



АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРОДОВ НА МЕДНО-ХРОМОВОЙ ОСНОВЕ ПРИ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

Ч. НАЧИМАНИ

Университет Малайя. 50603, Куала Лумпур, Малайзия. E-mail: nachicharde@yahoo.com

Данная работа представляет экспериментальное исследование съемных концов электродов второго класса (медно-хромовых) компании RMWA, выполненное при помощи контактной точечной сварки углеродистой и нержавеющей стали. Пара одинаковых по размеру закругленных съемных концов электродов (5 мм диаметром) прошла 900-кратное использование. Съемные концы электрода со временем заостряются и заменяются при помощи заправника для электродов после выполнения приблизительно четырехсот сварных точек. Коэффициент ухудшения рабочих характеристик медно-хромовых электродов имеет непосредственное влияние на геометрию шва соединений из углеродистых и нержавеющей сталей, что оказывает косвенное воздействие на прочность соединения. Съемные концы электродов, которые были использованы 900 раз, подвергали микроструктурному анализу. В результате во внутренней структуре было обнаружено несколько трещин. Внутренние трещины появляются из-за постоянного нагрева и воздействия пневматического давления только в подвижном съемном конце верхнего электрода по сравнению с нижним статическим электродом в машине для точечной сварки мощностью 75 кВ·А. Образование грибовидных деформаций на конце электрода также является негативным фактором для поверхности шва, поскольку снижает устойчивость процесса при сварке. Данный эксперимент показывает, что образование грибовидных деформаций кажется более вероятным со стороны верхнего электрода, чем нижнего. Увеличение диаметра поверхности конца электрода из-за эффекта образования грибовидных деформаций приводит к появлению нехарактерной геометрии шва, что в результате делает его внешний вид неоднородным и впоследствии приводит к выгоранию (выталкиванию). Библиогр. 21, рис. 9.

Ключевые слова: точечная сварка, образование грибовидных деформаций на электроде, деградация электрода, ухудшение характеристик электрода

Соединение углеродистых и нержавеющей сталей точечной сваркой рекомендуют выполнять сплавами класса два от компании «Resistance Welder Manufacturers Association» (RMWA) [1]. Основой для подобных рекомендаций является более высокая износостойкость, термостойкость и высокая стойкость к коррозии [2]. При отсутствии комбинации материалов чистая медь внутри будет мягкой и при ответственных применениях преждевременно разрушится [3]. Таким образом, комбинация материалов является хорошим решением для производства съемных концов электродов, поскольку обеспечивает более высокие качества, особенно в плане механических и электрических свойств. Принимая во внимание указанное выше, в данной работе проводили практические испытания электродов на медно-хромовой основе посредством сварки приблизительно 900 пар швов на листах из углеродистой и нержавеющей стали. На рис. 1 представлена диаграмма состояния меди и хрома для сплавов на основе меди [4]. Она показывает, что хром легко растворим в температуре ликвидуса меди при нагреве выше 1076 °С и ниже 1860 °С. После затвердевания необходимо применение постоянного количества тепла для повторного расплавления [5]. Этот параметр очень важен

при сварке углеродистых и нержавеющей сталей, поскольку точка плавления углеродистой стали находится между 1426 и 1560 °С, нержавеющей стали между 1400 и 1450 °С. Растворяющиеся фазы меди и хрома фактически являются эвтектическими. Гранецентрированная кубическая решетка (FCC) будет образовываться в меди, тогда как объемно-центрированная кубическая будет формироваться в хrome, если процесс кристаллизации касается медно-хромового сплава.

