

УДК 621.791.763.1

С. М. Фурманов, канд. техн. наук, доц., В. П. Березиенко, д-р техн. наук, проф.

## О РАСЧЕТЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ С ОБЖАТИЕМ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЗОНЫ

Исследована схема равновесия замкнутой силовой системы электрод–свариваемые детали–электрод–пуансон при контактной точечной сварке с обжатием периферийной зоны соединения. Предложены формулы и произведен расчет усилия сжатия электродов и усилия обжатия кольцевым пуансоном для различных толщин свариваемых деталей.

Контактная точечная сварка с обжатием периферийной зоны соединения кольцевым пуансоном применяется для устранения выплесков расплавленного металла, сближения плоскости теплового равновесия при сварке деталей неравной толщины с плоскостью контакта деталь–деталь, снижения вероятности образования дефектов усадочного характера и уменьшения глубины вмятин от электродов на лицевых поверхностях изделий [1–3].

Отличительной особенностью процесса формирования точечного соединения при указанном способе сварки является возникновение пластического прогиба металла в зоне между электродом и пуансоном при нагреве и образовании буртика высотой  $h_b$  (рис. 1). Прогиб детали, расположенной со стороны действия верхнего электрода и пуансона, происходит вследствие теплового расширения и образования рельефа высотой  $h_p$  в периферийной зоне контакта свариваемых деталей. При этом в области обжатия деталей пуансоном образуется отдельный замкнутый контакт, внутренняя граница которого расположена вне зоны пластического пояска.

Равновесие замкнутой силовой системы электрод–свариваемые детали–электрод–пуансон, имеющей при сварке одну степень свободы – перемещение по оси электродов  $z$ , в цилиндрической системе координат может быть описано следующим уравнением [4]:

$$F_{я} + F_{п} + F_{к} + F_{д} - (F_{св} + F_{обж}) = \\ = P_{я} \frac{\pi d_{я}^2}{4} + \sigma_{ср} \pi \frac{d_{п}^2 - d_{я}^2}{4} + F_{к} + \\ + F_{д} - (F_{св} + F_{обж}) = 0, \quad (1)$$

где  $d_{п}$  – диаметр пластического пояска вокруг сварной точки, мм;  $d_{я}$  – диаметр литого ядра сварной точки, мм;  $\sigma_{ср}$  – среднее значение напряжений в площади пластического пояска, Па;  $F_{к}$  – усилие, действующее по площади кольцевого контакта деталь–деталь в зоне приложения  $F_{обж}$ , Н;  $F_{д}$  – усилие, необходимое для деформации деталей при их сближении до соприкосновения, Н;  $F_{обж}$  – усилие обжатия кольцевым пуансоном, Н;  $F_{св}$  – усилие сжатия электродов при сварке, Н;  $F_{п}$  – усилие, действующее в зоне пластического пояска, Н;  $F_{я}$  – усилие, обусловленное давлением расплавленного металла ядра, Н;  $P_{я}$  – гидростатическое давление расплавленного металла ядра, Па.

Величина усилия  $F_{д}$ , противодействующего сварочному усилию, при начальных зазорах между деталями от 0,1 до 0,5 мм не превышает 0,5...2 % от сварочного усилия  $F_{св}$  [4]. По этой причине величина усилия  $F_{д}$  в процессе формирования соединения не оказывает существенное влияние на расчет  $F_{св}$  и может не учитываться.

Уравнение равновесия (1) описывает процесс формирования соединения при сварке и связывает параметры нагрева, плавления, величины нормальных

составляющих напряжений в зоне пластического пояска в контактах элект-

род-деталь и пуансон-деталь с величинами усилий  $F_{СВ}$  и  $F_{ОБЖ}$ .

