствует созданию поверхностей, близких к идеально чистым от окислов, содействует установлению межзатомных связей и образованию адгезионного сварного соединения.

Для второго случая, когда  $\sigma_{s1}(T) = \sigma_{s2}(T)$  нет разности сил, действующих на материалы, собранные в пакет. Схватывание металлических поверхностей может произойти при условии физического контакта активированных чистых поверхностей металлов. Одним из необходимых условий соединения металлических поверхностей является очищение их поверхностей от окисных плёнок. В период прокатки в процессе деформации окисная пленка начинает рваться по поверхности свариваемых пластин, а затем при деформировании рвется на фрагменты, раскрывая чистые поверхности, пригодные для сварки. При этом существует вероятность не проваров отдельных мест, на которых сохранилась окисная пленка. Условием проникновения металла между фрагментами разрушенной окисной плёнки может быть равенство давления нормального к межслойной поверхности и давления схватывания.

Для оценки усилий, действующих при прокатке на свариваемые пластины, разработан алгоритм расчета напряженного состояния двухслойной полосы в очаге деформации. С его помощью по экспериментально полученным значениям обжатия полос  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,

толщине полос на входе  $h_{01}$  и  $h_{02}$  и измеренному значению осевой силы  $P$  были найдены фактические значения пределов текучести свариваемых материалов  $\sigma_{s1}$  и  $\sigma_{s2}$  в условиях прокатки. Затем рассчитывались контактные касательные и нормальные напряжения, а также продольные составляющие сил в слоях и их разность.

Выражение для оценки разности продольных сил  $\Delta F$  в рамках предложенной модели расчета имеет следующий вид:

$$\Delta F = (D/2) \cdot b \cdot [\tau_1 \sin(\alpha_1) + p_1 (\cos(\alpha_1) - 1) - \tau_2 \sin(\alpha_2) - p_2 (\cos(\alpha_2) - 1)],$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы контакта валков с пластинами в процессе деформации;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  – средние значения по дугам линии взаимодействия между листами и валками контактных касательных и нормальных напряжений соответственно. Эти величины являются функциями пределов текучести  $\sigma_{s1}$  и  $\sigma_{s2}$  материалов пластин и углов контакта диаметром ( $D$ ) и шириной ( $b$ ) валков. Расчетная оценка выполнена для случая прокатки сплава титана ВТ-1 и стали 12Х18Н10Т при исходных данных:  $D=170$  мм;  $b=100$  мм;  $h_{01}=36$  мм;  $h_{02}=20$  мм;  $\varepsilon_{1a}=22\%$ ;  $\varepsilon_2=13\%$ ;  $P=30$  т.

Получены значения для фактических пределов текучести, соответствующие ~89 (титан ВТ-1) и ~140 Мпа (сталь 12Х18Н10Т). Разность продольных сил  $\Delta F$  равна примерно ~90 кг.

Силовое воздействие одного материала на другой при температуре 1020...1050°C и быстрой прокатке обеспечивает массоперенос одного материала в другой. После сварки пакет длительное время находится в вакууме для снижения температуры. В этот период в многослойном пакете устанавливаются, межзатомные связи между разнородными свариваемыми материалами [6,7]. Проведенные исследования микроструктуры на оптическом (рис. 2) и растровом микроскопе (рис. 3-5) подтверждают эти предпосылки. Видны структура и химическое распределение материала в местах сварки и проникновение одного материала в другой.

Для исследований использовалась многослойная структура Ti-Nb-Cu-St.Steel.

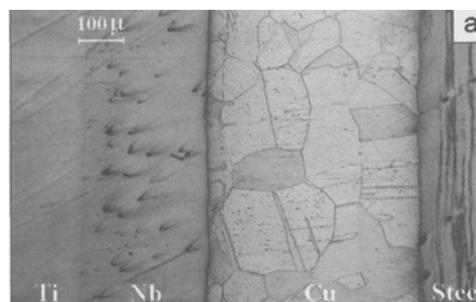


Рис. 2. Микроструктура соединения Ti-Nb-Cu-Steel

Анализ мест сварки на предмет образования интерметаллидных соединений не проводился. Однако, судя по диаграммам состояния свариваемых материалов, Cu – Fe, Cu – Ni, Cu – Nb, Nb – Ti можно полагать, что при выбранной температуре прокатки

интерметаллидные соединения не должны образовываться.