В основном процесс сварки изменяют при помощи параметров сварки, к которым относится сварочный ток, время сварки, диаметр конца электрода и усилие на электродах [6]. Варьирование этих параметров определяет соответствующий прирост тепла для любого материала, на основе которого в основном прогнозируют прочность сцепления. В результате количество тепла, вырабатываемое в замкнутом пространстве между концами электродов, приведет к разрушению концов электродов. Еще один фактор, несомненно влияющий на разрушение концов электродов — это прижимающее усилие электрода, которое в данном исследовании обеспечивается в основном пневмодавлением. Таким образом, каждый раз при прижатии электродов для удержания свариваемых материалов, влияние соударения концов электродов

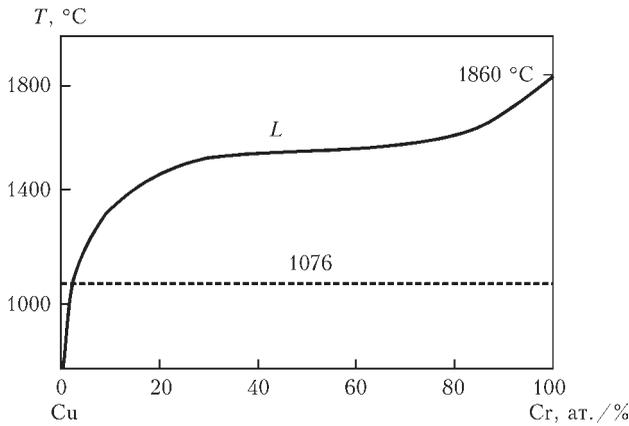


Рис. 1. Диаграмма состояния сплава медь–хром

на основной металл приводит к эффекту соударения металла или просто эффекту соударения, что в конце концов приводит к его усталости. Таким образом, в данном эксперименте исследовали образование грибовидных деформаций, деградацию, а также износ съёмных концов медно-хромовых электродов при помощи машины для стыковой сварки мощностью 75кВ·А. Часть исследований, проведенных в этой работе, ранее публиковалась в работах, имеющих отношение к моделированию, определению предела прочности при растяжении и сдвиге, распределению твердости и металлургическом анализе, и, таким образом, эта информация не включена в данную статью, но соответствующие ссылки даны в работе [7].

