

# ОБЗОРНАЯ ЛЕКЦИЯ «ОБОРУДОВАНИЕ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ»



Существующие к настоящему моменту времени источники питания сварочной дуги можно классифицировать **по разным признакам**.

По **первому** признаку источники питания классифицируются в соответствии **со способом производства энергии**: преобразуется ли она из силовой сети питания (что имеет место в трансформаторах, выпрямителях и электронных источниках питания) или вырабатывается самими источниками питания (как это имеет место в случае использования генераторов).

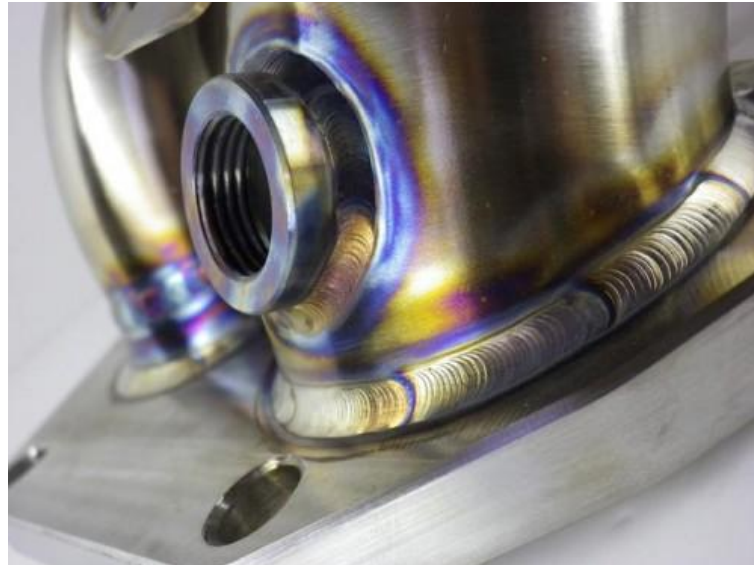


## **По второму признаку источники питания классифицируются в соответствии со способом преобразования электрической энергии:**

- путем использования трансформаторов, которые преобразуют относительно высокое напряжение силовой сети в более низкое напряжение для сварки переменным током;
- путем использования сварочных выпрямителей, состоящих из трансформатора (для понижения напряжения силовой сети) и блока выпрямления для преобразования переменного тока в постоянный;
- путем использования электронных источников питания (например, сварочных инверторов);
- путем использования сварочных преобразователей, состоящих из сварочного генератора, вращение ротора которого обеспечивается электрическим двигателем;
- путем использования сварочных агрегатов, состоящих из сварочного генератора, вращение ротора которого обеспечивается двигателем внутреннего сгорания (строго говоря, в агрегате происходит преобразование не электрической энергии, а механической в электрическую).

**Третьим** классификационным признаком является способ получения энергии: источники питания могут быть зависимыми (все кроме агрегатов, т. к. получают энергию от стационарной электрической сети) и автономными (агрегаты, т.к. их генератор подсоединен к двигателю внутреннего сгорания).

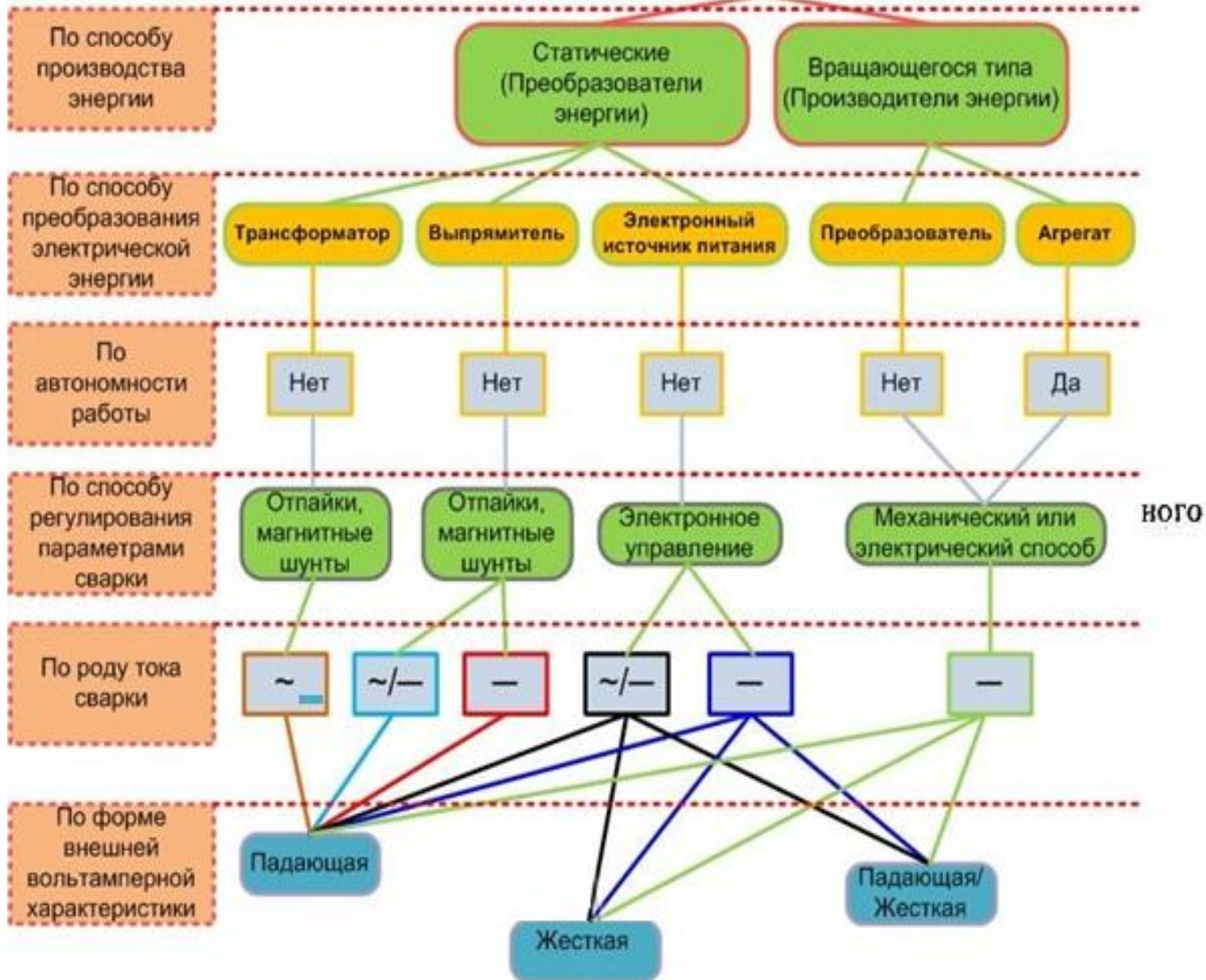
По **четвертому** признаку источники питания классифицируются в соответствии со способом регулирования параметров сварки. В трансформаторах, выпрямителях это может быть выполнено с помощью подвижных катушек, подвижных магнитных шунтов, секционированием витков вторичной обмотки и другими способами.



**Пятым** классификационным признаком является род тока сварки, который обеспечивают источники питания: переменный (АС), постоянный (DC) или оба, как АС, так и DC (комбинированные источники питания).

По **шестому** классификационному признаку источники питания классифицируются в соответствии с формой внешней (статической) вольт-амперной характеристики (ВВАХ). Внешней вольтамперной характеристикой источника питания является зависимость среднего значения напряжения на клеммах источника от силы тока в сварочной цепи. Она может быть либо падающей (CC - constant current), либо жесткой (CV - constant voltage). И в том и другом случаях эти определения не совсем точны и являются условными, принятыми в сварочной практике.

# Источники питания для дуговой сварки



Основными параметрами сварочного аппарата для сварщика являются назначение данного конкретного агрегата и сварочный ток, который он выдает.

Во многих случаях ключевым требованием является подбор нужной вольт-амперной характеристики (ВАХ).

Так, например, для сварки в среде защитных газов требуются устройства с жесткой характеристикой, работающие постоянным током.

Для ручной и полуавтоматической сварки под флюсом применяются аппараты переменного и постоянного тока с падающей характеристикой.



# Вольт-амперная характеристика дуги

Статическая вольт-амперная характеристика дуги показывает зависимость между установившимися значениями тока и напряжения дуги при постоянной ее длине.





Источники питания сварочной дуги имеют также свои вольт-амперные характеристики, которые могут быть падающими, жесткими и возрастающими.

Для стабильного горения дуги необходимо, чтобы было равенство между напряжениями и токами дуги ( $U_d, I_d$ ) и источника питания ( $U_p, I_p$ ).

Источники питания с падающей и жесткой характеристиками применяют при ручной дуговой сварке, с возрастающей характеристикой - при полуавтоматической сварке, с жесткой и возрастающей - при автоматической сварке под флюсом и для наплавки.

Устойчивое горение сварочной дуги возможно только в том случае, когда источник питания сварочной дуги поддерживает постоянным необходимое напряжение при протекании тока по сварочной цепи.



