

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

М.А. Гуреева, С.И. Феклистов



ГУРЕЕВА
Марина Алексеевна

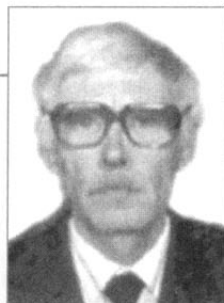
Кандидат технических наук, докторант Центрального научно-исследовательского института технологии машиностроения (ОАО «ЦНИИТМАШ»). Специализируется в области порошковых и гранулированных сплавов, а также технологии их сварки. Автор более 60 научных трудов и изобретений.

Введение

Фильтрующие элементы различной конструкции из металлических материалов широко применяются в различных отраслях народного хозяйства для фильтрации жидкостей и газов. Спектр задач в области жидкой фильтрации чрезвычайно обширен: тонкая фильтрация воды; очистка воды (через паровую фазу) для производства изделий микроэлектроники и лекарств; очистка отработанных машинных масел; фильтрация охлаждающих жидкостей от примесей, несущих в себе радионуклеиды; фильтрация технологических жидкостей и га-

зов; ультрафильтрация воздуха, содержащего дисперсные частицы радиоактивных элементов (плутония); осветление и стерилизация вин, пива, соков. Фильтрующие элементы работают в широком диапазоне температур, а также в агрессивных средах.

Для решения все возрастающего круга задач, связанного с высокоэффективной очисткой газов и жидкостей от микродисперсных загрязнений, возникает потребность в создании структур, которые были бы свободны от недостатков, присущих нетканым фильтрам. В



ФЕКЛИСТОВ
Станислав Ильич

Доктор технических наук. Заместитель директора аттестационного центра ЦНИИТМАШ. Специалист в области разработки конструкционных и сварочных материалов, технологии сварки высоколегированных сталей и сплавов в энергомашиностроении. Автор 80 научных трудов, в том числе одной монографии.

связи с этим представляет интерес разработка фильтрующих элементов патронного типа (ФЭП) из пористых металлических материалов.

К преимуществам металлических ФЭП можно отнести малое гидравлическое сопротивление при незначительных давлениях (менее 0,3 м водяного столба), высокую механическую прочность, коррозионную и радиационную стойкость, термостойкость и теплопроводность. Для более тонкой очистки на поверхность крупнопористого ФЭП наносят мембранный слой из сталей, титана, циркония, серебра, тантала, оксидов титана и циркония, нитрида титана и другой металлокерамики. Номинальная удерживающая способность ФЭП с мембранным покрытием для механических примесей составляет: по воде – от 0,3 до 2 мкм, по газу – от 0,1 до 0,5 мкм.

Фильтрующий элемент конструктивно включает стакан из пористого материала и адаптер, изготовленный механическим путем из горячекатаного прутка (рис. 1).

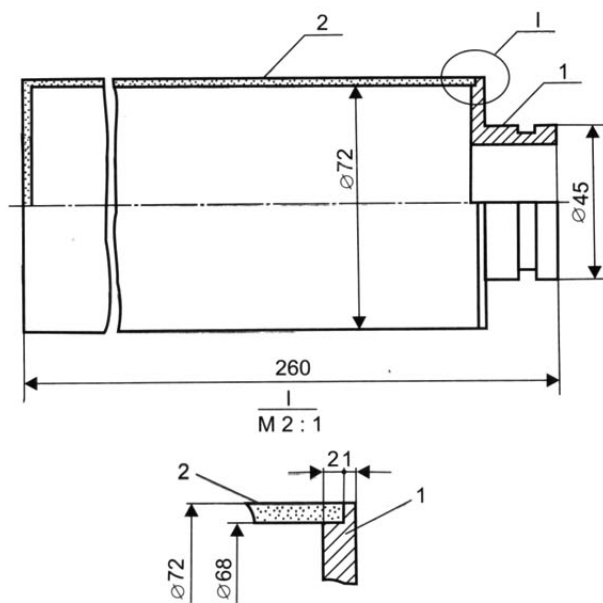


Рис. 1. Конструкция фильтрующего элемента патронного типа: 1 – адаптер; 2 – стакан

Адаптер служит для крепления фильтрующего элемента в фильтродержателе. При изготовлении фильтрующих элементов необходимо выполнить стыковое неразъемное соединение между адаптером и стаканом.

Методика исследования и полученные результаты

Эксперименты по исследованию механизма формирования сварного соединения пористо-проницаемых порошковых металлических материалов (ПППММ) из стали ПХ18Н15 с горячекатаной сталью 12Х18Н10Т в условиях электронно-лучевой сварки (ЭЛС) осуществляли на образцах в виде втулок с внешним диаметром 56 мм (рис. 2).

