

УДК 621.791.763.1

**О ВЛИЯНИИ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ  
НА ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ**

*д-р техн. наук, проф. В.П. БЕРЕЗИЕНКО,  
канд. техн. наук, доц. С.М. ФУРМАНОВ, канд. техн. наук Т.И. БЕНДИК  
(Белорусско-Российский университет, Могилёв);  
Е.Л. ВОРОНОВ  
(Завод «Могилевлифтмаши», Могилёв)*

*Исследуется процесс контактной точечной сварки, при котором для устранения вмятин со стороны лицевой поверхности изделия применяется электрод со значительно увеличенной рабочей площадью контакта. Разработана математическая модель контактной точечной сварки, позволяющая изменять условия охлаждения электродов. Установлено, что интенсивное охлаждение электродов приводит к уменьшению степени деформирования поверхностей деталей при сварке. Показано, что при применении электрода со значительно увеличенной площадью контакта и его интенсивного охлаждения происходит некоторое смещение литого ядра относительно границы контакта деталь – деталь и появляется выпуклость на лицевой поверхности изделия высотой 20...25 мкм. Экспериментально установлено, что применение данного электрода со стороны лицевой поверхности изделия в заводских условиях позволяет исключить операцию шлифовки перед покраской.*

**Введение.** Контактная точечная сварка широко применяется на производстве и характеризуется высокой производительностью и экономической эффективностью. Однако в местах постановки сварных точек образуются вмятины от токоподводящих электродов. Величина их достигает 15...20 %, а при нарушениях технологического процесса до 30...40 % от толщины детали. Деформации лицевых поверхностей ухудшают товарный вид изделий и приводят к необходимости их зачистки и доработки после сварки, что повышает материальные затраты и снижает производительность труда. Снизить деформации лицевых поверхностей изделий можно за счет значительного увеличения площади контакта электрода с деталью и улучшения условий его охлаждения, что приводит к уменьшению величины максимального температурного расширения материала электрода в месте постановки сварной точки.

**Основная часть.** Глубина вмятин от электродов зависит от температуры свариваемого металла в зоне контакта электрод – деталь. Проведенные исследования с использованием математического моделирования [1 – 5] показали, что она значительно снижается при использовании жестких режимов сварки, зависит от величины сварочного и ковочного усилий, начального зазора между свариваемыми деталями, размеров контактной поверхности электродов. Известно, что при повышении температуры растет пластичность металлов. Предел текучести  $\sigma_T$  стали 08 пс при комнатной температуре составляет 240 МПа, при температуре 200 °С – 220 МПа, а при 300 °С резко снижается до 150 МПа. Снижение  $\sigma_T$  при повышенных температурах способствует увеличению пластической деформации нагретого металла и росту глубины вмятины. Даже самый поверхностный анализ кривых  $\sigma_T = f(T)$  показывает, что для уменьшения глубины вмятин при сварке низкоуглеродистых сталей максимальная температура в контакте электрод – деталь со стороны лицевой поверхности не должна превышать 250 °С. При сварке нержавеющей сталей температура может быть несколько выше.

В сварочных машинах с распорными пистолетами и в многоэлектродных машинах часто применяют один из электродов с увеличенной рабочей поверхностью. Данный способ на протяжении определенного времени позволяет значительно уменьшать вмятину с одной стороны изделия [5]. С целью изучения процессов, протекающих при указанном способе, нами была построена математическая модель процесса сварки с применением электрода с увеличенной рабочей поверхностью (рис. 1, а). Распределение температурного поля при сварке деталей из низкоуглеродистой стали 08 пс толщиной 1,5 + 1,5 мм показано на рисунке 1, б; деформационная картина точечного соединения – на рисунке 1, в. Основные параметры режима: сварочный ток  $I_{CB} = 12$  кА, время протекания тока  $\tau_{CB} = 0,16$  с, диаметр контактной поверхности электрода  $d_э = 6$  мм, усилие сжатия электродов  $F_{CB} = 3,5$  кН.

