

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ПАЙКЕ В ПАРАХ ЦИНКА

© 2016

А.Ю. Краснопецев, кандидат технических наук, доцент,

заведующий секцией «Пайка» кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

М.В. Сафонов, инженер,

старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

Е.А. Краснопецева, магистр, аспирант

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

С.А. Мальцев, магистр, заместитель директора

ООО «Школа новых профессий», Тольятти (Россия)

Ключевые слова: углеродистые стали; пайка в парах цинка; математическое планирование эксперимента; показатели качества; технологические факторы.

Аннотация: Пайка в парах цинка позволяет не только предотвратить испарение цинка из латунных припоев и без ограничений использовать печной нагрев, но также исключить применение флюса при пайке углеродистых сталей, даже если внутри контейнера для пайки до нагрева находился атмосферный воздух (пайка в модифицированной воздушной среде). Наиболее простым и надежным вариантом пайки в парах цинка в настоящее время является пайка в контейнере с затвором, уплотняемым засыпкой, с дополнительным введением в контейнер и в состав засыпки карбюризатора. Такой вариант технологии не требует использования сложного специализированного оборудования. Латунный припой может быть получен из медной заготовки путем ее легирования цинком из паровой фазы. Работа проводилась применительно к этому варианту. Формирование и качество паяных соединений при пайке в контейнере, в частности в парах цинка, является результатом целого ряда тесно связанных между собой физико-химических процессов. Построение аналитической модели совокупности этих процессов в настоящее время затруднительно, Задача решалась методом математического планирования эксперимента. Был проведен полный факторный эксперимент, а затем с использованием композиционного плана получены уравнения второго порядка (включающие и коэффициенты парного и тройного взаимодействия), достаточно точно описывающие зависимости разрушающего усилия, прочности, коэффициента заполнения зазора и коэффициента дефектности паяных соединений от основных технологических факторов (температуры и времени выдержки, количества цинка и количества карбюризатора). Предложены и использованы два метода оптимизации режимов пайки. При выборе режимов следует учитывать наиболее важные показатели качества для конкретного изделия.

При высокотемпературной пайке углеродистых сталей в качестве припоя наиболее рационально использовать латуни. Медно-цинковые сплавы (латуни) имеют хорошую физико-химическую совместимость с паяемым материалом [1; 2], значительно дешевле серебряных припоев, по сравнению с технически чистой медью обеспечивают более высокую прочность паяных соединений при более низкой температуре пайки [3]. Однако существенным недостатком латунных припоев является интенсивное испарение цинка из припоя при пайке, которое может приводить к появлению дефектов в шве [4], поэтому пайку необходимо проводить с быстрым нагревом, ограничено применение печного нагрева, обладающего рядом преимуществ. Для уменьшения испарения цинка в состав латуней вводят кремний, олово [3] или другие легирующие элементы [5]. Наиболее надежную защиту от испарения цинка обеспечивает размещение дополнительного количества цинка в объеме пайки (печи или контейнере) – пайка в парах цинка [6–9]. Интересным вариантом является получение латунного припоя в процессе пайки из медной заготовки припоя путем легирования цинком из паровой фазы, в этом случае обеспечивается повышенная активность припоя в момент образования.

В Тольяттинском политехническом институте, а затем в Тольяттинском государственном университете проведен комплекс исследований физико-химических процессов, происходящих при пайке в парах цинка.

Установлено, что цинк не только участвует в управлении составом припоя, но и, в связи с его высокой активностью по отношению к кислороду, обеспечивает бесфлюсовую пайку углеродистых сталей, даже если в контейнере первоначально находится атмосферный воздух (пайка в модифицированной воздушной среде). Об интересе к этому направлению в настоящее время говорят как ссылки на выполненные работы [10–13], так и, прежде всего, востребованность со стороны производства (особенно опытного и мелкосерийного). В связи с этим исследования продолжают, в частности, применительно к углеродистым сталям поставлена задача создания математической модели процесса, которая позволит обеспечивать требуемые показатели качества соединений.