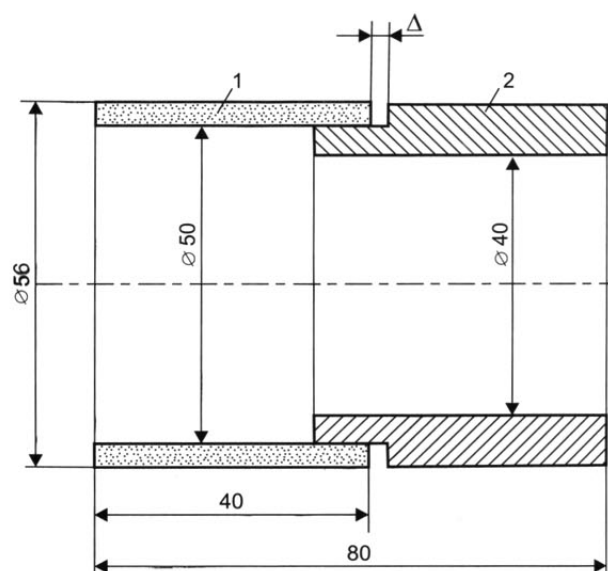


Рис. 2. Образец для отработки технологии ЭЛС пористого материала с деформированным металлом:

1 – втулка из пористого материала;
2 – втулка из металла; Δ – величина зазора между втулками из ПППММ и металла

Металлографические исследования соединений выполнялись на оптическом микроскопе «Neophot-2» при увеличении в 100–500 раз.

На первом этапе исследований было определено влияние режима ЭЛС на глубину проплавления и качество формирования швов при сварке стыкового соединения. Установлено, что глубина проплавления увеличивается с ростом значения силы тока луча. Так, при силе тока луча 18–25 мА проплавление металла (стали 12Х18Н10Т) достигается на глубину 1,2–1,5 мм. С увеличением силы тока луча до 35–40 мА

обеспечивается проплавление металла на глубину 3–3,5 мм. При дальнейшем увеличении силы тока луча до 68–75 мА обеспечивается проплавление металла на глубину до 6,5 мм.

Металлографические исследования микроструктуры соединений пористого порошкового материала с горячекатаным металлом показали, что в переходной зоне от шва к основному материалу ПХ18Н15 присутствует участок проникновения расплава в капиллярные каналы пористого материала (рис. 3).

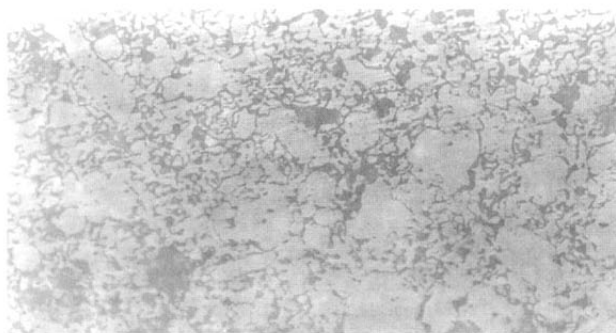


Рис. 3. Микроструктура сварного соединения пористого порошкового материала ПХ18Н15 со сталью 12Х18Н10Т. Участок проникновения расплава в капиллярные каналы пористого материала (x500)

Механизм формирования соединения между пористым порошковым материалом и горячекатаным металлом основан на явлении локальной высокотемпературной пропитки пористо-проницаемого материала расплавом металла. Глубина проникновения расплава в капиллярные каналы ПППММ в большой степени определяется характером распределения максимальных температур в зоне сплавления со стороны пористого материала в процессе ЭЛС.

Конечно-элементное моделирование температурных процессов

В настоящее время признано, что компьютерное математическое моделирование сложных задач тепломассообмена часто оказывается более дешевым и точным, чем экспериментальные исследования. Численные методы, поглощенные в

универсальные программные комплексы, становятся инструментом исследователей и инженеров и часто являются одной из составных частей систем автоматизированного проектирования.

Расчетное определение характера распределения максимальных температур в зоне сплавления ПППММ с учетом изменения теплофизических свойств материалов от температуры нагрева выполнялось с применением программы ANSYS. При проведении тепловых расчетов необходимо знать характер изменения теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности свариваемого материала от температуры. Такие справочные данные, имеющиеся в научно-технической литературе для металлических материалов, практически отсутствуют для пористо-проницаемых материалов. В связи с этим возникает задача экспериментального определения значений теплофизических свойств пористо-проницаемых материалов.

Поэтому в рамках описываемых исследований были экспериментально определены следующие характеристики порошковой стали ПХ18Н15: коэффициент теплопроводности, теплоемкость, температура плавления пористо-порошкового материала. Полученные результаты были использованы для моделирования распределения максимальных температур при ЭЛС ПППММ с горячекатаным металлом.

На рис. 4 показано соединение деформированного металла и ПППММ, выполняемое электронно-лучевой сваркой, и его конечно-элементная модель. Рассматриваемый образец состоит из двух пластин толщиной 3 мм, шириной 15 мм и длиной 30 мм. Одна из пластин выполнена из пористого материала, другая – из металла. В табл. 1 представлены теплофизические свойства пористого материала и металла в зависимости от температуры. Данные для пористого материала приведены при пористости $P = 0,4$ (пористость – отношение объема пор к объему материала).