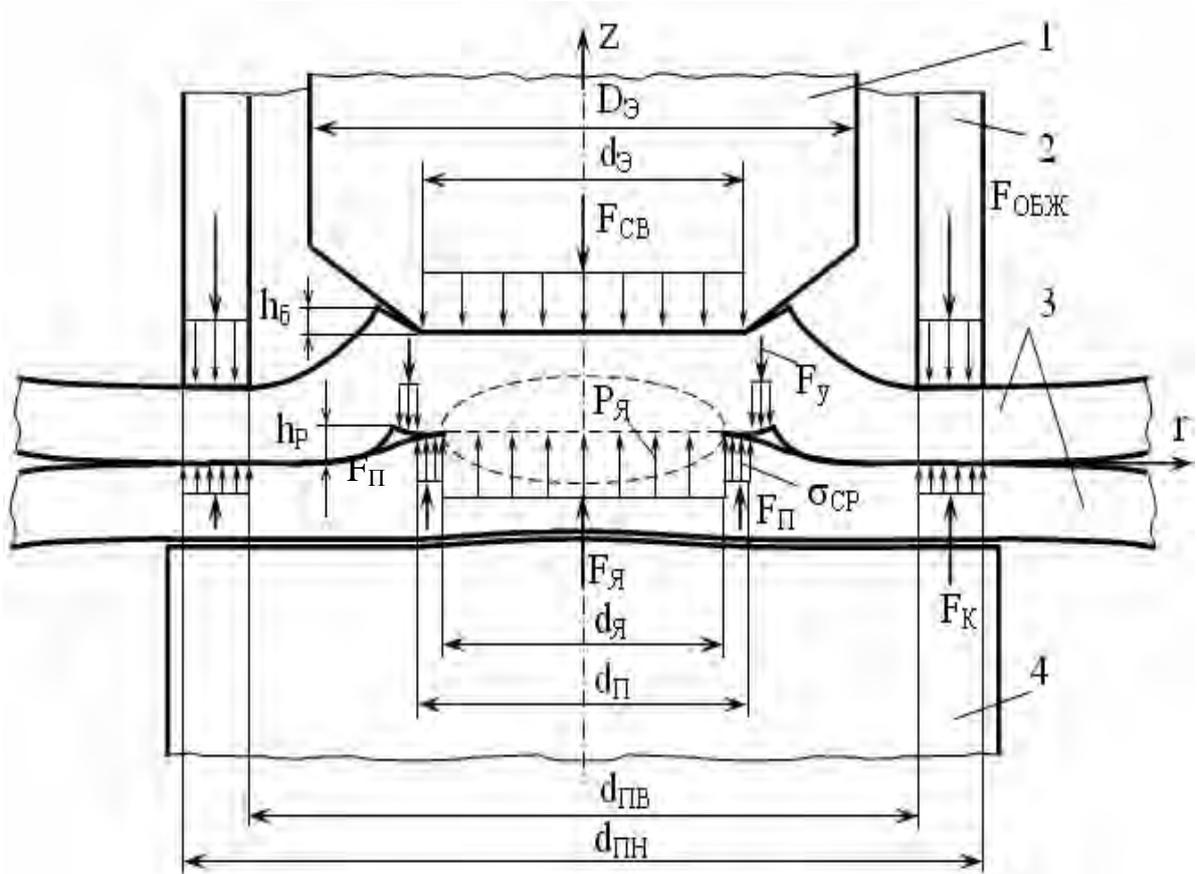


Рис. 1. Схема равновесия замкнутой силовой системы при сварке с обжатием периферийной зоны: 1 – подвижный электрод; 2 – пуансон; 3 – свариваемые детали; 4 – электрод с увеличенной рабочей поверхностью;  $d_э$  – диаметр контакта электрод-деталь, мм;  $d_{пв}$  – внутренний диаметр пуансона, мм;  $d_{пн}$  – наружный диаметр пуансона, мм

По данному уравнению может быть рассчитано суммарное усилие  $F_{\Sigma} = F_{СВ} + F_{ОБЖ}$ , действующее на нижний электрод с увеличенной площадью контакта.

Для определения усилия обжатия  $F_{ОБЖ}$  участок верхней детали, расположенный между электродом и пуансоном, нами приближенно рассматривался как круглая пластина, жестко зашпеленная в области действия силового пуансона, с отверстием в зоне расплавленного ядра. При этом, исходя из условия равновесия кольцевого элемента вне зоны ядра, усилие  $F_{ОБЖ}$  может быть определено по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
 F_{ОБЖ} &= F_к + F_п + F_у = (0,05...0,1) \times \\
 &\times (F_я + F_п) + F_п + (0,5...1,0)F_п = \\
 &= (0,05...0,1) P_я \frac{\pi d_я^2}{4} + (1,55...2,1) \times \\
 &\times \sigma_{ср} \pi \frac{d_п^2 - d_я^2}{4}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где  $F_у$  – часть усилия  $F_{ОБЖ}$ , передаваемого от кольцевого пуансона за счет упругого деформирования детали в зону пластического пояска.

При этом значения  $P_я$  и  $\sigma_{ср}$  с учетом того, что все величины изменяются во времени, могут быть определены по известным зависимостям [5].

В отличие от формулы, предложенной в [4], при определении  $F_{\text{ОБЖ}}$  нами учитывалось усилие  $F_{\text{П}}$ , действующее в зоне пластического пояска сварной точки. Это позволило рассчитать силовые параметры режима контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения, подтвержденные затем результатами экспериментальных исследований [6].

