

КУРС ЛЕКЦИЙ-ПРЕЗЕНТАЦИЙ  
по дисциплине

**«ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ  
СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ»**

лекция №12

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ:

к.т.н., доцент кафедры «ОиТСП»

БЕНДИК Татьяна Ивановна

# СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИИ №12

## Тема 12 . Технология стыковой сварки оплавлением

- Разновидности способов сварки  
оплавлением, области их применения
- Особенности процесса оплавления
- Циклограмма процесса сварки
- Основные параметры режима сварки

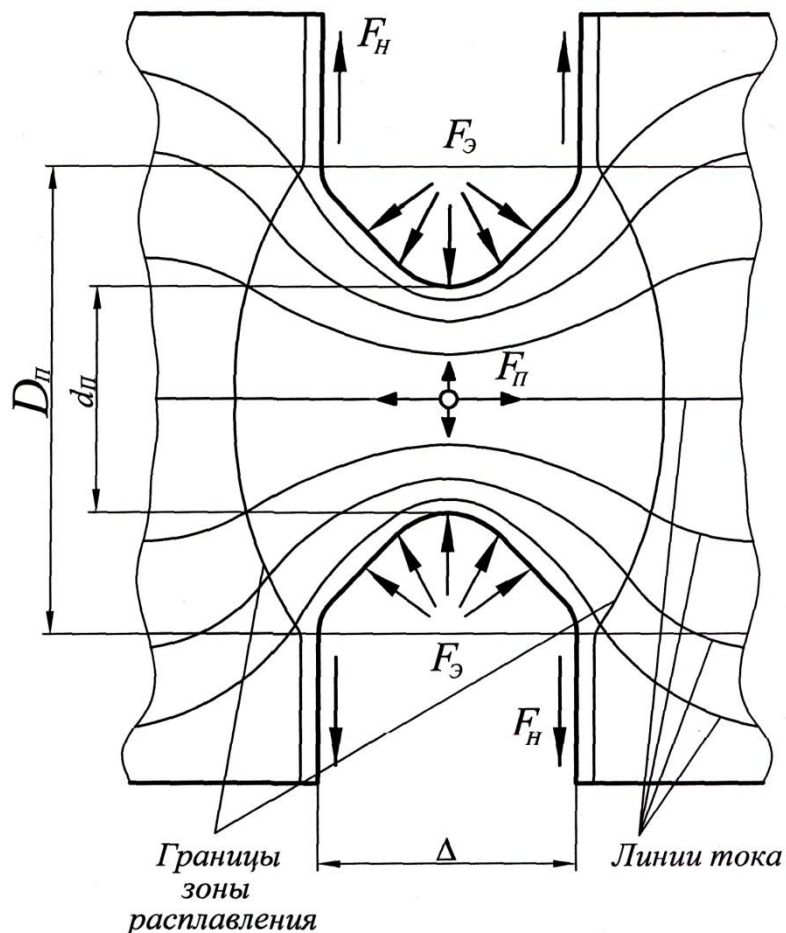
## Технологические особенности процесса, области применения

Непрерывное оплавление – разновидность способа нагрева, при котором теплота выделяется в контакте между деталями при пропускании по ним тока. Напряжение подается на свариваемые детали в момент, когда они разведены, после чего начинается их медленное сближение. При соприкосновении даже обрезанных ровно торцов деталей первые контакты между ними возникают в отдельных местах по имеющимся микронеровностям. За счет протекания тока контакты доводятся до расплавления. Для этого подводимое напряжение и плотность тока в контактах должны быть достаточно велики, чтобы контакты успели разрушиться раньше, чем их площадь успеет существенно увеличиться в процессе сближения деталей.

После взрыва жидких перемычек, образовавшихся в зоне контактов, образуются углубления (кратеры) и форма поверхности становится неровной. Длительность существования жидких перемычек обычно не превышает 0,001...0,005 с (время одного полупериода переменного тока составляет 0,01 с).

Основная технологическая роль оплавления заключается в нагреве сталей до образования на торцах слоя расплавленного металла, а также достижении соответствующего распределения температур в околошовной зоне для проведения последующей осадки с целью удаления жидкого металла и окислов.

## Технологические особенности процесса, области применения



Форма и размеры жидких перемычек определяются действием двух основных противоположно направленных сил.

