

УДК 621.791.051

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-11-246-41-45

А. Е. Розен, д-р техн. наук, А. Е. Корнеев, д-р техн. наук, А. В. Хорин, канд. техн. наук,
А. В. Прыщак, канд. техн. наук, А. С. Гуденко*, канд. техн. наук,
А. А. Розен, аспирант, Д. В. Козлов, аспирант*

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ МЕЖСЛОЙНЫХ ГРАНИЦ СЛОИСТОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Пензенский государственный университет, г. Пенза, aerozen@bk.ru

** ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ», г. Москва, aeroot@inbox.ru*

В работе представлены результаты исследований по изучению межслойных границ слоистых металлических материалов с внутренним протектором при сварке взрывом. Проведен расчет оптимальных параметров сварки взрывом и их влияние на волнообразование в межслойных границах. Изучено структурообразование переходной зоны межслойной границы.

Ключевые слова: сварка взрывом, сварное соединение, композиционный материал, межслойная граница, компьютерное моделирование

A. E. Rosen, A. E. Korneev, A. V. Horin, A. V. Pryshchak, A. S. Gudenko*, A. A. Rosen, D. V. Kozlov*

STRUCTURAL FORMATION OF INTERLAYER BOUNDARIES LAYERED METAL MATERIAL IN EXPLOSION WELDING

Penza State University, Penza, aerozen@bk.ru

** JSC RPA CNIITMASH, Moscow, aeroot@inbox.ru*

The paper presents the results of studies of interlayer boundaries of laminated metal materials with an inner protector during explosion welding. The calculation of the optimal parameters of explosion welding and their influence on wave formation in the interlayer boundaries is carried out. The structure formation of the transition zone of the interlayer boundary has been studied.

Keywords: explosion welding, welded joint, composite material, interlayer boundary, computer simulation

В последнее десятилетие ведутся активные работы в области создания нового перспективного слоистого металлического материала с повышенной коррозионной стойкостью [1 ... 3]. Предварительные результаты свидетельствуют о возможности повысить их коррозионную стойкость в сравнении с высоколегированными нержавеющей стали аустенитного класса в 10 раз и более за счёт применения, так называемого внутреннего протектора [4 ... 8].

Материалы и методы исследования

Исследуемый материал представляет собой композицию из листов стали с высоким электрохимическим потенциалом, такими как нержавеющей стали аустенитного класса (типа 10X18H12T, 12X18H10T, 08X16H9M2, 08X18H12Б, 10X14AГ15, 02X8H22C6 и их зарубежные аналоги AISI 304, AISI 321, ASTM 321 (США), X10CrNiTi18-9 (Германия), SUS 321, SUS 321 ТК (Япония),

321S51 (Англия) и др.) и сталей с низким электрохимическим потенциалом, в качестве которых могут быть использованы низкоуглеродистые и низколегированные ферритно-перлитные стали обыкновенного качества (Ст0, Ст1, Ст2, Ст3), либо качественные (Сталь 08, Сталь 10, Сталь 15 и Сталь 20), либо низколегированные (09Г2, 09Г2С, 10ХСНД, 10Г2С1 и 10Г2Б) и их зарубежные аналоги (А 516-55, А 516-60, А 516-65, А 561Gr70 (США), St37-3, S235J2G3, 9MnSi5 (Германия), SM41B, SB49, SS34 (Япония), S235JR, HFS3 (Англия) и др. Принципиально новым является использование слоя-протектора между защищаемыми слоями. При этом могут использоваться несколько слоев-протекторов. Конструкционная прочность композита рассчитывается по основному слою. В данной работе исследуются вариации слоистого металлического материала

ла (СММ) с одним и двумя слоями – внутренними протекторами (ВП).

При сварке взрывом серьезную проблему составляет решение задачи по обеспечению идентичности условий формирования межслойных границ многослойного пакета (рис. 1). Это является следствием различий в энергетических условиях соударения.

Для получения одинаковой прочности сцепления всех межслойных границ необходимо условие идентичного пластического деформирования при прохождении ударной волны. Достоверность данного условия может быть оценена соответствием профиля межслойных границ (амплитуда - A , длина и волны λ). При схожести данных характеристик, можно утверждать о схожести в механических характеристиках. Данный вопрос

рассматривался в работах А. А. Дерибаса [9], В. И. Лысака [10], И. А. Батаева [11]. Было установлено, что максимальная прочность достигалась при соотношении A/λ , равному от 0,3 до 0,5 при минимальном содержании зон с литой структурой.

Результаты и их обсуждение

Для предварительной оценки условий формирования сварного шва использовали программный продукт *LS-DYNA*. Регулируемыми параметрами при сварке взрывом являются высота заряда и скорость детонации взрывчатого вещества (ВВ) ($H_{ВВ}$, $D_{ВВ}$), величина зазора на каждой межслойной границе (h). Целью моделирования являлось определение таких факторов как $H_{ВВ}$ и h .