При моделировании образцы металла рассматривались как помещенные в вакуумную камеру установки для электронно-лучевой сварки, так что теплоотвод был возможен только с боковых площадей по толщине. Границы при-

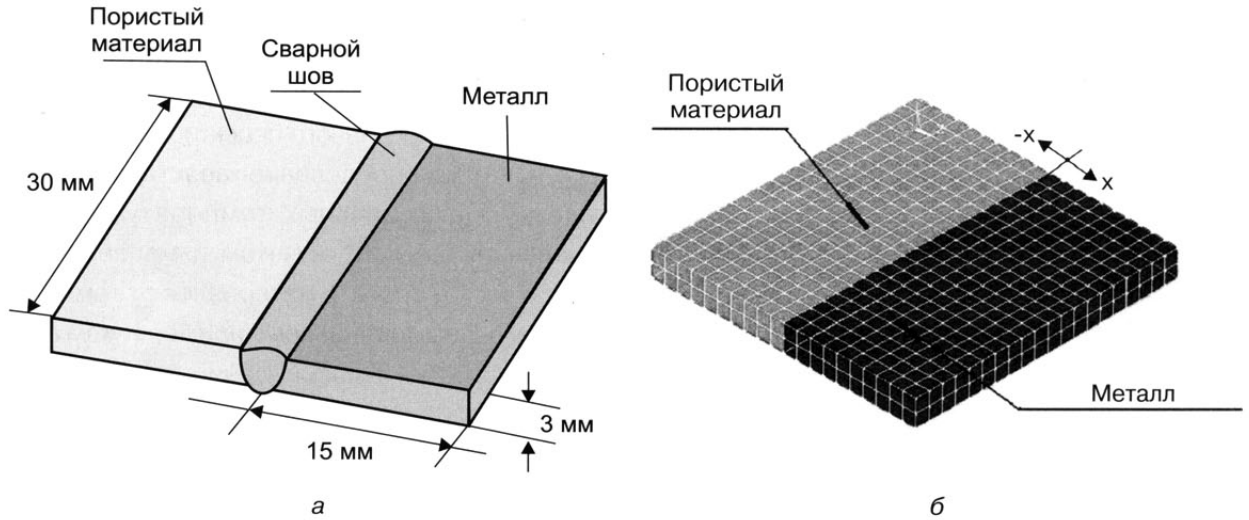


Рис. 4. Образец сварного соединения пористого материала и металла:

а – геометрия образца со сварным швом; б – конечно-элементная модель образца до сварки

няты адиабатическими с температурой $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и конвекцией 1 Вт/см^2 . Параметры режима сварки: ускоряющее напряжение $U = 60\text{ кВ}$; сила тока $I = 80\text{ мА}$; скорость сварки $V_{\text{св}} = 0,66\text{ см/с}$.

При расчетной оценке распределения температуры для прямолинейного шва на пластинах общим размером $30 \times 30 \times 3\text{ мм}$ использовалась схема плоского напряженного состояния. Длина сварного шва составляла 30 мм . Тепловая мощность источника сварки принималась $q = 12,6\text{ кВт}$, скорость сварки $V_{\text{св}} = 1\text{ см/с}$.

Уравнение теплопроводности в программе решалось с использованием разностной схемы Кранка-Николсона. При этом в модели были приняты следующие допущения:

1) все теплофизические свойства материала, исключая плотность, рассматривались как функции температуры;

2) температурное поле мало влияет на форму элементов;

3) фазовые изменения происходят при постоянной температуре, а ввиду аустенитной структуры материалов скрытая теплота плавления не учитывалась.

Расчетные результаты по распределению температуры представлены на рис. 5. Из результатов анализа двумерной модели следует, что принятые параметры режима ЭЛС (сила тока луча и скорость сварки) обеспечивают проплавление металла и ПППММ на всю толщину (рис. 5, а и б). Анализ распределения максимальных температур по ширине образца показывает, что в пористом материале область нагрева до высоких температур шире, чем в металле (рис. 5, в и г). При этом цикл нагрева и охлаждения пористого материала более же-

Таблица 1

Теплофизические свойства пористого материала и металла в зависимости от температуры

Свойство	Единица измерения	Температурный интервал, $^{\circ}\text{C}$	Пористый материал	Металл
Модуль упругости	ГПа	20 800	34,59 16,71	188 91
Коэффициент линейного расширения	$1/^{\circ}\text{C}$	20–800	$19,9 \cdot 10^{-6}$	$16,4 \cdot 10^{-6}$ $19,4 \cdot 10^{-6}$
Теплопроводность	Вт/м $^{\circ}\text{C}$	100 800	7,9 11,65	159,9 263
Плотность	Кг/м 3	20	$4,79 \cdot 10^3$	$7,9 \cdot 10^3$
Теплоемкость	кДж/ $^{\circ}\text{C}$	100 700	0,0272 0,0355	0,468 0,611
Предел прочности	МПа	20 800	52 41	620 180

сткий (рис. 5, д и е). Такое распределение максимальных температур и характер охлаждения пористого материала и металла создают предпосылки для проникновения расплава сварочной ванны в капилляры пористого материала и его последующей кристаллизации в этих каналах при охлаждении сварного соединения.