## Основные требования к источникам питания сварочной дуги

К источникам питания предъявляются следующие требования:

1. Внешняя характеристика источника питания должна соответствовать статической (вольтамперной) характеристике дуги.
2. Напряжение холостого хода должно быть достаточным для легкого зажигания дуги, но не превышающим нормы техники безопасности. Величина напряжения холостого хода зависит от конструкции и назначения сварочного агрегата и составляет  $(60 \div 80)$  В.
3. Источник должен обладать хорошими динамическими свойствами. С увеличением длины дуги рабочее напряжение должно быстро возрастать, а с уменьшением - быстро падать. Время восстановления рабочего напряжения при коротком замыкании от 0 до 30 В не должно превышать 0,05 с, а по требованиям минимального разбрызгивания металла - 0,01-0,02 с.

4. Ток короткого замыкания не должен быть чрезмерно велик во избежание перегрева электрода, оплавления покрытия и разбрызгивания металла, но не должен быть и слишком мал, чтобы не затруднять повторное зажигание дуги. Поэтому для источников сварочного тока принято следующее соотношение между током короткого замыкания и рабочим током:

$$1,25 \leq \frac{I_{кз}}{I_{св}} \leq 2,0$$

5. Мощность источника сварочного тока должна быть достаточной для выполнения сварочных работ соответствующим способом.

6. Источник должен иметь устройство для плавного регулирования силы тока.

# Характеристики сварочной дуги

Сварочная дуга – это установившийся мощный электрический разряд в ионизированной смеси газов, паров металлов и веществ, входящих в состав электродных покрытий, флюсов и других защитных средств.



Носителями электричества в сварочной дуге являются электроны и ионы.

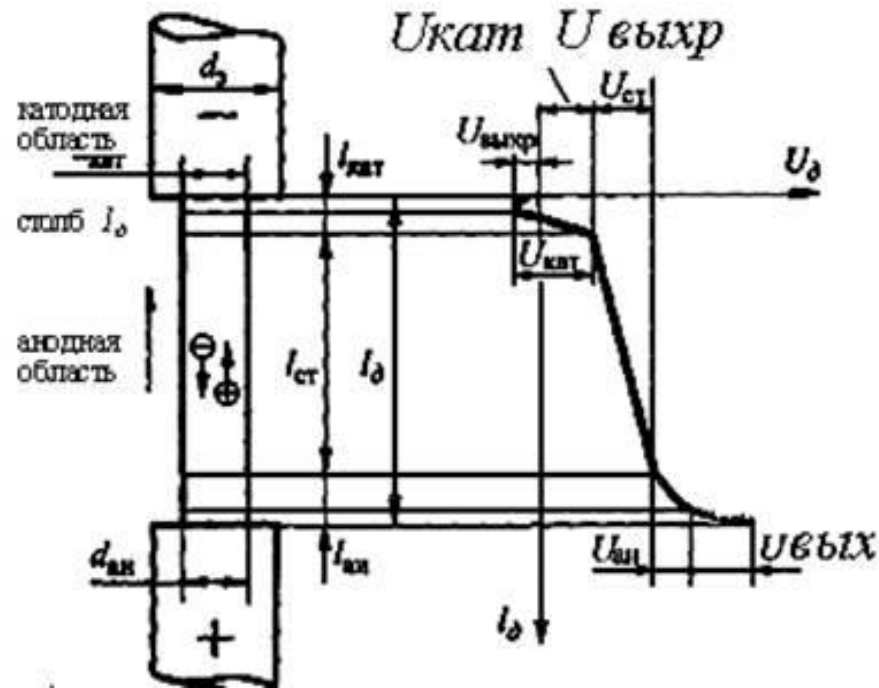
Под действием электрического поля между катодом и анодом отрицательно заряженные электроны движутся к аноду, а положительно заряженные ионы – к катоду.

Но основными носителями электричества в сварочной дуге, по большей части и определяющими ее проводимость, являются электроны.

В столбе дуги проходит большой ток и создается высокая температура.

Такая температура столба дуги приводит к термоионизации — процессу образования ионов вследствие соударения молекул и атомов, обладающих большой кинетической энергией при высоких скоростях их движения (молекулы и атомы среды, где горит дуга, распадаются на электроны и положительно заряженные ионы).

# Модель сварочной дуги и распределение потенциала по ее длине



$$l_d = l_{ст}$$

Напряжение и ток дуги – это сумма напряжения и тока как столба, так и катодных и анодных областей!

Динамической характеристикой источника питания называется время, необходимое ему для восстановления напряжения от нуля в момент короткого замыкания до величины напряжения зажигания дуги. Это время не должно превышать 0,05 с. Высокие динамические свойства источника питания обеспечивают спокойный перенос электродного металла в сварочную ванну, малое разбрызгивание его. хорошее формирование сварного шва, высокое качество сварки.

### **Сварочные свойства источников питания. Поддержание и горение дуги. Устойчивость и стабильность процесса сварки**

Сварочное свойство источника — это зависящее от его электрических параметров качество выполнения им одной из функций, связанных с обеспечением технологического процесса сварки.

Перечислим сварочные свойства в порядке перечисления соответствующих им функций источника.

**Надежность зажигания дуги** является важным свойством источника, поскольку влияет на качество начального участка шва, а при сварке короткими швами — и на производительность.

**Устойчивость и стабильность процесса сварки** оказывает непосредственное влияние на качество шва, постоянство его ширины и глубины проплавления.

**Эффективность регулирования (настройки)** параметров режима характеризует источник потому, что его регулятором настраиваются обычно сила тока или напряжение дуги, оказывающие влияние на производительность и качество сварки.

Характер переноса электродного металла в той степени, в которой зависит от источника, определяется параметрами режима, но особенно связан с величиной и скоростью изменения тока при технологических коротких замыканиях каплями электродного металла с поверхностью сварочной ванны. Желателен струйный или мелкокапельный перенос без чрезмерного разбрызгивания электродного металла.

**Качество формирования шва** от источника зависит косвенно и особенно связано с устойчивостью и стабильностью процесса сварки. Если процесс неустойчив, то в результате частых обрывов дуги получается неровный шов. В случае устойчивого, но нестабильного (по величине тока и напряжения) процесса также наблюдается непостоянство размеров шва, хотя и в меньшей степени, чем при неустойчивом процессе.

Критерии оценки сварочных свойств могут быть непосредственными и косвенными. Оценка сварочных свойств источников выполняется в соответствии с ГОСТ 25616-83 «Источники питания для дуговой сварки. Методы испытания сварочных свойств»



## **Принципиальная устойчивость системы «источник—дуга»**

Дуговой разряд называется устойчивым, если он существует непрерывно в течение длительного времени без обрывов и коротких замыканий. Поэтому в качестве непосредственного критерия для оценки устойчивости можно принять частоту обрывов дуги или количество обрывов при полном расплавлении одного электрода. Устойчивость зависит как от технологических, так и электрических характеристик процесса.

### **При малых возмущениях:**

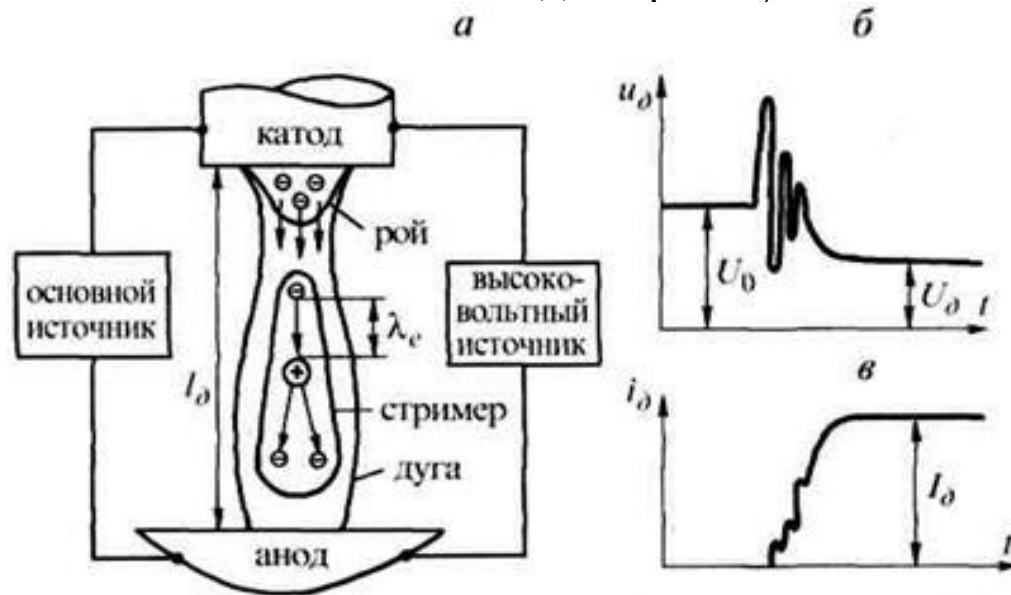
Система «источник—дуга» принципиально устойчива, если в результате отработки малых возмущений она приходит в установившееся состояние, характеризующееся равенством подаваемой и потребляемой энергии и малыми отклонениями тока и напряжения от исходного состояния. Система «источник—дуга» устойчива при малых возмущениях, если разность дифференциальных сопротивлений дуги и источника в точке пересечения их характеристик положительна.