Как указывалось ранее [14], формирование и качество паяных соединений при пайке в контейнере, в частности в парах цинка, является результатом тесно связанных между собой физико-химических процессов. Это изменение состояния газов, испарение и конденсация отдельных компонентов припоя и основного материала, диффузия в парогазовой, твердой и жидкой фазах, химические реакции окисления, восстановления, обмена и другие. Поставленная задача построения аналитической модели совокупности этих процессов до настоящего времени не решена ввиду своей сложности. Более простым вариантом является получение эмпирических зависимостей показателей качества от основных

технологических факторов. Для практических целей этого может быть достаточно. С другой стороны, несмотря на то, что коэффициенты получаемых уравнений регрессии не имеют физического смысла, анализ их соотношений может быть полезен и для понимания сущности происходящих процессов.

Наиболее простым и надежным вариантом пайки в парах цинка в настоящее время является пайка в контейнере с затвором, уплотняемым засыпкой, с дополнительным введением в контейнер и в состав засыпки карбюризатора. Такой вариант технологии не требует использования сложного специализированного оборудования. Возможно получение латунного припоя из медной заготовки в процессе пайки в результате контактного твердо-газового плавления. Именно для этого варианта были проведены исследования зависимости качества паяных соединений от основных параметров процесса пайки: температуры, времени выдержки, скорости нагрева при температурах выше 900 °С, удельного количества цинка и удельного количества карбюризатора на единицу объема [15]. Получены уравнения регрессии, описывающие влияние технологических факторов на прочность и дефектность паяных соединений. Подтверждена существенная зависимость механических свойств соединений, паяных латунными припоями, от концентрации цинка в паяном шве. Проведенная оптимизация режимов пайки позволила повысить качество паяных соединений. Однако при анализе полученных результатов было высказано предположение, что требуемая прочность соединений была достигнута в процессе реиспарения цинка, а полученный результат оптимизации не является единственным и существует другая область оптимальных режимов, в которой возможно достижение высоких показателей на стадии получения припоя при контактном твердо-газовом плавлении. Для поиска этих условий исследования были продолжены.

Был проведен сначала дробный, а потом и полный факторный эксперимент первого порядка [16]. Факторами планирования являлись:

X_1 – удельное количество цинка, г/л;

X_2 – удельное количество карбюризатора, г/л;

X_3 – время выдержки, мин.;

X_4 – температура пайки, °С;

X_5 – скорость нагрева при температурах выше 900 °С, °С/мин.

По сравнению с [15] в этой серии были несколько уменьшены температура пайки, время выдержки и количество цинка.

В качестве выходных параметров использовали:

– разрушающее усилие;

– прочность паяных нахлесточных соединений на растяжение (с учетом деформации образцов при испытании и появления изгибающих напряжений нельзя рассматривать эти напряжения как напряжения среза, их определяли как отношение разрушающей нагрузки к фактической площади разрушения);

– коэффициент заполнения зазора (отношение площади заполнения зазора к площади нахлестки);

– коэффициент дефектности (отношение площади дефектов в шве после разрушения к площади разрыва).

Исследования проводили на паяных образцах типа IV согласно ГОСТ 28830-90 из стали Ст3, собранных из

заготовок размерами 60×10×3 мм. Исходя из состояния образцов и с учетом ранее полученных результатов, был выбран следующий способ подготовки их поверхности: травление в соляной кислоте, промывка, протирка тканью. Непосредственно перед пайкой образцы и припой обезжировали ацетоном. Номинальная величина нахлестки составляла 3 мм. В качестве заготовки припоя использовали медь в виде проволоки диаметром 0,5 мм длиной по ширине образца. Образцы в контейнере фиксировались в струбине. Состав засыпки соответствовал А.с. СССР № 1454595.

Для получения более объективного результата (исключения систематических ошибок) опыты проводились в случайном порядке, не соответствующем порядку в матрице планирования.

Были получены уравнения регрессии, по которым были сделаны выводы о том, что все выбранные технологические параметры оказывают влияние на те или иные показатели качества. Однако, как показала оценка адекватности полученных уравнений, их точность в большинстве случаев оказалась недостаточной.

