

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
С ПОМОЩЬЮ ДИФфуЗИОННОЙ ПАЙКИ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ
БЫСТРОЗАКАЛЁННЫМИ ПРИПОЯМИ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ**

Пенязь М.А., Севрюков О.Н., Иванников А.А., Бачурина Д.М.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия,
MAPenyaz@mephi.ru*

Диффузионная пайка коррозионностойких сталей позволяет получать соединения, выдерживающие большие механические нагрузки, высокие температуры и агрессивное влияние активных сред без существенного изменения их свойств и зачастую используется в тех случаях, когда другие технологии не применимы. Это тонкостенные изделия или изделия со сложной геометрией, поверхности с большой площадью контакта, разнородные материалы [1]. Основными припоями, применяемыми для диффузионной пайки коррозионностойких сталей, являются аморфные или нанокристаллические никелевые сплавы, содержащие бор. Такие сплавы получают с помощью сверхбыстрой закалки со скоростью охлаждения порядка 10^6 °C/с на специальной установке. Их преимущество в узком прогнозируемом температурном интервале плавления, высокой капиллярной и диффузионной активности, скорости и технологичности процесса. Однако наличие бора приводит к образованию в паяном шве хрупких боридов [2] из-за его низкой растворимости в основном материале. Такая гетерогенная структура снижает эксплуатационные характеристики при динамических нагрузках [3] и в условиях термоциклирования. На рисунке 1 показаны изображения в обратно-рассеянных электронах (BSE) паяных соединений, содержащих неоднородности в диффузионной зоне.

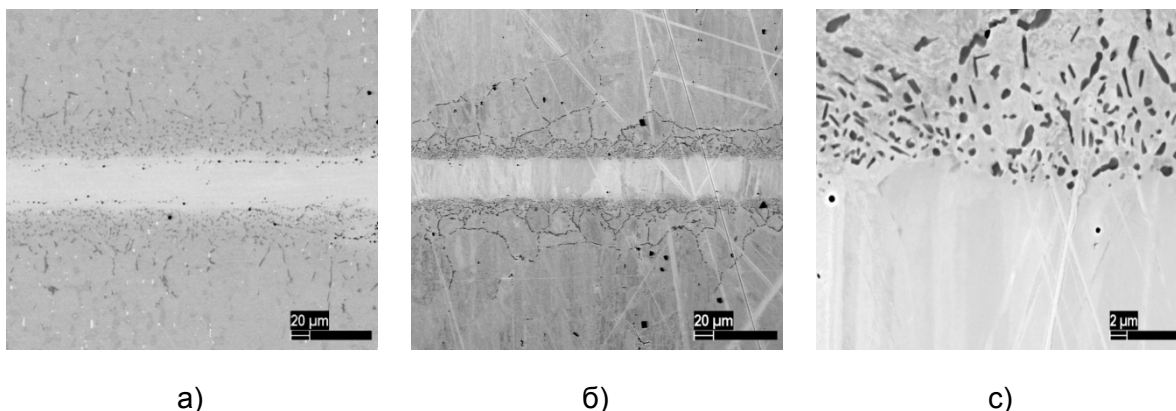


Рисунок 1 - Паяные соединения, полученные с помощью сплава-припоя Ni-Cr-Fe-Si-B:
а) ферритно-мартенситная сталь 16X12BMCФБ (ЭП-823), б), в) аустенитная сталь 12X18H10T
(разные увеличения).

Паяные узлы, как правило, являются частью энергонапряжённых изделий, зачастую работающих в условиях изменения температуры. Поэтому необходимо исследовать изменение механических свойств после многократных операций нагрева и охлаждения. С этой целью проведено термоциклирование паяных образцов, что является ускоренным способом изучения усталостной стойкости соединений. Рассмотрен классический сплав-припой системы Ni-Cr-Si-B.

Ниже в таблице 1 приведены составы исследуемых сталей и припоев. Пайка проводилась для двух типов стали: аустенитной (12X18H10T) и ферритно-мартенситной (16X12BMCФБ). Температурно-временной режим диффузионной пайки 1160 °C 40 мин для аустенитной стали и 1160 °C 15 мин для ферритно-мартенситной стали (время снижено для уменьшения эффекта частичного растворения карбидов Nb, V, W и Mo). Проведение процесса нагрева и выдержки во время пайки и охлаждение с печи происходит в вакууме 10^{-2} Па.