При расчете были приняты следующие граничные условия и допущения:

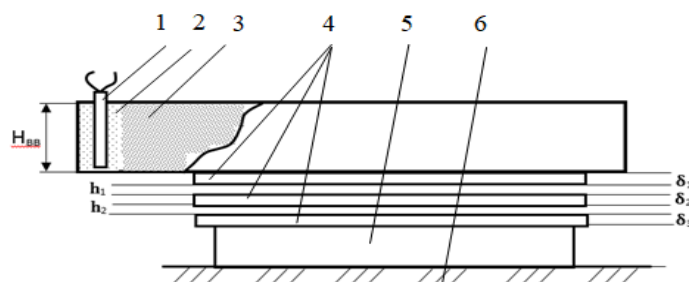


Рис. 1. Схема сварки взрывом 3-слойного СММ с ВП:

$H_{ВВ}$ – толщина заряда ВВ; h_1 , h_2 – технологические зазоры; δ_1 , δ_2 , δ_3 – толщины пластин, используемых в архитектуре; 1 – электродетонатор; 2 – генератор детонационной волны; 3 – заряд ВВ; 4 – метаемые пластины; 5 – слой основного металла; 6 – грунт

Таблица 1 – Экспериментальные и теоретические характеристики для оценки расчетных моделей

Вещество	Характеристика
ВВ, состав	микропористая АС+ДТ (96:4)
толщина, мм	60
модель	Уилкинса – Гейроуха
уравнение состояния	Джонса-Уилкинса-Ли
Металлические пластины для 3-хслойного материала	
первая (толщина, мм)	нержавеющая сталь аустенитного класса (2)
вторая (толщина, мм)	низкоуглеродистая сталь (2)
третья (толщина, мм)	нержавеющая сталь аустенитного класса (2)
модель	Джонсона-Кука
уравнение состояния	Ми-Грюнайзена
Металлические пластины для 4-хслойного материала	
первая (толщина, мм)	нержавеющая сталь аустенитного класса (2)
вторая (толщина, мм)	низкоуглеродистая сталь (2)
третья (толщина, мм)	нержавеющая сталь аустенитного класса (2)
четвёртая (толщина, мм)	низкоуглеродистая сталь (2)
модель	Джонсона-Кука
уравнение состояния	Ми-Грюнайзена

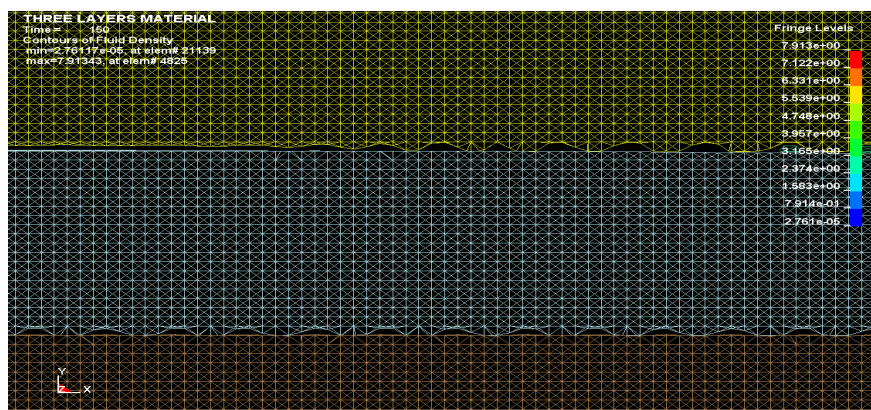


Рис. 2. Результаты моделирования волновой поверхности межслойных границ при сварке СММ с ВП с одним протектором

а) детонационная волна распространяется равномерно с постоянной скоростью 2100 м/с;

б) на удалении 250 мм от точки детонации начинается стабильное волнообразование на межслойной границе. Согласно работе [12], в которой приводятся исследования сварки взрывом аустенитной нержавеющей стали 08Х18Н10Т и низколегированной стали 09Г2С, условия волнообразования остаются стабильными на протяжении до 6000 мм.

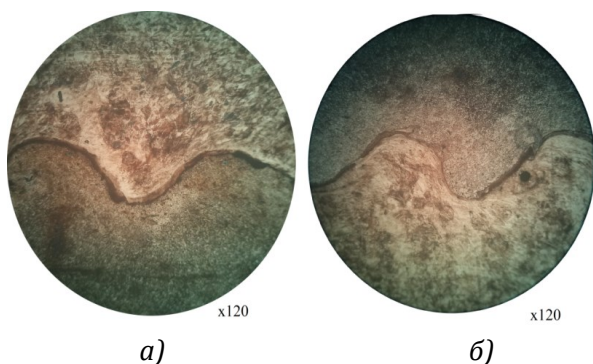


Рис. 3. Микроструктура межслойной границы в 3-хслойном СММ с ВП:
а – шов №1; б – шов №2

Для оценки достоверности принятой при расчете модели был проведен эксперимент, в котором сварку взрывом осуществляли согласно параметрам, аналогичным параметрам расчетной модели. В таблице 1 указаны характеристики расчетной модели.