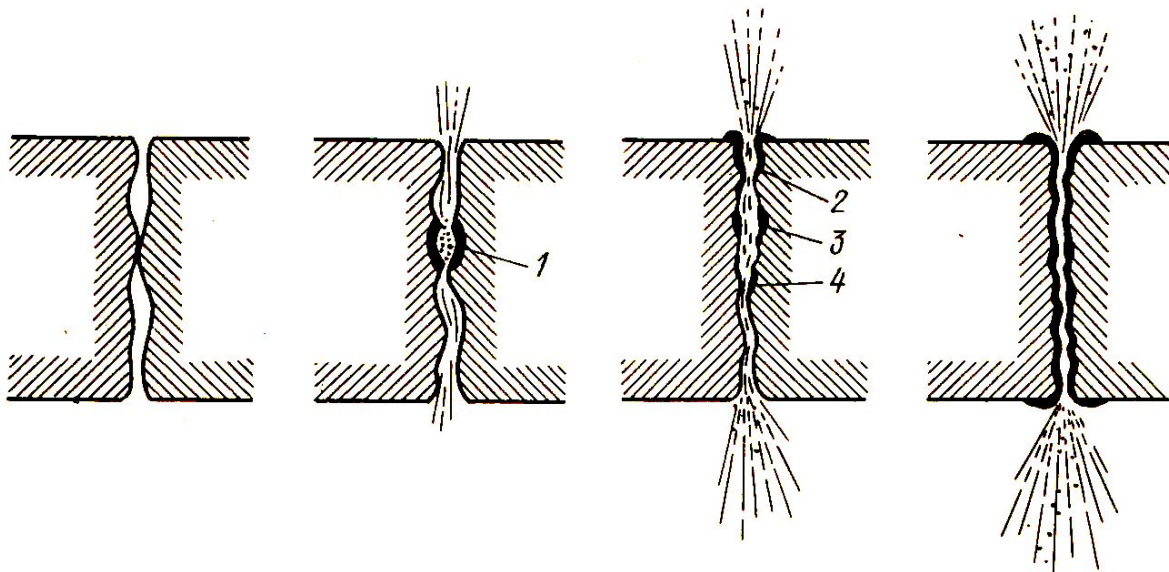
1) силы поверхностного натяжения  $F_H$ , стремящиеся при сближении деталей (уменьшении  $\Delta$ ) увеличить диаметр жидкой перемычки  $d_{п}$ . Увеличение  $d_{п}$  ведет к уменьшению общей поверхности жидкого металла в перемычке и на торцах;

2) электромагнитные силы  $F_3$ , стремящиеся сжать и разорвать жидкую перемычку. Силы  $F_3$  пропорциональны квадрату тока в перемычке и растут с увеличением степени ее сужения, т. е. отношения  $D_{п}/d_{п}$ .

Сжатие перемычки вызывает увеличение в ней плотности тока и скорости нагрева. При больших плотностях тока (достигает  $3000 \text{ А/мм}^2$ ) металл в центре жидкой перемычки переходит в парообразное состояние.

Возникает сила  $F_{п}$ , вызванная давлением паров металла, которая приводит к взрыву перемычки. Давление паров в момент взрыва достигает  $10...20 \text{ МПа}$ , а температура повышается до  $6000...8000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Расплавленный металл выбрасывается из зазора в виде искр. Скорость их перемещения достигает  $60 \text{ м/с}$ . При визуальном наблюдении процесса создается впечатление непрерывного потока искр, вылетающих из зазора, который часто называют искровым промежутком.

## Технологические особенности процесса, области применения



Упрощенная схема возникновения и развития процесса оплавления. Показано, как от единичной перемычки 1 процесс оплавления развивается, возникают новые перемычки 2,3,4, которые тоже взрываются. Из зазора между торцами свариваемых деталей выбрасываются мелкие частицы расплавленного металла. Свариваемые поверхности покрываются слоем расплавленного металла, теплота распространяется в направлении токоподводящих электродов. Создаются условия для последующей осадки, приводящей к удалению жидкого металла и окислов, а также для пластической деформации металла в зоне стыка. Перемычки в стадии их формирования до момента разрушения служат источником нагрева металла зоны сварки. С увеличением времени существования перемычек градиент температуры нагрева деталей за счет теплопроводности металла снижается, и наоборот. Разрушение перемычек и выброс частиц расплавленного металла за пределы искрового промежутка рассматривают как потерю накопленной тепловой энергии.