Влияние параметров ЭЛС

При электронно-лучевой сварке на формирование соединения помимо основных параметров процесса сварки (силы тока луча, ско-

рости сварки, рабочего расстояния, фокусировки) существенное влияние оказывает величина исходной пористости материала. Металлографические исследования зоны сплавления показали, что сварные соединения ПППММ с высокой пористостью, выполненные при скорости более 0,66 см/с, характеризуются наличием подрезов и участков несплавления ПППММ с металлом шва. При этом с увеличением скорости сварки ПППММ с высокой пористостью уменьшается площадь поперечного сечения образца, воспринимающего растягивающее усилие (рис. 6), что приводит к снижению проч-

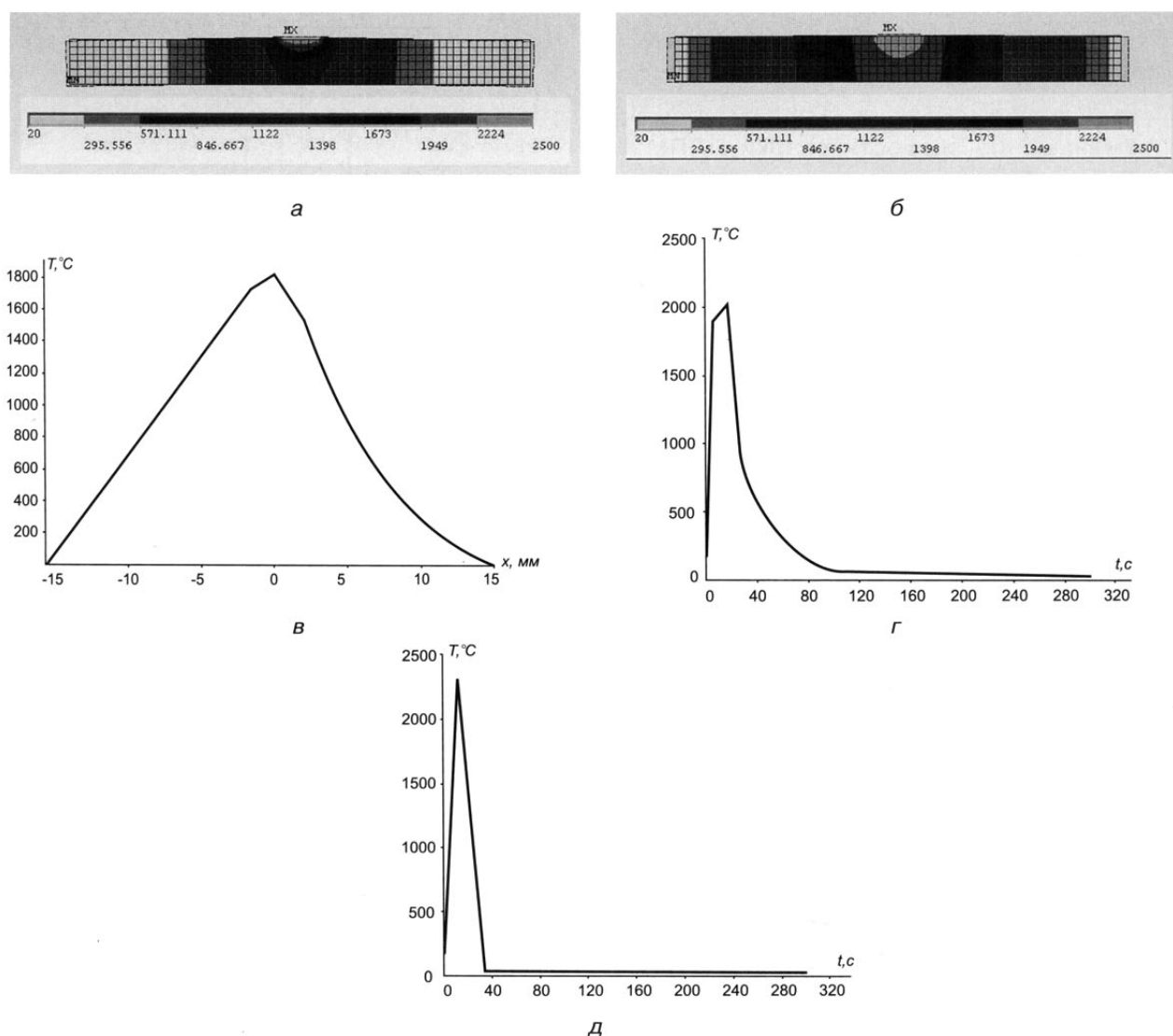


Рис. 5. Распределение температуры в двумерной модели образца:

а – по толщине металла; б – по толщине пористого материала; в – распределение максимальных температур термического цикла сварки по ширине части образца вблизи сварного шва; г – цикл нагрева и охлаждения образца за время 0–300 с для металла; д – цикл нагрева и охлаждения образца за время 0–300 с для пористого материала

ности сварного соединения. Зона разрушения образца при испытании на растяжение совпадает с линией сплавления на ПППММ.

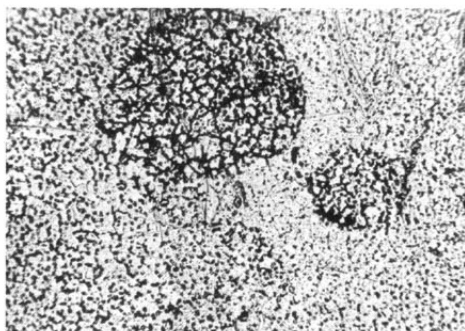


Рис. 6. Несплавления шва и основного материала ПХ18Н15 с пористостью $P = 0,42$ при скорости ЭЛС 45 м/ч ($\times 400$)

Уменьшение скорости сварки ПППММ ПХ18Н15 с высокой пористостью улучшает качество сплавления металла шва с пористым материалом (возрастает площадь капиллярных каналов в поперечном сечении сварного соединения, заполненных расплавом). При этом возрастает прочность сварного соединения, а зона разрушения образца при испытании на растяжение смещается от линии сплавления в сторону основного материала ПППММ.