На модели к торцу верхнего электрода 1 приложено распределенное усилие сжатия, а торец электрода 4 с увеличенной рабочей поверхностью неподвижно закреплен. По этим же границам задается зона водяного охлаждения. Зона теплогенерации ограничена размерами площади контакта электрода 1 с верхней деталью 2. Лицевая поверхность соединения располагается со стороны нижней детали 3.

При моделировании температурных полей учитывалось, что сварка и последующее остывание деталей происходит в водоохлаждаемых электродах из бронзы марки БрХЦр, свойства которой также задавались в зависимости от температуры.

Результаты моделирования показали, что в первый момент нагрева значительно увеличивается отвод теплоты в электрод с увеличенной рабочей поверхностью при его соприкосновении с деталью. Условия нагрева существенно изменяются также за счет снижения плотности тока со стороны данного электрода. Происходит некоторое смещение расплавленного ядра относительно границы контакта деталь – деталь (см. рис. 1, б). При достаточном нагреве, когда проявляется дилатометрический эффект в месте сварки, теплоотвод в электрод с увеличенной поверхностью снижается.

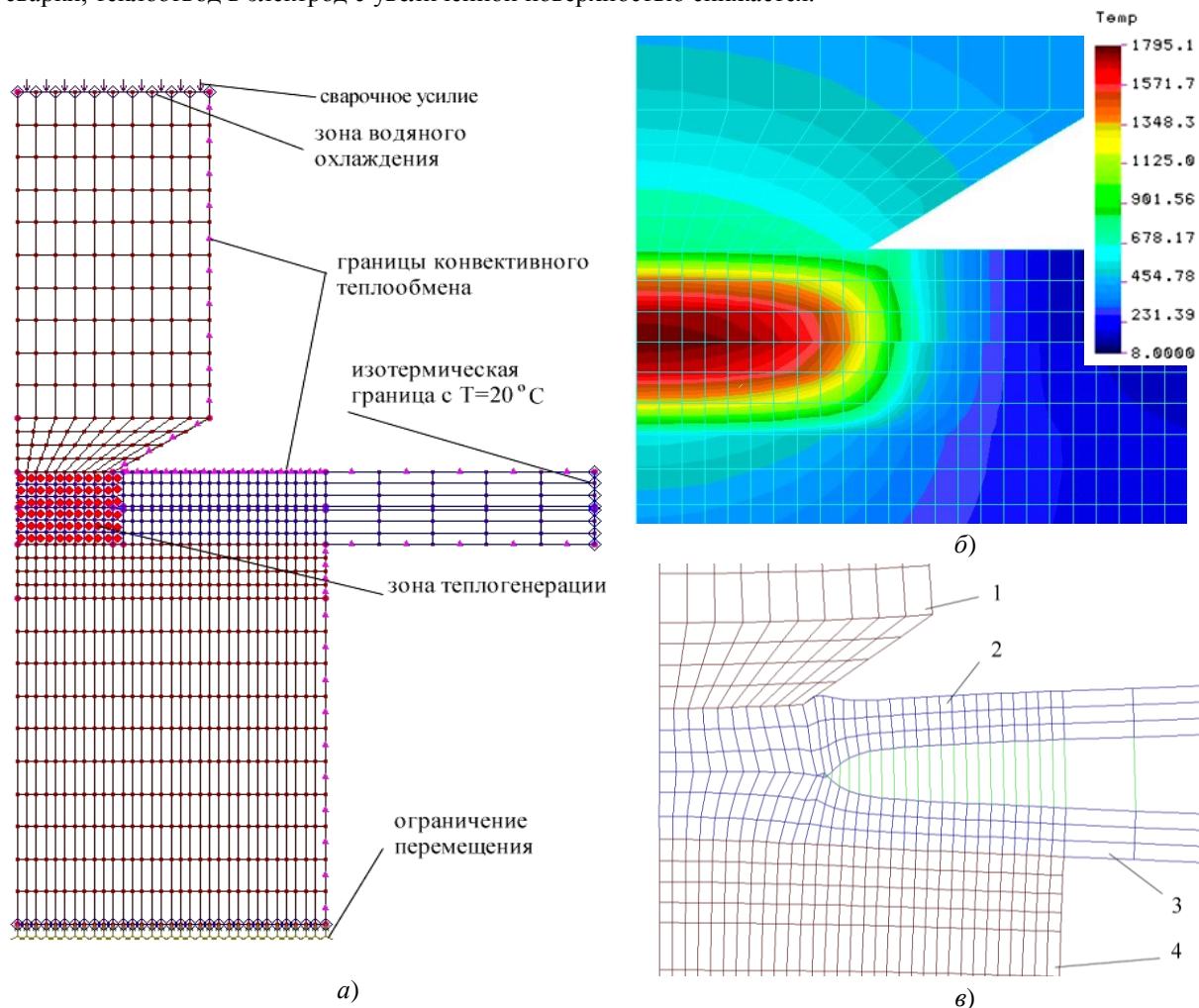


Рис. 1. Математическая модель процесса точечной сварки с применением со стороны лицевой поверхности изделия электрода с увеличенной рабочей поверхностью (а), смещение расплавленного ядра в сторону электрода с меньшей контактной поверхностью (б), деформационная картина точечного соединения при максимальном тепловом расширении деталей (в)