Одним из главных параметров режима стыковой сварки оплавлением является скорость оплавления  $V_{\text{опл}}$ . Она оказывает решающее влияние на температурное поле, равномерность распределения температур, рельеф поверхности оплавляемых торцов деталей, степень окисления металла зоны сварки, качество сварного соединения.

Для устойчивого процесса оплавления мгновенная скорость сближения деталей  $V_{\text{сбл}}$  должна соответствовать мгновенной скорости оплавления  $V_{\text{опл}}$ :  $V_{\text{сбл}} = V_{\text{опл}}$ .

Если это условие не соблюдается, то нарушается устойчивый процесс оплавления.

Если это условие не соблюдается, то нарушается устойчивый процесс оплавления. При  $V_{\text{сбл}} > V_{\text{опл}}$  площадь перемычки увеличивается, зазор между деталями уменьшается, происходит короткое замыкание и процесс оплавления прекращается. При  $V_{\text{сбл}} < V_{\text{опл}}$  процесс образования и разрушение жидких перемычек сопровождается увеличением зазора между торцами деталей и перерывом в процессе оплавления.

Мгновенная скорость оплавления зависит от того, с какой скоростью металл на торцах деталей может быть нагрет до температуры плавления  $T_{\text{пл}}$  и частично до температуры кипения  $T_{\text{кип}}$ . За секунду в контакте с сопротивлением  $r_{\text{дд}}$  выделяется количество теплоты

$$q_{\text{опл}} = k \cdot r_{\text{дд}} \cdot I_{\text{св}}^2$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий неполнофазность переменного тока,  $k \approx 0,75 \dots 0,8$ .

Контактное сопротивление между свариваемыми деталями  $r_{\text{дд}}$ , мкОм, определяется сопротивлением жидких перемычек и зависит от их сечения и количества.

$$r_{\text{дд}} = \frac{9500 \cdot k_1}{S^{2/3} \cdot V_{\text{опл}}^{1/3} \cdot j_{\text{опл}}}$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий свойства оплавленной стали (для углеродистой и низколегированной сталей  $k_1 = 1$ , для аустенитных сталей  $k_1 = 1,2$ );  $S$  – площадь торца свариваемых деталей, см<sup>2</sup>;  $V_{\text{опл}}$  – скорость оплавления, см/с;  $j_{\text{опл}}$  – плотность тока, А/мм<sup>2</sup>.

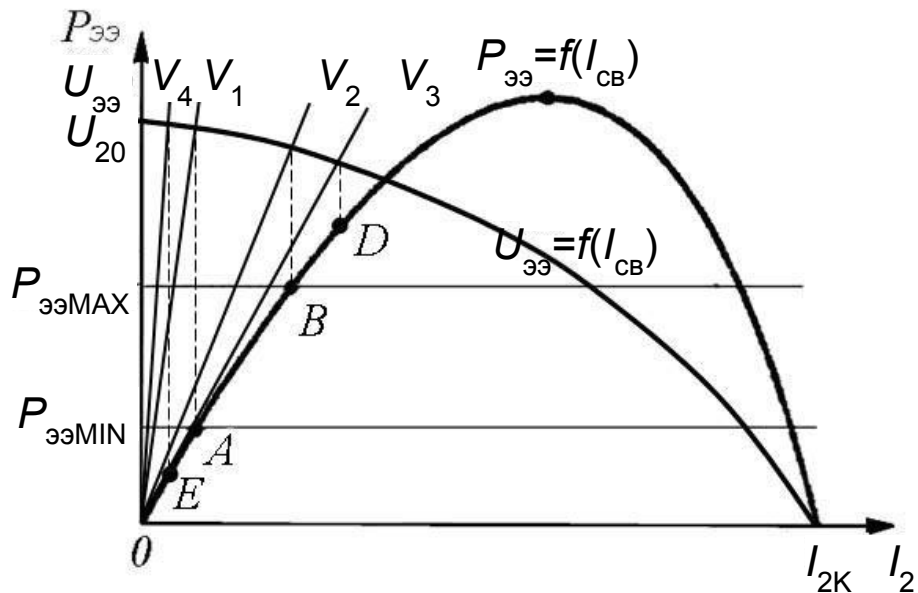
$c, \gamma, \lambda, m_0$  – удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и скрытая теплота плавления свариваемого металла;  $t_1$  – средняя температура торцов деталей (в начале оплавления – температура окружающей среды, в конце оплавления – температура, близкая к  $T_{\text{пл}}$ , при сварке с предварительным подогревом  $t_1 = t_{\text{под}}$ );  $t_{\text{опл}}$  – средняя температура металла, выбрасываемого из зазора при оплавлении (для стали  $t_{\text{опл}} = 2000$  °С).