Отмеченный экспериментальный факт является следствием низкой теплопроводности ПППММ ПХ18Н15 с высокой пористостью. Наличие низкой теплопроводности препятствует формированию в околошовной зоне участка пористого материала, нагретого до высоких температур при скоростях сварки более 25 м/ч. Это в свою очередь ограничивает интенсивность и полноту проникновения расплава шва в капиллярные каналы ПППММ. С уменьшением скорости сварки возрастает время воздействия сварочного источника тепла на ПППММ и увеличивается ширина зоны пористого материала, нагретого до высоких температур, что благоприятно сказывается на заполнении капиллярных каналов ПППММ расплавом сварочной ванны. С уменьшением пористости ПППММ возрастает теплопроводность и появляется возможность реализации процесса на высоких скоростях сварки (более 30 м/ч).

Эксперименты показали, что для получения качественных соединений необходимо осуществлять фокусировку электронного луча определенным образом (рис. 7).

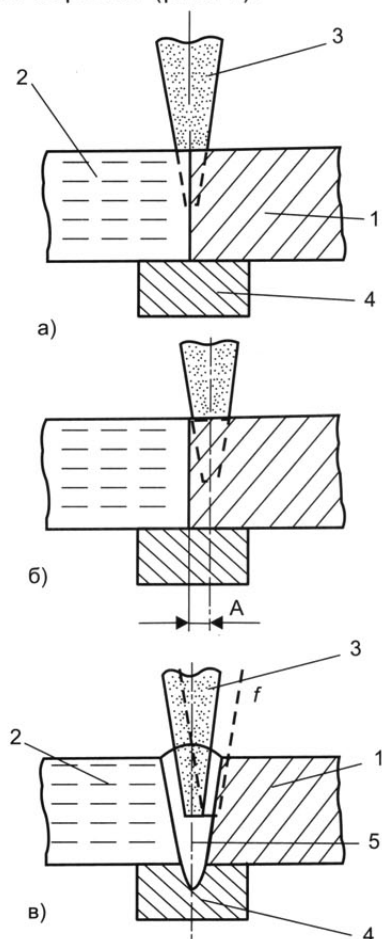


Рис. 7. Схема реализации ЭЛС соединения ПППМ с металлом: 1 – металл; 2 – заготовка из ПППММ; 3 – электронный луч; 4 – подкладка, 5 – сварной шов

Предварительно луч фокусируют в пятно нагрета диаметром 0,5–0,8 мм (рис. 7, а) на уровне половины толщины заготовки из пористого материала. Затем луч смещают в сторону металла на 0,4–0,7 мм от стыка (рис. 7, б). В процессе сварки осуществляется сканирование луча поперек стыка соединяемых материалов со смещением (А) его на ПППММ на 1,2–1,5 мм с одновременным увеличением диаметра пятна нагрета до 1,5–2,1 мм по сравнению с предварительной фокусировкой (рис. 7, в). Частоту сканирования луча (f) задают в зависимости от скорости сварки и величины смещения луча на ПППММ по соотношению [1, 2]:

$$f = (2,2 - 3,5)V_{св}/A,$$

где $V_{св}$ – скорость перемещения луча, мм/с;
 A – смещение луча на ПППММ, мм.

Регулирование ширины зоны проникновения расплава в капиллярные каналы пористого материала осуществляется за счет формирования определенного теплового поля в области соединения путем сканирования луча поперек стыка с одновременным увеличением диаметра пятна нагрева при смещении луча в сторону ПППММ. Амплитуду поперечного сканирования луча задают в пределах 1,2–1,8 мм. При амплитуде менее 1,2 мм пористый материал недостаточно прогревается, что мешает стабильному проникновению расплава в капиллярные каналы ПППММ. Увеличение амплитуды сканирования более 1,8 мм приводит к расширению зоны проникновения жидкого расплава в капиллярные каналы ПППММ, что влечет за собой необходимость увеличения количества расплавленного компактного металла. В этом случае наблюдается формирование в металле шва пор диаметром 0,5–1,3 мм.

При прочих равных условиях (силе тока луча, скорости сварки, пористости материала) на глубину проникновения расплава в капиллярные каналы ПППММ существенное влияние оказывает диаметр самих капиллярных каналов, характеризующий задерживающую способность фильтрующего элемента и определяющийся размером фракций порошка, идущего на прессование заготовки из ПППММ. Установлено, что с уменьшением диаметра каналов глубина проникновения расплава снижается.

При сварке ПППММ с металлами для предотвращения провисания шва с лицевой стороны необходимо в сварочную ванну дополнительно вводить присадочный металл. Такое введение дополнительного присадочного металла при ЭЛС возможно за счет подачи присадочной проволоки, а также сборки стыкового соединения с накладкой, вставкой и остающейся подкладкой (рис. 8).

