

УДК 621.791.011

ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ В ВАКУУМЕ

Б. В. БОРЦ

Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"

На базе экспериментальных данных и физических принципов сформулированы основные условия достижения устойчивого соединения в твердой фазе разнородных материалов при их совместной горячей прокатке в вакууме: обеспечение скольжения одного металла по другому; подчинение движения металлов уравнению Бернулли для несжимаемой жидкости; обеспечение массопереноса разнородных атомов металла через границу их соединения; неразрывность потока или посекундное равенство массы прокатываемого металла; равенство приобретаемой металлами мощности.

Ключевые слова: *соединения разнородных материалов, твердая фаза, закономерности, прокатка.*

Сварка в твердой фазе разнородных материалов методом горячей прокатки в вакууме открыла новые перспективные направления для использования этого метода в промышленности [1–3]. Известные способы соединения разнородных материалов основаны на пластическом их деформировании, как правило, в одноосном направлении. Поэтому и теория соединения в твердой фазе развивалась применительно к этим технологиям [3, 4].

Метод горячей прокатки в вакууме существенно меняет теоретическое представление о соединении в твердой фазе больших массивных пластин из разнородных материалов по толщине и длине. Как правило, в твердой фазе при прокатке их соединяют в пакете с размерами 50×100×400 mm. Толщины составляющих пакета, например, для стали 08X18H10T – 23 mm, для титана – 27 mm. При необходимости используют барьерные и демпфирующие прослойки толщиной 0,3... 1,0 mm из соответствующих материалов (Ni, Cu, Nb, V).

Сварку в твердой фазе разнородных материалов методом прокатки обеспечивает пластическая деформация. Причем материал с большей пластичностью деформируется сильнее и скользит по материалу с меньшей пластичностью. При скольжении и воздействии сжимающих сил возникают силы трения, приповерхностные слои очищаются и при дальнейшем деформировании материалы соединяются в твердой фазе [5, 6].

Сухое трение скольжение между пластичными твердыми материалами контролирует локализованная пластическая деформация на микроуровне [5, 6], тогда как структура на атомном уровне и состав контактирующих поверхностей являются определяющими для соединения материалов в твердой фазе. Взаимосвязь между контактирующими твердыми телами и разупорядочением на атомном уровне в зоне поверхности раздела исследовали ранее [7–11]. Однако специфика процессов на макроуровне, отражающая основные закономерности устойчивой прокатки металлов в зависимости от ее скорости, температуры и толщины металлов, требует детального анализа.

Контактная osoba: Б. В. БОРЦ, e-mail: borts@kipt.kharkov.ua

Поэтому цель настоящей работы – сформулировать на основе экспериментальных данных и физических принципов основные условия и закономерности, необходимые для прямолинейного соединения в твердой фазе разнородных материалов при их совместной горячей прокатке в вакууме.

Методика эксперимента. Металлы в твердой фазе соединяли [12–14] при высокой температуре на вакуумном прокатном стане ДУО-170, который состоит из вакуумной системы, обеспечивающей вакуум $p = 10^{-2} \div 10^{-3}$ Па, печи нагрева образцов до $T \approx 900 \div 1200^\circ\text{C}$ и валковой камеры, привод которой позволяет осуществлять прокатку со скоростью $V_0 = 0,03 \div 0,3 \text{ ms}^{-1}$. Усилие обжатия прокатного стана $P = (2 \div 32) \cdot 10^2$ МПа.

Для металлографических экспериментов использовали оптический микроскоп Olympus GX-51, а для испытаний на растяжение – машину Instron 5581 и вакуумную разрывную машину УМ-5, оснащенную вакуумной камерой с печью нагрева до 1100°C , динамометром с интерфейсом, выводящим информацию на компьютер. Электронную микроскопию высокого разрешения HREM выполняли на микроскопе JEM 2100F, а элементный микроанализ – с помощью приставки к микроскопу рентгеновского микроанализатора INCA (Oxford Instruments).

