

Рис. 3. Схема розрахунку для визначення радіуса кривизни стиснено-розтягнутої зони

надати деформуючому інструменту контур за дугою cd з радіусом R_2 .

$$\Delta cd = \Delta L = L\varepsilon_{пр},$$

де L — довжина дуги стиснено-розтягнутої зони у будь-якому меридіональному перетині днища.

Величина переміщення діаметра деталі у напрямку ba :

$$f = [2R_{сф}\sin(\gamma/2)]/\sin(\beta_1 - \gamma),$$

де $\gamma = 180\Delta L/(\pi R_{сф})$ — кут, на який опирається приріст дуги ΔL , $\beta_1 = \beta - \alpha_1/2$ — кут, на який опирається дуга cb . Величини ΔL та f несумірні з $R_{сф}$, тому прийmemo $ab = bd = f$.

З рисунка за геометричними співвідношеннями обчислимо

$$R_2 = \frac{1}{2(H+f)} \sqrt{\left[\left(\frac{D_d + D_c}{2}\right)^2 + (H+f)^2\right]} \times \sqrt{\left[\left(\frac{D_d - D_c}{2}\right)^2 + (H+f)^2\right]}.$$

Сполучення радіусів R_1 та R_2 виконується огинаючим радіусом $R_{ог} = (1.5...2)(2R_1 - R_2)$.

Розрахунок радіусів штапів для витягування днищ сферичної форми значно зменшить вартість та термін технологічної підготовки нових виробів.

ACCOUNT OF RADIUS TOOL'S CURVATURE FOR WANT IN PUNCHING OF SPHERICAL SHELLS

N. N. Ubyz'kyi

The problems of technological preparation of spherical bottoms of rocket tanks production are considered.

УДК

АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СОЕДИНЕНИЯ ГРАФИТА С МЕТАЛЛАМИ ПРИ УЧАСТИИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

© В. Е. Приходько, А. В. Кулик

Дніпропетровський державний університет

Графітові матеріали знаходять все більше застосування у сучасних інженерних конструкціях. Існуючі способи з'єднання графітів з металами поділяються на три основні класи за умовами, в яких проходить формування з'єднувального шва — в твердій, рідкій чи парогазовій фазі. Більшість способів зварки і пайки графіту з металами оснований на формуванні шва у твердій чи рідкій фазах.

Известные в настоящее время способы соединения графита с металлами основаны на формировании зоны соединения в жидкой или твердой фазах с учетом протекающих при этом физико-химических процессов.

Формирование соединения с участием жидкой фазы является наиболее распространенным способом пайки, сварки, сварко-пайки графита с металлами. При этом возможны различные варианты

материала формирующего — от металлического до карбидного и углеродного составов, а также промежуточных составов с различным содержанием металлической карбидной и углеродной фаз.

Для большинства способов пайки и сварки плавлением графитовых материалов с металлами характерно наличие жидкой фазы, образование которой может происходить при плавлении готовых припоев, промежуточных металлических прослоек, при

локальном или контактно-реактивном плавлении соединяемого металла, а также при плавлении графита в камерах высокого давления. Жидкая фаза играет важную роль в процессах сварки и пайки.

При различных способах пайки графита с металлами расплавленный металл должен смачивать графит, растекаться в зазоры или по его поверхности, проникать в поры. В результате обеспечивается физический контакт между жидким металлом и графитом и создаются условия для взаимодействия.

В процессе контактного взаимодействия жидких металлов с графитом протекают такие процессы, как растворение и перекристаллизация графита в жидком металле, науглероживание и карбидизация жидкого металла, сопровождающиеся диффузией углерода в жидкий металл непосредственно или через образовавшийся карбидный слой.

Процесс контактного плавления при контактно-реактивной пайке графита со сталью изучали ряд исследователей [5, 6, 19, 20]. Основной стадией процесса пайки является пропитка соединяемых графитовых деталей расплавленным металлом. При застывании металла в порах графита образуется металлический каркас, прочностные свойства которого и определяют, как правило, прочность паяного соединения.

При определенной глубине пропитки и полноте заполнения прочность паяного соединения превышает прочность графита.

Процесс пропитки жидким расплавом графитовой основы зависит от особенностей пористой структуры графита, физических свойств жидкого расплава (плотность, вязкость, поверхностное натяжение, краевой угол смачивания) и характер его взаимодействия с углеродом.