Применение присадочной проволоки при ЭЛС тонколистовых материалов затруднительно из-за малых размеров сварочной ванны и проблем с взаимным позиционированием ванны и присадочной проволоки. Поэтому основ-

ное внимание было уделено способам введения дополнительного присадочного металла за счет специальных методов сборки стыкового соединения. Были опробованы следующие варианты сборки: стыковое соединение с накладкой, стыковое соединение с вставкой и стыковое соединение с остающейся подкладкой.

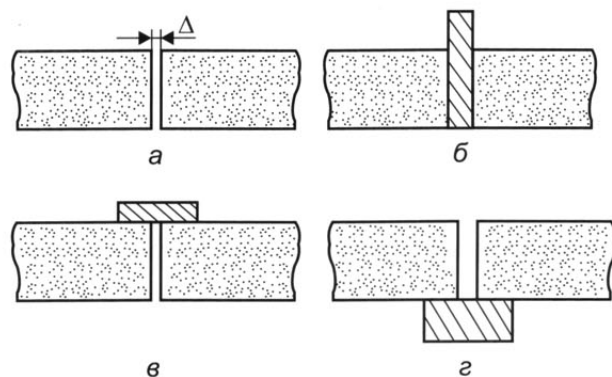


Рис. 8. Введение дополнительного присадочного металла при ЭЛС:

а – исходное положение стыка между двумя заготовками из ПППММ (Δ – величина зазора в стыке); б – применение вставки; в – применение накладки; г – применение остающейся технологической подкладки

Использование в стыке вставки (рис. 8, б) требует увеличения ширины вставки до 2–3 мм. При этом в соединении образуются фактически два стыка, которые свариваются последовательно. Это усложняет технологию выполнения соединения, так как после сварки первого стыка происходит деформация и усадка материала вставки, что влечет за собой изменение зазоров во втором стыке.

Применение накладки (рис. 8, в) позволяет ввести дополнительный присадочный металл в сварочную ванну при ЭЛС ПППММ. Однако накладка экранирует стык, что усложняет совмещение стыка с электронным лучом. Кроме того, появляется необходимость применения механической обработки деталей после сварки для удаления остатков накладки с наружной поверхности фильтрующих элементов после сварки. Режимы ЭЛС при использовании накладки предусматривают применение остро сфокусированного луча при увеличении погон-

ной энергии процесса, что может вызвать образование прожога на пористом материале.

По упомянутым причинам предпочтение было отдано варианту сварки с массивной остающейся подкладкой из горячекатаного металла (рис. 8, г). Эксперименты показали, что в этом случае при правильном выборе параметров режима, глубине проплавления подкладки и марки ее материала, возможно получение качественных стыковых соединений ПППММ. Металлографические исследования подтвердили наличие участка проникновения расплава в капиллярные каналы пористого металлического материала ПХ18Н15. Анализ полученных результатов показал возможность увеличения производительности фильтрующих элементов за счет соединения между собой пористых заготовок электронно-лучевой сваркой.

Предварительные эксперименты показали, что при воздействии электронного луча на пористый материал наблюдается уменьшение объема ПППММ с образованием в околошовной зоне «седловины» (провала сварного шва в стыке). Установлено, что образование «седловины» можно предотвратить, если собирать стыковое соединение с заранее установленным фиксированным зазором в стыке. Образование «седловины» полностью устраняется при зазоре в стыке $\Delta = 0,8 - 1,0$ мм, т.е. при величине зазора, соизмеримой с диаметром фокального пятна электронного луча (рис. 9).

Увеличение зазора в стыке более 1,0–1,2 мм приводит к росту глубины седловины шва с лицевой стороны соединения.

Большое значение для качественного формирования соединения ПППММ имеют геометрические параметры подкладки и глубина ее проплавления при ЭЛС. Выбор размеров подкладки основывался, с одной стороны, на обеспечении условий для формирования шва заподлицо с основным пористым материалом, а с другой – на минимальном уменьшении площади фильтрующей поверхности фильтрующего элемента. Установлено, что для формирования шва заподлицо с основным пористым материалом при сварке пористых заготовок толщиной 3 мм с шири-

ной шва 3,5–4,2 мм глубина проплавления подкладки должна быть не менее 5 мм (рис. 10).

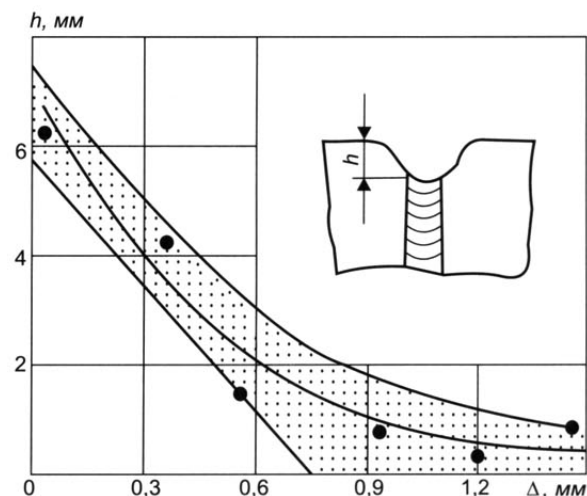


Рис. 9. Величина глубины «седловины» (h) на ПППММ ПХ18Н15 в зависимости от зазора в стыке (Δ) при ЭЛС на остающейся подкладке