Распределение температур по контактной поверхности электрода представлено на рисунке 2, а. При прохождении тока из-за большой площади контакта он нагревается неравномерно. Максимальная температура в его центральной части может достигать 550...600 °С, а периферийная часть нагревается до 100...120 °С. Тепловое расширение материала электрода с увеличенной рабочей поверхностью в ходе цикла сварки показано на рисунке 2, б. В момент включения сварочного тока начинается тепловое расширение материала электрода, которое длится вплоть до момента выключения тока. Причем в центре контакта электрод – деталь оно составляет около 0,043 мм, а на периферии контакта – около 0,023 мм. В связи с этим давление в зоне контакта перераспределяется, и усилие сжатия прикладывается в основном к центральной части электрода (см. рис. 1, в). В интервале температур от 500 до 600 °С резко снижается предел текучести бронзы БрХЦр, что вызывает пластическое деформирование центральной части электрода, где появляется небольшое углубление. При дальнейшей постановке сварных точек углубление продолжает расти. Поэтому в процессе сварки необходимо постоянно следить за состоянием электрода с увеличенной поверхностью. При его износе и появлении на нем углубления изменяются условия теплоотвода, что приводит к смещению литого ядра относительно плоскости соединения листов и существенному снижению прочности. Это особенно сказывается при сварке деталей неравной толщины. Углубление, образующееся на поверхности электрода, является также причиной уменьшения его начальной

площади контактирования с поверхностью изделия. При этом происходит перераспределение плотности электрического тока в зоне контакта электрод – деталь и увеличение контактного сопротивления. Поэтому для получения качественного соединения необходимо повышение величины усилия сжатия электродов.