При расчете искомыми параметрами были: величина массовой скорости каждой из пластин и величина контактного давления.

На рис. 2 представлены результаты моделирования волновой поверхности межслойных границ при сварке СММ и СП с одним протектором (12Х18Н10Т + Ст3сп + 12Х18Н10Т).

Отклонение результатов расчета и эксперимента не превышало 17%. Данное отклонение считается допустимым. Таким образом, принятая гидродинамическая модель волнообразования при сварке взрывом может быть принята для расчета амплитуды и длины волн на каждой межслойной границе.

При этом достигнуто условие, в котором значения λ , l в каждом из слоев не отличались друг от друга более чем на 8%.

Таблица 2 – Механические и технологические свойства СММ с ВП

Техническая характеристика	Архитектура СММ с ВП		
	3-х слойная	4-х слойная	6-слойная
Прочность сцепления слоёв на каждой межслойной границе $\sigma_{ср}$, Н/мм ²	от 320 до 410 (требование ГОСТ 10885 – не менее 140)		
Временное сопротивление на разрыв основного слоя σ_b , Н/мм ²	от 640 до 710 (не менее 530)	от 520 до 590 (не менее 470)	
Ударная вязкость основного слоя KCU , кДж/м ²	<u>от 290 до 310</u> (не менее 250)	<u>от 690 до 740</u> (не менее 640)	
Угол загиба $\alpha_{град}$, не менее	150		

Примечание: в скобках указаны значения по ГОСТ 10885 и ТУ 27.32.09.010-2005

Данный подход в выборе параметров сварки взрывом был использован при получении 3-х, 4-х и 6-тислойных материалов с одним и двумя внутренними протекторами. Были получены образцы площадью от 3,5 до 9,0 м².

После сварки взрывом заготовки проходили 100% ультразвуковой контроль для определения сплошности. Далее, для снятия наклепа на межслойных границах и стабилизации аустенитной структуры, заготовки проходили термическую обработку от 860 до 920°C с одновременной правкой листов на листопрямильных машинах, либо на вальцах. Описанные операции позволили получить СММ с ВП с высокими физико-механическими и технологическими характеристиками (таблица 2).

Отклонения на разных межслойных границах не превышает 40%, что хорошо кор-

релируется с величинами отклонений по амплитуде (37%). Пластичность материала находится на высоком уровне: максимальный угол загиба без признаков повреждения составил до 150 градусов.

Фазовый и структурный анализы межслойных границ

Были проведены рентгеноструктурные, рентгенофазовые и микроструктурные исследования переходных зон на межслойных границах. Исследования микроструктуры проводили металлографических микроскопах МИМ-7 и Альтами МЕТ6.

Были получены фотографии первой и второй межслойной границы 3-хслойного СММ с ВП (рис. 3).

Было установлено, что в стали 12Х18Н10Т с аустенитной структурой на межслойной границе помимо γ -железа с гранецентрированной кристаллической ре-

Таблица 3 – Фазовый состав и характеристика кристаллографической структуры на межслойных границах

Фазовый состав	Структурный тип	Периоды, нм		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
12X18N10T				
γ -Fe (ГЦК)	<i>Fm-3m</i> (225), кубическая	0,3645	-	-
(Cr, Ni)	<i>Fm-3m</i> (225), кубическая	0,3591	-	-
Cr_7C_3	<i>P63mc</i> (186), гексагональная	0,1401	-	0,4532
$Cr_{23}C_6$	<i>Fm-3m</i> (225), кубическая	1,06599	-	0,29806
Cr_3C_2	<i>Cmcm</i> (63), орторомбическая	0,285	0,925	0,696
СтЗсп				
α -Fe (ОЦК)	<i>Im-3m</i> (229), кубическая	0,28606	-	-
Fe_3C	<i>Pbnm</i> (62), орторомбическая	0,45144	0,50787	0,67297
($Cr_{0,2}Fe_{0,8}$)	<i>Im-3m</i> (229), кубическая	0,28664	-	-

Таблица 4 – Фазовый состав и характеристика кристаллографической структуры переходной зоны на межслойной границе