Наиболее оптимальные условия формирования соединения создаются в том случае, если при  $\tau = \tau_{\text{СВ}}$  усилием  $F_y$  передается не менее 50 % требуемого условием отсутствия выплеска усилия  $F_{\text{П}}$ . При этом усилие  $F_{\text{СВ}}$  можно снизить на 10...15 %. Если при прогибе происходит соприкосновение деталей ( $F_y = F_{y \text{ max}}$ ), то дальнейшее увеличение  $F_{\text{ОБЖ}}$  приводит только к росту  $F_{\text{К}}$ . Чрезмерное увеличение усилия  $F_{\text{ОБЖ}}$  может привести к значительному упругому деформированию нижней консоли машины и смещению осей верхнего и нижнего электродов. Поэтому при соприкосновении деталей в зоне действия пуансона усилие  $F_{\text{К}}$  не должно превышать 5...10 % от суммы усилий  $F_{\text{Я}} + F_{\text{П}}$ .

Максимальное усилие  $F_{y \text{ max}}$  находится исходя из известного решения задачи деформации круглой пластины [4]:

$$F_{y \text{ max}} = \frac{8\pi D_1 \omega_1}{K_{\text{П}}} = \frac{8\pi D_1 h_{\text{р}}}{K_{\text{П}}(1 + D_1/D_2)}, \quad (3)$$

где  $\omega_1$  – прогиб детали;  $\omega_1 = h_{\text{р}}/(1 + D_1/D_2)$ ;  $D$  – цилиндрическая жесткость детали;  $h_{\text{р}}$  – высота рельефа;  $K_{\text{П}}$  – коэффициент, учитывающий размеры силового пуансона, для расчета которого нами предложена следующая формула:

$$K_{\text{П}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3 + \nu}{1 - \nu} (d_{\text{ПВ}}^2 - d_{\text{Я}}^2) + \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \cdot \frac{2d_{\text{ПВ}}^2 d_{\text{Я}}^2}{d_{\text{ПВ}}^2 - d_{\text{Я}}^2} \left[ \ln \left( \frac{d_{\text{ПВ}}}{d_{\text{Я}}} \right) \right]^2, \quad (4)$$

где  $d_{\text{ПВ}}$  – внутренний диаметр силового пуансона;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Разработанный нами алгоритм расчета усилий  $F_{\text{СВ}}$  и  $F_{\text{ОБЖ}}$  при контактной точечной сварке с обжатием приведен на рис. 2. Для сварки с неизменным  $F_{\text{ОБЖ}}$  расчет проводится при  $\tau = \tau_{\text{СВ}}$ , т. к. в этот момент времени  $F_{\text{ОБЖ}}$  будет максимальным. Исходными данными для решения задачи являются толщина детали  $\delta$ , среднестатистическая величина начального зазора между деталями  $\delta_3$ , время протекания сварочного тока  $\tau_{\text{СВ}}$ , требуемые диаметры литого ядра  $d_{\text{Я}}$  и пластического пояска  $d_{\text{П}}$ . Очевидно, что при большой жесткости деталей их соприкосновение в зоне действия пуансона может отсутствовать ( $F_{\text{К}} = 0$ ), при этом по формуле (4) находим  $F_{\text{ОБЖ}} = F_y + F_{\text{П}}$ . В случае соприкосновения деталей  $F_{\text{ОБЖ}} = F_{y \text{ max}} + F_{\text{П}} + F_{\text{К}}$ . После расчета  $F_{\text{ОБЖ}}$  по формуле (1) находится  $F_{\text{СВ}}$ .

На рис. 3 приведены результаты расчета усилий  $F_{\text{СВ}}$ ,  $F_{\text{ОБЖ}}$ ,  $F_y$  при контактной точечной сварке низкоуглеродистых сталей в зависимости от толщины деталей, требуемых размеров литого ядра  $d_{\text{Я}}$  и пластического пояска  $d_{\text{П}}$  при внутреннем диаметре пуансона  $d_{\text{ПВ}} = 17$  мм.