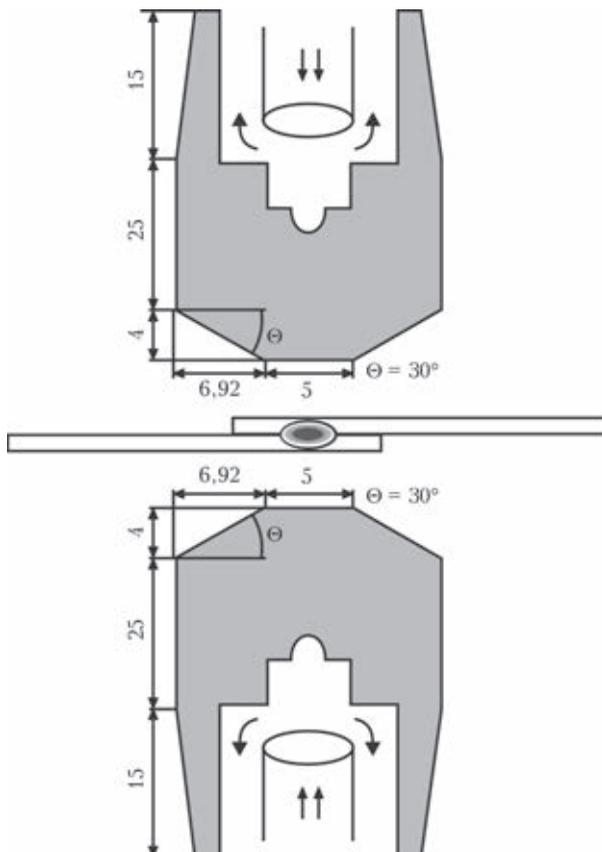


Рис. 2. Размеры электрода, контактирующего со свариваемым материалом

Экспериментальные данные. Основной металл имел прямоугольную форму длиной 200 мм, шириной 25 мм и толщиной 2 мм. Листы из нержавеющей стали имели следующий химический состав, мас. %: 0,046 С, 18,14 Cr, 8,13 Ni, 1,025 Mn, 0,506 Si, 0,004 S, 0,051 N и 0,030 P. Листы из углеродистой стали включали следующие химические элементы, мас. %: 0,23 С, 0,095 Mn, 0,006 Si, 0,050 S и 0,040 P. Твердость аустенитной нержавеющей стали составила *HRB* 86,2, тогда как для углеродистой стали она составляет *HRB* 65. Для соединения этих основных металлов, как показано на рис. 2, использовали пару усеченных водоохлаждаемых электродов диаметром 5 мм.

Свойства медно-хромовых электродов

Сплав CMW (класс 2)	S18200
Химические элементы, мас. %	
.....99,1 Cu, 0,10 Fe, 0,05 Pb, 0,60 Cr, 0,10 Si	
Твердость по Роквеллу (<i>HRB</i>)	70
Электропроводность, %	80
Прочность на растяжение (KSI)	70
Предел текучести (KSI)	55
Удлинение, % на 2 дюйма	21
Теплопроводность (Вт/м·К (мин))	187
Тепловое расширение (/К)	9,8·10 ⁻⁶

Было выполнено приблизительно 900 сварочных точек, а съёмные концы затачивали для удаления грибовидных деформаций после выполнения 400 точек. Затем съёмные концы электродов вынимали из держателя и отрезали по линии диаметра (посредине) при помощи абразивного режущего инструмента для формирования плоской поверхности. После разрезания по диаметру его закрепляли при помощи порошковой смолы в машине для горячей запрессовки, таким образом, чтобы было видно поперечное сечение съёмных концов электродов. После этого закрепленные образцы были хорошо отполированы при помощи абразивной бумаги на основе кремния класса 1200/800р и 600/200р, а также полировочной ткани Metadi. Процесс полировки выполняют от 30 мин до часа для каждого образца до появления блестящей (зеркальноподобной) поверхности. Травильный раствор V2A, который состоит из 100 мл воды, 100 мл соляной кислоты и 10 мл азотной кислоты, используется для травления отполированных образцов. Образцы погружают в емкость на 45...60 мин. После этого образцы хорошо промывают простой водой, просушивают воздуходувкой, наносят антикоррозионную жидкость и размещают в вакуумной камере для сканирования электронным микроскопом. Этих подготовительных шагов и использование указанных выше материалов достаточно для получения корректных микро- и макрофотоснимков для анализа.

Результаты и обсуждение. Сварные точки на углеродистых, нержавеющей и смешанных ста-