## Устойчивость при значительных возмущениях

При дуговой сварке наиболее значительными возмущениями являются колебания длины дуги. *Чем больше удастся удлинить дугу без ее обрыва, тем устойчивей процесс.* Разрывная длина дуги для оценки эластичности обычно определяется в следующем эксперименте. Электрод зажимается в штативе, после чего возбуждается дуга. По мере плавления или медленного подъема электрода дуга непрерывно удлиняется вплоть до обрыва. Разрывная длина дуги  $l_{др}$ , т.е. длина в момент, предшествующий обрыву, и принята в качестве непосредственного критерия устойчивости дуги при значительных ее колебаниях.

## Начальное зажигание дуги

Под начальным зажиганием дуги понимают процесс возбуждения дуги в начале сварки. От него нужно отличать повторное зажигание после случайных обрывов дуги, которое выполняется теми же способами, что и начальное, но происходит в более благоприятных условиях при уже разогретых электродах. Непосредственным критерием при оценке надежности начального зажигания принято считать процент успешных попыток или количество попыток до первой успешной.



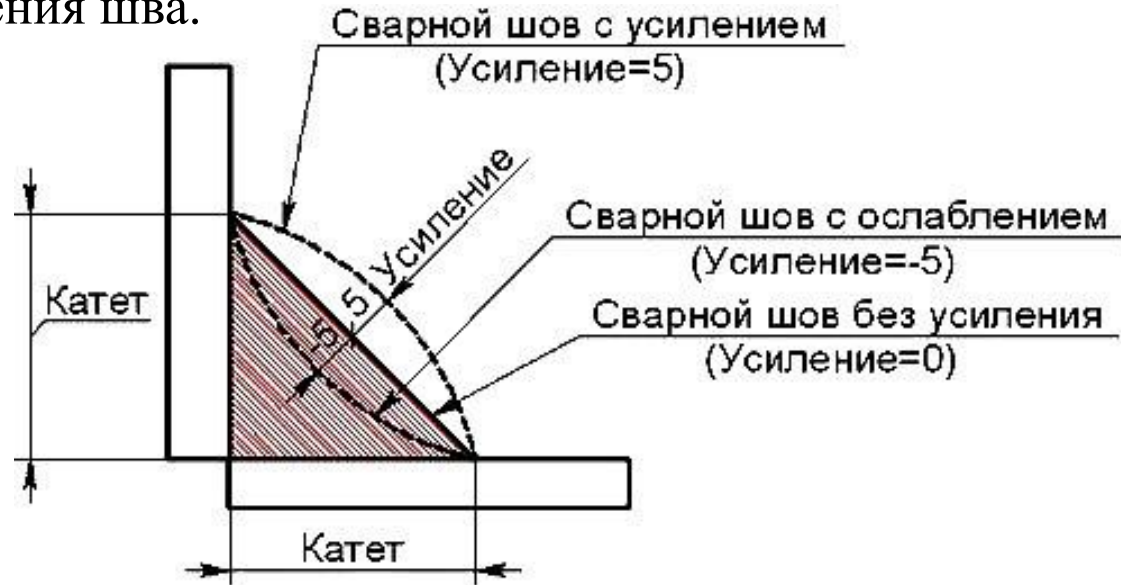
При этом параллельно основному источнику подключается вспомогательный высоковольтный источник малой мощности. По соображениям безопасности он выполняется импульсным или высокочастотным (частота  $f > 100$  кГц). Назначение высоковольтного источника – пробить искрой, т.е. ионизировать межэлектродный промежуток, по которому затем пойдет ток от основного источника.

## Стабильность параметров режима сварки

Стабильность режима: это удержание постоянными заданных значений тока и напряжения

Отклонения силы тока от заданной приводят к:

изменениям глубины и формы провара,  
изменениям доли основного металла в шве  
и изменениям величины усиления шва.



**Увеличение тока:**

глубина провара возрастает, что может привести к прожогам.

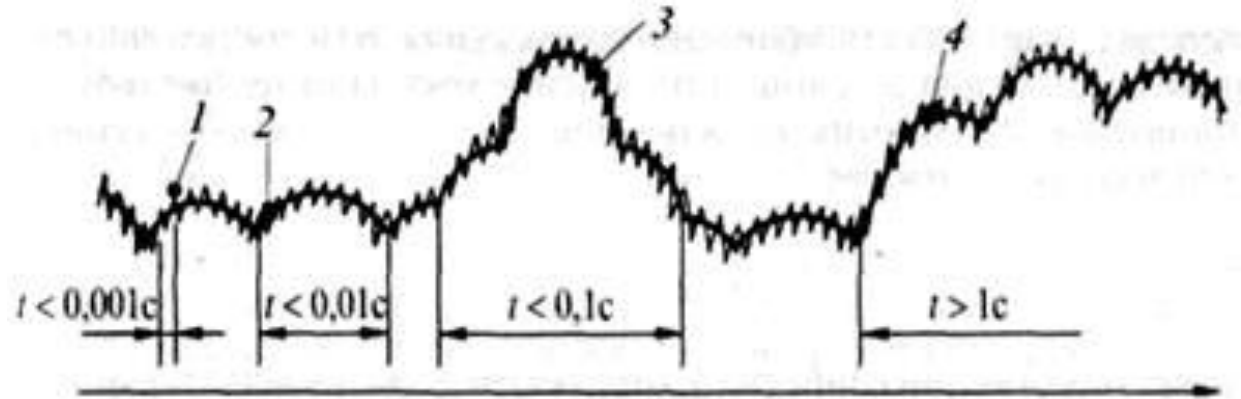
**Уменьшение тока:**

возможен непровар корня шва.

**Отклонения напряжения дуги:**

вызывают пропорциональные изменения ширины шва.

Возмущения, нарушающие стабильность параметров режима, могут иметь:  
периодический,  
импульсный  
скачкообразный характер



**Кривая 1** – высокочастотные (200 – 2000 Гц) колебания тока

**Причина:** периодические флуктуации проводимости дуги, вызванные хаотическим движением катодного и анодного пятен по поверхности электрода и детали (не оказывают влияние на формирование шва, но ответственны за звуковой эффект дуги)

**Кривая 2** – периодические колебания напряжения источника с частотой сети 50 Гц (или кратной ей частотой 100, 150, 300 Гц)

**Причина:** пропорциональные колебания тока (с малой амплитудой, также не отражающиеся на форме шва)

**Кривая 3** – импульсные всплески тока с частотой 10 — 150 Гц,

**Причина:** технологические короткие замыкания (не вызывают изменения глубины провара из-за высокой тепловой инерционности ванны, но капельный перенос оказывает влияние на внешнюю чешуйчатость шва).

Кривая 4 – скачкообразное отклонение тока, имеет длительный характер ( $> 1$  с!).

**Изменяет глубину провара!**

Для сопоставления различных источников питания и режимов их стабильности удобно пользоваться коэффициентом вариации параметра

$$k_{vI} = \frac{\sigma_I}{I_{\text{дср}}} \cdot 100\%$$

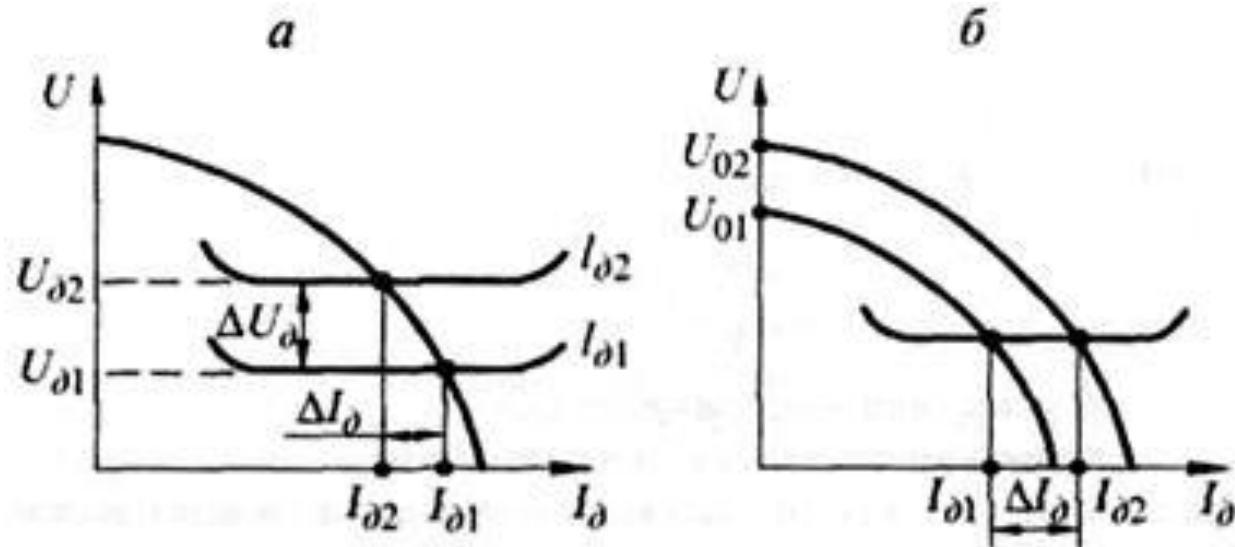
где

$$\sigma_I = \sqrt{\sum_{i=1}^n (i_{\partial} - I_{\text{дср}})^2 / (n - 1)},$$

где  $i_{\partial}$  — текущее значение тока в  $i$ -й момент,  $I_{\text{дср}}$  — среднее значение тока за  $n$  измерений.