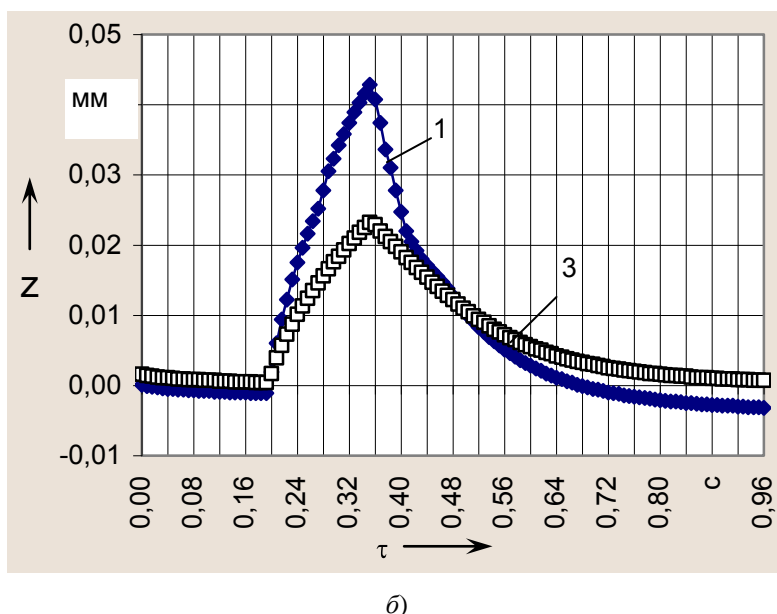
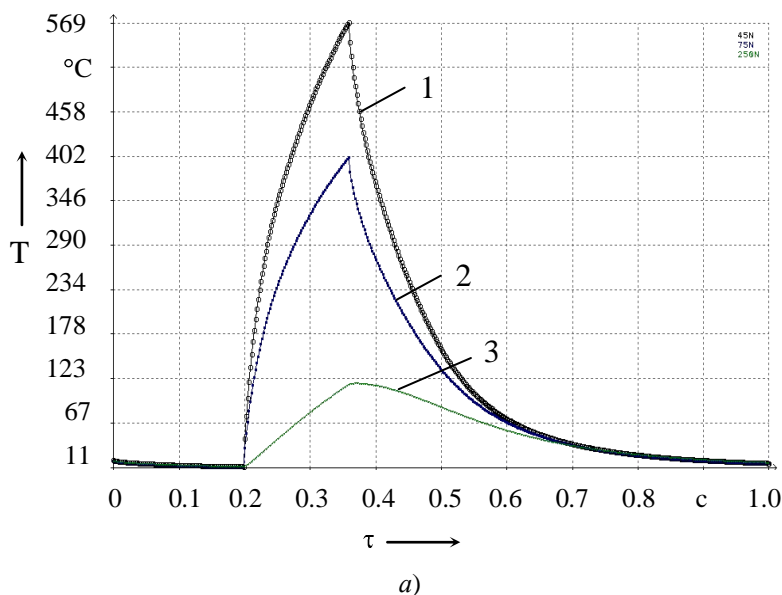


Рис. 2. Распределение температур по поверхности электрода с увеличенной площадью контакта (а) и его тепловое расширение (б):

1 – в центре контакта электрод – деталь; 2 – на расстоянии  $r = 2,5$  мм от центра; 3 – на границе электрода

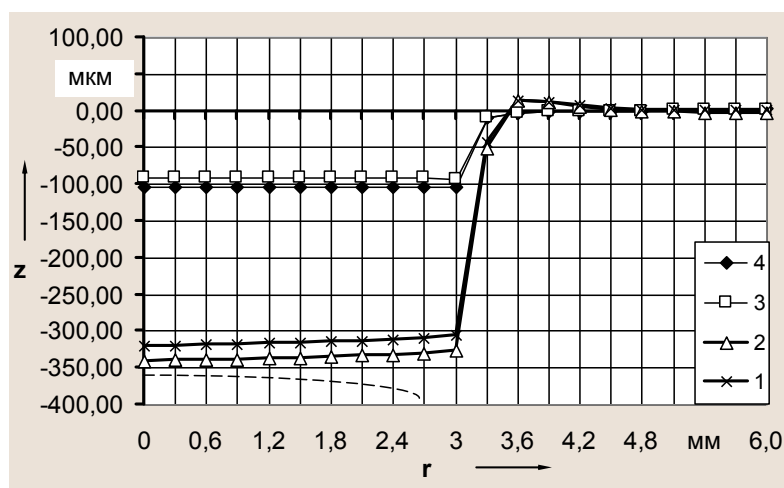
Существенным недостатком данного способа сварки, кроме того, является образование со стороны электрода с меньшей площадью контакта чрезмерно глубокой вмятины, величина которой может достигать 30...35 % от толщины детали. При этом со стороны электрода с увеличенной площадью контакта на лицевой поверхности изделия образуется выпуклость. Глубокие односторонние вмятины приводят не только к ухудшению прочностных свойств соединения из-за сильного утонения одной из деталей в месте постановки сварных точек, но и способствуют увеличению общих деформаций свариваемых деталей.

