# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НАПЛАВЛЕНИЕМ СВЕРХПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

**А. Ю. Кузнецов, С. В. Рогов**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Рассмотрено применение композитных присадочных порошков, объединяющих твердый припой (тугоплавкий сплав: медь, серебряный, латунный) с температурой плавления выше 450 °С, часто до 1000 °С, обеспечивающий высокую прочность и жаростойкость соединений), и термостойкие сварочные материалы (к ним относятся материалы для сварки нержавеющей стали, чугуна, а также термостойкая холодная сварка), что способствует формированию пространственной дендритной решетки (ветвящаяся форма кристалла, образующаяся при кристаллизации металлов, сплавов и некоторых минералов) и эвтектической матрицы (структурный элемент сплава, представляющий собой мелкодисперсную смесь двух или более твердых фаз, которая образуется одновременно из расплава при постоянной температуре). Отмечена способность структуры к самозалечиванию трещин в процессе последующей термообработки, а также снижение остаточных напряжений в сварных соединениях. Подчеркнута возможность получения прочных, устойчивых к окислению швов без необходимости предварительного подогрева. Сделан вывод о применимости разработанного метода при изготовлении и ремонте деталей газотурбинных двигателей, а также других элементов авиационной и энергетической техники.*

**Ключевые слова**: композитные присадочные порошки, междендритная эвтектическая матрица, сварные швы.

В настоящее время предъявляются повышенные требования к соединениям и ремонтным технологиям изделий из сверхпрочных материалов. Традиционные методы сварки и пайки не всегда обеспечивают необходимый уровень прочности и долговечности, что стимулирует разработку новых технологических решений.

Одним из таких решений является метод наплавки с использованием композитных присадочных порошков, позволяющий сочетать преимущества твердого припоя (порошков) и высокотемпературных сварочных материалов, например: сплав никеля (Ni) и хрома (Cr) – нихромы (Х20Н80, NiCr80/20), никелевые сплавы с Cr, Fe, Mo – инконели (Inconel 625, Inconel 718, Inconel 738), кобальтовые сплавы – стеллиты (Stellite 6, Stellite 12), тугоплавкие сплавы на основе железа и никеля (ЭП617, ЭИ868, ЭП718), тугоплавкие металлы и их сплавы – молибден (Mo), вольфрам (W), тантал (Ta), ниобий (Nb) и порошковые материалы для наплавки (ПГ-СР2, ПГ-ХН80МТЮ, ПН-80НХ20, ПГ-КХН65ВТМЮ).

Далее рассмотрим метод наплавления, который заключается в том, что для достижения необходимого результата первоначально нужно нанести на основной материал присадочный порошок (композитный), который содержит от 50 до 95 % сварочного порошка (высокотемпературного) и от 5 до 50 % порошка твердого припоя. Немаловажно следить за тем, чтобы нагрев присадки и основного металла с использованием сварочного источника тепла происходил локально и одновременно.

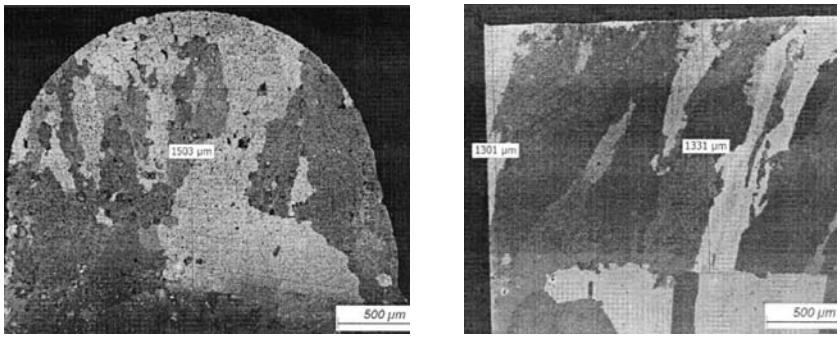
Следующий этап – это достижение полного расплавления припоя и частичного или полного перехода основного материала вместе с высокотемпературным сварочным порошком в жидкое состояние, образовывая сварочную ванну, однородность которой зависит от выбранных параметров.

В процессе, когда образованная нагревом сварочная ванна переходит на этап охлаждения и кристаллизации, начинает образовываться неоднородный наплавленный валик, включающий протяженную взаимосвязанную решетку из высокотемпе-

ратурных дендритов и междендритную эвтектическую матрицу, которая представляет собой смесь эвтектического состава, которая затвердевает в промежутках между ветвями первичных кристаллов (дендритов).