У лучших источников для механизированной сварки в углекислом газе коэффициент вариации тока  $k_{vi} < 35\%$ ,  
А коэффициент вариации напряжения  $k_{vu} < 30\%$ .

Для стабилизации силы тока рекомендуется использовать источник с крутопадающей внешней характеристикой (с большим отрицательным дифференциальным сопротивлением  $\rho_{\text{и}}$ ).



Самыми опасными являются длительные скачкообразные изменения параметров. У простейших трансформаторов и выпрямителей пропорционально изменениям напряжения сети меняется и напряжение холостого хода  $U_0$ , что приводит к нарушению стабильности режима.

**Устойчивость процесса сварки во многом зависит от динамических свойств источников питания дуги.**

**Динамические свойства определяются временем восстановления напряжения холостого хода после короткого замыкания, и, в основном, связаны с электромагнитной инерционностью источника тока.**

**(то есть – чем быстрее восстановилось напряжение – тем динамические свойства лучше).**





Критерии оценки сварочных свойств могут быть *прямыми* и *косвенными*.

***Прямые:*** по количественным и качественным характеристикам дуги или шва. Ещё называют такие критерии «непосредственные», технологические.

***Косвенные:*** по собственным электрическим параметрам источника (например, скорость нарастания тока короткого замыкания).

***Методы оценки:***

Объективный  
Количественное  
выражение

Субъективный  
Качественное  
выражение

### Сварочные свойства источников питания

Функция источника	Сварочное свойство	Непосредственный критерий	Косвенный критерий
Зажигание дуги	Надежность начального зажигания	Доля успешных попыток; количество попыток до первой успешной; предельная начальная длина дуги $l_{0н}$ , мм	Напряжение холостого хода $U_x$ , В; ток $I_{гп}$ , А и время $t_{гп}$ , с горячего пуска
Поддержание горения дуги	Принципиальная устойчивость системы «источник-дуга»	Частота обрывов дуги, раз/электрод	Коэффициент устойчивости $k_y > 0$
	Устойчивость при значительном удлинении дуги	Разрывная длина дуги $l_{0р}$ , мм	Напряжение холостого хода $U_x$ , В

Функция источника	Сварочное свойство	Непосредственный критерий	Косвенный критерий
	Устойчивость при частых коротких замыканиях	Частота $f_{кк}$ и длительность $t_{кк}$ коротких замыканий каплей; скорость нарастания тока короткого замыкания каплей $di_{к}/dt$ , кА/с	Напряжение холостого хода $U_x$ , В; индуктивность дросселя $L$ , мГн
	Устойчивость при переменном токе	Время повторного зажигания $t_3$ , мс; скорость восстановления проводимости межэлектродного промежутка $V_3$ , См/с	Скорость нарастания тока короткого замыкания трансформатора $di_{к}/dt$ , кА/с; напряжение импульсного стабилизатора горения дуги $U_{ис}$ , В; индуктивность дросселя $L$ , мГн
	Стабильность параметров режима	Относительные отклонения тока и напряжения, %; коэффициенты вариации тока $k_{vI}$ , % и напряжения $k_{vU}$ , %	Наклон внешней характеристики источника $\rho_{и}$ , В/А; коэффициент пульсации выпрямленного тока $\beta_I$ и напряжения $\beta_U$
Регулирование режима	Эффективность регулирования тока и напряжения	Диапазон настройки тока $I_{д\min}-I_{д\max}$ и напряжения $U_{д\min}-U_{д\max}$ ; кратность регулирования тока $k_I$ и напряжения $k_U$	Количество ступеней; интервал изменения напряжения холостого хода $U_x$ , В и сопротивления источника $Z_{и}$ , Ом
Воздействии на перенос	Характер переноса электродного металла	Коэффициент потерь на разбрызгивание $k_p$ , %; скорость нарастания тока короткого замыкания каплей $di_{к}/dt$ , кА/с	Индуктивность дросселя $L$ , мГн; частота $f_{и}$ , Гц и амплитуда $I_{и}$ , А пиковых импульсов тока
Воздействии на шов	Качество формирования шва	Глубина проплавления, ширина шва и высота усиления, мм	Ток $I_{и}$ , $I_{п}$ , А и длительность $t_{и}$ , $t_{п}$ , с импульсов и пауз

Оценка сварочных свойств осуществляется в соответствии с ГОСТ 26616-83 «ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ. Методы испытания сварочных свойств»

<http://docs.cntd.ru/document/gost-25616-83>

При испытании источников для ручной дуговой сварки принята методика субъективной оценки по непосредственным критериям. В этом случае сварщик на нескольких режимах выполняет наплавку валика в нижнем или вертикальном положении на пластину из низкоуглеродистой стали электродами с основным или рутиловым покрытием. В процессе наплавки или по ее результатам сварщик с помощью таблицы выставляет оценку в баллах по каждому из пяти свойств: надежность зажигания, стабильность (и устойчивость) процесса, эластичность дуги (устойчивость при значительном удлинении), разбрызгивание металла (характер переноса электродного металла) и качество формирования шва.

ГОСТ предусматривает, что комплексную оценку источника проводят суммированием баллов.

Максимальное количество баллов – 25.

Но: в конкретных условиях сварки наиважнейшими становятся разные свойства источников.

Например: при монтаже металлоконструкций – надежное зажигание и эластичность дуги. Разбрызгивание – неважно.

А при сварке высокопрочных сталей наибольшие требования – к качеству и форме шва.

Поэтому правильней оценивать источники по обобщенному показателю  $\gamma_{ип}$ , вычисляемому как произведение взвешенных отношений  $\beta_n$  численных характеристик сварочных свойств с учетом значимости  $\varepsilon_n$  каждого из  $n$  свойств:

$$\gamma_{ип} = \prod_{n=1}^N \beta_n^{\varepsilon_n}.$$

Отношение  $\beta_n$  получается делением численного значения показателя данного свойства на его максимальное (идеальное) значение.

Оценка сварочных свойств источников для ручной сварки

Сварочное свойство	Критерий оценки	Балл	Оценка свойства	Качественная и количественная характеристики свойства
Надежность зажигания	Количество попыток до первой успешной	1	Плохая	Редкое зажигание или отсутствие зажигания
		2	Низкая	Зажигание после многократных соприкосновений электрода с изделием и привариваний электрода
		3	Удовлетворительная	Зажигание после 3–4 соприкосновений
		4	Хорошая	Зажигание после легкого движения по металлу
		5	Высокая	Зажигание сразу после прикосновения электрода к изделию
Устойчивость и стабильность процесса сварки	Частота обрывов, вибрация дуги, звуковой эффект	1	Плохая	Неустойчивое горение дуги с частыми обрывами
		2	Низкая	Неравномерно горящая, вибрирующая дуга с редкими обрывами
		3	Удовлетворительная	Неравномерно горящая, вибрирующая дуга без обрывов
		4	Хорошая	Равномерно горящая дуга с незначительной вибрацией и хрустящим шумом (треск)
		5	Высокая	Спокойно, равномерно горящая дуга без вибраций (мягкое шипение)
Устойчивость при значительном удлинении дуги	Разрывная длина дуги, реакция на растяжение дуги	1	Плохая	При попытке удлинения дуга сразу обрывается
		2	Низкая	Приходится постоянно поддерживать короткую дугу, при незначительном удлинении дуга обрывается
		3	Удовлетворительная	Дуга удлиняется до двойного диаметра стержня электрода при заметном изменении интенсивности расплавления электрода
		4	Хорошая	Дуга удлиняется до тройного диаметра стержня при небольшом изменении интенсивности расплавления электрода

Сварочное свойство	Критерий оценки	Балл	Оценка свойства	Качественная и количественная характеристика свойства
		5	Высокая	Дуга удлиняется до тройного (или более) диаметра стержня электрода при практически неизменной интенсивности расплавления электрода
Характер переноса электрода и тростного металла	Разбрызгивание металла, размер и количество капель	1	Плохая	Очень много крупных, трудноудаляемых брызг вблизи шва
		2	Низкая	Много крупных, трудноудаляемых брызг вблизи шва
		3	Удовлетворительная	Умеренное количество крупных и мелких, легко удаляемых брызг вблизи шва
		4	Хорошая	Мелкие брызги, равномерно распределенные вблизи шва
		5	Высокая	Мало мелких брызг на поверхности образца
Качество формирования шва	Равномерность валика по ширине и высоте, чешуйчатость, наличие шлаковых включений и пор	1	Плохая	Валик неравномерный по ширине и высоте, крупночешуйчатый, с видимыми шлаковыми включениями и порами
		2	Низкая	Валик неравномерный по ширине и высоте, крупночешуйчатый
		3	Удовлетворительная	Валик крупночешуйчатый с отдельными неровностями по высоте и превышениями по кромке шва
		4	Хорошая	Валик мелкочешуйчатый с редкими небольшими неровностями по высоте и небольшими превышениями по кромкам
		5	Высокая	Валик равномерный, гладкий или мелкочешуйчатый, с плавным переходом к основному металлу

**Оценка сварочных свойств источников для механизированной сварки  
в углекислом газе**

Сварочное свойство	Критерий оценки	Балл	Оценка свойства	Качественная и количественная характеристики свойства
Надежность зажигания (надежность установления процесса)	Число коротких замыканий до установления стабильного процесса	2	Неудовлетворительная	Число коротких замыканий более 3
		3	Удовлетворительная	Число коротких замыканий меньше или равно 3
Характер переноса электродного металла (потери металла)	Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание $k = \frac{M_p - M_n}{M_p} \cdot 100\%$ где $M_p$ и $M_n$ — масса расплавленного и наплавленного электродного металла	2	Неудовлетворительная	Коэффициент потерь для конкретного режима превышает 5–12%
		3	Удовлетворительная	Коэффициент потерь для конкретного режима не превышает 5–12%
Качество формирования шва	Отношение высоты валика к его ширине, чешуйчатость, наличие пор, подрезов и прожогов	2	Неудовлетворительная	Отношение более 0,6. Поверхность валика неровная, крупночешуйчатая с подрезами и прожогами
		3	Удовлетворительная	Отношение 0,3–0,6. Отдельные подрезы (до 3 штук на 250 мм валика) длиной до 1 мм
		4	Хорошая	Отношение менее 0,3. Валик гладкий или мелкочешуйчатый, без пор, подрезов и прожогов



# НАЧАЛЬНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ДУГИ

Это - процесс возбуждения дуги в начале сварки.

