

## АНАЛИЗ ИНОРОДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Рубцов В.Е.<sup>1,2</sup>, Тарасов С.Ю.<sup>1,2</sup>, Колубаев Е.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г.Томск, Россия (634021, г.Томск, пр.Академический 2/4), e-mail: rvy@ispms.ru;

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.Томск, Россия (634050, г.Томск, проспект Ленина, 30)

При нарушении оптимальных режимов сварки трением с перемешиванием (СТП), в швах могут образоваться дефекты, в том числе инородные включения. Наличие инородных включений обусловлено несколькими причинами. В первом случае это могут быть включения металла подложки, которые образуются при непосредственном контакте СТП инструмента и металла подложки. Вторым типом включений является образование при работе изношенным инструментом, когда на поверхности инструмента образуется трибологический слой в результате диффузионного взаимодействия свариваемого материала и материала инструмента. Включения этого типа представляют собой интерметаллидные Fe-Al частицы, которые отрываются от поверхности инструмента и замешиваются в металл шва. Третий тип включений представлен вольфрамовыми частицами, образованными при дополнительном фиксировании свариваемых пластин аргонодуговой сваркой.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, включения, слой переноса, диффузионное изнашивание, радиография

## ANALYSIS OF FOREIGN INCLUSIONS IN FRICTION STIR WELDS

Rubtsov V.E.<sup>1,2</sup>, Tarasov S.Y.<sup>1,2</sup>, Kolubaev E.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia (634021, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4), e-mail: rvy@ispms.ru;

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, pr. Lenina, 30)

When optimal process parameters is beyond the optimal ranges, different weld flaws may appear in friction stir weld (FSW) including foreign inclusions. There are several reasons behind such type defect generation. First, those may be inclusions from the substrate metal generated by excess penetration of the FSW tool and its direct contacting to the substrate. The second type inclusions are generated when FSW is conducted using worn tool which is covered by tribological layer in which diffusion is activated. These inclusions are the intermetallic Fe-Al particles worn off the FSW tool and mixed into the weld metal. The third type inclusions are the tungsten particles tack weld originated from TIG tack welds used for extra securing the aluminum alloy sheets.

Keywords: friction stir welding, inclusions, transfer layer, diffusion-controlled wear, radiography

При радиографическом контроле сварных соединений, получаемых сваркой трением с перемешиванием, выявляются дефекты в виде несплошностей, пор, стыковых линий [1-3]. При этом основное внимание уделяется влиянию стыковых линий и несплошностей на их прочность и долговечность. Однако обнаруживаемые в ходе контроля инородные включения также могут снижать прочность сварного соединения, выступая в качестве концентраторов напряжений и источниками зарождения трещин.

Целью данной работы является анализ причин возникновения инородных включений при сварке трением с перемешиванием.

### Оборудование и материалы

В качестве материала для сварки трением с перемешиванием применяли пластины из термически неупрочняемого деформируемого сплава АМг5М в отожженном состоянии. Две пластины сваривались по длине с использованием опытно-промышленной установки,

разработанной ЗАО Чебоксарское предприятие «Сеспель». Для радиографического анализа дефектов сварного шва использовали рентгеновскую телевизионную систему ФИЛИН 1010 (Тестрон, г. С-Петербург) с размером входного окна детектора 100 x 100 мм и разрешением 2048 x 2048 пикселей. Размер элемента изображения 48 микрон. Экспозиция осуществлялась с помощью компактного источника излучения ICM CP120, напряжение 70 кВ, ток 1,5 мА. Кадры получены в режиме накопления в течение 10 с.

### Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены образцы швов, в которых методом радиографии были обнаружены различные типы включений. Включения первого типа располагались вдоль центральной линии шва (Рис.1) Кроме включений на этих образцах заметен дефект типа выпуклости корня шва, образование которого связано с превышением необходимого уровня силы прижатия образца в пластифицированном металле (Рис.1). Таким образом, инструмент проникает в металл на всю его глубину и упирается в подложку, тем самым формируя вышеописанный дефект. Кроме того, инструмент образует пару трения с материалом подложки, частицы износа которого попадают и замешиваются в шов.