Формула, символ	Структурный тип
(γ -Fe) – аустенит	<i>Fm3m</i> (225), кубическая
(α -Fe) – феррит	<i>Im-3m</i> (229), кубическая
(Fe, Cr) – хромистое железо	<i>Im-3m</i> (229), кубическая
(Cr, Ni) – аустенит	<i>Fm-3m</i> (225), кубическая
Fe_3C – цементит	<i>Pbnm</i> (62), орторомбическая
(Fe,Cr) γ C ₃ – карбид	<i>P31c</i> (159), орторомбическая
Cr_7C_3 – трикарбид	<i>Pmct</i> (51), орторомбическая
$Cr_{23}C_6$ – карбид	<i>Fm-3m</i> (225), кубическая
Fe_2C – мартенсит	<i>14/mmm</i> (139), тетрагональная

шёткой, имеется ещё 4 типа структур, две из которых кубические, одна гексагональная и одна орторомбическая. В стали СтЗсп с феррито-перлитной структурой на межслойной границе имеются α -железо с объёмно-центрированным кубом, а также одна кубическая и одна – орторомбическая структуры.

Заключение

В работе приведены особенности структурообразования на межслойных границах при сварки взрывом. Применение прикладной программы *LS-DYNA* обеспечило достижение оптимальных значений структуры, обеспечивающей высокие механические свойства каждой межслойной границы и всего материала в целом. Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ переходных зон межслойной границы сварного соединения показали наличие в стали 12X18H10T помимо γ -железа с гранецентрированной кристаллической решёткой, наличие ещё 4 типов структур, две из которых кубические, одна гексагональная и одна орторомбическая. В стали ферритно-перлитного класса СтЗсп на межслойной границе выявлены, помимо α -железа, кубическая и орторомбические структуры. Из изменения фазового и структурного состава переходной зоны можно предположить об изменении электрохимического потенциала, что напрямую может влиять коррозионную стойкость. Изучение изменения в переходной зоне электрохимического потенциала и его влияния на коррозионную стойкость материала является дальнейшим этапом исследования.

Библиографический список

1. Евразийский патент № 016878 ЕАПВ С23F 13/06 В 32В 7/02. Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения / А. Е. Розен, И. С. Лось, Ю. П. Перелыгин, Л. Б. Первухин, Ю. А. Гордолопов, Г. В. Кирий, П. И. Абрамов, С. Г. Усатый, Д. Б. Крюков, О. Л. Первухина, И. В. Денисов, А. А. Розен. – 2012.
2. Патент Украины № 100188. Багатослойний матеріал корозійної стійкості (варіанти) і способи його отримання / А. Е. Розен, И. С. Лось, Ю. П. Перелыгин, Л. Б. Первухин, Г. В. Кирий, А. А. Розен. – 2012.
3. Patent of South Korea №10-1300674. Title of the invention: multilayer material with enhanced corrosion resistance (variants) and methods for preparing same patent. – 2013.
4. New Multilayer Corrosion Resistant Materials for Nuclear Power Engineering / A. E. Rozen, I. S. Los', D. B. Kryukov, G. V. Kozlov, A. A. Rozen // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – Pp. 40-44.
5. Mechanism of Pitting Corrosion Protection of Metals and Alloys / V. A. Grachev, A. E. Rozen, G. V. Kozlov, A. A. Rozen // Oriental journal of chemistry. – 2016. – Vol. 32 (2). – Pp. 845-850.
6. Multilayer metal material with special properties and the production technology / V. A. Grachev, A. Y. Rozen, Y. P. Perelygin, A. A. Rozen // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – Vol. 7, Iss. 5. – Pp. 403-411.
7. Multilayer Metallic Material with Specific Properties and the Technology of Its Production / V. A. Grachev, A. E. Rosen, Yu. P. Perelygin, A. A. Rosen // Russian metallurgy. – 2017. – Vol. 5. – Pp. 426-431.
8. Accelerated Corrosion Tests of a New Class of Multilayer Metallic Materials with an Internal Protector / V. A. Grachev, A. E. Rozen, Y. P. Perelygin, S. Y. Kireev, I. S. Los', A. A. Rozen // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – Vol. 3. – Pp. 247-256.
9. Физика упрочения и сварки взрывом / А. А. Дерibas; Отв. ред. С. С. Григорян. - 2-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1980. – 221 с.
10. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин – М.: Машиностроение – 1, 2005. – 544 с.
11. Формирование сваркой взрывом слоистых композиционных материалов из разнородных сталей / И. А. Батаев, Д. В. Павлюкова, Т. В. Журавина, Е. Б. Макарова, Д. С. Терентьев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 1. – С. 6-8.
12. К вопросу о предельных размерах листов получаемых сваркой взрывом / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина, И. В. Денисов, Т. А. Шишкин, Д. В. Ноняк // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград, 2016. – № 10 (189). – С. 76-86.

Работа выполнена в рамках проекта № 0748-2020-0013 «Научные принципы формирования гетерогенных структур методами физико-химического диспергирования» (государственное задание вузу в сфере научной деятельности. Заказчик Министерство науки и высшего образования РФ).