(От него нужно отличать повторное зажигание после случайных обрывов дуги, которое выполняется теми же способами, что и начальное, но происходит в более благоприятных условиях при уже разогретых электродах).

Непосредственным критерием при оценке надежности начального зажигания принято считать *процент успешных попыток или количество попыток до первой успешной.*

Практическое применение при дуговой сварке нашли два способа начального зажигания:

- высоковольтным искровым разрядом,
- разрывом цепи короткого замыкания электрода на изделие.

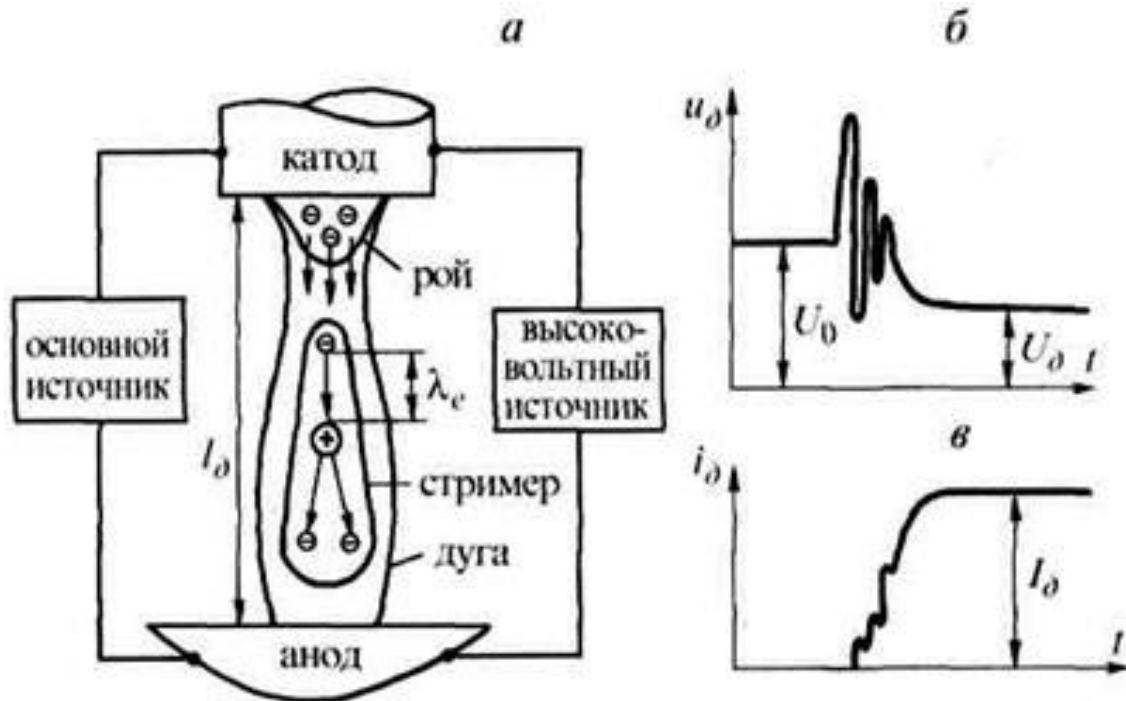
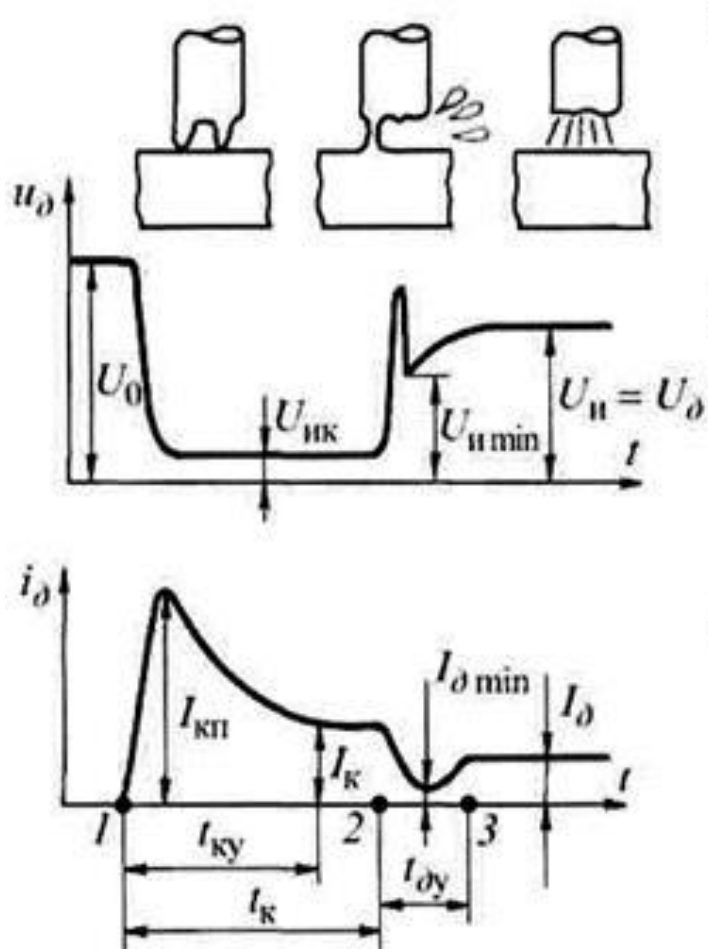


Схема процесса (а) и осциллограммы напряжения (б) и тока (в) при зажигании дуги высоковольтным разрядом

Вспомогательный высоковольтный источник малой мощности по соображениям безопасности выполняется импульсным или высокочастотным (частота  $f > 100$  кГц). Назначение высоковольтного источника — пробить искрой, т.е. ионизировать межэлектродный промежуток, по которому затем пойдет ток от основного источника.

# Зажигание дуги разрывом цепи короткого замыкания



Стадии процесса (а) и осциллограммы напряжения (б) и тока (в) при зажигании дуги разрывом цепи короткого замыкания

- а При замыкании электрода на изделие сопротивление нагрузки составляет всего 0,01-0,2 Ом, поэтому ток короткого замыкания достигает сотен ампер.
- б С начала короткого замыкания (точка 1) напряжение источника резко снижается до сравнительно низкой величины  $U_{ик} = 2-5$  В. Ток короткого замыкания быстро возрастает до пикового значения  $I_{кп}$ , а затем несколько снижается до установившегося значения  $I_{к}$ .
- в Разрыв цепи короткого замыкания (точка 2) происходит через  $t_{к} = 0,01-1$  с после начала процесса в результате отдергивания электрода или разрушения перемычек между электродом и изделием. *Площадь таких перемычек сравнительно мала, поэтому плотность тока в них настолько велика, что наблюдается их мгновенное расплавление и даже испарение.*

После разрыва цепи короткого замыкания с момента 2 наступает стадия развития дугового разряда. Напряжение источника быстро увеличивается до значения  $U_{и\ min}$ , а затем сравнительно плавно восстанавливается до установившегося значения  $U_{и}$ , равного напряжению дуги (**точка 3**). Начальный пик ЭДС самоиндукции источника в момент 2 имеет малую продолжительность и *практически не влияет на надежность зажигания.*

Оценим условия **надежного зажигания.**

На первой стадии необходимо обеспечить энергичный разрыв цепи короткого замыкания. При недостаточной плотности тока в электроде (менее 20 А/мм) жидкие перемычки между электродом и изделием не взрываются, а, наоборот, застывают. «Примерзание» электрода можно предотвратить его резким отдергиванием или увеличением тока. Естественное превышение тока короткого замыкания  $I_{к}$  над сварочным в 1,2-5 раз, наблюдающееся у большинства источников, благоприятствует надежному зажиганию.

На второй стадии важно, чтобы напряжение источника было достаточным для питания дуги ( $U_{\text{и}} \geq U_{\text{д}}$ ). У малоинерционных источников, таких, как диодные выпрямители, восстановление  $U_{\text{и}}$  происходит практически мгновенно.