Таблица 1 - Химический состав материалов

Материал	Химический состав, масс. %											
	Fe	Ni	C	Cr	Si	Mo	V	Nb	W	Ti	B	Be
Сталь (А) 12Х18Н10Т	осн	10	0,12	18	<0,8	-	-	-	-	<1	-	-
Сталь (Ф-М) 16Х12ВМСФБ (ЭП-823)	осн	0,5	0,16	12	1,1	0,6	0,2	0,3	0,7	-	-	-
Никелевый припой	3,5	осн	-	7,5	4,5	-	-	-	-	-	2,6	-

На сегодняшний день слабо изучено влияние на механические свойства сложной структуры боридов, возникающих в диффузионной зоне стальных соединений.

В предыдущей работе [4] были получены результаты испытаний паяных соединений на одноосное растяжение (ГОСТ 28830-90) и ударную вязкость (ГОСТ 23046-78), и проанализировано с помощью метода фрактографии влияние хрупких боридов на прочность и характер разрушения соединения. Результаты механических испытаний показали, что для припоя системы Ni-Cr-Si-B получены значения: ударная вязкость 90 ± 10 Дж/см², предел прочности 460 ± 30 МПа для 12Х18Н10Т и предел прочности 210 ± 30 МПа для 16Х12ВМСФБ. Испытания на ударную вязкость были проведены только для аустенитной стали.

Термоциклирование цилиндрических образцов ($\varnothing 6$ мм $\times$ 10 мм) осуществлялось в металлической колбе, которая помещалась в разогретую заранее муфельную печь. Нагрев образцов осуществляли до 450 °С и далее охлаждали до 60 °С путем погружения колбы в холодную воду. Было проведено 50 циклов. График экспериментально полученной зависимости нагрева и охлаждения от времени представлен на рисунке 2.