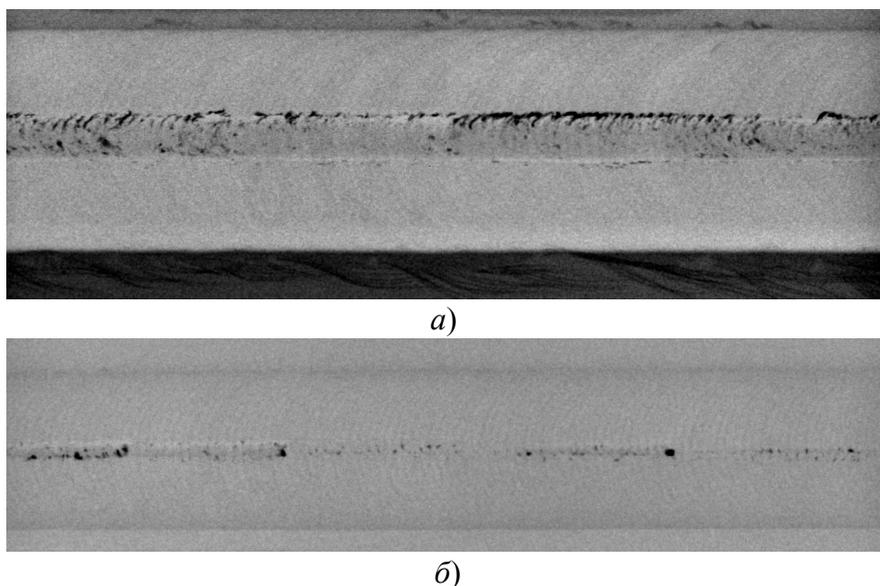
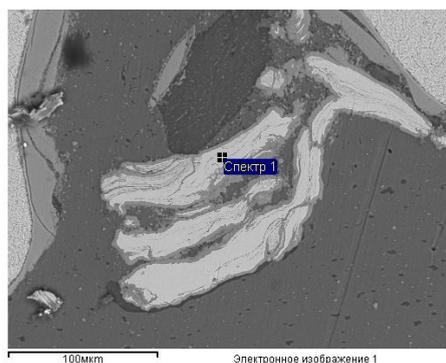
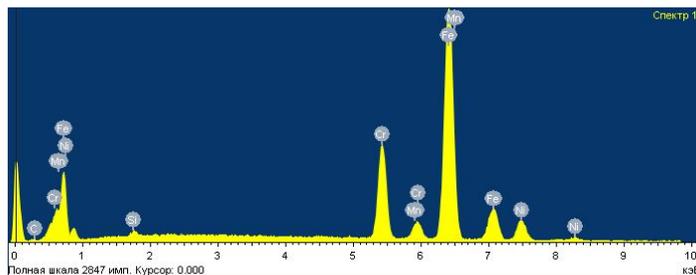


Рис.1. Инородные включения в СТП швах: *a* - толщина 8 мм, 3000 кг, 35 см/мин, 320 об/мин;  
*б* - толщина 2,5 мм, 1200 кг, 50 см/мин, 650 об/мин

Подтверждением сказанному служит Рис.2, *a* на котором изображен фрагмент слоя переноса, сформированного на инструменте из стали 1.2344 X40CrMoV5-1 в результате продолжительной работы по сварке алюминиевого сплава. Микроанализ частиц показывает, что в их состав входит 17% хрома, 9.46% никеля и почти 70% железа. Это состав примерно соответствует составу нержавеющей стали X18H10T, из которой и сделан стол для сварки.



а)



б)

Элемент	Усл.	Интенсивность	Весовой %	Весовой %	Атомный%
	Конц.	Попр.			
C K	0.29	0.4220	1.84	0.34	7.90
Si K	0.12	0.6284	0.49	0.06	0.91
Cr K	7.32	1.1299	17.13	0.17	17.03
Mn K	0.55	0.9787	1.49	0.12	1.40
Fe K	25.55	0.9706	69.60	0.34	64.43
Ni K	3.19	0.8906	9.46	0.20	8.33

Рис.2. Включения нержавеющей стали в слое переноса на СТП инструменте (а), спектр (б) и состав включения

Второй тип включений образуется при длительном использовании инструмента, когда на нем образуется слой переноса в результате интенсивного деформационного и диффузионного взаимодействия материала инструмента и свариваемого сплава. Это приводит к образованию хрупкого интерметаллида Fe-Al, частицы которого отрываются от поверхности инструмента и попадают в шов [4]. Такого рода включения располагались по линии на отступающей стороне шва в виде мелких частиц (Рис. 3).