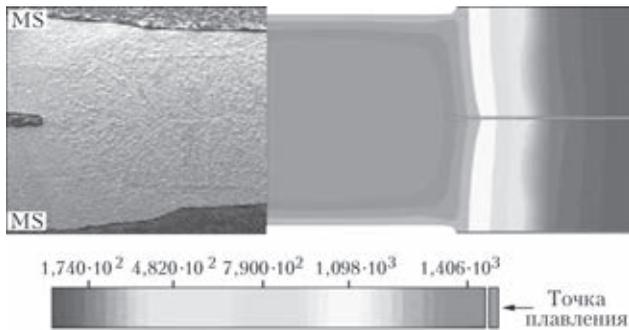


Рис. 3. Распределение температуры в изделиях из низкоуглеродистых сталей

лях. Обычные опасения по поводу точечной сварки углеродистых и нержавеющей сталей, как правило, касаются неоднородности точек плавления в отдельных соединениях, а также теплового дисбаланса в разнородных соединениях [7]. В данном эксперименте оба момента рассматривали при нескольких сочетаниях параметров процесса, например, контролировали варьирование уровней сварочного тока по отношению к варьированию цикла времени сварки [7]. На рис. 3–5 показаны швы из углеродистой, нержавеющей сталей и смешанные швы, соответственно, выполненные при помощи электродов со съемными концами на медно-хромовой основе. Слева на рис. 3–5 представлены соответствующие расчеты при помощи SORPAS, в которых четко показаны максимальные температуры до начала процесса кристаллизации; тогда как на левой части рисунка показаны реальные швы после окончательного завершения процесса кристаллизации. Цветные изображения используются для анализа зон расплава, а также близлежащих областей с целью четкого распределения зон термического влияния, а также зон распространения тепла. Основным моментом является то, что электроды со съемными концами на медно-хромовой основе оказывают значительное влияние на формирование качественных швов из углеродистой, нержавеющей стали и комбинации материалов, но при длительном использовании они изнашиваются.

Эффект образования грибовидных деформаций на электроде. Съемные концы электродов

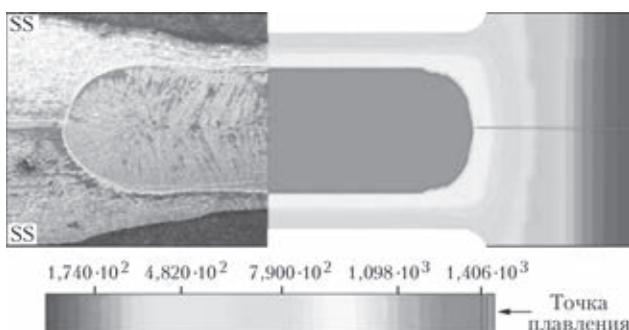


Рис. 4. Распределение температуры в изделиях из нержавеющей стали

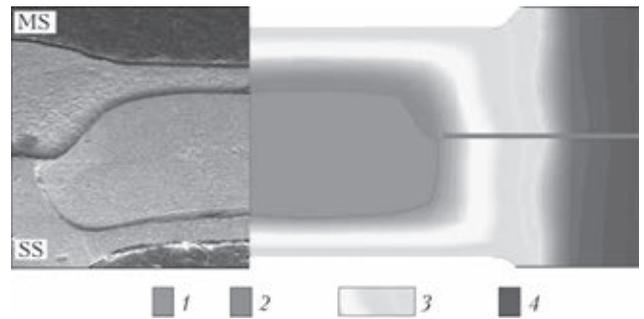


Рис. 5. Распределение температуры в изделиях из углеродистой и нержавеющей стали: 1 — зона сплавления; 2 — ЗТВ; 3 — зона распространения тепла (ЗРТ); 4 — основной металл

класса два для точечной сварки в основном изготавливаются из медных и хромосодержащих материалов, которые являются основными компонентами согласно классификации RMWA [8]. Они включают двухфазную смесь хрома и альфа-меди как основных химических элементов, тогда как остальные находятся в меньшинстве. Изменение свойств происходит при повышении температуры ($Q = I^2Rt$) вследствие выделения хрома из твердого раствора. Согласно фактам, при нагреве электрода вместе с металлом вероятно образование новых видов сплавов [9, [0]. Это та ситуация, когда выделение хрома из твердого раствора легко обнаружить [11, 12]. Эта информация также подтверждается микроструктурным анализом съемных концов электродов, как показано на рис. 6. Поскольку процесс сварки повторно выполняли на углеродистых и нержавеющей сталях, эффект образования грибовидных деформаций увеличивался вследствие воздействия тепла на поверхности концов электродов. Это просто увеличение площади A конца электрода, которое приводит к падению контактного сопротивления ($R = \rho l/A$) по отношению к эффективности процесса сварки [13, 14]. В данном исследовании рабочий конец электрода с обеих сторон изначально имел диаметр 5 мм и он был частично подвергнут грибовидному деформированию. Диаметр рабочего конца верхнего электрода увеличился до 7,458 мм, тогда как диаметр рабочего конца нижнего электрода возрос до 7,238. На рис. 7 показан износ рабочего конца электрода после 900-кратного использования.