При двухсторонней точечной сварке должно соблюдаться динамическое равновесие между величиной усилия сжатия электродов  $F_{\text{СВ}}$ , средним сопротивлением пластической деформации  $\sigma_{\text{СР}}$  зоны пластического пояска и количеством металла, вытесненного в зазор между деталями [5]. Нарушение равновесия может приводить к быстрому росту литого ядра, увеличению давления  $P_{\text{Я}}$ , разгерметизации расплавленной зоны и выплеску. Область пластических деформаций при этом локализована в объеме  $V_{\text{Д}}$ , ограниченном наружными поверхностями свариваемых деталей и внешним контуром контакта деталь–деталь (рис. 4, а). Область  $V_{\text{Д}}$  через узкий пояс упругопластических деформаций  $V_{\text{УП}}$  окружена жесткой оболочкой холодного металла  $V_{\text{ХМ}}$ . Вследствие теплового расширения объем  $V_{\text{Д}}$  получает приращение  $V_{\text{Т}}^*$ , а объем ме-

талла ядра при его расплавлении – приращение  $V_{ят}^*$ . Выдавливание металла в зоне контакта деталь–деталь вызывает образование зазора высотой  $h_3$ . Одновременно происходит вдавливание

электродов на величины  $g_{ВМ1}$  и  $g_{ВМ2}$ . Объем металла, вытесненный электродами  $V_{э1}^*$  и  $V_{э2}^*$ , переходит в объем смещенного металла  $V_{СМ}$ .

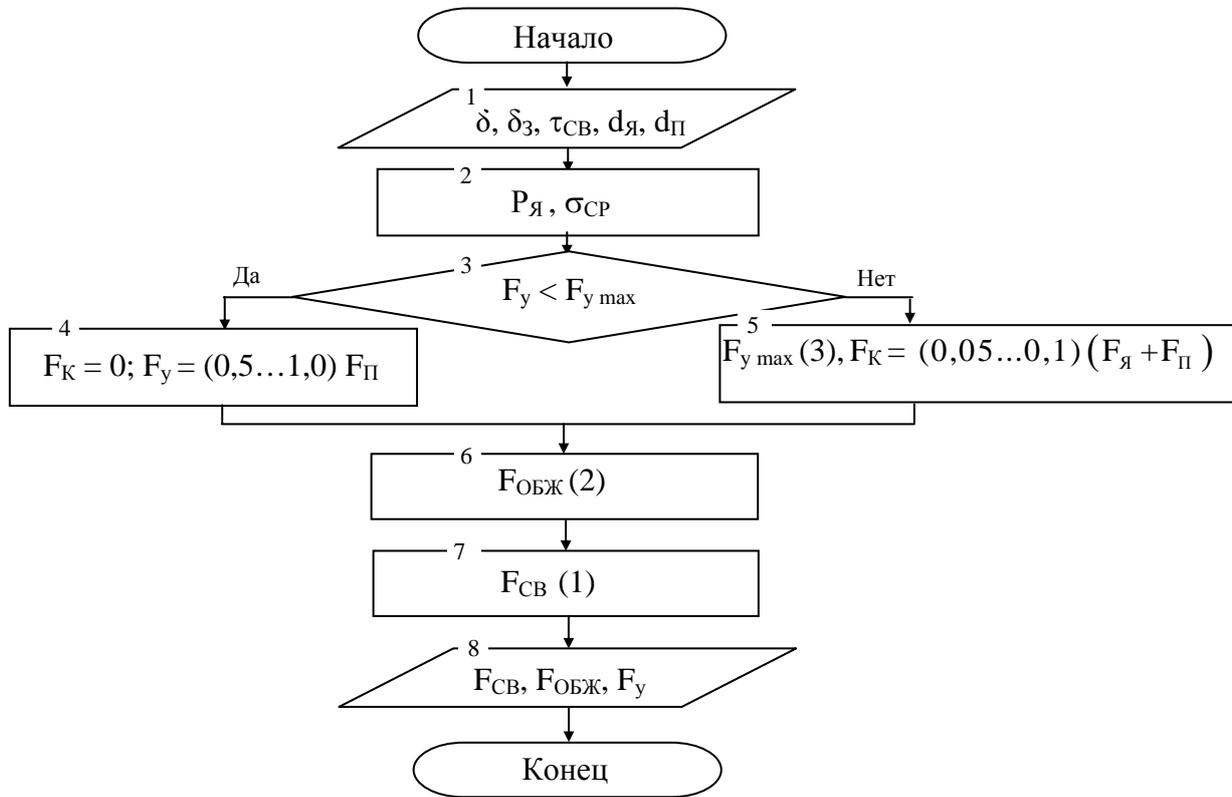


Рис. 2. Алгоритм расчета усилий  $F_{СВ}$  и  $F_{ОБЖ}$  при сварке с обжатием периферийной зоны соединения