Для понимания процессов, протекающих при соединении разнородных материалов в твердой фазе, выбрали пакет из SS–Cu – Nb–Ti. Температура вакуумсоединения в твердой фазе для данного пакета 950°C и $p = 10^{-2} \div 10^{-3}$ Па. Скорость прокатки пакета $V_0 = 0,03 \text{ ms}^{-1}$. Причем при $800 \div 1000^\circ\text{C}$ растворяется не более $0,58 \div 0,73 \text{ at.}\%$ материалов соединения Cu–Nb. Поэтому для детального исследования (электронная микроскопия) интерфейс-границы использовали именно эти материалы. Установлено (рис. 1), что границы этого соединения в твердой фазе образуют чистые стыки без интерметаллидных зон, что особенно важно при измерениях нано- и микротвердости образцов.

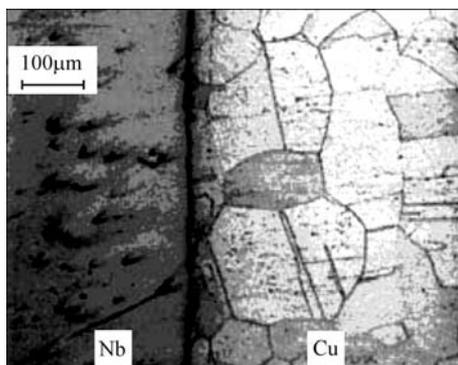


Рис. 1. Микроструктура соединения Nb–Cu.

Fig. 1. Microstructure of Nb–Cu joint.

Условия и закономерности, необходимые для сварки в твердой фазе разнородных металлов. Здесь учтем тот факт, что свариваемые металлы (условно обозначим их как мягкий S и твердый H), как правило, разогреваются до $0,5 \dots 0,7 T_m$, имеют различную пластичность и находятся в состоянии, приближающемся к пределу текучести. Поэтому можно сформулировать первое условие, обеспечивающее соединение таких металлов в твердой фазе: достижение скольжения (трения) одного металла по другому и, как следствие, взаимного массопереноса металлов через границу соединения в процессе прокатки.

Усилия, действующие на образец при прокатке, рассчитаны ранее [5]. При вакуумной горячей прокатке поверхности активируются вследствие пластической деформации со сдвигом [5, 15], вызванным касательными усилиями, которые способствуют разрушению пленки окислов и обеспечивают при скольжении (трении) одного металла по другому смешивание поверхностных атомов этих металлов. На ювенильных поверхностях образуются центры возбуждения, связанные с зарождением дислокаций и переносом в глубину металла атомов, захваченных на границе соединяемых металлов.

Предполагали [10], что зарождение дислокаций на границе поверхности соединения двух металлов обеспечивает захват и массоперенос разнородных перемешанных приповерхностных атомов металла с границы раздела по дислокациям вглубь материала. Таким образом, первое условие устойчивого соединения разнородных металлов в твердой фазе заключается в необходимости обеспечить скольжение (трение) одного металла по другому и, как следствие, взаимный массоперенос металлов через границу соединения при прокатке.

Движение металлов при прокатке можно описать уравнением Бернулли течения жидкости в горизонтальном направлении (сила тяжести не влияет на параметры прокатки). Для этого считаем, что поперечная площадь входа в валки мягкого металла $S_{1S} = H_S \cdot l \text{ m}^2$, а твердого – $S_{1H} = H_H \cdot l \text{ m}^2$, а на выходе из них $S_{2S} = h_S \cdot l \text{ m}^2$ и $S_{2H} = h_H \cdot l \text{ m}^2$. Считаем также, что валки вращаются с разными угловыми скоростями $\omega_i \equiv R_i^{-1} \cdot v_{2i}$, где $i = S, H$; v_{2i} , R_i – скорость металлов на выходе из валков и их радиусы соответственно, и не проскальзывают.

Теперь оценим параметры течения мягкого металла, понимая, что для твердого рассуждения будут аналогичными, и в полученных выражениях необходимо заменить индекс S на H. Для адекватного описания течения мягкого металла по уравнению Бернулли необходимо определить его плотность ρ_{1S} на входе (сечение S_{1S}) и ρ_{2S} на выходе (сечение S_{2S}) из валков, а также давления и скорости в направлении прокатки P_{1S} , v_{1S} и P_{2S} , v_{2S} . Тогда

$$\rho_S \frac{v_{1S}^2}{2} + P_{1S} = \rho_S \frac{v_{2S}^2}{2} + P_{2S}. \quad (1)$$

Здесь использовали условие $\rho_{1S} = \rho_{2S} = \rho_S$, которое описывает неизменность плотности мягкого металла при прокатке. Таким образом, второе условие устойчивой прокатки металлов соответствует закону Бернулли течения несжимаемой жидкости в канале разного сечения под влиянием перепада внешнего давления.