$$V_{\text{опл}} = \frac{k \cdot r_{\text{дд}} \cdot I_{\text{св}}^2 - 2\lambda S \frac{dt}{dx}}{S \cdot \gamma [c(t_{\text{опл}} - t_1) + m_0]}$$

Мгновенная скорость  $V_{\text{опл}}$  растет с увеличением тепловой и полезной мощности, с уменьшением градиента температуры торцов  $dt/dx$  и с повышением температуры торцов  $t_1$ . В начале процесса оплавления, когда  $dt/dx$  велик и  $t_1$  мало, оплавление идет медленно. По мере подогрева торцов снижается величина  $(t_{\text{опл}} - t_1)$  и  $V_{\text{опл}}$  растет.

Такие технологические приемы, как подогрев торцов деталей перед процессом оплавления (кратковременным замыканием торцов деталей, газовой горелкой или индуктором), а также снижение величины начального сечения торцов деталей  $S$  (применением скоса кромок) увеличивают возможную скорость оплавления.

Перечисленные приемы позволяют уменьшить мощность машины для стыковой сварки.



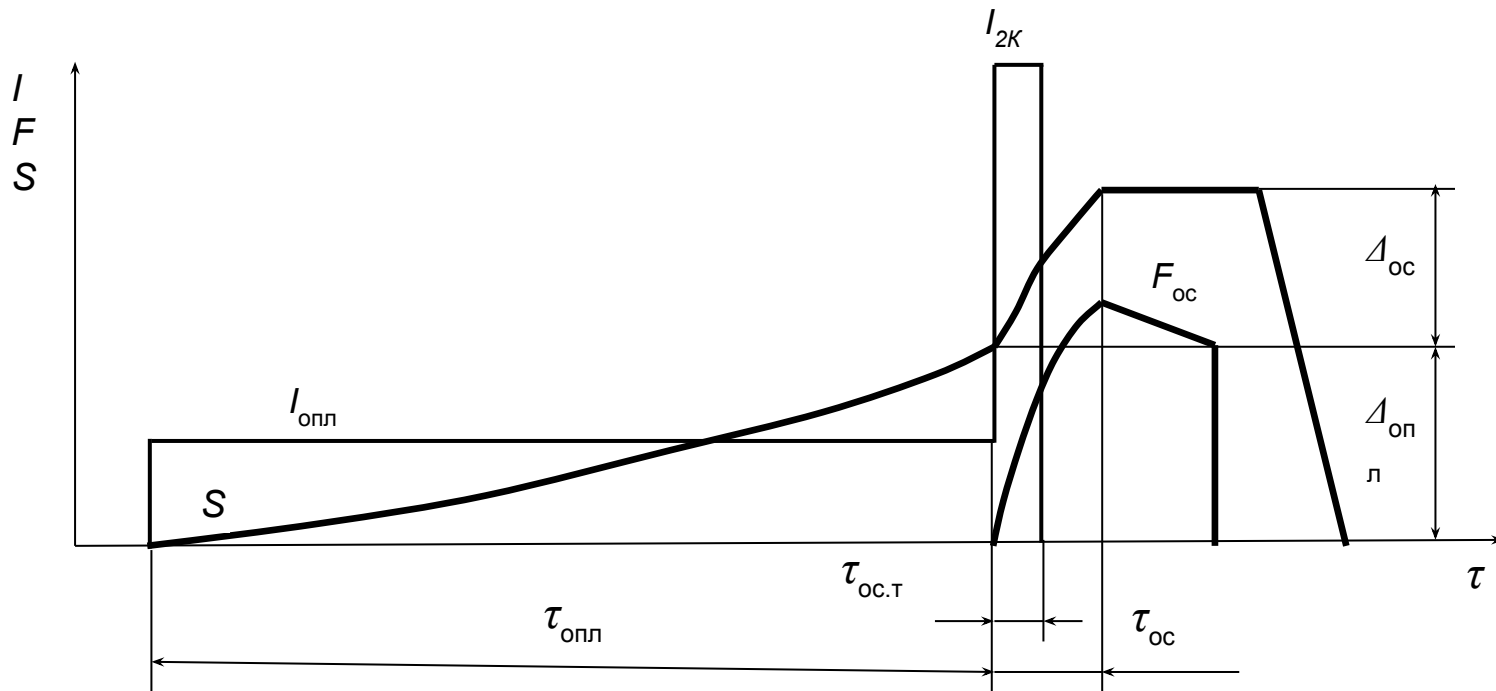
Устойчивость процесса оплавления оценивают по изменению электрических параметров (тока и напряжения) в процессе сварки. При сварке оплавлением ток в сварочной цепи определяется проводимостью искрового промежутка, т. е. величиной зазора между торцами деталей. В ходе оплавления проходят процессы саморегулирования. При правильно выбранных параметрах режима такие процессы поддерживают равенство скоростей оплавления деталей и их сближения, а значит, и сопротивление цепи.