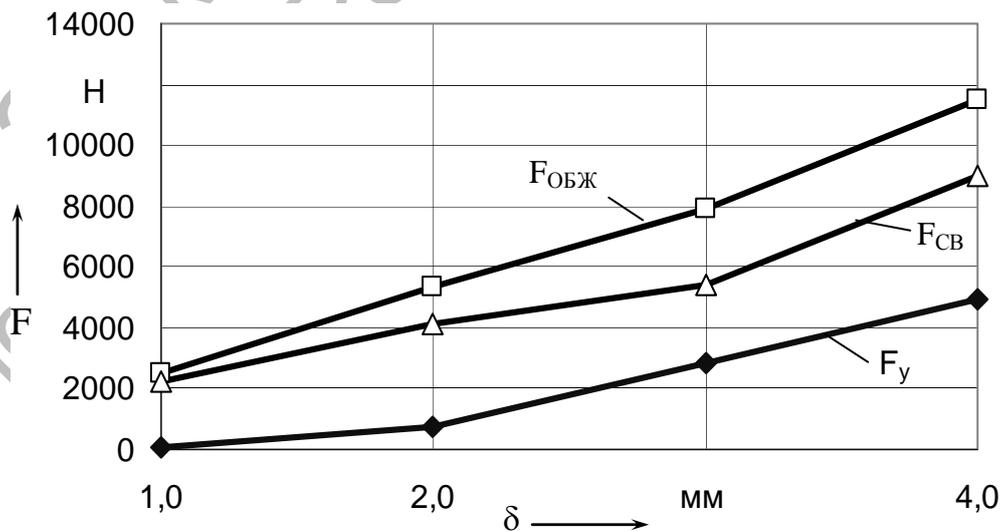


Рис. 3. Зависимости усилий  $F_{СВ}$ ,  $F_{ОБЖ}$ ,  $F_y$  от толщины деталей

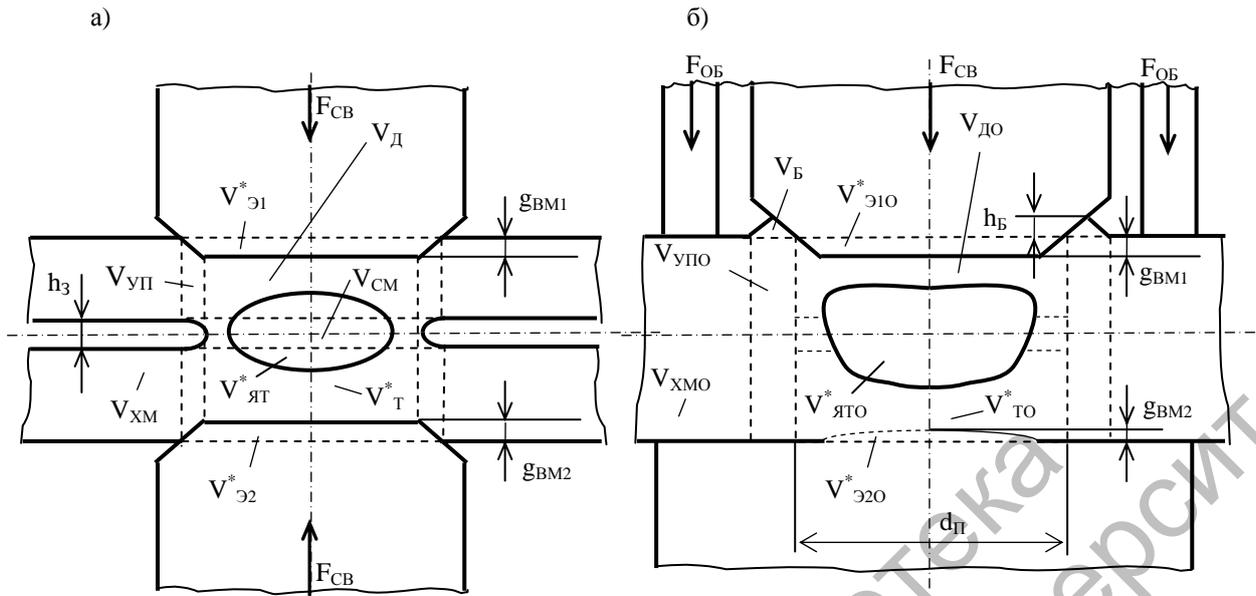


Рис. 4. Схема зоны формирования соединения: а – при двухсторонней точечной сварке; б – при сварке с обжатием периферийной зоны

Объективным критерием оценки степени деформирования поверхности детали может служить общая степень пластической деформации  $\varepsilon_0$ , которая определяется отношением смещенного объема металла  $V_{CM}$  к деформируемому объему  $V_D$ . Деформируемый и смещенный объемы находятся по формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= V_{CM} / V_D \cdot 100 \% ; \\ V_D &= 2 \cdot \delta \frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} ; \\ V_{CM} &= V_T + V_{ЯТ} + V_{Э1} + V_{Э2} . \end{aligned} \quad (5)$$