Чтобы изучить износ съемных концов электрода после 900-кратного использования, его сканировали на определение глубоких структурных изменений. Точка A на рис. 6 отображает съемный конец, который непосредственно подвергся воздействию тепла от расплава основного металла (максимум $\approx 1600^\circ$), точки B и C — это следующие точки в направлении электрододержателя, которые также подвергаются воздействию теплового потока, но охлаждаются водой, проходящей внутри. Таким образом, коэффициент меди постепенно уменьшается от точки A к точке C . При по-

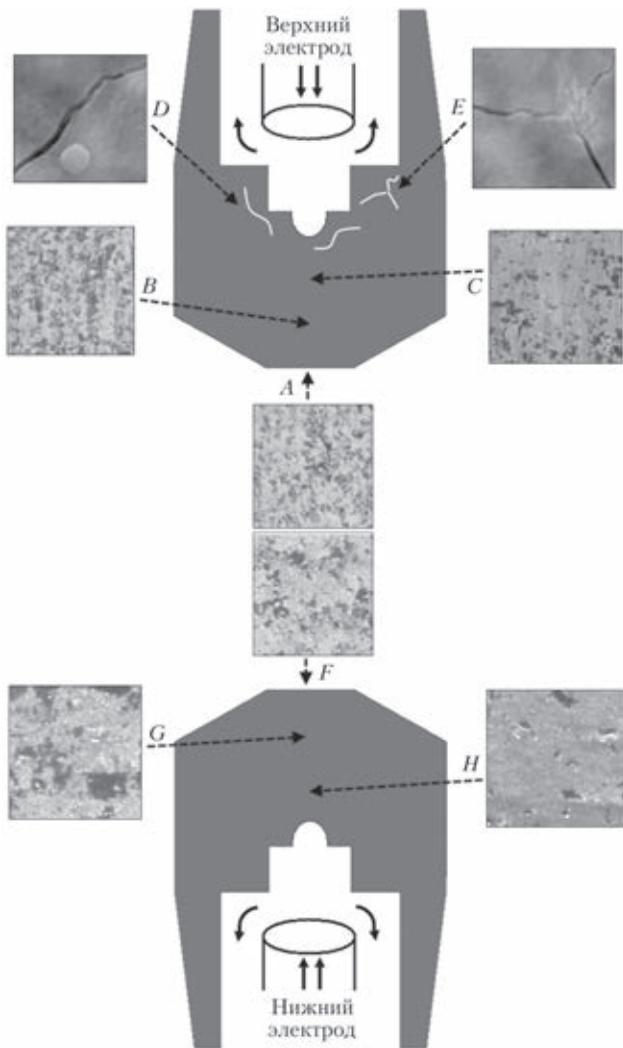


Рис. 6. Микроструктурные проекции электрода

мощи микроструктурного анализа показано, что на съёмном конце выделение хрома больше (точка *A*) из-за непосредственного воздействия тепла, которое больше порога точек плавления медно-хромовых сплавов (рис. 1). Точка *B* неким образом сбалансирована в соотношении медь–хром, которое находится между точками *A* и *C*. Тем не менее, различие в скоростях охлаждения в точке *C* из-за охлаждения водой (4 л/мин), которая проходит внутри электрододержателей, предотвращает выделение хрома, но приводит к внутренним трещинам в съёмном конце верхнего электрода. В съёмном конце нижнего электрода наблюдаются те же явления (точки *F*, *G* и *H* на рис. 6), что и съёмном конце верхнего электрода в рамках изменения химических свойств, но при этом благодаря его статическому положению при сварке внутренние трещины отсутствуют. Теоретически нагретые и охлажденные поверхности концов электрода претерпевают аналогичное воздействие, такое же как при отжиге и закалке при обработке металлов [15]. Отжиг медно-хромовых сплавов со временем может приводить к пластичности [16].