Используя зависимость  $P_{\text{эз}} = f(I_{\text{св}})$ , отметим на ней допустимые значения мощности (точки A и B). Спроектировав эти точки на внешнюю характеристику машины  $U_{\text{эз}} = f(I_{\text{св}})$ , получаем диапазон скоростей сближения ( $V_1, V_2$ ), которые при заданном  $U_{20}$  обеспечат устойчивость процесса оплавления. При использовании скорости сближения деталей  $V_3 > V_2$  величина мощности  $P_{\text{эз}}$  выходит за пределы диапазона допустимых значений (точка D). При этом процесс сместится в сторону короткого замыкания. В случае снижения скорости сближения деталей ( $V_4 < V_1$ ) значение мощности сместится в точку E. Это приводит к увеличению зазора между торцами деталей и прерыванию процесса оплавления. Процесс смещается в сторону холостого хода. Для возбуждения процесса и последующего устойчивого оплавления необходим запас устойчивости, который представляет собой отношение  $I_{2к} / I_{\text{св}} = 3,0 \dots 5,0$ . При сварке оплавлением больших компактных сечений это отношение принимает еще большее значение.



# Стыковая сварка с непрерывным оплавлением

Стыковая сварка непрерывным оплавлением – это разновидность контактной стыковой сварки оплавлением, при которой процесс оплавления начинается в результате поступательного движения сразу же после сближения деталей, находящихся под напряжением. Происходит непрерывно повторяющееся образование и разрушение отдельных участков торцевых поверхностей свариваемых деталей с выбрасыванием из стыка расплавленных частиц металла, а сварное соединение формируется сжатием нагретых стыкуемых поверхностей. Во время сжатия вместе с выдавливаемым из стыка жидким металлом удаляются окислы и другие загрязнения. Циклограмма процесса контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением представлена на рис.



Циклограмма процесса стыковой сварки непрерывным оплавлением:

$I_{\text{опл}}$  – ток оплавления;  $I_{2K}$  – ток короткого замыкания;  $S$  – перемещение подвижной плиты;  $F_{\text{ос}}$  – усилие осадки;  $\tau_{\text{опл}}$  – длительность оплавления;  $\tau_{\text{ос.т}}$  – длительность осадки под током;  $\tau_{\text{ос}}$  – длительность осадки;  $\Delta_{\text{опл}}$  – припуск на оплавление;  $\Delta_{\text{ос}}$  – припуск на осадку