При точечной сварке с обжатием периферийной зоны с перекрытием зазора под воздействием усилия  $F_{ОБЖ}$  связано значительное увеличение сопротивления деформации в радиальном направлении и уменьшение вероятности появления внутреннего выплеска расплавленного металла. Однако при повышении температуры происходит тепловое расширение металла в зоне между электродом и пуансоном, за счет чего происходит упругопластический прогиб металла и образование рельефа  $h_p$ , что несколько уменьшает сопротивление

пластическому течению металла (см. рис. 1). Полное перекрытие зазора и предотвращение выплеска может достигаться при определенном усилии  $F_{ОБЖ}$ , зависящем от толщины изделия, марки металла, внутреннего диаметра силового пуансона и режимов сварки. При этом пакет из двух деталей можно фактически рассматривать как одну деталь суммарной толщины, а пластическая деформация проявляется в образовании рельефа или буртика на поверхности детали. Схема зоны формирования соединения при этих допущениях приведена на рис. 4, б.

Объем металла, вытесненный со стороны электрода с увеличенной рабочей поверхностью  $V_{Э20}^*$ , обусловлен тепловым расширением материала электрода при сварке и втягиванием свариваемого металла при кристаллизации и усадке. В основном вытеснение металла происходит из-под электрода с нормальной рабочей поверхностью, поэтому можно считать, что  $V_{Э20}^* \ll V_{Э10}^*$ . Тогда объем  $V_{Э10}^*$  при соблюдении условия несжимаемости вытесненного металла можно приближенно принять равным объему металла, сосредоточенного

в буртике ( $V_{Э10}^* = V_B$ ). Поэтому объем буртика  $V_B$  и его высота  $h_B$  служат критерием оценки количества вытесненного металла из зоны сварки:

$$\begin{aligned} V_{CM} &= V_{ТО}^* + V_{ЯТО}^* + V_{Э10}^* + V_{Э20}^* = \\ &= V_{ТО}^* + V_{ЯТО}^* + V_B. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, при сварке с обжатием периферийной зоны регулирование напряженно-деформированного состояния с целью уменьшения глубины вмятины сводится к наибольшему снижению объема металла  $V_B$ , вытесняемого в буртик.

Усилие  $F_{ОБЖ}$  будет оказывать заметное влияние на процесс формирования соединения при его увеличении до определенной величины. Оптимальная величина  $F_{ОБЖ}$  будет ограничиваться усилием, при котором обеспечивается соприкосновение деталей в зоне действия силового пуансона в момент образования расплавленного ядра требуемых размеров. При этом сила, передаваемая упругопластическим прогибом в область пластического пояска, достигает своего максимального значения  $F_{у\max}$ . Дальнейшее увеличение  $F_{ОБЖ}$  приводит к росту площади кольцевого контакта деталь–деталь в зоне действия пуансона и усилия  $F_K$ , действующего по этой площади, что способствует существенному уменьшению плотности сварочного тока и снижению степени проплавления деталей.

Увеличение усилия  $F_{ОБЖ}$ , в свою очередь, согласно формулам (1), (2) должно вести к снижению  $F_{СВ}$ , т. к. для удержания расплавленного металла от внутреннего выплеска к усилию  $F_{П}$  добавляется составляющая  $F_y$ . Однако снижение  $F_{СВ}$  ограничивается появлением наружного выплеска из-под электрода в связи с ростом сопротивления контакта электрод–деталь.

При изменении внутреннего диаметра пуансона  $d_{ПВ}$  и приближении места приложения усилия обжатия к зоне пластического пояска изменяются силовые

параметры, графические зависимости которых представлены на рис. 5. Расчетные данные приведены для сварки низкоуглеродистых сталей толщиной 1 + 1 мм ( $I_{СВ} = 13$  кА;  $\tau_{СВ} = 0,16$  с;  $F_{СВ} = 3900$  Н). При этом истинное значение сопротивления пластической деформации металла в области пластического пояска  $\sigma_{ди} = 80$  МПа (при  $T = 1100$  °С, скорости деформации  $\dot{\epsilon} = 10$  с<sup>-1</sup>, степени деформации  $\epsilon = 20$  %). При уменьшении  $d_{ПВ}$  растет усилие  $F_{у\max}$ , требуемое для обеспечения соприкосновения деталей при деформировании и устранения зазора между деталями в области действия усилия  $F_{ОБЖ}$ . Рост  $F_{у\max}$  требует, соответственно, и увеличения усилия обжатия  $F_{ОБЖ}$  по уравнению (2). Приближение места приложения усилия  $F_{ОБЖ}$  к зоне пластического пояска способствует уменьшению прогиба металла, снижению сварочного усилия, а также благоприятно сказывается на прочностных характеристиках сварного соединения. Однако минимальный диаметр пуансона ограничивается размерами электрода  $D_Э$  (см. рис. 1) и необходимостью соблюдения зазора между электродом и пуансоном для предотвращения заклинивания системы и шунтирования части сварочного тока через пуансон. Размер  $D_Э$  стандартизирован и обычно составляет 10, 16, 20 мм; внутренний диаметр пуансона при этом должен быть не менее 11, 17, 21 мм.