В работе [1] предложено математическое описание процесса пропитки графита жидкими химическими активными металлами. Применительно к процессам пайки была предложена зависимость глубины пропитки от пористости графита, свойств жидкого расплава и параметров пайки:

$$l^2 = \frac{2 \ln(R - \xi) [2\sigma_{ж-г} \cos\theta (R - \xi) + P_{сд} (R - \xi)^2 n_k] t^{1/2}}{\rho \nu_0 N},$$

где R — радиус поры; ξ — толщина карбидного слоя; $\sigma_{ж-г}$ — поверхностное натяжение припоя; θ — краевой угол смачивания графита припоем; $P_{сд}$ — удельное усилие сдавливания; n — количество капилляров на контактной поверхности; ρ — плотность жидкого припоя; ν — вязкость припоя; N — коэффициент науглераживания. Видно, что про-

питка графита припоем может прекратиться в результате резкого увеличения краевого угла смачивания, повышения вязкости припоя или закупорки пор твердой карбидной фазой. При пайке с увеличением температуры до некоторого предела вязкость припоя снижается, однако дальнейшее увеличение температуры приводит к более интенсивному растворению углерода в жидком расплаве, что приводит к увеличению краевого угла смачивания и вязкости, а также к ускорению процесса закупорки пор. В работе [5] установлено, что контактное плавление протекает с большой скоростью, и для среднеуглеродистой стали она достигает 0.018 см/с, а максимальная прочность паяного соединения [4] достигается при глубине пропитки графита жидким расплавом до 14—16 мм. Время, необходимое для заполнения пор графита ГМЗ (пористость 25 %) на глубину 14...16 мм сталью с содержанием углерода до 1 % составляет 12—16 с.

Одним из основных условий осуществления пайки графита с металлами является хорошее смачивание и растекание металлических расплавов по поверхности графита. Эти процессы влияют на газоплотность и прочность паяных соединений.

В работе [13] исследована смачиваемость графита жидкими Ti, Zr, Hf, Si и установлено, что при их взаимодействии с графитом на границе происходит интенсивное карбидообразование и диспергирование графита (его разрушение и увеличение поверхностной энергии). Межфазная энергия при взаимодействии этих металлов с графитом стремится к нулю, и даже становится отрицательной [3].

При взаимодействии жидких Ti, Zr, Hf с графитом происходит полное смачивание (краевой угол близкий или равный нулю). Поэтому краевой угол в качестве критерия смачивания использовать нельзя. Критерием смачивания в таких системах являются скорость растекания или конечный радиус капли жидкости [7].

Металлы IV группы периодической системы хорошо свариваются с графитом и служат припоями для высокотемпературной пайки графита. Их применение позволяет получать графитовые соединения с карбидным швом, близким по своим характеристикам к свойствам графита.

В работе [12] исследована смачиваемость графита V, Nb, Mo, W и установлено, что эти металлы не образуют равновесных краевых углов на графите и хуже растекаются по его поверхности, чем металлы IV группы. При этом они образуют пористую карбидную пленку переменного состава. Краевой угол смачивания графита этими металлами составляет 20—40°. По своему поведению в контакте с графитом эти металлы занимают промежуточ-

ное положение между элементами IV группы и группы железа. Эти металлы хорошо свариваются с графитом, но несколько хуже, чем металлы IV группы.

Металлы V и IV группы успешно применяются при высоко температурной пайке графита.

В работах [14, 16] приведены результаты исследований смачиваемости графита жидким железом, никелем, кобальтом и палладием — эти металлы удовлетворительно смачивают графит. Хуже смачивает графит жидкая платина [14]. Смачивающая способность этих металлов сильно зависит от содержания углерода в жидкой фазе. С увеличением содержания углерода в расплаве более 2.5 % смачивающая способность по отношению к графиту резко ухудшается. В работе [9] приводятся данные по смачиваемости графита металлами группы железа в различных атмосферах. Например, при температуре 1550 °С краевой угол смачивания в вакууме равен 0°, в атмосфере N_2 и He он составляет 31°, а в атмосфере N_2 — 64°. Видно, что кислород-содержащие примеси в рабочей атмосфере ухудшают смачиваемость графита расплавом железа.

