

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-11-258-69-72

*В. Г. Шморгун, д-р техн. наук, В. П. Кулевич, м. н. с.,  
А. И. Богданов, канд. техн. наук, О. В. Слаутин, канд. техн. наук*

## **СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ОПЛАВЛЕННЫХ УЧАСТКОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА В СВАРИВАЕМЫХ ВЗРЫВОМ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЙ-СПЛАВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА**

*Волгоградский государственный технический университет, [mv@vstu.ru](mailto:mv@vstu.ru)*

Исследовано влияние состава сплавов на основе железа на микротвердость участков оплавленного металла в сваренных взрывом соединениях с алюминием. Показано, что при прочих равных условиях присутствие хрома в составе сплава на основе железа приводит к повышению твердости участков оплавленного металла на 1-2 ГПа, а совместное легирование хромом и никелем – на 3 ГПа.

**Ключевые слова:** сварка взрывом, оплавленный металл, фазовый состав, микротвердость

*V. G. Shmorgun, V. P. Kulevich, A. I. Bogdanov, O. V. Slautin*

## **STRUCTURE AND PROPERTIES OF MELTED AREAS FORMED AT THE BORDER OF SECTION IN EXPLOSION WELDED JOINTS ALUMINUM-IRON-BASED ALLOY**

*Volgograd State Technical University, [mv@vstu.ru](mailto:mv@vstu.ru)*

The influence of the composition of iron-based alloys on the microhardness of the areas of the melted metal in explosion-welded joints with aluminum is investigated. It is shown that, other things being equal, the presence of chromium in the composition of an iron-based alloy leads to an increase in the hardness of the alloys by 1–2 GPa, and joint alloying with chromium and nickel, by 3 GPa.

**Keywords:** explosion welding, fused metal, phase composition, microhardness

Опыт, накопленный к настоящему времени в области сварки взрывом, позволяет утверждать, что наиболее опасным видом неоднородности, оказывающим решающее влияние на прочность соединения основного металла с плакирующим слоем, является локальное оплавление на границе раздела металлов, которое вызывается теплом, выделяющимся при деформации на участках ее наиболее интенсивного действия. Большие оплавленные участки всегда содержат кристаллизационные дефекты и поэтому, независимо от сочетаний свариваемых материалов, снижают прочность соединений как физическая неоднородность второго вида [1].

В работе [2] показано, что зависимость относительной прочности сварных соединений от относительной протяженности оплавленных участков имеет свой характерный вид для каждого конкретного биметаллического соединения и определяется твердостью оплавленного металла.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния состава сплавов на основе железа на микротвердость участков оплавленного металла в сваренных взрывом соединениях с алюминием.

### **Материалы и методы исследований**

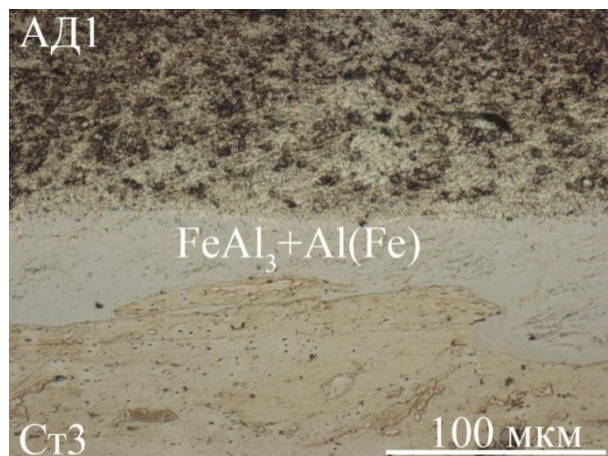
Структуру и свойства оплавленного металла исследовали на межслойной границе сваренных взрывом композитов - бинарных АД1+Ст3 (2,5+8 мм) и многокомпонентных АД1+Х15Ю5 (2,5+1,6 мм), АД1+Х23Ю5 (2,5+2,5 мм) и АД1+12Х18Н10Т (2,5+10 мм). Сварку взрывом проводили на режиме  $V_k=2300$  м/с и  $V_c=470$  м/с.

Металлографические исследования выполняли на модульном металлографическом микроскопе Олимпус ВХ-61, электроннооптические исследования и определение химического состава – на растровом электронном микроскопе Versa 3D Dual Beam. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3М с нагрузкой на индентор 50-100 г.