На основании проведенных исследований процесса точечной сварки с обжатием периферийной зоны нами разработан новый способ сварки, позволяющий снизить глубину вмятин от электродов на лицевых поверхностях деталей. Его циклограмма представлена на рис. 6. Она используется в случае приложения независимого усилия обжатия  $F_{ОБЖ}$  [6, 7].

В начале цикла сварки свариваемые детали в течение некоторого времени  $\tau_{СЖ}$  сжимают сварочными электродами с целью образования начального контакта и стабилизации контактных

сопротивлений. Усилие  $F_{\text{ОБЖ}}$  прикладывается после окончания времени сжатия  $\tau_{\text{СЖ}}$ . Затем через время задержки  $\tau_3$

включается сварочный ток  $I_{\text{СВ}}$ , который действует в течение времени  $\tau_{\text{СВ}}$ .

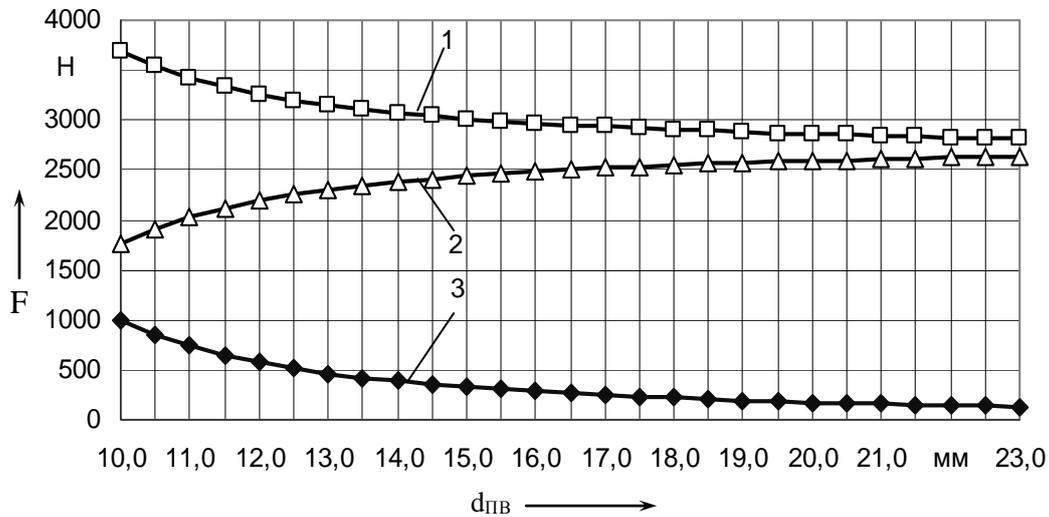


Рис. 5. Изменение силовых параметров при точечной сварке деталей из низкоуглеродистой стали 08 пс толщиной 1 + 1 мм в зависимости от внутреннего диаметра пуансона  $d_{\text{ПВ}}$ : 1 – усилие обжатия  $F_{\text{ОБЖ}}$ ; 2 – усилие  $F_{\text{СВ}}$ ; 3 – максимальное усилие  $F_{y \text{ max}}$