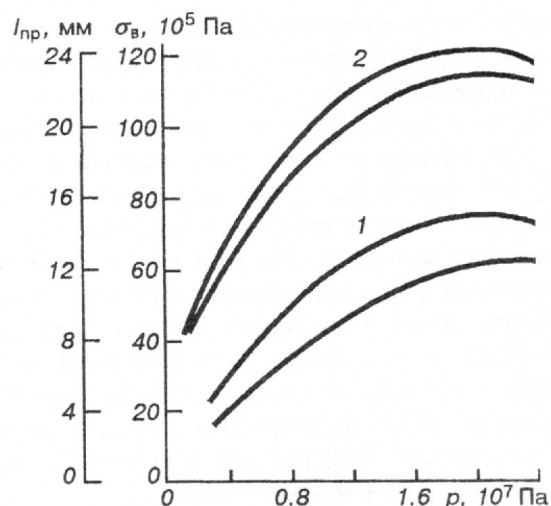
Металлы группы железа могут быть использованы в качестве припоев при пайке и сварке с графитовыми материалами.

Особенности контактно-реактивной пайки графита со сталью исследованы в работах [5, 6, 8, 10]. Установлено [8, 10], что при контактном нагреве графитовой и стальной детали до температуры пайки образуется жидкая прослойка железоуглеродистой эвтектики, которая при сжатии паяемых деталей проникает в поры графита и химически взаимодействует с ним. При охлаждении расплав кристаллизуется с образованием металлического каркаса, плотно сцепленного с графитовой основой.

Прочность паяного соединения зависит от глубины проникновения расплава в графит и его пористости, а также технологических параметров пайки: усилия сжатия, температуры пайки и времени выдержки, скорости нагрева и охлаждения деталей в процессе пайки.

Зависимость глубины пропитки графита и прочности паяного соединения от удельного давления сжатия [6] приведена на рисунке. Максимальная прочность паяных графито-металлических образцов достигается при удельном давлении сжатия $(1.5-1.7) \cdot 10^7$ Па и глубине пропитки 14–16 мм. Дальнейшее увеличение удельного давления сжатия приводит к снижению прочности соединения, что связано, по-видимому, с разупрочнением графита под действием сжимающего усилия.

В работе [5] исследовано влияние времени пайки и скорости охлаждения на структуру зоны шва при



Зависимость глубины пропитки графита припоем (1) и прочности паяного соединения (2) от удельного давления сжатия

контактно-реактивной пайке на воздухе низкоуглеродистой стали Ст3 с графитом марки ГМЗ.

Резюмируя результаты исследований по контактно-реактивной пайке графита со сталью, можно отметить, что оптимальный режим пайки графита плотностью 1.6–1.9 г/см³ с низкоуглеродистыми сталями следующий: нагрев паяемого узла со скоростью 373 К/мин до температуры 1423–1473 К, выдержка при этой температуре в течение 1–2 мин, при усилии сжатия $(1.5-1.7) \cdot 10^7$ Па, охлаждение — вместе с печью. Пайку деталей небольших размеров рекомендуется производить в атмосфере защитных газов, а больших — на воздухе. Однако, как отмечают авторы, этот способ мало пригоден для пайки с графитом деталей из высоколегированных сталей больших размеров. Контактным способом можно паять детали диаметром не более 15 мм. Оптимальный режим пайки: температура $T = 1540...1620$ К, время $\tau = 2...10$ мин, вакуум 13.33...1.333 Па или среда защитных газов.

Применение готовых припоев позволяет вести процесс пайки при более низких температурах, формировать шов из более пластичного материала, использовать промежуточные компенсационные элементы, снижающие уровень термических напряжений в паяном узле. Последние два фактора особенно важны при пайке с графитом нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов, резко отличающихся от него по коэффициенту термического расширения. Недостатком способа является его большая стоимость по сравнению с контактно-реактивной и диффузионной пайкой.

В зависимости от назначения паяемых изделий для пайки графита со сталью применяется низко-

температурная и высокотемпературная пайка. При низкотемпературной пайке (температура эксплуатации не превышает 473—523 К) используют пропой на основе олова, свинца, висмута, кадмия и сурьмы. Эти пропой не смачивают чистый графит и используются для пайки специальных видов графита, пропитанных металлами или графита с предварительно нанесенным покрытием (медь, никель).

Величина зазора между графитовой и металлической поверхностью при пайке должна составлять 0.0125—0.025 мм. Выбор минимального зазора обусловлен тем, что в материале шва вследствие его отличия по КТР от графита и металла возникают растягивающие напряжения и величина их будет тем меньше, чем меньше зазор.