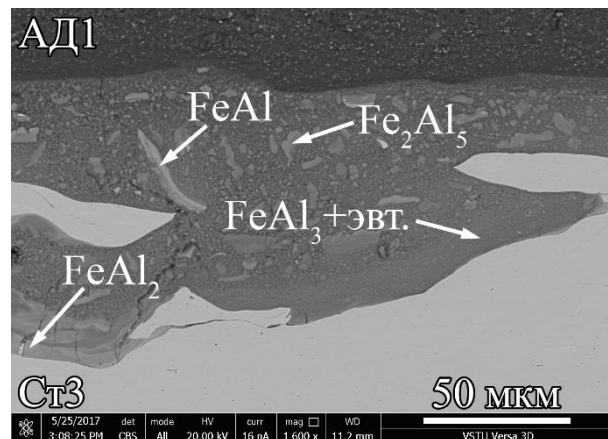
### Результаты и их обсуждение

Анализ результатов энергодисперсионного анализа (рис. 1) показал, что после сварки структура оплавленного металла на

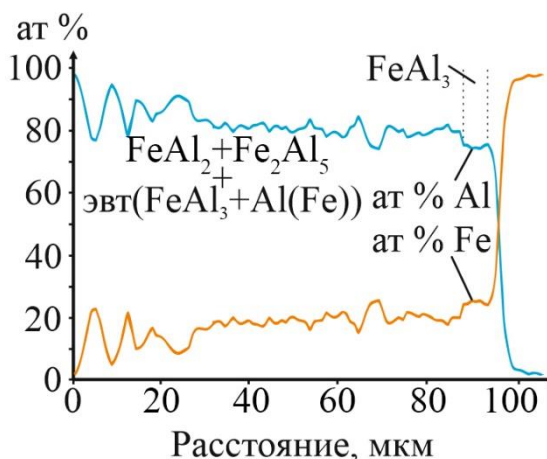
позиций Х15Ю5-АД1 и Х23Ю5-АД1 (рис. 2) показали, что формирующиеся оплавы имеют гетерогенную структуру, их относительная протяженность превышает 90 % при



а



б



в

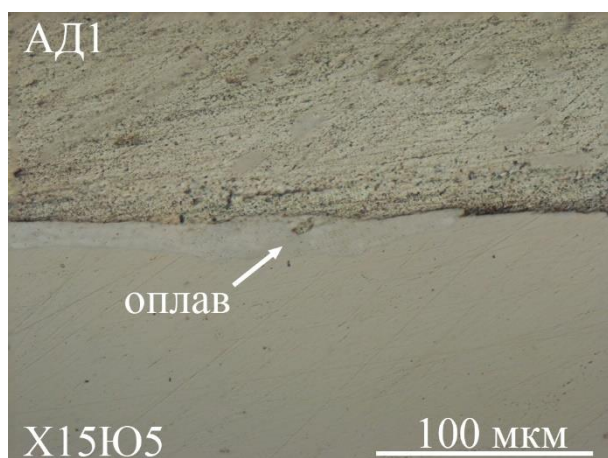
**Рис. 1. Структура (а) и СЭМ изображение (б) оплавленного металла на межслойной границе Ст3-АД1 после сварки взрывом и распределение химических элементов по его толщине (в)**

межслойной границе композита АД1+Ст3 представляет собой механическую смесь  $\text{Al}+\text{FeAl}_3$  с включениями интерметаллидов  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  и  $\text{FeAl}_2$ . На границе со сталью формируется тонкая прослойка интерметаллида  $\text{FeAl}_3$ . Толщина оплавов составляет порядка 50 мкм, их относительная протяженность 90 %, а микротвердость  $\sim 6$  ГПа.

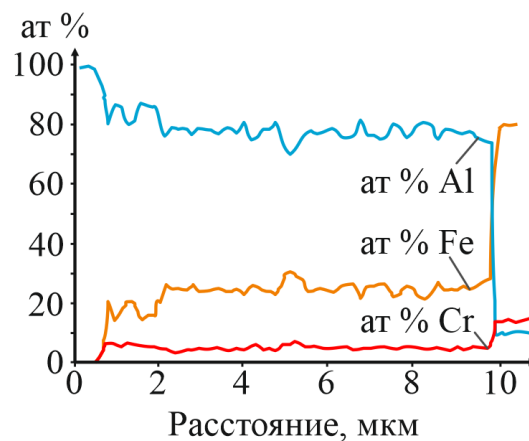
Металлографические исследования межслойной границы сваренных взрывом ком-

толщине, достигающей 15 мкм для Х15Ю5-АД1 и 20 мкм для Х23Ю5-АД1. Микротвердость оплавленных участков находится в диапазоне 5-7 ГПа для Х15Ю5-АД1 и 7-8 ГПа для Х23Ю5-АД1.

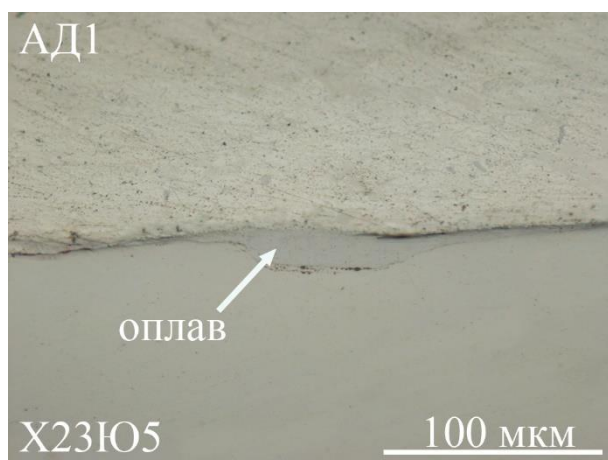
По результатам энергодисперсионного анализа установлено, что оплавы имеют практически постоянный химический состав с равномерно распределенным содержанием хрома на уровне 6 ат. % для Х15Ю5-АД1 и 10