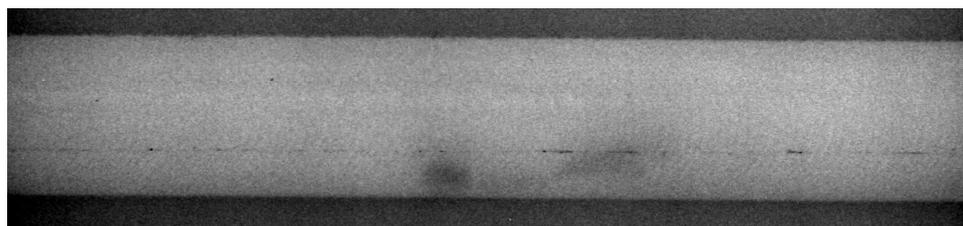
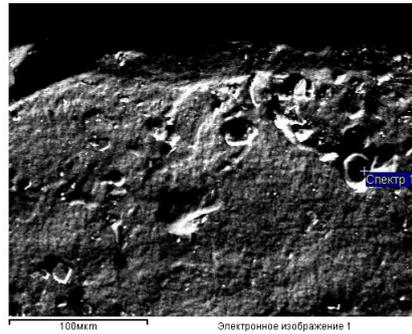
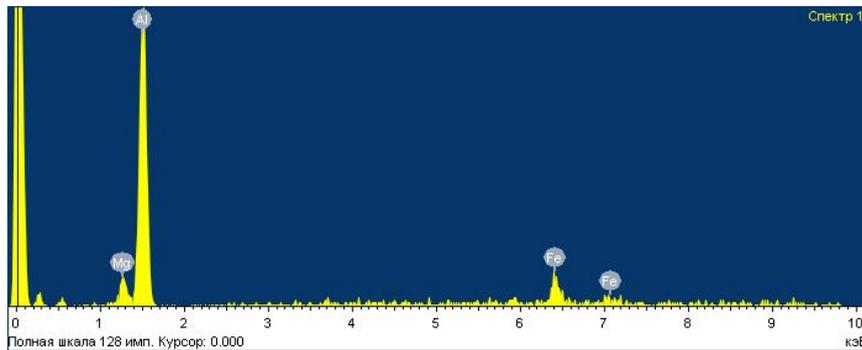


Рис.3. Включения в СТП шве

На Рис.4 показана поверхность излома образца по стыковой линии. Микроанализ показывает, что частицы на поверхности излома по составу соответствуют интерметаллиду Fe-Al.



а)



б)

Элемент	Усл.	Интенсивность	Весовой %	Весовой %	Атомный%
	Конц.	Попр.			
Mg K	0.27	0.9164	6.21	1.00	7.73
Al K	3.04	0.8900	71.59	2.14	80.25
Fe K	0.95	0.8931	22.20	2.13	12.02

Рис.4. Интерметаллические включения на поверхности излома по стыковой линии (а), спектр (б) и состав включения

Третий тип включения появляется тогда, когда используется аргонодуговая сварка для дополнительного фиксирования свариваемых листов (прихватки). Действительно, одним из важных моментов при сварке трением с перемешиванием является необходимость надежного фиксирования свариваемых листов во избежание увеличивающегося зазора и смещения кромок листов. В связи с этим, возможно попадание капель вольфрамового электрода в металл шва и замешивание их внутрь при сварке трением. Именно такие включения показаны на радиографическом изображении Рис.5, а и металлографических сечениях (Рис.5, б, в, г).