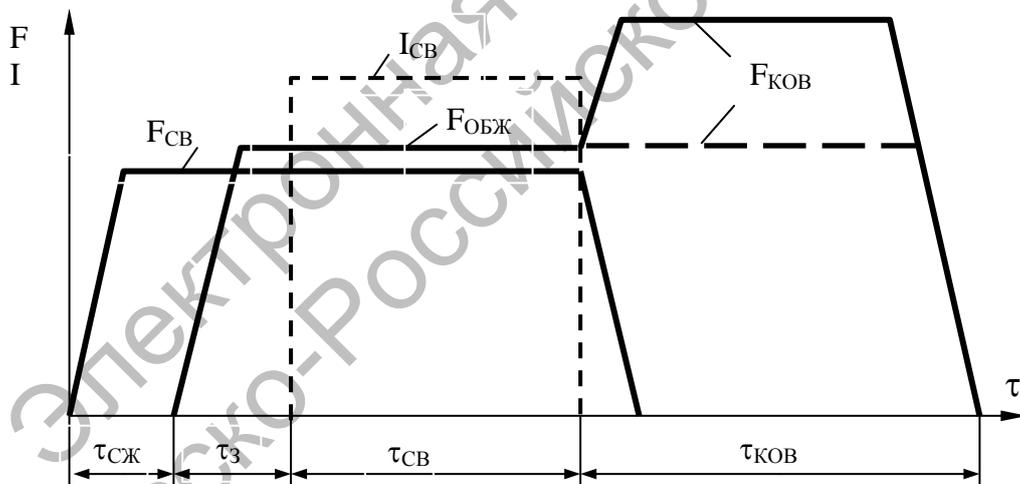


Рис. 6. Циклограмма процесса контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны кольцевым пуансоном

Время задержки  $\tau_3$  учитывает инерционность привода сжатия и обеспечивает включение  $I_{\text{СВ}}$  сразу же после приложения усилия  $F_{\text{ОБЖ}}$ . Усилие сжатия с верхнего электрода  $F_{\text{СВ}}$  снимается одновременно с выключением сварочного тока  $I_{\text{СВ}}$  в момент образования сварной точки требуемых размеров. Прокровка периферийной зоны осуществляется только

кольцевым пуансоном, к которому прикладывается усилие проковки  $F_{\text{КОВ}}$  в течение времени  $\tau_{\text{КОВ}}$ . Анализ результатов экспериментов показал, что снятие ковочного усилия с токоподводящих электродов в момент выключения сварочного тока и осуществление проковки кольце-

вым пуансоном способствует также повышению стойкости электродов.

### **Выводы**

1. Исследована схема равновесия замкнутой силовой системы электрод–свариваемые детали–электрод–пуансон при контактной точечной сварке с обжатием периферийной зоны соединения кольцевым пуансоном, на основании которой предложены формулы для определения усилий сжатия электродов и обжатия при сварке низкоуглеродистых сталей толщиной 1...4 мм.

2. Установлено, что усилие  $F_{обж}$  препятствует возникновению пластического течения разогретого металла из области контакта деталь–деталь в направлении периферии сварной точки, снижает вероятность образования выплеска и уменьшает на 15...20 % необходимое для качественной сварки усилие сжатия электродов. Обжатие периферийной зоны соединения способствует применению более жестких режимов сварки, чем при сварке без обжатия, за счет передачи части усилия обжатия в область пластического пояса.

3. Разработан новый способ контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения, позволяющий снизить глубину вмятин от электродов на лицевых поверхностях деталей. Предложена циклограмма процесса сварки, которая может использоваться в случае приложения независимого усилия обжатия  $F_{обж}$  к периферийной зоне. Установлено, что снятие усилия сжатия  $F_{св}$

с токоподводящих электродов в момент выключения сварочного тока и осуществление проковки кольцевым пуансоном способствует также повышению стойкости электродов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Фурманов, С. М.** Об упругопластическом деформировании металла при контактной точечной сварке с обжатием периферийной зоны соединения / С. М. Фурманов // Сварка и родственные технологии. – 2001. – № 4. – С. 33–37.
2. **Березиенко, В. П.** О снижении глубины вмятины от электродов на лицевых поверхностях изделий при контактной точечной сварке / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов // Вестн. МГТУ. – 2002. – № 1. – С. 16–21.
3. **Березиенко, В. П.** Технология сварки давлением / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
4. **Козловский, С. Н.** Особенности расчета параметров силового воздействия на детали при точечной сварке с обжатием периферийной зоны соединения / С. Н. Козловский, В. И. Малимонов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1989. – № 10. – С. 102–108.
5. **Орлов, Б. Д.** Технология и оборудование контактной сварки : учебник для машиностроительных вузов / Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев ; под общ. ред. Б. Д. Орлова. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
6. **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.
7. **Пат. ВУ 6959 С1, В 23К 11/10.** Способ контактной точечной сварки / С. М. Фурманов, В. П. Березиенко ; № а 20010905 ; заявл. 29.10.01 ; опубл. 30.03.05, Бюл. № 1. – 5 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 21.06.2010

**S. M. Furmanov, V. P. Berezienko**  
**About calculation of force parameters**  
**of a mode of resistance spot welding**  
**with the compression of the peripheral zone**

The scheme of balance of the electrode - welded details - electrode - plunger closed force system at resistance spot welding with the compression of the peripheral zone of the welded joint has been researched. Formulas are offered and calculation of effort of compression electrodes and effort of compression by a ring-shaped plunger at various thickness of welded details are presented.