С помощью электронной микроскопии высокого разрешения (рис. 2) установлен факт переноса металлов навстречу друг другу. Приведены (рис. 3а, б) точки измерения спектров в образце, Cu–Nb. Следовательно, массоперенос одного металла в другой осуществляется отдельными порциями, движущимися в виде волнового фронта навстречу друг другу.

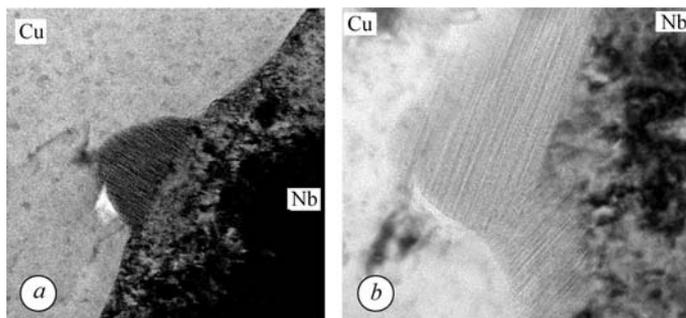
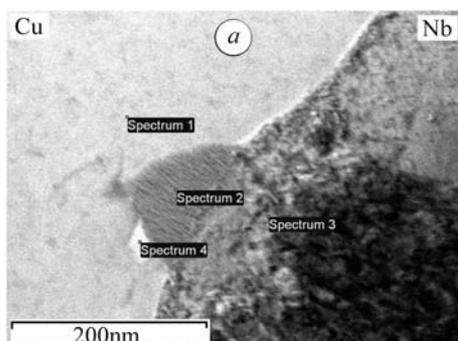


Рис. 2. Граница твердофазного соединения Cu–Nb, полученного горячей прокаткой в вакууме (а), а также квазипериодический волновой фронт Nb, перемещаемый в медь (б).

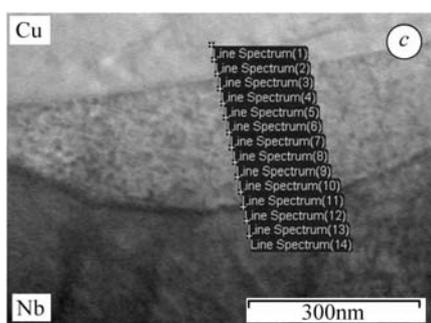
Fig. 2. Interface of the solid phase compound Cu–Nb obtained by hot rolling in vacuum (a) and a quasiperiodic wave front Nb, moved to copper (b).

Результаты испытания одного и того же образца свидетельствуют об одновременном движении фронтов навстречу друг другу (рис. 3). На основании данных электронно-микроскопических исследований можно сделать вывод, что массоперенос осуществляется не только за счет дислокаций [10], но и вследствие взаимного переноса двух металлов через границу соединения свариваемых паке-

тов. Перенос материала обусловлен сдвигом отдельных плоскостей металла, и дальнейшим перемещением атомов металла через границу твердофазного соединения. Таким образом, прочность границы соединения будет зависеть от взаимного массопереноса атомов из одного материала в другой.



Spectrum	In stats.	Cu	Nb
Spectrum 1	Yes	97,30	2,70
Spectrum 2	Yes	11,02	88,98
Spectrum 3	Yes	7,13	92,87
Spectrum 4	Yes	11,55	88,45



Spectrum	In stats.	Cu	Nb
Line Spectr (1)	Yes	98,06	1,94
Line Spectr (2)	Yes	97,55	2,45
Line Spectr (3)	Yes	27,03	72,97
Line Spectr (4)	Yes	8,22	91,78
Line Spectr (5)	Yes	7,88	92,12
Line Spectr (6)	Yes	7,44	92,56
Line Spectr (7)	Yes	7,26	92,74
Line Spectr (8)	Yes	7,24	92,76
Line Spectr (9)	Yes	7,20	92,80
Line Spectr (10)	Yes	6,92	93,08
Line Spectr (11)	Yes	7,34	92,66
Line Spectr (12)	Yes	6,69	93,31
Line Spectr (13)	Yes	7,06	92,94
Line Spectr (14)	Yes	6,95	93,05

Рис. 3. Соединение в твердой фазе Cu–Nb и точки регистрации спектров (a, c), а также содержание (at.%) химических элементов в соответствующих точках спектра (b, d).