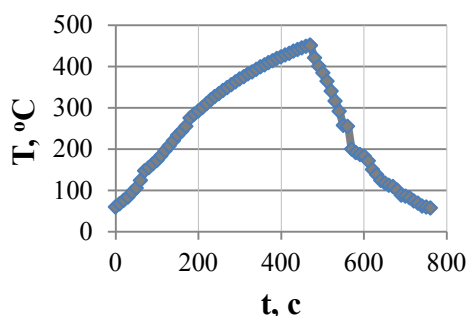


Рисунок 2 - Зависимость нагрева и охлаждения образцов от времени

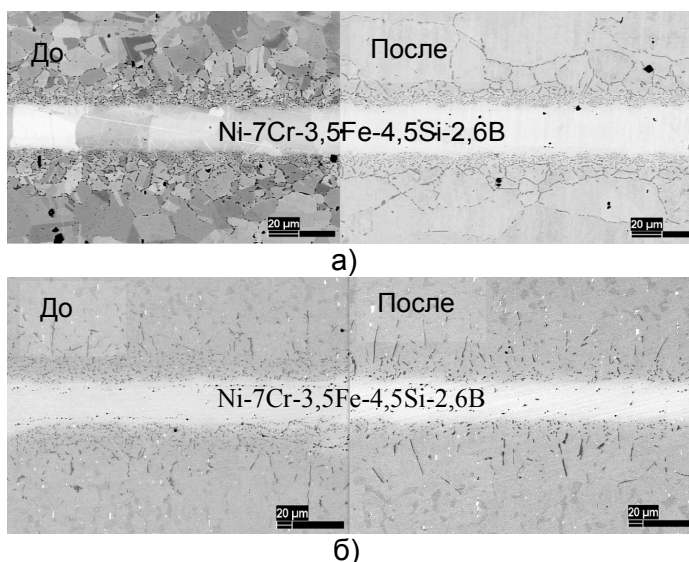
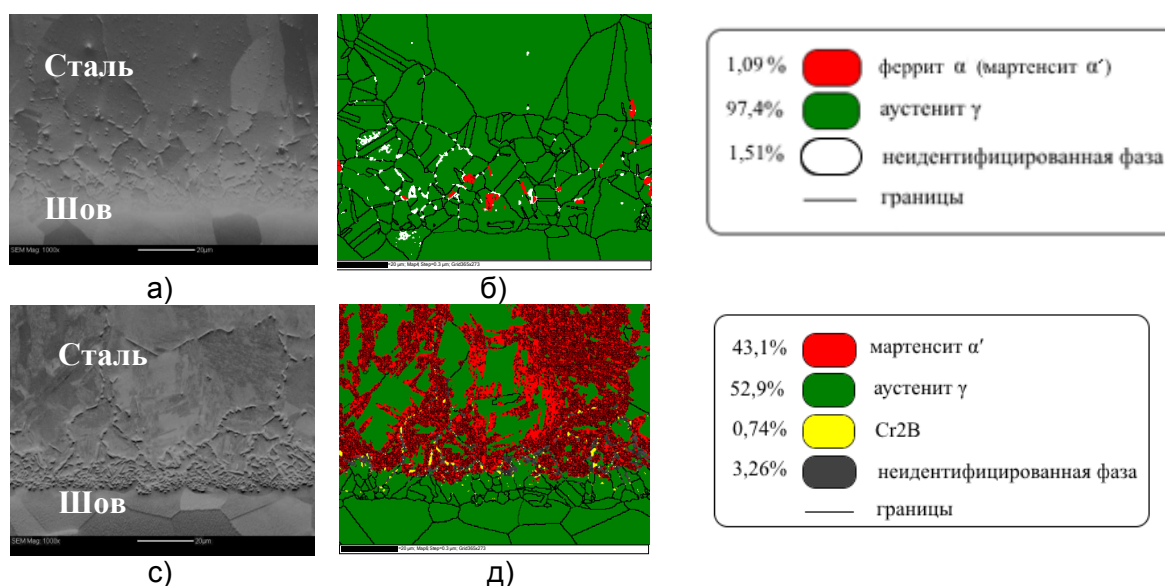


Рисунок 3 - Микроструктура паяного соединения (BSE) до и после термоциклирования
а) 12Х18Н10Т / Ni-Cr-Fe-Si-B;
б) 16Х12ВМСФБ / Ni-Cr-Fe-Si-B

Контроль температуры проводился с помощью вольфрам-рениевой термопары, помещенной в колбу с образцами. Установлено на базе 50 циклов, что все рассмотренные в работе соединения, обладают стойкостью к термоусталости (появление трещин и дефектов не обнаружено – рисунок 3) в интервале температур от комнатной до 450 °С, что свидетельствует о реальной возможности эксплуатации данных неразъемных соединений в условиях значительных колебаний рабочей температуры.

Определено влияния термоциклической обработки соединений на структурно-фазовое состояние шва. С помощью метода EBSD установлено, что в диффузионной зоне паяного соединения, полученного с помощью припоя системы Ni-Cr-Fe-Si-B, образуется в два раза больше мартенсита вследствие формирования во время изотермической выдержки боридной сетки, приводящей к накоплению микронапряжений и пластической деформации, стимулирующих фазовое $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение в стали (рисунок 4).



Список литературы:

- [1] Ivannikov A., Tukhbatov V., Ustyuzhaninov A., Bogachev I. Rapid-quenched nickel-based solder for high-temperature brazing of various constructive elements // Tsvetnyye Metally Issue 12, 2014, P. 27-31.
- [2] Marsilius M, Hartmann T. Influence of boron and phosphor containing nickel based brazing alloy on different base materials o Title. Int. Conf. Brazing, High Temp. Brazing Diffus. Bond. 2016. p. 227–232.
- [3] Binesh B, Jazayeri Gharehbagh A 2016 Transient Liquid Phase Bonding of IN738LC/MBF-15/IN738LC: Solidification Behavior and Mechanical Properties // Journal of Materials Science and Technology (vol 32) pp 1137-1151.
- [4] Kalin B., Penyaz M. Mechanical characteristics of heterogeneous structures obtained by high-temperature brazing of corrosion-resistant steels with rapidly quenched non-boron nickel-based alloys // Journal of Physics: Conference Series. 2018 (vol 945) 012024.