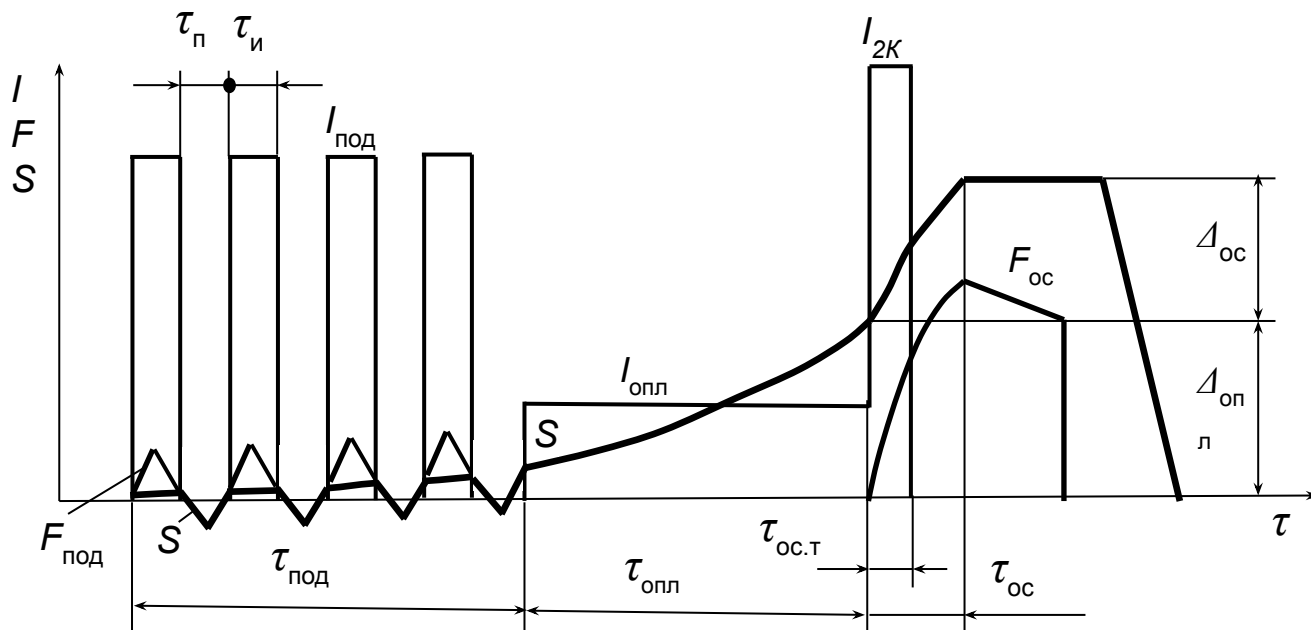
Основными параметрами режима сварки непрерывным оплавлением являются:

- установочная длина  $l_0$ ;
- величина тока оплавления  $I_{\text{опл}}$ ;
- длительность оплавления  $t_{\text{опл}}$ ;
- скорость оплавления  $V_{\text{опл}}$ ;
- припуск на оплавление  $\Delta_{\text{опл}}$ ;
- припуск на осадку  $\Delta_{\text{ос}}$ ;
- скорость осадки;
- длительность осадки под током  $t_{\text{ос.т}}$ ;
- усилие осадки  $F_{\text{ос}}$ .

Если произвести отключение сварочного тока перед осадкой торцов деталей, то произойдет их охлаждение и окисление. Качество сварки будет невысоким, в сваренном стыке могут присутствовать окислы металла, появится возможность возникновения непрочности. Наиболее трудные условия для получения качественных соединений возникают, когда расплавленный металл до начала осадки успевает закристаллизоваться, а температура плавления его окислов выше температуры плавления свариваемого металла. Поэтому на закристаллизовавшейся оплавленной поверхности образуется твердая пленка окислов, препятствующая получению качественных соединений. Обычно такие условия имеются при сварке алюминия, меди и их сплавов. Для удаления со стыкуемых поверхностей оксидных пленок необходима интенсивная деформация при повышенных усилиях осадки.

# Стыковая сварка оплавлением с предварительным подогревом

Наиболее часто подогрев осуществляется неоднократным кратковременным замыканием торцов свариваемых деталей. Во время замыкания торцы нагреваются до температуры подогрева  $t_{\text{под}} < T_{\text{пл}}$ . Во время паузы теплота от нагретых торцов распространяется вглубь деталей, подогревая металл, выступающий из зажимов (электродов).



Циклограмма процесса стыковой сварки оплавлением с подогревом сопротивлением:

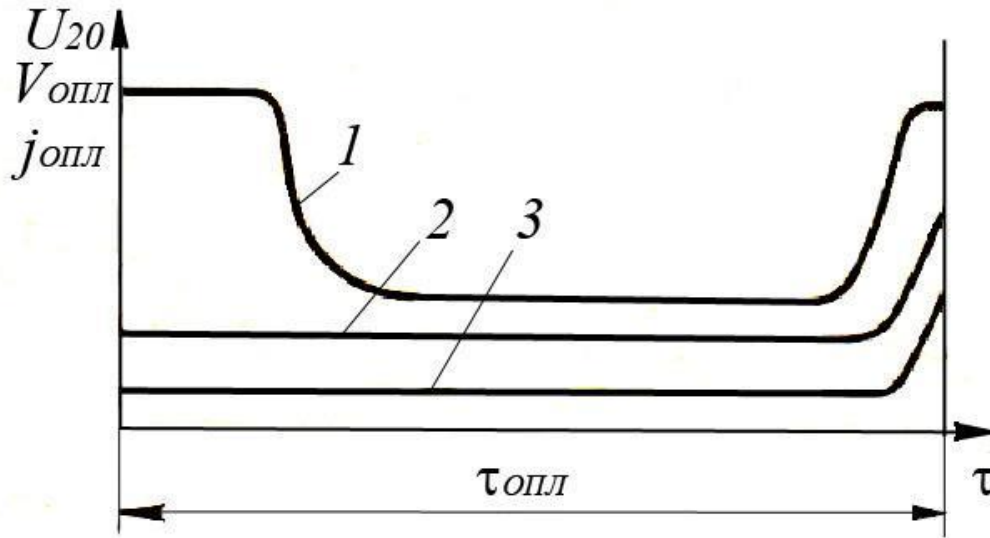
$I_{\text{под}}$  – ток нагрева;  $\tau_{\text{и}}$  – длительность импульса подогрева;  $\tau_{\text{п}}$  – длительность паузы

Перед началом процесса непрерывного оплавления через сжатые небольшим усилием детали протекает импульс тока длительностью  $t_{и}$ . Таких импульсов подогрева, чередующихся с паузами  $t_{п}$ , может быть несколько. Количество их возрастает с увеличением площади свариваемых деталей. Предварительный подогрев повышает сопротивление выступающих из электродов (зажимных губок) деталей, что способствует увеличению количества выделяемой теплоты и уменьшает величину тока оплавления  $I_{опл}$ .

При сварке с подогревом дополнительными параметрами процесса являются:

- длительность импульсов подогрева  $t_{и}$ ;
- длительность паузы  $t_{п}$ ;
- количество импульсов подогрева;
- припуск на подогрев.

# Стыковая сварка с программным регулированием напряжения



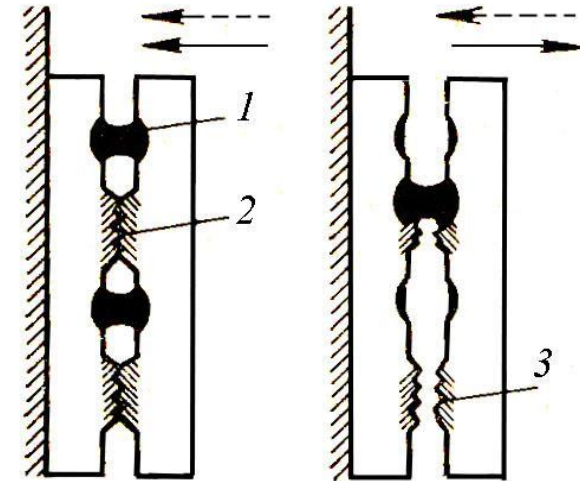
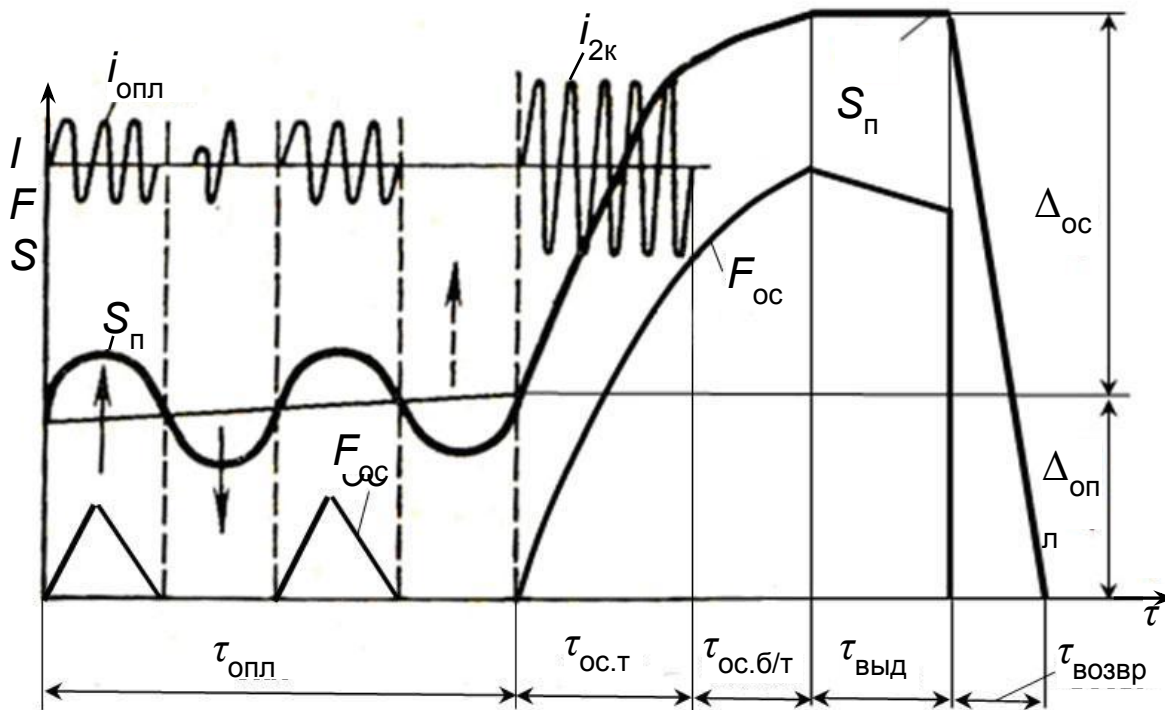
Программа изменения напряжения  $U_{20}$  (1), скорости оплавления  $V_{опл}$  (2) и плотности тока  $j_{опл}$  (3)