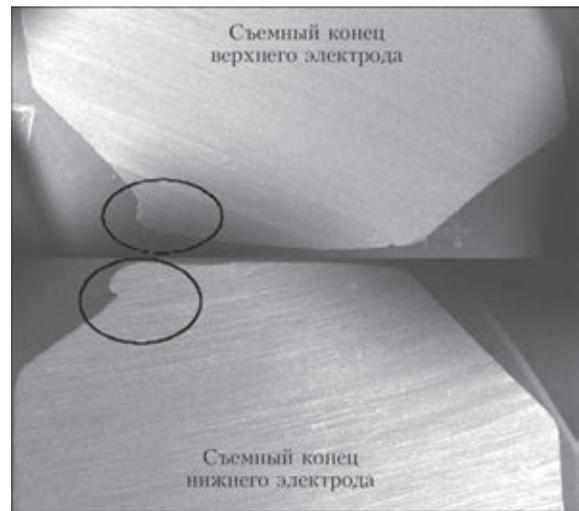


Рис. 7. Макрошлиф съёмных концов электрода после одностороннего износа

Было выполнено графическое сравнение химического распределения медно-хромового сплава для обоих съёмных концов электрода и обнаружены аналогичные признаки появления частичных выделений из твердого раствора.

Диаметр концов электродов измеряли после каждых ста применений и результат показан на рис. 8. Процесс образования грибовидных деформаций на съёмном конце верхнего электрода немного более значительный, чем на нижнем, поскольку ему необходимо выдерживать силу прижима (ударную силу), так как процесс прижима постоянен. Значительные деформации на концах электродов наблюдали после выполнения первой очистки от грибовидных деформаций. Диаметр конца превысил 7 мм после 900-кратного использования, что требует расширения комбинирования параметров контроля (сварочного тока, времени сварки и усилия на электродах) [17].

Распределение твердости. Процесс точечной сварки со временем снижает твердость мед-

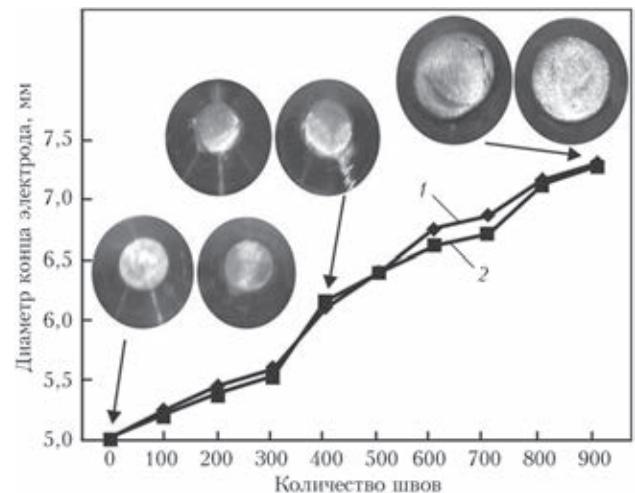


Рис. 8. Физические изменения в съёмных концах электродов в результате процесса очистки от грибовидных деформаций: 1 — верхний рабочий конец; 2 — нижний

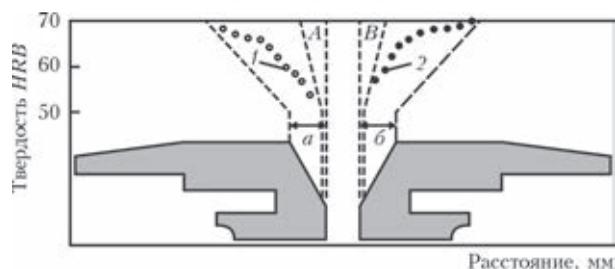


Рис. 9. Распределение твердости на концах электродов после 900-кратного использования: 1, 2 — соответственно точки замера твердости верхнего и нижнего съемного конца ($A = 0,22$ мм; $B \approx 0,21$ мм; $a = b = 4$ мм)