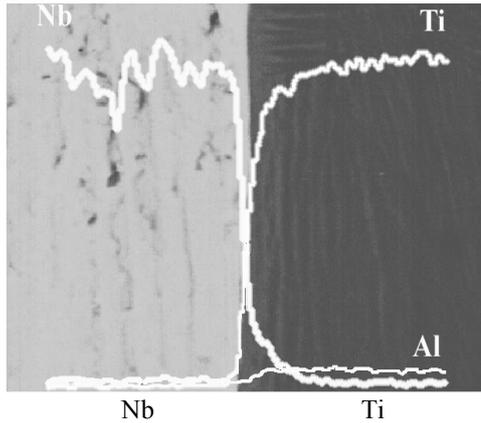


Рис. 3. Соединение материалов Nb-Ti и массоперенос одного материала в другой

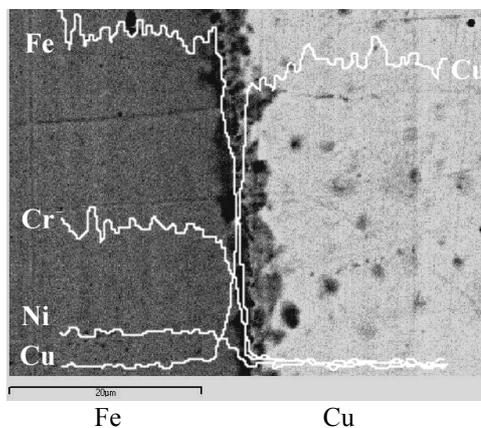


Рис. 4. Соединение материалов Steel-Cu и массоперенос одного материала в другой

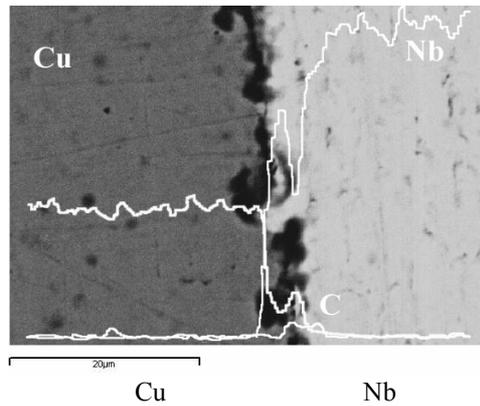


Рис. 5. Соединение материалов Cu-Nb и массоперенос одного материала в другой

Таким образом, получаемый многослойный материал, свариваемый из кристаллитов различного химического состава методом горячей прокатки в вакууме, представляет собой новый материал, созданный на основе образования межзаточных связей между разнородными материалами.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1.Современные композиционные материалы. М.: «Мир», 1970, 672 с.
- 2.В.Е. Иванов, В.М. Амоненко, А.С. Тронь. Высоко-температурная прокатка в вакууме металлов, сплавов и многослойных материалов //Украинский физический журнал. 1978, т. 23, №11, с. 1782–1789.
- 3.В.С. Смирнов, В.М. Амоненко, А.С. Тронь и др. Влияние прокатки в вакууме на свойства металлов //Сб. трудов ЛПИ. Обработка металлов давлением. 1964, № 238, с. 95–100.
- 4.В.Е. Иванов, В.М. Амоненко и др. Свойства титановых сплавов со сталью, полученных через тонкие металлические прослойки //Физика и химия обработки материалов. 1971, № 2, с. 101–105.
- 5.Н.Д. Рыбальченко, А.С. Тронь. Исследование упрочнения тонких прослоек пластичных металлов в композициях //Физика металлов и металловедение АН СССР. 1977, т. 44, № 4, с. 888–891.
- 6.А.С. Тронь, Л.А. Забашта и др. Параметры взаимной диффузии в слоистом композите ниобий-тантал //Физика и химия обработки материалов. 1983, № 5, с. 100–104.
- 7.А.Т. Lopata, I.M. Neklyudov, B.V. Borts. Vacuumtight multilayer materials production by hot rolling in vacuum //6-th European Vacuum Conference-Leon (France) - December 7-10, 1999, p. 35.

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ СТРУКТУР ІЗ КРИСТАЛІТІВ РІЗНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗА ДОПОМОГОЮ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ У ВАКУУМІ

*Б.В. Борц, А.Ф. Ванжа, А.Т. Лопата, І.М. Неклюдов, С.В. Шевченко*

Перспективним методом виробництва композиційних матеріалів шаруватого типу є метод пакетної прокатки металів у вакуумі, у якому реалізується зварювання різнорідних матеріалів у твердій фазі утримуючих легко окисляемі метали і сплави. Розглянуто процеси, що протікають при зварюванні багатощарових структур різного хімічного складу. На прикладі багатощарової структури Ti-Nb-Cu-St.Steel, вивчені сили, що діють на матеріали зібрані в пакет. Досліджена на металографічному мікроскопі зварювання шарів пластин і за допомогою електронної растрової мікроскопії вивчений масоперенос одного матеріалу в інший.

#### INVESTIGATION OF WELDING PROCESSES OF MULTILAYER STRUCTURES COMPOSED FROM DIFFERENT CHEMICAL COMPOSITION CRYSTALLITES BY VACUUM HOT ROLLING

*B.V. Borts, A.F. Vanzha, A.T. Lopata, I.M. Neklyudov, S.V. Shevtchenko*

Promising method of laminated composite materials production is the method of metal pack rolling in vacuum. The proposed method is based on the welding of heterogeneous materials in solid phase, that contain easily oxidized metals and alloys. Processes occurring during multi

layer structures of different chemical composition welding are examined. On the example of multi layer structure Ti-Nb-Cu steel forces operating on the materials in the pack are studied. The welding of strata of laminas is studied on a metallographic microscope and with the help of an electronic raster microscopy is learnt mass transfer of one material in other.