Во время протекания сварочного тока происходит интенсивное тепловое расширение как материала электрода с увеличенной рабочей поверхностью в центре контакта электрод – деталь, так и свариваемого металла в этой зоне. При этом температура поверхностных слоев свариваемого металла обычно на 150...200 °C выше, чем температура поверхности электрода. Поэтому происходит образование углубления на лицевой поверхности соединения. После полного остывания деталей и усадки металла углубление может дости-

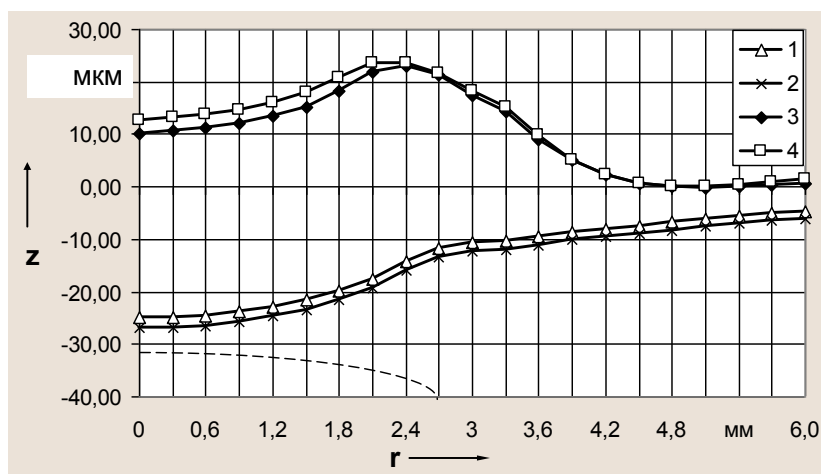
гать 4...5 % от толщины детали. Снизить деформации лицевых поверхностей изделий и износ электродов можно за счет улучшения условий охлаждения электродов. Это приводит к уменьшению величины максимального температурного расширения материала электрода в его центральной части (см. рис. 2, б).

Оценка влияния условий охлаждения электрода с меньшей площадью контакта на характер деформирования поверхности детали с помощью математической модели показана на рисунке 3, а. Пунктиром на рисунках условно обозначено расположение литого ядра. При охлаждении торцов электродов на модели до 8 и 22 °С глубина вмятины составляла соответственно 320 и 340 мкм, или 20...23 % от толщины детали. Расстояние от торца электрода до контакта электрод – деталь составляло 15 мм. При полном интенсивном охлаждении электродов до неизменной температуры 8 и 22 °С вмятина уменьшилась соответственно до 90 и 100 мкм, что составило 6...7 % от толщины детали.

Влияние условий и температуры охлаждения электрода с увеличенной площадью контакта на характер деформирования лицевой поверхности детали показано на рисунке 3, б. При охлаждении торца электрода до 8 и 22 °С (кривые 1, 2) на лицевой поверхности детали образуется углубление размером 25 ...27 мкм. При полном охлаждении электрода до 8 и 22 °С на лицевой поверхности появляется выпуклость высотой 20...25 мкм (кривые 3, 4). Таким образом, интенсивность охлаждения электродов оказывает существенное влияние на характер деформирования поверхностей деталей.



а)



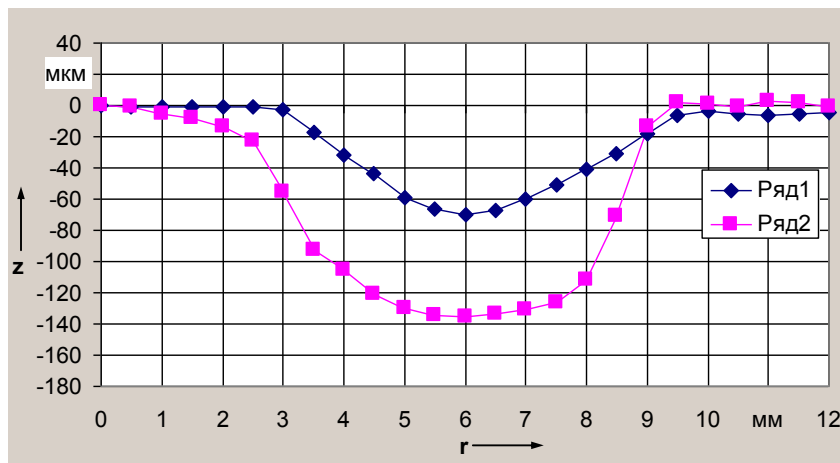
б)