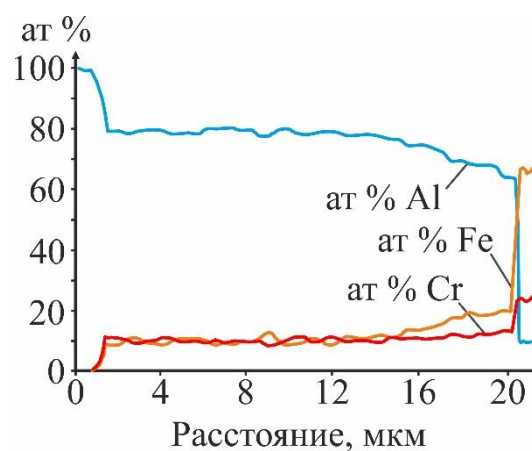
а



б

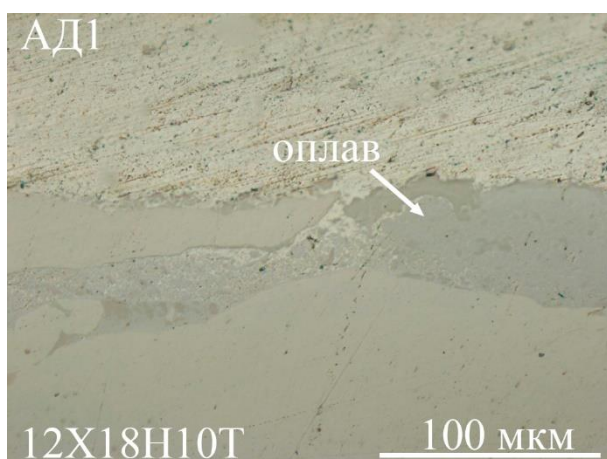


в

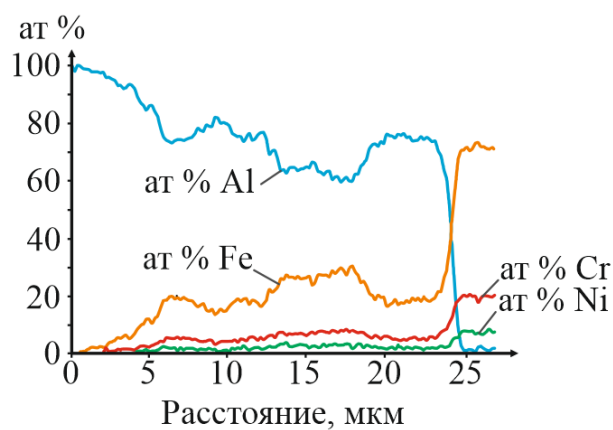


г

**Рис. 2. Структура участков оплавленного металла на межслойной границе X15Ю5+АД1 (а) и X23Ю5+АД1 (в) после сварки взрывом и распределение химических элементов по его толщине (б) и (г) соответственно**



а



б

**Рис. 3. Структура участка оплавленного металла на межслойной границе 12X18H10T+АД1 (а) после сварки взрывом и распределение химических элементов по его толщине (б)**

ат. % для X23Ю5-АД1 (рис. 2, б, г), что соответствует смеси фаз  $\text{FeAl}_3(\text{Cr}) + \text{Al}(\text{Fe}, \text{Cr})$ .

При сварке алюминия АД1 со сплавом 12X18H10T (рис. 3) формируются оплав

переменной толщины (5 - 80 мкм) с относительной протяженностью близкой к 100 %, состоящие из смеси фаз  $\text{FeAl}_3(\text{Cr}, \text{Ni})$  +  $\text{Al}(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Ni})$  с включениями  $\text{FeAl}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  и квазикристаллической фазы  $\text{Al}_8(\text{Fe}, \text{Cr})_5$  [3]. Микротвердость оплавов достигает 9 ГПа.

### Вывод

Микротвердость участков оплавленного металла на межслойной границе сваренных взрывом композиций системы Fe-Al зависит от химического состава сплава на основе железа. При прочих равных условиях присутствие хрома в составе сплава на основе железа (15-23 %) приводит к повышению твердости участков оплавленного металла

на 1-2 ГПа, а совместное легирование хромом (18 %) и никелем (10 %) – на 3 ГПа.

### Библиографический список

1. Седых, В. С. Сварка взрывом и свойства сварных соединений / В. С. Седых, Н. Н. Казак – М.: Машиностроение, 1971. – 72 с.
2. Трыков, Ю. П. О влиянии количества и твердости оплавленного металла на прочность свариваемых взрывом соединений / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун, И. Б. Степанищев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 11. – С. 82-83.
3. Al-Cr-Fe phase diagram. Isothermal Sections in the region above 50 at% Al / D. Pavlyuchkov, B. Przepiórzyński, W. Kowalski, T. Y. Velikanova, B. Grushko // Calphad. – 2014. – Vol. 45. – Pp. 194-203.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда  
№ 21-79-10246, <https://rscf.ru/project/21-79-10246/>