Проблема осложняется для источников с большой электромагнитной инерцией — тиристорных и дроссельных выпрямителей с обратными связями, и особенно генераторов. У коллекторного генератора в течение времени установления тока короткого замыкания  $t_{\text{кз}}$ , составляющего от 0,1 до 1 с, ЭДС непрерывно снижается и становится в 2-4 раза ниже, чем напряжение при холостом ходе  $U_{\text{хх}}$ .

Восстановление ЭДС при переходе к режиму нагрузки идет сравнительно медленно, поэтому в момент 2 близкое к ЭДС значение минимального напряжения генератора  $U_{\text{и min}}$  может оказаться недостаточным для питания дуги.

Из перечисленных характеристик переходного процесса в качестве косвенного критерия для оценки *надежности зажигания* выбрано  $U_{и\ min}$ . Генераторы в соответствии с требованиями стандарта должны иметь  $U_{и\ min} > 24-37$  В. Это напряжение зависит в основном *от напряжения холостого хода* генератора  $U_{хх}$ .

Очевидно также, что *надежность* зажигания повысится при *кратковременном соприкосновении* электрода с изделием, поскольку тогда ЭДС генератора еще не успеет заметно упасть.

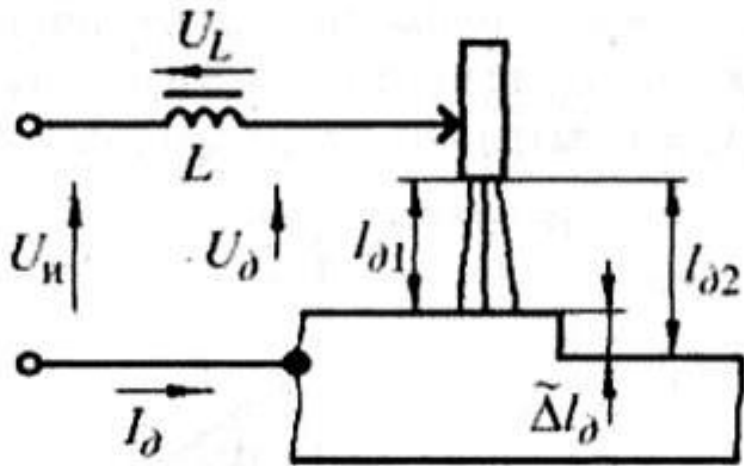
Кроме того, полезно в цепь источника вводить индуктивность. Запасенная в ней на стадии короткого замыкания энергия отдается затем дуге, стремясь поддержать ток на высоком уровне без провала.

# Принципиальная устойчивость системы «источник—дуга»

Дуговой разряд называется устойчивым, если он существует непрерывно в течение длительного времени без обрывов и коротких замыканий.

Поэтому в качестве непосредственного критерия для оценки устойчивости можно принять *частоту обрывов дуги* или *количество обрывов при полном расплавлении одного электрода*.

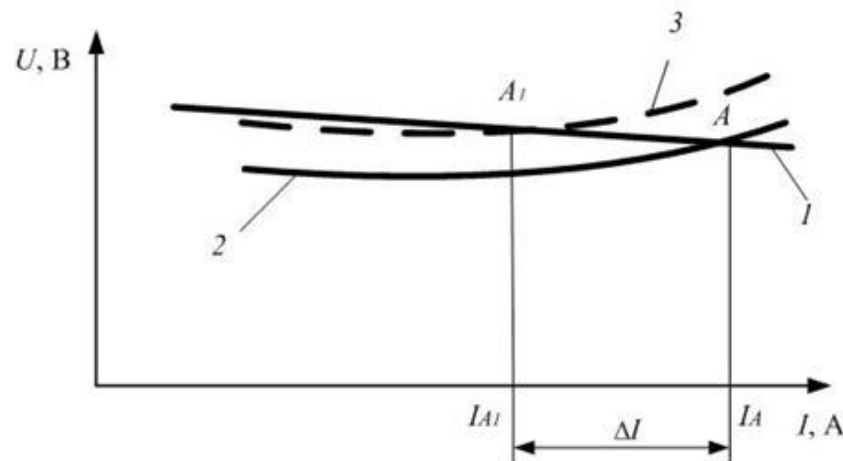
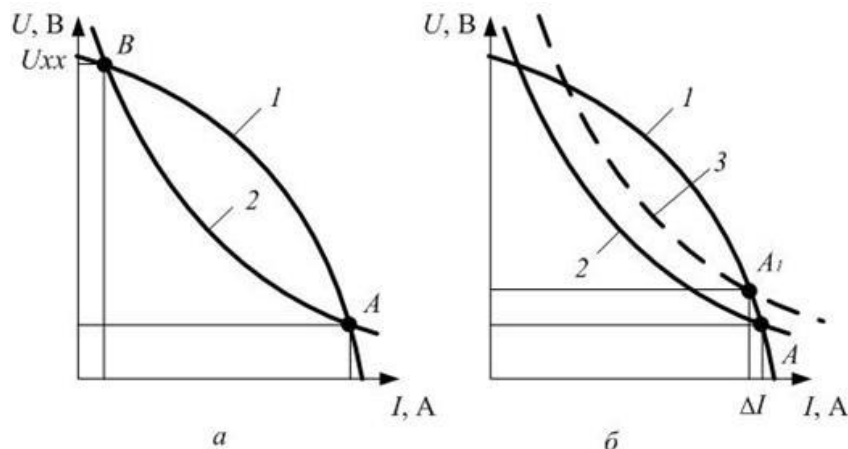
Устойчивость зависит как от технологических, так и электрических характеристик процесса.



Система «источник—дуга» при малом возмущении по длине дуги  $\Delta l_d$

Равенство токов и напряжений дуги и источника имеет место в двух точках А и В.

Установившийся режим работы системы "сварочная дуга — источник питания" определяется прежде всего точкой пересечения внешней характеристики источника и вольт-амперной характеристики дуги.



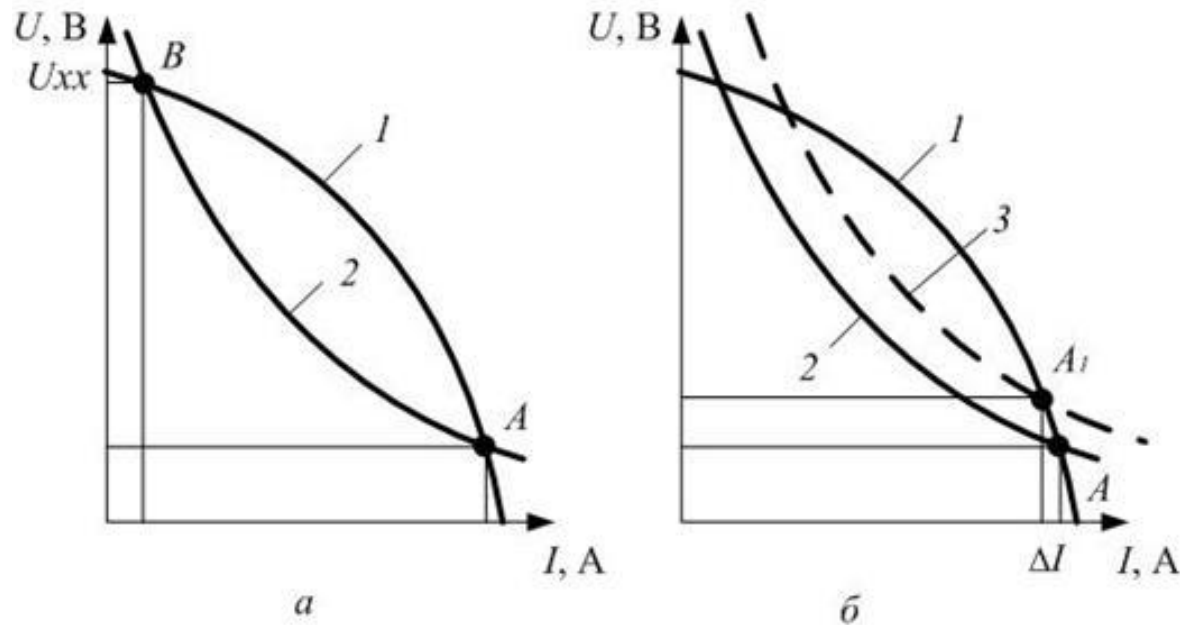
Внешние характеристики источника питания и статические вольт-амперные характеристики дуги  
 а, б — ручная сварка; в — механизированная плавящимся электродом;  
 1 — характеристики источника питания; 2 — характеристики дуги;  
 3 — характеристики удлиненной дуги



Однако только точка А соответствует устойчивому горению дуги; в точке В дуга гореть устойчиво не будет. Потому что: если при горении дуги в точке А по какой-либо причине сварочный ток при заданной длине дуги уменьшается, то установившееся напряжение источника оказывается *больше напряжения дуги*, и это *избыточное напряжение приводит к увеличению силы тока, т.е. к возвращению в точку А*.