Fig. 3. Joint in solid phase Cu–Nb, and registration points (a, c) and the content of elements (at.%) at corresponding points of the spectrum (b, d).

Второе условие заключается в том, чтобы в процессе прокатки достичь массопереноса разнородных перемешанных приповерхностных атомов металла через границу, что обеспечит прочность соединения двух разнородных металлов.

Для устойчивой прокатки необходимо выполнение условия посекундного равенства массы прокатываемого металла:

$$\rho_S \cdot v_{1S} \cdot S_{1S} \cdot \Delta t = \rho_S \cdot v_{2S} \cdot S_{2S} \cdot \Delta t. \quad (2)$$

Из уравнений (1), (2) следует $|v_{2S} - v_{1S}| = 2|P_{2S} \cdot S_{2S} - P_{1S} \cdot S_{1S}|(\rho_S \cdot v_{1S} \cdot S_{1S})^{-1}$. На выходе из валков справедливо соотношение $v_{2S} \equiv \omega_S \cdot R_S$. При прокатке разнородных металлов всегда выполняется условие $v_{2S} \gg v_{1S}$.

Отсюда

$$\omega_S \cdot R_S = 2\sigma_S(T) \cdot \varepsilon_S \cdot H_S \cdot (\rho_S \cdot v_{1S} \cdot S_{1S})^{-1}, \quad (3)$$

где $\sigma_S(T)$ – предел текучести мягкого металла, зависящий от температуры прокатки; ε_S – относительное его обжатие.

Из выражения (3) непосредственно находим соотношение между параметрами прокатки мягкого и твердого металлов:

$$\frac{\omega_H \cdot R_H}{\omega_S \cdot R_S} = \frac{\sigma_H(T) \cdot \varepsilon_H \cdot H_H \cdot (\rho_S \cdot v_{1S} \cdot S_{1S})}{\sigma_S(T) \cdot \varepsilon_S \cdot H_S \cdot (\rho_H \cdot v_{1H} \cdot S_{1H})}. \quad (4)$$

Таким образом, необходимым условием устойчивой прокатки будет посекундное равенство массы прокатываемых металлов. В выражении (4) неизвестны значения расхода массы за единицу времени: $M'_i = \rho_i \cdot v_{1i} \cdot S_{1i} \equiv \rho_i \cdot v_{2i} \cdot S_{2i}$.

Чтобы найти соотношение между M'_S и M'_H , используем следующие физические соображения. Мощности, приобретаемые каждым из прокатываемых металлов, должны быть одинаковыми. Если это не так, то неизбежно возникнет необходимость их перераспределения, чтобы выровнять значения по всему объему металлов. Такое перераспределение может привести к искривлению плоскости свариваемых металлов, так как носителем энергии являются элементарные объемы металлов.

Мощности металлов на выходе из валков

$$W_i = \rho_i \cdot v_{2i} \cdot S_{2i} \cdot \frac{v_{2i}^2}{2}. \quad (5)$$

Из условия равенства мощностей следует:

$$\frac{\rho_S \cdot v_{2S} \cdot S_{2S}}{\rho_H \cdot v_{2H} \cdot S_{2H}} = \left(\frac{\omega_H \cdot R_H}{\omega_S \cdot R_S} \right)^2. \quad (6)$$

После подстановки соотношения (6) в равенство (4) получим условие устойчивой прокатки разнородных металлов

$$\frac{\omega_S \cdot R_S}{\omega_H \cdot R_H} = \frac{\sigma_H(T) \cdot \varepsilon_H \cdot H_H}{\sigma_S(T) \cdot \varepsilon_S \cdot H_S}, \quad (7)$$

которое имеет ряд экспериментальных подтверждений [13, 15].

Таким образом, следующим условием устойчивой прокатки разнородных металлов будет равенство энергии, получаемой каждым из них за единицу времени (или равенство мощности прокатываемых металлов).

ВЫВОДЫ

Сформулированы необходимые условия, обеспечивающие устойчивую сварку в твердой фазе разнородных металлов в вакууме: скольжение одного металла по другому в процессе прокатки; массоперенос разнородных перемешанных приповерхностных атомов металла через границу; подчинение движения металлов уравнению Бернулли для несжимаемой жидкости; неразрывность потока или посекундное равенство массы прокатываемого металла; равенство получаемой энергии каждым из металлов в единицу времени, или равенство приобретаемой металлами мощности при прокатке.