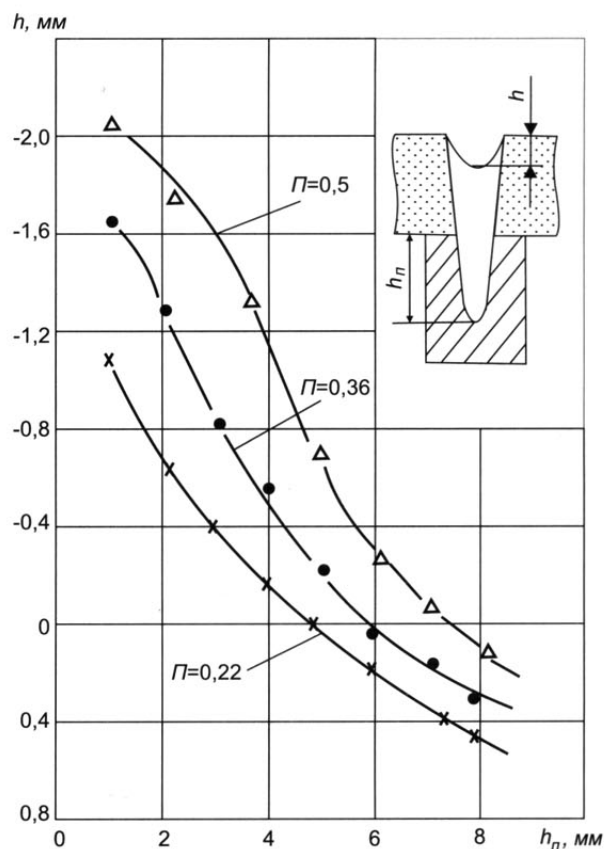


Рис. 10. Влияние глубины проплавления остающейся подкладки из стали 12Х18Н10Т на занижение шва с лицевой стороны образца ПППММ ПХ18Н15 толщиной 3 мм:
 h_n – глубина проплавленной подкладки;
 P – исходная пористость ПППММ

На рис. 10 значения $h < 0$ соответствуют сварному шву с «седловиной», $h = 0$ – гладкому сварному шву (заподлицо с основным материалом), $h > 0$ – сварному шву с выпуклостью.

С увеличением пористости основного материала глубина проплавления подкладки должна пропорционально возрастать. Оптимальная конфигурация остающейся подкладки при сварке стыковых соединений ПППММ, обеспечивающая формирование шва с занижением не более 0,1 мм, показана на рис. 11.

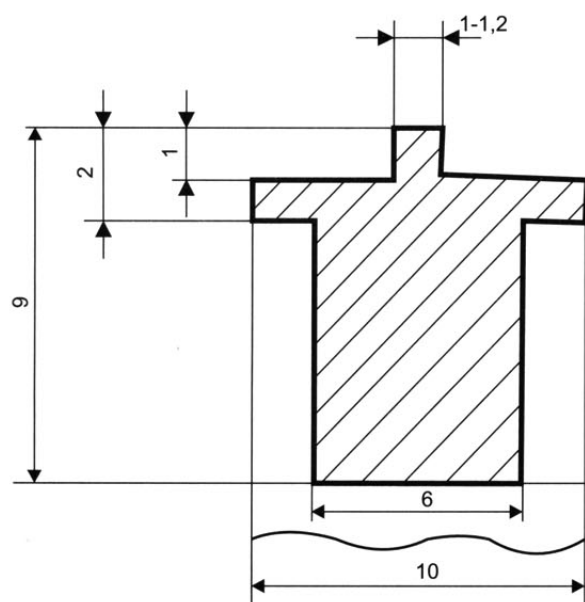


Рис. 11. Оптимальная конфигурация остающейся подкладки при ЭЛС стыковых соединений образца ПППММ толщиной 3 мм

На глубину проникновения расплава в капиллярные каналы ПППММ существенное влияние оказывает химический состав материала под-

кладки и температура его плавления. В табл. 2 приведены данные по химическому составу различных марок нержавеющей стали, которые могут быть использованы для изготовления подкладки, величина проникновения расплава в капиллярные каналы ПППММ, прочность и коррозионная стойкость сварных соединений.

Механические свойства и коррозионная стойкость оптимально сочетаются в сварных соединениях, выполненных на подкладке из сталей 12Х18Н10Т и Х24Н8М2ДЗЛ. В последнем случае фильтрующие элементы могут применяться для работы в агрессивных средах и морской воде. Подкладка из Х17Г9Н4 предпочтительна для сварки фильтрующих элементов, работающих в атмосферных условиях при температуре до 400 °С в контакте с авиационным топливом.