Для повышения точности модели было решено использовать коэффициенты взаимодействия двух или нескольких факторов, а также уравнения второго порядка. По результатам проведенных по матрице планирования опытов наименьшее влияние на выходные параметры из всех рассмотренных факторов оказывает скорость нагрева (зафиксировано ее влияние только на коэффициент дефектности). Поэтому при составлении композиционного плана для определения коэффициентов перед слагаемыми второго порядка матрица была построена только для первых четырех факторов и проведены опыты в звездных точках при значениях эти факторов ±1,41, а также в центральной точке плана. Эти опыты проводились при средних значениях скорости нагрева.

Результаты опытов были статистически обработаны в соответствии с рекомендациями [17–19] и приводятся в настоящей работе. В связи с неравномерным дублированием опытов однородность дисперсий оценивали по критерию Бартлетта. Значимость полученных коэффициентов оценивали по критерию Стьюдента, а адекватность моделей – по критерию Фишера.

Для вышеуказанных выходных параметров рассчитаны коэффициенты уравнений регрессии (приводятся только значимые коэффициенты уравнений с условными переменными).

Разрушающее усилие:

$$Y_1 = 1636,915 + 59,465 \cdot X_1 + 80,443 \cdot X_2 + 133,984 \cdot X_3 + 184,585 \cdot X_4 + 44,135 \cdot X_2 \cdot X_3 - 184,321 \cdot X_1^2 - 238,488 \cdot X_2^2 - 300,988 \cdot X_3^2 - 217,238 \cdot X_4^2 - 50,677 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$$

Прочность на растяжение:

$$Y_2 = 36,7746 + 2,081 \cdot X_2 + 4,287 \cdot X_3 + 4,958 \cdot X_4 + 1,525 \cdot X_2 \cdot X_3 - 5,172 \cdot X_1^2 - 3,612 \cdot X_2^2 - 5,441 \cdot X_3^2 - 3,293 \cdot X_4^2$$

Коэффициент заполнения зазора:

$$Y_3 = 0,6015 + 0,066 \cdot X_2 - 0,086 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,066X_3 \cdot X_4 + 0,064 \cdot X_1^2 - 0,065 \cdot X_3^2$$

Коэффициент дефектности:

$$Y_4 = 0,06817 + 0,013 \cdot X_2 + 0,015 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,021 \cdot X_4^2$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что значимыми оказались и квадратичные члены уравнения, и многие двойные, а в одном случае и тройной коэффициент взаимодействия. Наибольшее влияние оказывают температура пайки и время выдержки.

Рассчитанные по приведенным зависимостям значения показателей качества удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами (на рисунках 1–4 приведены средние экспериментальные значения по соответствующему опыту), что подтверждает и статистическая обработка (расчетные значения критерия Фишера во всех случаях ниже соответствующих табличных значений). Таким образом, полученные математические модели могут использоваться для оценки па-

раметров качества паяных соединений при тех или иных режимах, а также для управления качеством.

Квадратичные зависимости должны иметь экстремумы, поэтому была поставлена задача определить технологические параметры, обеспечивающие наилучшие значения каждого или нескольких показателей качества. Для поиска оптимальных условий использовались два метода: метод перебора и аналитический.

Для реализации первого варианта была составлена компьютерная программа на языке Object Pascal с использованием среды программирования Borland Delphi 7. Программа поочередно перебирает и рассчитывает значения функции при $-2 \leq X_i \leq 2$, создавая базу данных, содержащую все полученные значения. Из полученных баз данных (каждое уравнение имеет свою базу) выделяются максимумы или минимумы (для коэффициента дефектности).