РЕЗЮМЕ. На базі експериментальних даних і фізичних принципів сформульовані основні умови та закономірності, необхідні для досягнення стабільного зварювання у твердій фазі різнорідних матеріалів за гарячого вальцювання у вакуумі: забезпечення ковзання одного металу по іншому; рух металів підпорядкований рівнянню Бернуллі для нестисливої рідини; забезпечення масопереносу атомів металу через межу з'єднання двох різнорідних металів; нерозривність потоку або посекундна рівність маси вальцьованого металу; виконання рівності потужності, яку набувають метали.

SUMMARY. On the basis of experimental data and physical principles the main conditions and mechanisms necessary for obtaining a stable welding of dissimilar materials in solid phase under simultaneous rolling in vacuum are formulated: providing sliding of one metal over the another under rolling; motion of metals follows the Bernoulli's theorem for incompressible liquid; providing mass transfer of dissimilar metal atoms through the boundary of joint of two dissimilar metals; flow continuity or condition of every second equality of the rolled metal mass; observance of equality of acquired power.

1. *Гельман А. С.* Основы сварки давлением. – М.: Машиностроение, 1970. – 310 с.
2. *Основы сварки давлением / С. Б. Айнбиндер, Р. К. Глуде, А. Я. Логинова и др.* // Автомат. сварка. – 1964. – № 5. – С. 21–27.
3. *Каракозов Э. С.* Соединение металлов в твердой фазе. – М.: Metallurgy, 1976. – 263 с.
4. *Сахацкий Г. П.* Технология сварки металлов в твердой фазе. – К.: Наук. думка, 1979. – 295 с.
5. *Исследование процессов сварки многослойных структур из кристаллитов различного химического состава с помощью горячей прокатки в вакууме / Б. В. Борц, А. Ф. Ванжа, А. Т. Лопата и др.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2005. – № 5 (88). – С. 156–158.
6. *Relative slipping of interface of titanium alloy to stainless steel during vacuum hot roll bonding / D. S. Zhao, J. C. Yan, Y. Wang, S. Q. Yang* // Mater. Sci. and Engng. – 2009. – **A499**. – P. 282–286.
7. *Борц Б. В.* Создание композиционных материалов методом горячей прокатки в вакууме // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2009. – **93**, № 2 (60). – С. 128–134.
8. *Evangelakis G. A. and Pontikis V.* Molecular dynamics study of Pb-substituted Cu(100) surface layers // J. of Alloys and Compounds. – 2009. – **483**, № 1–2. – P. 662–664.
9. *Danesh Manesh and Karimi Taheri H. A.* An investigation of deformation behavior and bonding strength of bimetal strip during rolling // Mechanics of Materials. – 2005. – **37**. – P. 531–542.
10. *Гостомельский В. С., Ройтбурд А. Л.* Дислокационный массоперенос вблизи границы раздела разнородных материалов при их пластической деформации // ДАН СССР. – 1986. – **288**, № 2. – С. 366–369.
11. *Борц Б. В., Ткаченко В. И.* Основные закономерности соединения разнородных металлов в твердой фазе при прокатке в вакууме // Тр. XIX Междунар. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. – 2010. – С. 397–399.
12. *Вакуумный прокатный стан / В. М. Амоненко, А. С. Тронь, В. В. Мухин, В. А. Тарасов* // Сталь. – 1960. – № 10. – С. 920–922.
13. *Патент на винахід № 80204.* Спосіб зварювання у твердій фазі металевих пластин // І. М. Неклюдов, Б. В. Борц, І. Е. Васеха, О. Т. Лопата. – Опубл. 25.06.2007; Бюл. № 9.
14. *Patent USA № 7,654,439, B2.* Method of solid phase welding of metal plates // І. М. Neklyudov, В. V. Vorts, І. Е. Vasyekha, А. Т. Lopata. – Feb. 2, 2010.
15. *Борц Б. В.* Исследование зависимости предела прочности границы соединения в твердой фазе разнородных металлов от их пластичности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2010. – **96**, № 5. – С. 108–118.

Получено 06.06.2011