Рис. 3. Влияние условий охлаждения электрода с меньшей площадью контакта (а) и электрода с увеличенной площадью контакта (б) на характер деформирования поверхности детали: при охлаждении торцов электродов до 8 °С (1) и 22 °С (2); при полном охлаждении электродов до 8 °С (3) и 22 °С (4)

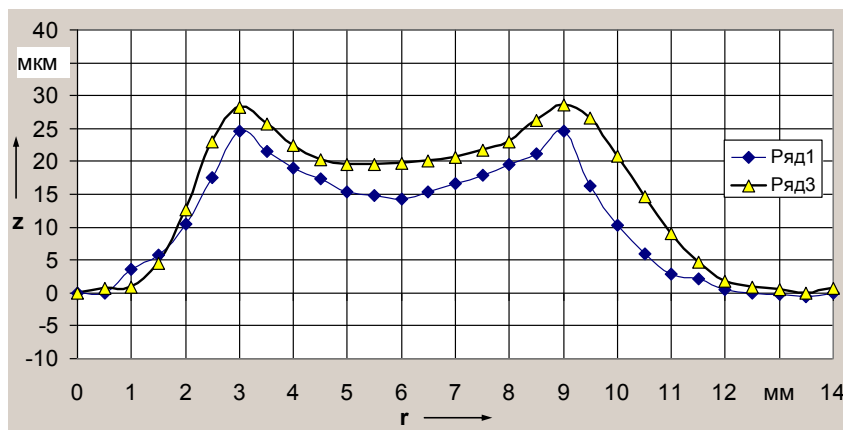
Экспериментальная проверка результатов математического моделирования производилась на установке для контактной точечной сварки SEMSA ROOF на заводе «Могилевлифтмаш». В качестве электрода со стороны лицевой поверхности детали использовался большой медный рабочий стол. Образцы из низкоуглеродистой стали толщиной 1,5 + 1,5 мм сваривались при следующих параметрах режима:

сварочный ток  $I_{CB} = 12$  кА, время протекания тока  $\tau_{CB} = 0,16$  с, диаметр контактной поверхности электрода  $d_{\Sigma} = 6$  мм, усилие сжатия электродов  $F_{CB} = 3,5$  кН.

Зависимость величины вмятины на поверхности детали со стороны электрода с меньшей площадью контакта показана на рисунке 4, а; величина выпуклости на лицевой поверхности детали со стороны электрода с увеличенной площадью контакта – на рисунке 4, б. Для регулирования температуры охлаждения электродов в составе машины для контактной сварки применялась специальная холодильная установка. Электроды охлаждались соответственно до температур 8 и 22 °С.



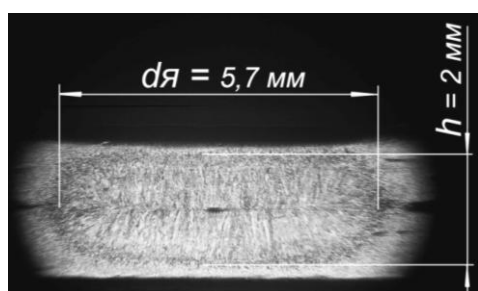
а)



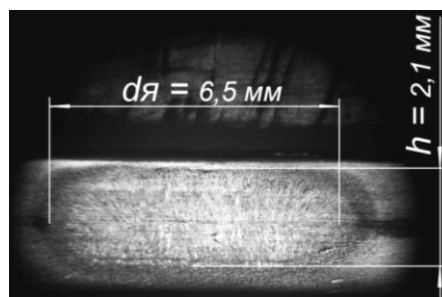
б)

Рис. 4. Зависимость величины вмятины на поверхности детали со стороны электрода с меньшей площадью контакта (а) и величины выпуклости на лицевой поверхности детали со стороны электрода с увеличенной площадью контакта (б) от температуры охлаждения 8 и 22 °С электродов 1 и 2 соответственно

Макрошлифы сварных соединений из стали 08 пс толщиной 1,5 + 1,5 мм, полученных при сварке с охлаждением электродов до температуры 8 и 22 °С, представлены на рисунке 5.