По второму варианту в соответствии с [20] определялись частные производные по каждому параметру, они приравнялись к нулю, и из решения полученной системы уравнений определялись координаты точек экстремума. Затем рассчитывали значения вторых частных производных в каждой найденной точке и по знаку определителя матрицы, составленной из полученных

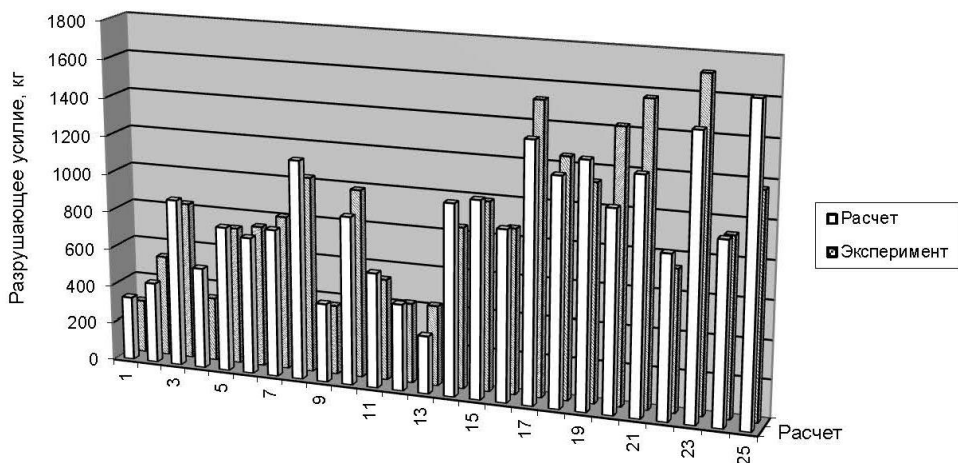


Рис. 1. Разрушающие усилия, кгс

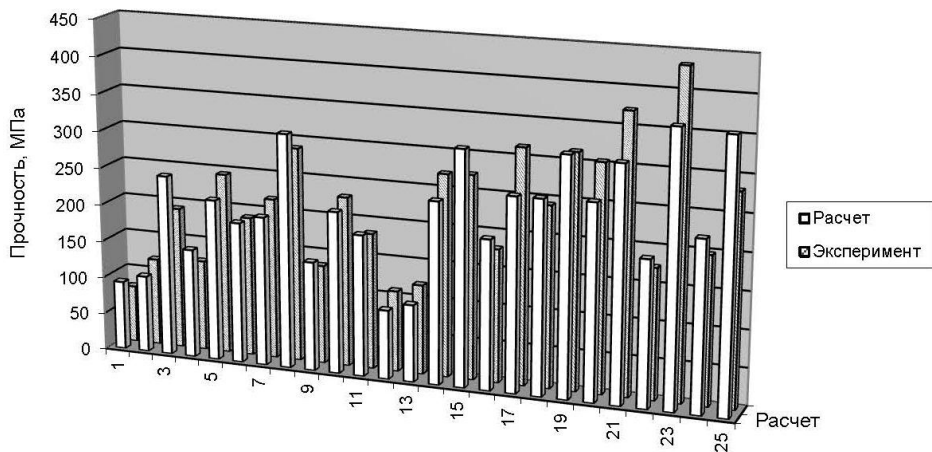


Рис. 2. Прочность при испытаниях на растяжение, МПа

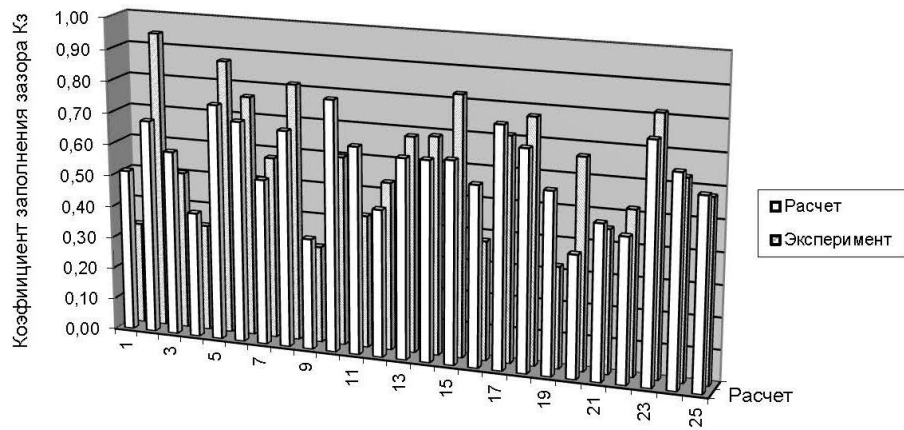


Рис. 3. Коэффициент заполнения зазора

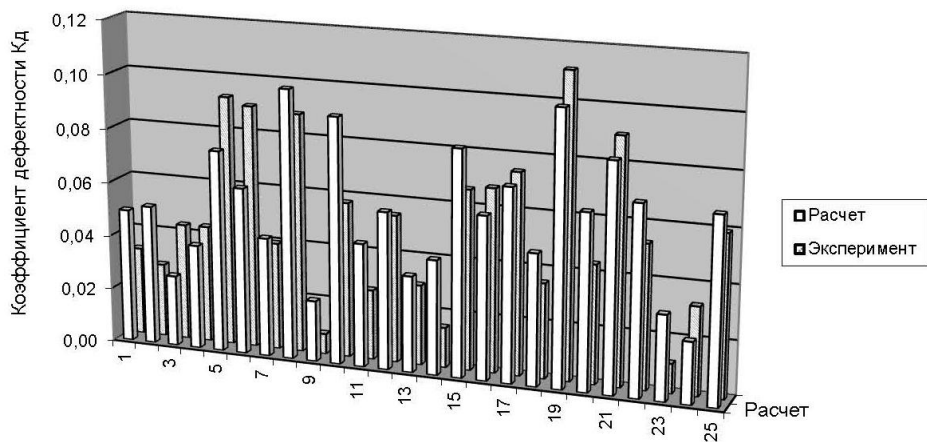


Рис. 4. Коэффициент дефектности

значений производных, устанавливали, является данный экстремум максимумом или минимумом (если значение определителя положительное, то точка является максимумом). Расчеты проводили с использованием программы Mathcad.

Области экстремальных значений, определенные по первому и второму вариантам для разрушающих усилий и прочности близки между собой и удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Для коэффициентов заполнения зазора и дефектности аналитическим путем невозможно однозначно определить характер экстремума (опредетель матрицы равен или близок к нулю), метод перебора позволил выделить несколько областей с хорошим заполнением зазора и низкой дефектностью. При выборе области режимов необходимо учитывать наиболее важные показатели для конкретного изделия.