В работах [4, 11] для высокотемпературной пайки графита марки ГМЗ со сталью Ст. 3 использованы порошкообразные припои систем Cu-Sn, Cu-Zn, Cu-Zn-Mn. Для смачиваемости графита и растекания припоев в зазоре графит—сталь в их состав вводили 5—10 % титана. Из исследованных припоев более высокую прочность на разрыв ($\sigma = 1.1 \cdot 10^7$ Па) обеспечивает припой состава 80 % Cu + 10 % Ti + 10 % Sn. При этом разрушение происходило по паяному шву.

Разработаны сплавы-припои системы Ti-V-Cr, обладающие смачиваемостью и текучестью по отношению к графиту и окиси алюминия [18], не требующие предварительной обработки соединяемых материалов. Были также разработаны и показали хорошие результаты сплавы других тройных систем, таких как Ti-Zr-Ge, Ti-Zr-Ta, Ti-Zr-Nb.

В работе [21] показано, что пайка плотного (беспористого) пирографита с молибденом, коваром, вольфрамом через титановую фольгу с гальваническим покрытием медью или оловом не дает положительных результатов. Образцы самопроизвольно разрушались по соединению. После искусственного создания капиллярных каналов на графитовой поверхности путем сверления технологических отверстий диаметром 0.7 мм и глубиной 1—2 мм удалось незначительно повысить прочность соединения до 2—2.8 МПа.

В работе [17] приведены исследования по разработке типов твердых припоев и технологии пайки пиролитического графита с окисью бериллия. Разработанные три типа припоев $93\text{Zr} + 7\text{Ni}$, $93\text{Zr} + 7\text{Fe}$, $93\text{Ti} + 7\text{Cr}$ позволили получить соединение небольших деталей из пирографита и окиси бериллия. Однако при пайке деталей больших размеров образовывались трещины в одном или обоих компонентах материалов вследствие появления остаточных напряжений, возникающих из-за большого различия в КТР этих материалов.

В работе [15] приведены результаты исследований и режимы электронно-лучевой сварки графита МПГ-6 с молибденом и титаном, представляющие собой цилиндрический стакан из этих металлов с толщиной стенок 0.5—1 мм. С одного из торцов стаканов были вварены графитовые окна. Были также получены соединения типа цилиндр — цилиндр.

При исследовании шлифов микротрещин в зоне шва не наблюдалось. В процессе испытания на прочность разрушение происходило по графитовой детали (а не по шву). Отмечается, что 50-кратный нагрев сварных соединений электронным лучом в вакууме от комнатной температуры до 1400—1500 °С не вызывал разрушения сварного шва или появления трещин.

В литературе приводят результаты применения электронно-лучевого нагрева при сварко-пайке графита с молибденом. Были получены соединения графитового диска с молибденовым цилиндром, графитовой трубки с молибденовой доской. Выполненные швы выдерживали 50-кратный цикл нагрева до 1570 К и охлаждения до комнатной температуры. Проведенные исследования показывают возможность сварко-пайки графита с тугоплавкими металлами электронным лучом.

В работах [1, 2] для соединения графита с титаном использовалась аргонно-дуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом. При этом наибольшая прочность шва, превышающая прочность графита, достигалась при сварке крупнопористых графитов типа ВПП, ГЗМ, ПРОГ-2400.

ВЫВОДЫ

1. Анализ способов соединения графита с металлами показывает, что механизм соединения при сварке плавлением и пайке связан с образованием металлического каркаса при расплавлении припоя, в связи с чем качество соединения определяется не только образованием химических связей и твердых растворов, но и чисто механической связью металлического каркаса с матрицей, образующейся в месте соединения на глубину до 15 мм.

Поэтому применение сварки плавлением и пайки ограничивается пористостью графита, и для мало-пористых и плотных (беспористых) графитов такой механизм образования соединения графит-металл не может быть реализован из-за отсутствия пор или их малой величины. При величине пор менее 400 мкм проникновение расплавленного металла или припоя в капилляры графита затруднено из-за закупоривания их образовавшимся карбидом.

2. При соединении плотных графитов с металлами целесообразно использовать методы соединения в твердой фазе, среди которых наиболее широкое применение находит диффузионная сварка в вакууме. Этот метод дает принципиальную возможность для соединения графита различной пористости с металлом, который образует с ним химические соединения (карбиды) или твердые растворы.