а)



б)

Рис. 5. Макрошлифы сварных соединений из стали 08 пс толщиной 1,5 + 1,5 мм при точечной сварке с охлаждением электродов до температуры 8 °С (а) и 22 °С (б)

При уменьшении температуры охлаждения электродов от 22 до 8 °С глубина вмятины со стороны обычного электрода уменьшилась на 50 %, высота выпуклости на лицевой поверхности изделия – на 25 %. При этом обеспечиваются требуемый диаметр литого ядра и глубина проплавления.

Применение со стороны лицевой поверхности изделия электрода со значительно увеличенной поверхностью контакта и интенсивного охлаждения электрода до температуры 8 °С позволили на заводе «Могилевлифтмаш» применить контактную точечную сварку при изготовлении створки дверей лифта, панелей и других узлов, к внешнему виду которых предъявляются повышенные требования. При этом исключена операция шлифовки лицевых поверхностей перед покраской.

**Заключение.** Проведенное исследование показало, что интенсивное охлаждение электродов приводит к уменьшению степени деформирования поверхностей деталей при контактной точечной сварке. При использовании электрода с увеличенной площадью контакта со стороны лицевой поверхности изделия происходит некоторое смещение литого ядра относительно границы контакта деталь – деталь, и появляется выпуклость высотой 20...25 мкм. Со стороны электрода с меньшей рабочей поверхностью величина вмятины составляет 6...7 % от толщины детали.

Установлено, что применение со стороны лицевой поверхности изделия электрода со значительно увеличенной поверхностью контакта и его интенсивного охлаждения до температуры 8 °С позволяет исключить операцию шлифовки перед покраской.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Выбор режимов контактной точечной и рельефной сварки на основе математических моделей процессов / В.П. Березиенко [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 2. – С. 23 – 28.
2. Методика программного управления процессом контактной точечной сварки / В.П. Березиенко [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 8. – С. 139 – 144.
3. Березиенко, В.П. Уменьшение глубины вмятин от электродов при контактной точечной сварке / В.П. Березиенко, С.М. Фурманов // Сварочное производство. – 2003. – № 9. – С. 20 – 26.
4. Фурманов, С.М. О разработке оборудования для контактной точечной сварки без вмятин на лицевых поверхностях изделий / С.М. Фурманов, В.П. Березиенко // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование: материалы второго междунар. науч.-практ. семинара. – СПб., 2005. – С. 15 – 20.
5. Березиенко, В.П. Технология сварки давлением: учеб. пособие / В.П. Березиенко, С.Ф. Мельников, С.М. Фурманов. – Могилев: ГУВПО «Белорус.-Рос. ун-т», 2009. – 256 с.

Поступила 16.06.2011

#### ABOUT INFLUENCE CONDITIONS COOLING OF THE ELECTRODES ON CHARACTER DEFORMATION OF THE SURFACES OF DETAILS IN RESISTANCE SPOT WELDING

V. BEREZIENKO, S. FURMANOV, T. BENDIK, E. VORONOV

*Article is devoted research of the resistance spot welding process at which the electrode is applied to elimination of dents from an obverse surface of a product with considerably increased working area of contact. The mathematical model of the resistance spot welding is developed, allowing changing conditions of cooling of electrodes. It is established, that intensive cooling of electrodes leads to reduction of degree of deformation of the surfaces of details at welding. It is shown, that at application of an electrode with considerably increased area of contact and its intensive cooling there is some displacement of a cast kernel concerning border of contact a detail-detail, and there is a camber on an obverse surface of a product in height 20...25 microns. It is experimentally established, that application of the given electrode from an obverse surface of a product industrially allows excluding grinding before painting.*