Выводы

1. Использование планирования второго порядка позволило получить достаточно точные математические модели, описывающие влияние технологических факторов на прочность и дефектность паяных соединений при пайке в парах цинка.

2. Полученные математические модели могут использоваться для прогнозирования и управления качеством паяных соединений.

3. Предложенные методы оптимизации режимов пайки позволят подобрать режим пайки в зависимости от важности того или иного показателя качества или их совокупности для конкретного изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
2. Лашко С.В., Врублевский Е.И. Технология пайки изделий в машиностроении: справочник проектировщика. М.: Машиностроение, 1993. 464 с.
3. Хряпин В.Е. Справочник паяльщика. М.: Машиностроение, 1981. 348 с.
4. Справочник по пайке / под ред. И.Е. Петрунина. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.
5. Kawakatsu J., Osawa T. Furnace brazing of steel with brass filler metal // Welding Journal. 1977. № 2. P. 56s–60s.
6. Перевезенцев Б.Н., Соколова Н.М. Исследование процесса контактного твердо-газового плавления в системах Cu-Mn и Cu-Zn применительно к пайке сталей // Технология производства сварных и паяных конструкций. Куйбышев, 1976. Вып. 4. С. 121–127.
7. Перевезенцев Б.Н., Тюнин Ю.Н., Краснопецев А.Ю. Исследование процессов испарения применительно к пайке сталей в парах цинка // Пайка в машино-