Если же ток увеличивается, то *напряжение источника становится меньше напряжения дуги*, что приводит к *уменьшению тока* и соответственно также к возвращению в точку А. **Режим горения дуги восстанавливается.** При горении дуги в точке В всякое случайное изменение тока получает свое дальнейшее самопроизвольное развитие: *увеличение тока вызывает его последующий рост, и наоборот, уменьшение тока приводит к его последующему снижению*. Эти процессы идут до тех пор, пока не произойдет *или обрыв дуги, или пока ток не достигнет значения, соответствующего точке устойчивого горения дуги (точка А)*.

В реальных условиях ручного процесса сварки возможны резкие изменения длины дуги, поэтому *дуга должна обладать достаточным запасом устойчивости*. При этом важно, чтобы при изменении длины дуги в определенных пределах *отклонение сварочного тока от заданного значения было минимальным*, т.е. чтобы режим сварки сохранялся практически постоянно. Именно такому условию удовлетворяют *источники питания с крутопадающей внешней характеристикой, особенно с большой крутизной падения*. В этом случае даже при существенном удлинении длины дуги и переходе режима устойчивого горения дуги в точку А у величина сварочного тока изменяется весьма незначительно —  $\Delta I = I_A - I_{A1}$ . (рис. б)

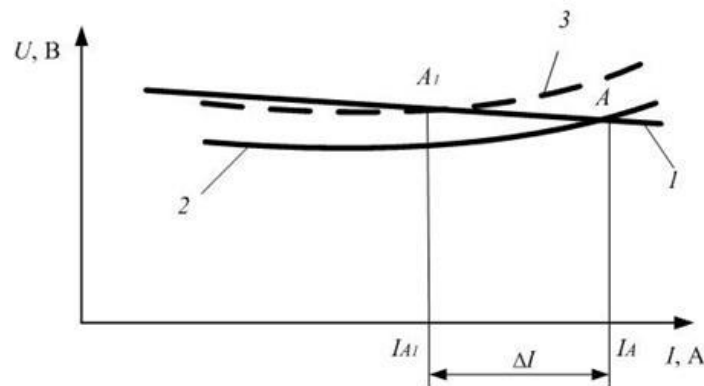


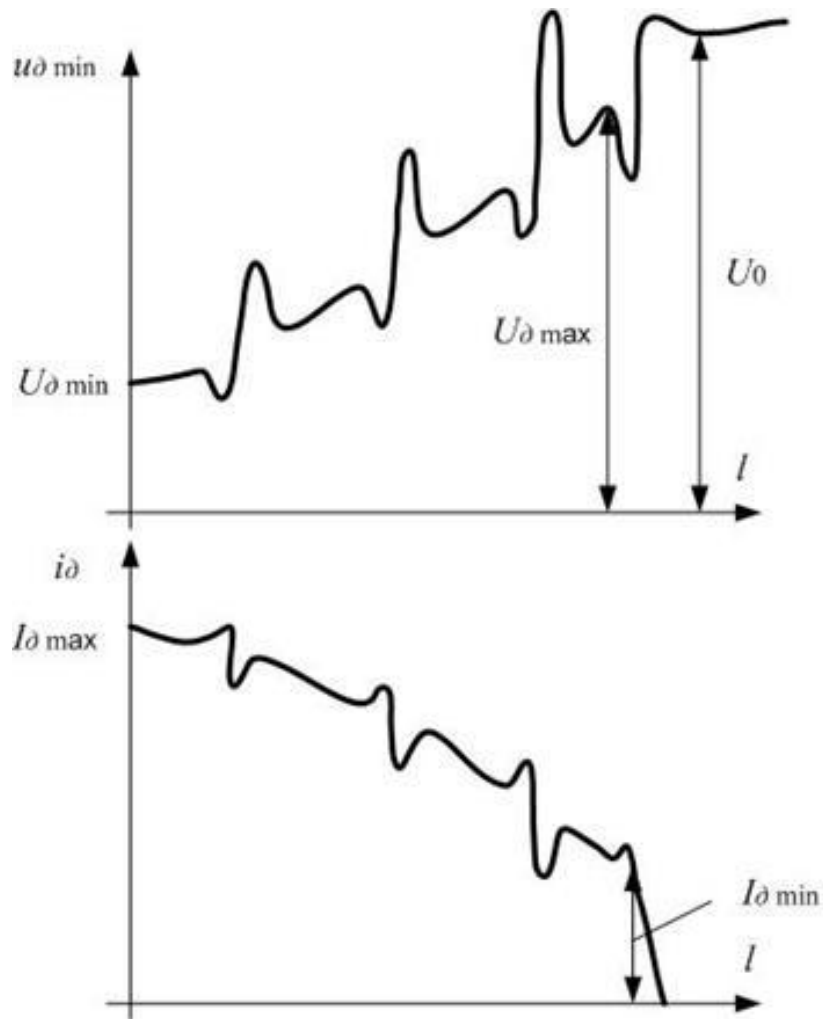
Таким образом, источники питания с крутопадающей характеристикой обеспечивают процессу РДС следующие технологические свойства: *устойчивое горение дуги, надежное первоначальное и повторное ее возбуждение (благодаря повышенному напряжению холостого хода источника), ограниченную силу тока короткого замыкания, возможность изменения длины дуги в разумных пределах, не опасаясь ее обрыва или чрезмерного увеличения тока.*

При механизированной сварке плавящимся электродом используют в зависимости от способа и режимов сварки источники питания с пологопадающей, жесткой и возрастающей внешними характеристиками.

Применение таких источников обеспечивает действие эффекта *саморегулирования дуги.*

Явление саморегулирования дуги заключается в том, что в дуге при сварке плавящимся электродом самопроизвольно устанавливается и поддерживается такой ток, при котором скорость плавления проволоки равна скорости ее подачи в зону сварки (точка А).





**Переходный процесс при значительном удлинении дуги**

Осциллограммы тока и напряжения, полученные в эксперименте по оценке эластичности дуги с плавящимся электродом показывают, что на монотонные кривые снижения тока и возрастания напряжения накладываются всплески, вызванные переносом каплей электродного металла. *Действительно, после отрыва капли от электрода длина дуги скачком увеличивается, что приводит к резкому увеличению напряжения и снижению тока.*

Капельный перенос снижает эластичность дуги.

*Увеличение индуктивности  $L$  в цепи источника повышает устойчивость системы при резком возмущении по длине дуги.*

Колебания напряжения сети являются другим возмущающим воздействием, оказывающим влияние на устойчивость.

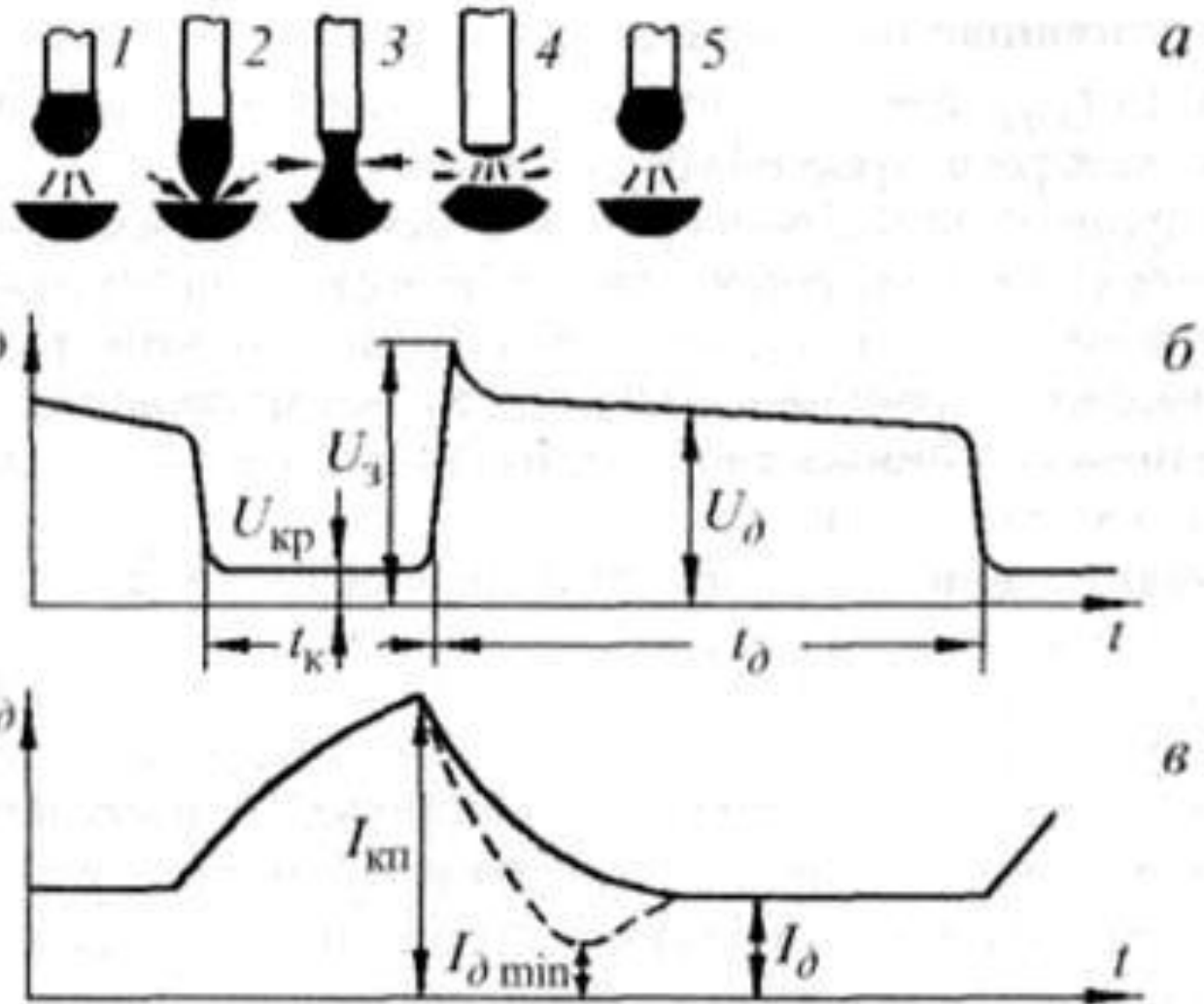
У некоторых источников (трансформаторов и выпрямителей) напряжение холостого хода пропорционально напряжению сети.