При программном регулировании для возбуждения оплавления напряжение  $U_{20}$  вначале увеличивают (в течение  $0,1\tau_{опл}$ ). Повышение  $U_{20}$  ускоряет разрушение перемычек и сужает зону нагрева. По мере нагрева торцов деталей и стабилизации процесса оплавления  $U_{20}$  снижают и поддерживают постоянным (в течение  $0,7\tau_{опл}$ ). В конце процесса оплавления, непосредственно перед осадкой,  $U_{20}$  снова кратковременно увеличивают для повышения локальной устойчивости процесса. Для управления напряжением обычно используют фазное регулирование.

При программном регулировании  $U_{20}$  программируют также и скорость оплавления  $V_{опл} = f(\tau_{опл})$ . Осадка осуществляется так же, как и при сварке непрерывным оплавлением.

При этом способе сварки время сварки по сравнению со сваркой непрерывным оплавлением сокращается в 1,5...2 раза, а расход электроэнергии – в 3...5 раз.

# Стыковая сварка пульсирующим оплавлением



Циклограмма процесса сварки пульсирующим оплавлением:  $i_{\text{опл}}$  – осциллограмма тока оплавления;  $i_{2к}$  – осциллограмма тока короткого замыкания;  $S_{\text{п}}$  – перемещение подвижной плиты;  $F_{\text{ос}}$  – усилие осадки

Для осуществления этого способа на основное поступательное движение, которое совершает подвижная плита сварочной машины, накладывается дополнительное колебание с частотой от 3 до 45 Гц и амплитудой 0,1...0,8 мм. Это вызывает периодическое высокоскоростное изменение зазора между деталями. В стадии сближения деталей и уменьшения зазора идут процессы расплавления и разрушения (взрыва) мелких перемычек, а также одновременно нагрев, деформация и увеличение площади контактов, нагретых до температуры ниже  $T_{пл}$ . В стадии увеличения зазора эти контакты механически разрушаются и лишь частично оплавляются вследствие большой скорости увеличения зазора.

Пульсирующее оплавление, как и оплавление при сварке с программным регулированием напряжения, осуществляется при более низких  $U_{20}$ . При этом способе сварки на 10...15 % повышается температура торцов деталей, в 3...4 раза сокращается  $t_{опл}$ , в 2...2,5 раза – расход электроэнергии. Потери металла на оплавление снижаются в 2...2,5 раза.

При сварке рельсовой стали количество газообразных выделений при оплавлении, содержащих окислы железа, марганца, других легирующих элементов и примесей, сокращается в 10 раз.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

**КАКИЕ БУДУТ ВОПРОСЫ?**