- строении: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Омск, 1980. С. 190–193.
8. Osawa T. Vapor phase brazing of copper plated carbon steel in a zinc vapor // *Welding Journal*. 1981. № 11. P. 215s–218s.
 9. Отика Сунао. Пайка медью в парах цинка // *Ёсицу гидзюцу*. 1982. Т. 30. № 4. P. 32–36.
 10. Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка в газовых средах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 2. С. 30–36.
 11. Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка в вакууме // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 4. С. 32–40.
 12. Карабанов В.В., Бохоров И.О. Реактивные процессы при пайке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 4. С. 30–39.
 13. Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка стали и чугуна // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 9. С. 33–44.
 14. Краснопевцев А.Ю. О взаимосвязи физико-химических процессов при контейнерной пайке // Пайка. Современные технологии, материалы, конструкции, опыт эксплуатации паяных конструкций: материалы конференции. М., 2003. С. 144–145.
 15. Краснопевцев А.Ю., Сафонов М.В., Косянчук А.В., Белоусов С.И. Оптимизация режимов пайки углеродистых сталей в парах цинка // Пайка–2010. Анализ современного состояния, обсуждение перспектив и достижений в области пайки. Сб. 1. М.: ЦРДЗ, 2010. С. 35–42.
 16. Краснопевцев А.Ю., Сафонов М.В., Чумаев Н.А., Кильчевская А.В., Ключкова М.С. Исследование влияния технологических параметров на качество соединений при пайке углеродистых сталей в парах цинка методом полного факторного эксперимента // Современные проблемы эффективности сварочного производства: сб. материалов Всерос. заочной науч.-техн. конф. Тольятти: ТГУ, 2011. С. 279–285.
 17. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
 18. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения. Минск: Вышэйшая школа, 1987. 231 с.
 19. Использование метода композиционного планирования эксперимента для описания технологических процессов / сост. А.Н. Гайдадин, С.А. Ефремова. Волгоград: ВолгГТУ, 2008. 16 с.
 20. Кудрявцев Л.Д. Курс математического анализа. Т. 2. М.: Дрофа, 2003. 704 с.
 4. Petrunin I.E., ed. *Spravochnik po payke* [Reference guide on brazing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 480 p.
 5. Kawakatsu J., Osawa T. Furnace brazing of steel with brass filler metal. *Welding Journal*, 1977, no. 2, pp. 56s–60s.
 6. Perevezentsev B.N., Sokolova N.M. The study of the process of contact solid-gas fusion in Cu-Mn and Cu-Zn systems relating to steels brazing. *Tekhnologiya proizvodstva svarynykh i payanykh konstruksiy*. Kuybyshev, 1976, no. 4, pp. 121–127.
 7. Perevezentsev B.N., Tyunin Yu.N., Krasnopevtsev A.Yu. The study of vaporization processes relating to steels brazing in zinc vapors. *Tezisy dokladov Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Payka v mashinostroenii"*. Omsk, 1980, pp. 190–193.
 8. Osawa T. Vapor phase brazing of copper plated carbon steel in a zinc vapor. *Welding Journal*, 1981, no. 11, pp. 215s–218s.
 9. Otika Sunao. Copper brazing in zinc vapors. *Yositsu gidzyutsu*, 1982, vol. 30, no. 4, pp. 32–36.
 10. Karabanov V.V., Bokhorov I.O. The soldering in gas environments. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2011, no. 2, pp. 30–36.
 11. Karabanov V.V., Bokhorov I.O. The soldering in vacuum. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2011, no. 4, pp. 32–40.
 12. Karabanov V.V., Bokhorov I.O. Reactive processes for soldering. *Sborka v emashinostroenii, priborostroenii*, 2012, no. 4, pp. 30–39.
 13. Karabanov V.V., Bokhorov I.O. The soldering, as auxiliary process. *Sborka v emashinostroenii, priborostroenii*, 2012, no. 9, pp. 33–44.
 14. Krasnopevtsev A.Yu. About the interrelation of physicochemical processes during the container brazing. *Materialy konferentsii "Payka. Sovremennye tekhnologii, materialy, konstruksii, opyt ekspluatatsii payanykh konstruksiy"*. Moscow, 2003, pp. 144–145.
 15. Krasnopevtsev A.Yu., Safonov M.V., Kosyanchuk A.V., Belousov S.I. Optimization of modes of carbon steels brazing in zinc vapors. *Payka–2010. Analiz sovremennogo sostoyaniya, obsuzhdenie perspektiv i dostizheniy v oblasti payki*. Moscow, TsRDZ Publ., 2010, part 1, pp. 35–42.
 16. Krasnopevtsev A.Yu., Safonov M.V., Chumaev N.A., Kilchevskaya A.V., Klochkova M.S. The study of technology parameters influence on the quality of joints when brazing carbon steels in zinc vapors using the complete factorial experiment method. *Sbornik materialov Vseros. zaachnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennye problemy svarochnogo proizvodstva"*. Togliatti, TSU Publ., 2011, pp. 279–285.
 17. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Design of experiment when searching for optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p.
 18. Kane M.M. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v tekhnologii mashinostroeniya* [Basics of scientific research in machine building technology]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1987. 231 p.
 19. Gaydadin A.N., Efremova S.A., compilers. *Ispolzovanie metoda kompozitsionnogo planirovaniya eksperimenta dlya opisaniya tekhnologicheskikh protsessov* [Applica-