но-хромовых съемных концов электродов, особенно в его конечной области. Это происходит по причине того, что воздействие обоих концов электрода направлено на герметизацию тепловыделения при формировании шва [18]. После того, как прилегающие поверхности металлов расплавились, соединились и сформировали новую смесь фаз, съемные концы электродов обеспечивают достаточное (но не излишнее) усилие для предотвращения утечки расплавленного металла [19]. Таким образом, такое поведение четко зависит от тесного контакта со свариваемыми металлами без формирования шероховатости [20]. В данном случае твердость имеет большее значение, и, следовательно, твердость верхнего и нижнего съемных концов измеряют по дистрибутивным моделям. Распределение твердости показано на рис. 9, для каждого электрода отдельно рассматривали десять точек замера. Затем съемные концы электродов, усеченные на 30° , замеряли по площади конической поверхности на расстоянии приблизительно первых четырех миллиметров (буквы a и b) (рис. 9). Буквы A и B отображают удаленные участки, и, следовательно, поэтому в них ничего не найдено. Необходимо отметить, что средняя твердость нового медно-хромового сплава класса 2 составляет приблизительно $HRB 70$. Это значение значительно сокращается на концах электродов и постепенно растёт при увеличении расстояния от концов электродов к его задней части. Эта модель подтверждает предыдущие результаты о том, что выделение хрома на концах больше по сравнению с удаленными участками независимо от нижнего или верхнего расположения электрода. Тем не менее, твердость снижается немного быстрее в съемном конце верхнего электрода по сравнению с нижним. Таким образом, можно сделать вывод о снижении твердости съемных концов электродов (медно-хромовый сплав), что приводит к их деформации после определенного количества использования для сварки углеродистых, нержавеющей и смешанных сталей [21].

Выводы

1. Выделение хрома из твердого раствора в съемных концах электрода выше, чем в удаленных участках. Это происходит из-за герметизации тепловыделения при формировании точечных швов.
2. Выделение хрома из твердого раствора приводит к износу поверхности концов, а также их разрушению.
3. После 400-кратного использования диаметр конца электрода увеличивается приблизительно на 23 % по сравнению с начальным значением из-за влияния грибовидных деформаций.
4. В дальнейшем, после 500-кратного использования (после начальных 400), диаметр конца электрода увеличивается еще на 26 % от измененного значения, даже после заострения электродов.
5. Увеличение диаметра электрода на 49 % от первоначального значения (5 мм) наблюдается в случае с концом верхнего электрода, тогда как увеличение приблизительно на 44 % отмечают в случае с концом нижнего электрода.
6. Твердость съемного конца верхнего электрода сокращается приблизительно до $HRB 54$, а верхнего до $HRB 57$ по сравнению с начальным значением $HRB 70$.