Для обеспечения гарантированного проникновения расплава в капиллярные каналы ПППММ сварку следует осуществлять со сканированием электронного луча и с предварительным прогревом стыкуемых кромок ПППММ расфокусированным лучом. Прогрев кромки 1 ПППММ до начала процесса ЭЛС осуществляется расфокусированным лучом 3 с пятном нагрева 4 диаметром 1,2-2,5 мм (рис. 12, а). Силу тока луча при прогреве кромки ПППММ выбирают в пределах 0,3-0,45 от значения силы тока луча при ЭЛС. Прогрев ПППММ осуществляется за несколько оборотов детали. Затем луч 3 смещают в сторону металла 2 (рис. 12, б), фокусируют в пятно нагрева 0,5-0,8 мм и осуществляют ЭЛС. В процессе сварки луч 3 совершает колебания поперек стыка и тем самым

Таблица 2

Влияние состава материала подкладки на глубину проникновения расплава в капиллярные каналы ПППММ ПХ18Н15, механические и коррозионные свойства сварных соединений

Марка стали	Химический состав, масс. %								Глубина проникновения расплава в ПППММ, мм	Прочность сварного шва соединения на разрыв, МПа
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Ti	Cu		
Х17Г9Н4	0,12	0,8	9,7	17,0	3,8	—	—	—	0,16	85
Х18Н10Т	0,12	0,55	1,3	18,3	8,8	—	—	—	0,22	107
08Х18Н12Б	0,08	0,8	1,4	18,5	12,2	1,0	—	—	0,25	98
12Х21Н5Т	0,11	0,7	0,6	21,3	5,1	—	0,43	—	0,21	92
Х24Н8М2ДЗЛ	0,07	0,6	0,5	23,4	8,7	—	—	2,95	0,35	113
Пористость основного материала $\Pi = 0,36$										
Коррозионная стойкость сварных соединений превышала 90 суток										

обеспечивает перемещение расплава в направлении ПППММ.

Полученные результаты легли в основу технологии сварки пористых заготовок фильтрующих элементов. ЭЛС стыковых соединений заготовок из ПППММ позволила существенно расширить номенклатуру типоразмеров фильтрующих элементов без дополнительных затрат на создание сложной и дорогостоящей оснастки для гидростатического прессования заготовок и их спекания в атмосфере сухого водорода. Остающаяся после ЭЛС технологическая подкладка не влияет на эксплуатационные характеристики фильтрующих элементов. Внешний вид фильтрующих элементов обычной и повышенной производительности при фильтрации показан на рис. 13.

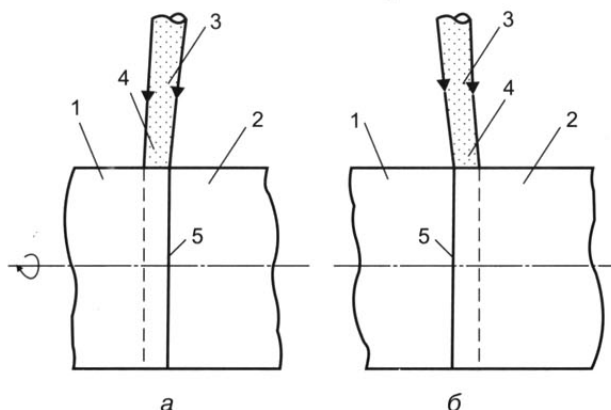


Рис. 12. Схема прогрева кромок ПППММ расфокусированным электронным лучом:

1 – ПППММ; 2 – металл; 3 – электронный луч;
4 – пятно нагрева; 5 – стык

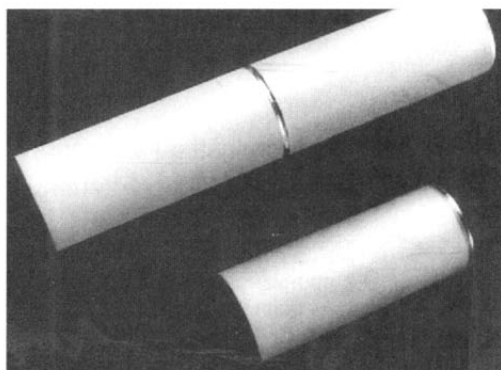


Рис. 13. Сварной фильтрующий элемент из ПХ18Н15 обычной (внизу) и повышенной производительности

Заключение

На основании анализа экспериментальных результатов установлены основные закономерности механизма формирования стыкового соединения при электронно-лучевой сварке пористо-проницаемых порошковых металлических материалов с металлом, которые базируются на явлении локальной высокотемпературной пропитки капиллярных каналов в порошkovом материале расплавом сварочной ванны.

Показано, что глубина проникновения расплава в капиллярные каналы пористого материала определяется максимальными температурами околошовной зоны со стороны пористого материала, а также соотношением температур плавления металла сварочной ванны и пористого материала. На основе компьютерного моделирования выполнены расчеты максимальных температур нагрева участков околошовной зоны со стороны ПППММ. Анализ результатов моделирования показал, что более широкая область распространения теплового поля присутствует в пористом материале и имеет место резкий характер его охлаждения по сравнению с металлом.

При ЭЛС стыковых соединений ПППММ рекомендуется введение дополнительного присадочного металла осуществлять за счет использования остающейся технологической подкладки.

Список литературы

1. Гуреева М.А., Антонов А.А., Овчинников В.В., Магнитов В.С. Технологические особенности электроннолучевой сварки изделий из пористых порошковых материалов // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Сварка – XXI век». – Тольятти, ТГУ. 2002. С. 164–168.
2. Гуреева М.А., Антонов А.А., Овчинников В.В. Механизм локальной капиллярной пропитки при формировании соединений пористо-проницаемых и компактных металлических материалов // Межвузовский сборник научных трудов. Т.1 «Наука, технологии и перспективные материалы». – М.: МГИУ, 2001. С. 291–293.