REFERENCES

1. Lashko S.V., Lashko N.F. *Payka metallov* [Metal soldering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 376 p.
2. Lashko S.V., Vrublevsky E.I. *Tekhnologiya payki izdeliy v mashinostroenii. Spravochnik proektirovshchika* [The technology of brazing goods in machine building. Reference guide of a design engineer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 464 p.
3. Khryapin V.E. *Spravochnik payalshchika* [Reference guide of a brazer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 348 p.

tion of method of composite design of experiments for description of technological processes]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2008. 16 p.

20. Kudryavtsev L.D. *Kurs matematicheskogo analiza* [Course of mathematical analysis]. Moscow, Drofa Publ., 2003. Vol. 2, 704 p.

MATHEMATICAL MODELS OF DEPENDENCE OF JOINTS' QUALITY ON THE TECHNOLOGY FACTORS WHEN BRAZING IN ZINC VAPORS

© 2016

A.Yu. Krasnopevtsev, PhD (Engineering), Associate Professor,

Head of section "Brazing and soldering" of Chair "Welding, pressure materials processing and related processes"

M.V. Safonov, engineer, senior lecturer of Chair "Welding, pressure materials processing and related processes"

E.A. Krasnopevtseva, master, postgraduate student

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

S.A. Maltsev, master, deputy director

Limited Liability Company "School of new professions", Togliatti (Russia)

Keywords: carbon steels; brazing in zinc vapor; mathematical design of experiments; quality indicators; technology factors.

Abstract: Brazing in zinc vapor allows not only to prevent zinc evaporation out of brass brazing alloys and to use furnace heating without limitations but also to eliminate the flux application when brazing carbon steels even if before heating the container for brazing has the atmospheric air (brazing in modified air environment). Brazing in a container with a filling-sealed stopper with the carburizer superinduction to the container and in the filling composition is currently the easiest and the most reliable option for brazing in zinc vapors. Such technology does not require the application of complex specialized equipment. Brass brazing alloys can be produced from copper billet by alloying it with zinc from a vapor phase. The work was carried out in relation to this variant. The formation and quality of brazed joints when brazing in a container, in particular in zinc vapors, is the result of a number of closely related physical and chemical processes. The construction of the analytical model of these processes combination is problematic at present. The challenge was solved by the method of mathematical design of experiments. The authors carried out the complete factorial experiment and then, using the composite design, they produced the second-order equations (including the coefficients of pair and triple interaction) describing pretty exactly the dependencies of breaking stress, strength, gaps filling factor and the ratio of brazed joints defects on the main technology factors (temperature and exposure time, the amount of zinc and the amount of carburizer). Two methods of brazing modes optimization were proposed and used. When selecting the modes, the most important quality indicators for a specific product should be considered.