После чего следует плановая термообработка, выполняемая при температуре выше солидуса твердого припоя, но ниже температуры солидуса основного материала, при которой наплавленный валик частично расплавляется, что под действием капиллярных сил приводит к самозалечиванию трещин. При этом общая геометрия наплавленного валика сохраняется благодаря устойчивой дендритной решетке, сформированной из высокотемпературного сварочного порошка [1].

На рис. 1 приведена микрофотография поперечного и продольного разрезов наплавленных сварных швов Mar M247 – AWS A5.8 BNi-9, полученных на сплаве Inconel 738 с использованием микроплазменной сварки, после термообработки.




*а*) *б*)

*Рис. 1*. Микрофотография поперечного (*а*) и продольного (*б*) разрезов наплавленных сварных швов Mar M247 – AWS A5.8 BNi-9, полученных на сплаве Inconel 738 с использованием микроплазменной сварки наплавлением, после термообработки

Полученное изделие, восстановленное с использованием предпочтительного варианта осуществления, содержит исходный промышленный бездефектный основной материал с поврежденной областью, удаленной перед ремонтом и замененной композитным сварочным материалом, содержащим протяженную решетку из высокотемпературных дендритов, полученную во время кристаллизации сварочной ванны, и матрицу из твердого припоя, содержащего депрессанты температуры плавления [2].

В зависимости от требуемого размера наращиваемого шва с использованием нужного количества проходов подбирается температура таким образом, чтобы температура плавления высокотемпературного сварочного порошка была меньше температуры сварной ванны приблизительно в 1,20 раза, однако температура плавления твердого припоя должна превышать температуру ванны. Все это необходимо для обеспечения требуемого химического состава и микроструктуры сварных швов.

Преимущества метода:

– снижение остаточных напряжений – по сравнению с традиционными методами сварки;

– повышение стойкости к окислению – структура соединений демонстрирует более высокую коррозионную и термическую устойчивость;

– высокие механические свойства – прочность и долговечность сварных соединений превышают показатели классических швов;

– гибкость применения – этот метод обычно используется для соединения, восстановления размеров, ремонта корпусов, валов и других узлов [3].

Немаловажным преимуществом является то, что результат проделанной работы обладает устойчивостью к окислению, превышающую устойчивость основного материала.

Таким образом, предложенный способ наплавки сверхпрочных сплавов позволяет формировать уникальную композитную структуру соединений, улучшает механические и эксплуатационные характеристики деталей, расширяет возможности ремонта и продления срока службы элементов двигателей, валов и других немаловажных узлов.

Литература

1. Патон, Б. Е. Сварка и родственные процессы / Б. Е. Патон. – М. : Машиностроение, 1974. – 560 с.
2. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.
3. Козырев, Н. А. Металлургия сварки плавлением : учеб. пособие / Н. А. Козырев, В. Е. Белов – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – 412 с.
4. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин : учеб. пособие / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск, 2000. – 286 с.

## МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПЕНА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**И. П. Старовойтов**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель А. Д. Левкина

*Рассмотрены металлические пены (МП) – легкие композиты с ячеистой структурой (5–25 % металла), предназначенные для работы в экстремальных условиях. Описаны типы МП (закрытые, открытые, композитные), основные материалы (алюминий, никель, медь) и метод порошковой металлургии. Показаны преимущества МП в авиации и ракетостроении: термостойкость до 1500 °С, низкая теплопроводность, высокое энергопоглощение, снижение массы теплозащитных экранов на 40–60 %. Отмечены перспективы гибридных пен и градиентной пористости, а также то, что МП являются оптимальным решением для теплозащиты, ударопоглощения и фильтрации.*

**Ключевые слова:** металлическая пена, классификация, применение, экстремальные условия.

Современное машиностроение сталкивается с задачами, требующими использования материалов, способных выдерживать экстремальные условия: высокие температуры, механические нагрузки, агрессивные среды и вибрации. Одним из перспективных решений являются металлические пены (МП) – это класс композиционных материалов, состоящих из двух компонентов: твердой части (ячеистая решетка из твердого металла) и газа, который создает в полости основного материала множество газонаполненных пор. При этом процентное содержание самого металла составляет всего 5–25 % от общей массы материала, из-за чего класс материалов получил название «металлическая губка».