1. Bower R.J., Sorensen C.D., Eager T.W. Electrode geometry in resistance spot welding // *Welding J.* – 1990. – P. 45–51.
2. Babu S.S., Santella M.L., Peterson W. Modelling resistance spot welding electrode life. – Oak Ridge National Laboratory, 2000.
3. Yeung K.S., Thornton P.H. Transient thermal analysis of spot welding electrodes // *Welding J.* – 1999. – P. 1–6.
4. Chakrabarti D.J., Laughlin D.E. The Chromium – Copper (Cu–Cr) system // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams.* – 1984. – Vol 5, № 1.
5. Chen Z., Zhou Y., Scotchmer N. Coatings on resistance welding electrodes to extend life // *SAE International.* – 2005. – P. 1–4.
6. Nachimani C. Effect of spot welding variables on nugget size and bond strength of 304 austenitic stainless steel (2 mm) // *Australasian Welding J.* – 2012. – Vol 57. – P. 39–44.
7. Nachimani C., Farazila Y., Rajprasad R. Material characterizations of mild steels, stainless steels, and both steel mixed joints under resistance spot welding (2-mm sheets) // *Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology.* – 2014.
8. Mathematical modeling of electrode cooling in resistance spot welding / Z.H. Rao, S.M. Liao, H.L. Tsai et al. // *Welding J.* – 2009. – P. 111–119.
9. Numerical modelling of electrode degradation during resistance spot welding using CuCrZr electrodes / G. Elise, C. Denis, R. Philippe et al. // *J. of Materials Engineering and Performance.* – 2014.
10. Chang B.H., Zhou Y. Numerical study on the effect of electrode force in small scale resistance spot welding // *J. of Materials Processing Technology.* – 2003. – 139. – P. 635–641.
11. Babu S.S., Joseph A. Carpenter long-life electrodes for resistance spot welding of aluminum sheet alloys and coated high-strength steel sheet // *Automotive Lightweighting Materials.* – 2010. – P. 229–236.
12. The effects of coating parameters on the quality of TiB-TiC composite phase coating on the surface of Cu–Cr–Zr alloy electrode / P. Luo, S. Dong, Z. Xie et al. // *Surface and Coatings Technology.* – 2014. – 253. – P. 132–138.
13. Effects of cone angle of truncated electrode on heat and mass transfer in resistance spot welding / Y. Bing Li, Ze Yu Wei, Ya



- Ting Li et al. // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. – 2013. – 65. – P. 400–408.
14. Bayraktar E., Moiron J., Kaplan D. Effect of welding conditions on the formability characteristics of thin sheet steels: mechanical and metallurgical effects // J. of Materials Processing Technology. – 2006. – 175. – P. 20–26.
 15. Primoz Podrzaj, Samo Simoncic. A machine vision-based electrode displacement measurement // Weld World. – 2014. – P. 58:93–99.
 16. Wei P.S., Wu T.H. Effects of electrode contact condition on electrical dynamic resistance during resistance spot welding // Sci. and Technology of Welding and Joining. – 2014. – 19, № 2. – P. 173–180.
 17. Peng-Sheng Wei, Tzong-Huei Wu, Long-Jeng Chen. Joint quality affected by electrode contact condition during resistance spot welding // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 3, № 12.
 18. Aravinthan A., Nachimani C. Analysis of spot weld growth on mild and stainless steel (1 mm) // Welding J. – 2011. – P. 143–147.
 19. Pouranvari M., Marashib S.P.H. Failure mode transition in AHSS resistance spot welds, Part I: Controlling factors. Materials Science and Engineering A. – 2010. – 528. – P. 8337–43.
 20. Feramuz K. The effect of process parameter on the properties of spot welded cold deformed AISI304 grade austenitic stainless steel // J. of Materials Processing Technology. – 2009. – 209. – P. 4011–19.
 21. Dursun O. An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weld ability of 304L austenitic stainless steel // Materials and Design. – 2008. – 29. – P. 597–603.

Поступила в редакцию 27.04.2015

Юбилейная XX выставка «Пекин Эссен Сварка и Резка»

С 16 до 19 июня 2015 г. в новом Международном выставочном центре г. Шанхая на 80 тыс. кв. м была проведена юбилейная XX выставка «Пекин Эссен Сварка и Резка».

Выставка является важнейшим мероприятием в области сварки, резки и нанесения покрытий в Азии.

В выставке приняло участие 989 экспонентов из 28 стран, количество посетителей превысило 20 тыс. чел. Выставка «Пекин Эссен Сварка и Резка» (результат сотрудничества «Мессе Эссен», Китайского общества машиностроителей и Немецкого сварочного общества) в очередной раз подтвердила свой высокий статус.

На стенде «Сделано в Германии» были представлены новейшие разработки продуктов и услуг в области сварки 31 компании из Федеративной Республики Германии.

Следующая выставка «Пекин Эссен Сварка и Резка» будет проведена с 14 по 17 июля 2016 г. в г. Пекине.



По материалам пост-релиза выставки