1. Аникин Л. Т., Дергунова В. С., Кравецкий Т. А. Пайка и сварка графита. — М.: Металлургия, 1978.—135 с.
2. Аникин Л. Т., Кравецкий Г. Л., Дергунова В. С. О высокотемпературной прочности соединений графитовых деталей // Свар. производство.—1972.—№ 1.—С. 18—19.
3. Елютин В. П., Костиков В. И., Пеньков И. А. и др. // Заводская лаборатория.—1964.—№ 8.—С. 1022—1024.
4. Кокина Т. А., Аникин Л. Т., Кравецкий Т. А. и др. Авт. свид. № 318445 // Открытия, изобретения, промыш. обр., тов. знаки.—1971.—№ 32.—С. 27.
5. Кокина Т. А., Кравецкий Г. А., Леонов Л. В. и др. Конструкционные материалы на основе графита. — М.: Металлургия, 1975.—Сб. № 10.—С. 176—182.
6. Кокина Т. А., Шакова К. И., Кравецкий Т. А. и др. Влияние некоторых технологических параметров на структуру и прочность паяных соединений стали с графитом // Сварочное производство.—1972.—№ 2.—С. 14—17.
7. Костиков В. И., Митин Б. С. // Высокотемпературные материалы // Технология химического машиностроения.—1968.
8. Крапишина А. Б., Поздняков В. В., Семенов А. П. // Физика и химия обработки материалов.—1968.—№ 1.—С. 107—110.
9. Левин А. М. // Тр. Днепропетровского металлургического института.—1952.—Вып. 28.—С. 89—104.
10. Лукина Э. Ю., Кокина Т. А., Кравецкий Т. А. // Свар. производство.—1973.—№ 6.—С. 36—37.
11. Лукина Э. Ю., Кокина Т. А., Кравецкий Т. А. и др. Авт. свид. № 321337 // Открытия, изобретения, промыш. обр.,

тов. знаки.—1977.—№ 35.—С. 47.

12. Маурах М. А., Костиков В. И., Пеньков И. А. // Физическая химия поверхностных явлений в расплавах. — Киев: Наук. думка, 1971.—С. 197—199.
13. Маурах М. А., Костиков В. И., Пеньков И. А. и др. // Взаимодействие материалов высокотемпературного назначения. — Киев: Наук. думка, 1968.—С. 142—149.
14. Найдич Ю. В. Контактные явления в металлических расплавах. — Киев: Наук. думка, 1972.—196 с.
15. Найдич Ю. В., Костюк Б. Д. Исследование условий и разработка метода электронно-лучевой сварки графита с металлами.
16. Найдич Ю. В., Перевертайло В. М., Неводник Г. М. // Порошковая металлургия.—1971.—№ 1.—С. 58—61.
17. Пайка окиси бериллия с пирографитом: Пер. с англ. — М.: ВЦП, 1974.
18. Прямая пайка керамики, графита и жаропрочных металлов: Пер. с англ. — М.: ВЦП, 1978.
19. Савицкая Л. К. // Изв. вуз. Физика.—1961.—№ 6.—С. 129—131.
20. Савицкая Л. К. // Изв. вуз. Физика.—1962.—№ 6.—С. 30—34.
21. Шибалов М. В., Парамонов А. К. Формирование околшово́й зоны при пайке графита // Сварочное производство.—1982.—№ 5.—С. 18—19.

ANALYSIS OF PHYSICOCHEMICAL PROCESSES OF GRAPHITE WITH METALS JUNCTURE IN A FLUID PHASE

V. E. Prykhod'ko, A. V. Kulyk

The graphitic stuffs, as constructional, find the increasing application in modern engineering. The existing ways of connection of graphites with metals are sub divided into three basic classes describing in what conditions passes formation of a copulative (connecting) juncture — in a firm, fluid or steam-gaseous phase. The most of ways for welding and soldering of graphites with metals is based on formation of a juncture in firm or fluid phases.

УДК 621.762

ПОРОШКОВАЯ БЫСТРОРЕЖУЩАЯ СТАЛЬ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

© А. Ф. Санін

Дніпропетровський державний університет

Представлено результати дослідження технології отримання швидкоріжучих сталей з підвищеним вмістом азоту методами порошкової металургії. Вивчено вплив основних технологічних параметрів і способів виготовлення на вміст та розподіл азоту, залишкову пористість, експлуатаційні властивості сталі.

Использование быстрорежущих сталей с увеличенным содержанием азота способствует повышению теплостойкости, износостойкости и производительности режущего инструмента. В некоторых случаях отмечено возрастание стойкости в два-три раза по сравнению с инструментом из стали с нормальным

содержанием азота [1]. Поэтому важной задачей является разработка составов азотсодержащих инструментальных сталей и технологических процессов их получения.

Применение методов порошковой металлургии позволяет расширить возможности легирования, а