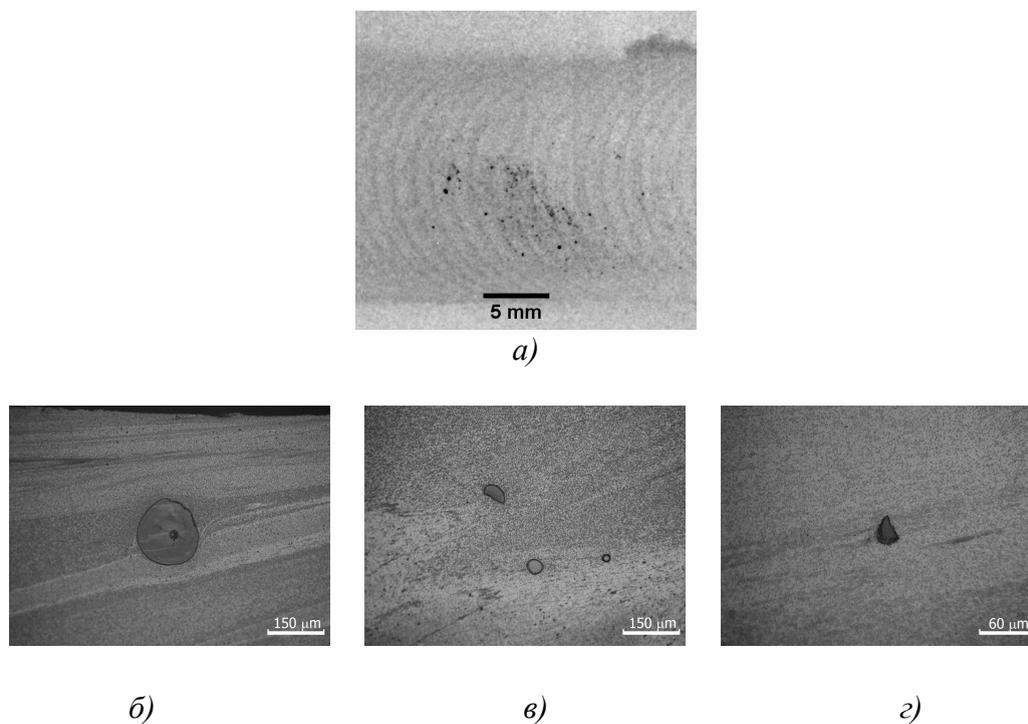


Рис.5. Вольфрамовые включения в шве по данным радиографии (а), металлографических сечений СТП шва (б, в, г)

При сварке трением с перемешиванием свариваемый материал находится в разогретом и пластифицированном состоянии. Кроме того, деформация приводит к фрагментации исходных зерен и формированию наноразмерных зерен. Все эти факторы благоприятствуют адгезионному взаимодействию между материалом инструмента и свариваемым металлом. Адгезионное взаимодействие между телами в трибоконтакте приводит к формированию промежуточного (трибологического) слоя материала, течение можно описать в терминах гидродинамики [5]. Адгезионное взаимодействие между поверхностью инструмента и свариваемым металлом также приводит к диффузионному типу изнашивания инструмента.

На наш взгляд именно эти процессы приводят к появлению инородных частиц в сварном шве при СТП.

Кроме того, пластификация материала, определяемая его структурно-фазовым состоянием и температурой в зоне сварки, может меняться по длине шва. В связи с этим, могут возникать условия, при которых усилие прижатия инструмента к образцу будет излишним, что приводит к контакту инструмента с подложкой. В связи с этим необходимо контролировать величину усилия по ходу сварки.

### **Заключение**

Таким образом, были исследованы типы инородных включений, образующиеся при сварке трением с перемешиванием. Показано, что существующие включения могут возникать за счет адгезионного и диффузионного изнашивания инструмента, либо за счет контакта

инструмента с подложкой.

*Работа выполнена по Проекту III.23.2.1 «Разработка научных основ создания мультимодальных функциональных материалов и покрытий триботехнического назначения на основе динамики контактирования поверхностей» и при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218.*

### Список литературы

- 1.Тарасов С.Ю., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Гнусов С.Ф Радиоскопическая графическая идентификация дефектов сварного шва, полученного методом сварки трением с перемешиванием. Сварка и Диагностика ( в печати).
- 2.Kim Y.G., Fujii H., T. Tsumura, T. Komazaki, K. Nakata. Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy Materials Science and Engineering A. 2006. 415. 250–254.
- 3.Mishra R.S. and Mahoney M. Friction stir welding and processing. ASM International. 2007. 360 p.
- 4.Tarasov S.Y., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. A proposed diffusion-controlled wear mechanism of alloy steel friction stir welding (FSW) tools used on an aluminum alloy Wear 318 (2014)130–134.
- 5.Tarasov S.Y. and Rubtsov V.E. Shear Instability in the Subsurface Layer of a Material in Friction Physics of the Solid State, 2011, v. 53 (2), 358–362.

### Рецензенты:

Данилов В.И., д.ф.-м.н., профессор ИФПМ СО РАН, г. Томск;

Сизова О.В., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ИФПМ СО РАН, г. Томск.