При падении напряжения сети снижается и напряжение холостого хода источника  $U_0$ , *а следовательно, уменьшается разрывная длина дуги  $l_{др}$ .*

Поэтому эффективной мерой повышения устойчивости системы является стабилизация напряжения холостого хода.

Для механизированной сварки в углекислом газе от источника с низким напряжением характерны естественные технологические короткие замыкания.

Такой процесс, несмотря на резкие изменения параметров, обеспечивает практически равномерное плавление электродного и основного металла и образование сплошного ровного шва, что позволяет говорить о технологической устойчивости процесса.



**Процесс переноса капли с коротким замыканием (а) и осциллограммы напряжения и тока дуги при естественном (б, в) и управляемом (г) переносе**

На стадии дугового разряда (1) происходит плавление электрода и образование капли. По мере роста капли при непрерывной подаче электрода длина дуги сокращается, а напряжение падает. Стадия дугового разряда продолжается в течение времени  $t_d = 0,005 — 0.1$  с.

Затем капля касается ванны расплавленного металла, при этом дуга гаснет, напряжение резко снижается, а ток возрастает — наступает стадия короткого замыкания. Ее длительность  $t_k = 0,001—0,01$  с.

В начале стадии короткого замыкания (2) капля касается ванны на очень небольшой площади.

При благоприятном ходе процесса переноса капля сливается с ванной и перетекает в нее (3). Это приводит к образованию тонкой перемычки уже между каплей и электродом.

Окончательное разрушение перемычки происходит под действием сжимающих электродинамических сил, а также благодаря перегреву и взрывному испарению металла перемычки при возрастании плотности тока в ней (4). После разрыва цепи короткого замыкания дуга повторно зажигается (5), при этом напряжение источника быстро восстанавливается до значения  $U_d$ , а ток снижается до  $I_{d \min}$  с последующим плавным нарастанием до  $I_d$ . Описанные явления регулярно повторяются.

Условием технологической устойчивости процесса с естественными короткими замыканиями следует считать *регулярную смену стадий дугового разряда и короткого замыкания.*

Поэтому в качестве непосредственного критерия оценки устойчивости можно принять *частоту циклических изменений тока и напряжения.*

При механизированной сварке в углекислом газе процесс устойчив при частоте  $f_{\text{ц}}=10—150$  Гц.

Длительность коротких замыканий  $t_{\text{к}}$  не должна превышать 0,01 с. Нежелательна и затяжка стадии дугового разряда  $t_{\text{д}}$  более 0,1 с. *Абсолютно недопустимы длительные обрывы дуги, т.е. переход к стадии холостого хода источника.*



Для увеличения пикового значения тока короткого замыкания следует увеличивать напряжение холостого хода  $U_0$  источника и снижать его внутреннее сопротивление  $R_H$ .

Для увеличения скорости нарастания тока короткого замыкания необходимо, кроме того, *снижать индуктивность  $L$ .*

Перечисленные приемы, решая проблему надежного разрыва цепи короткого замыкания, обеспечивают выполнение *главного условия технологической устойчивости.*

Но эти же приемы затрудняют слияние капли с ванной, играющее хоть и второстепенную, но заметную роль в обеспечении устойчивого процесса.

**Увеличение индуктивности  $L$  способствует:**

- снижению разбрызгивания,
- надежному повторному зажиганию дуги,
- слиянию капли с ванной,

но *препятствует* надежному разрыву цепи короткого замыкания.

Поэтому в простейших конструкциях источников их электрические параметры назначаются на основе компромисса между отдельными требованиями.

В современных же конструкциях с обратными связями и программным управлением возможно полное удовлетворение всех требований на основе управляемого переноса металла.



КОРПУС С ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

[www.sam-avtomaster.com](http://www.sam-avtomaster.com)

БЛОК УПРАВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫМ ТОКОМ  
И СКОРОСТЬЮ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ

РУКАВ-КАНАЛ

ГОРЕЛКА С  
РУКОЯТКОЙ

БОБИНА СО СВАРОЧНОЙ  
ПРОВОЛОКОЙ

ЗАЖИМ МАССЫ



SPR.BY  
Строительный Портал Республики Беларусь

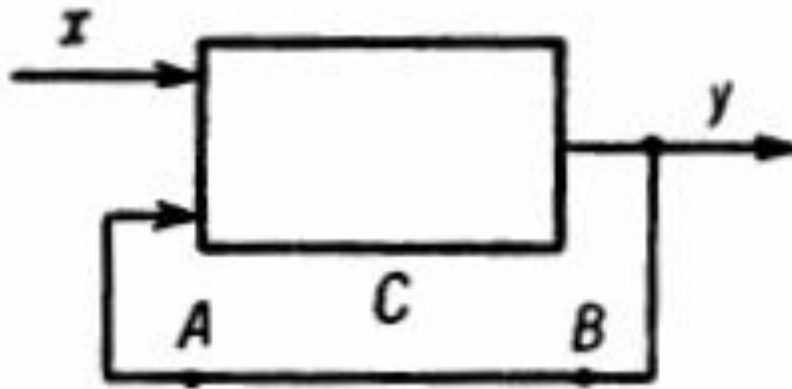


**Принцип обратной связи.** Суть этого принципа заключается в том, что на любом этапе деятельности полученный результат сравнивается с планируемым (ожидаемым). По результатам сравнения вводится коррекция цели, планов или технологии.

**Обратная связь в технике** — это процесс, приводящий к тому, что результат функционирования какой-либо системы влияет на параметры, от которых зависит функционирование этой системы. На вход системы подаётся сигнал, пропорциональный выходному сигналу. (то есть вход – функция от выходного сигнала). Это делает систему более устойчивой к случайному изменению параметров.

Обратная связь = «фидбэк»

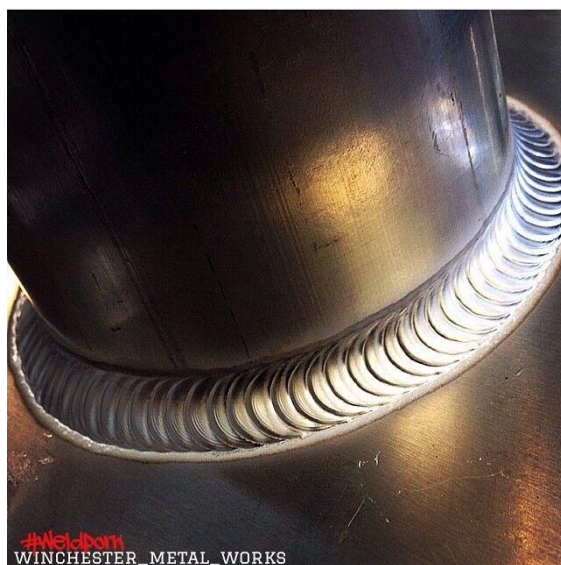
**Обратная связь в системах автоматического регулирования и управления,** связь в направлении от выхода к входу рассматриваемого участка основной цепи воздействий (передачи информации). Этим участком может быть как управляемый объект, так и любое звено автоматической системы (либо совокупность звеньев).



Цепь АВ, по которой передается обратная связь, называется цепью, линией или каналом обратной связи.

В сложных системах может существовать множество различных цепей обратных связей. В многоэлементной системе выход каждого элемента может, вообще говоря, воздействовать на входы всех остальных элементов, включая свой собственный вход.

# Конец 1-й части





## 2-я часть лекции



# Сварочные трансформаторы

Трансформатор - статический электромагнитный преобразователь переменного тока одного напряжения в другое без изменения частоты. Работа его основана на электромагнитном взаимодействии двух или нескольких не связанных между собой электрических контуров (обмоток, см. рис.).

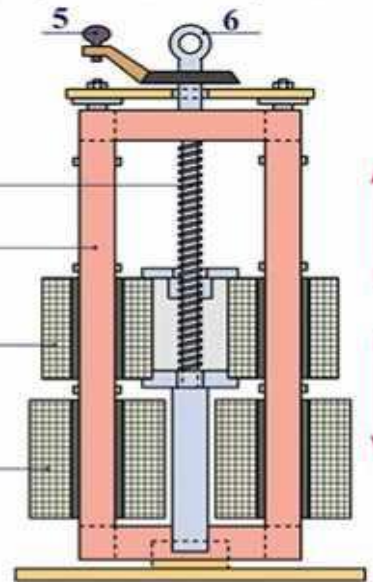
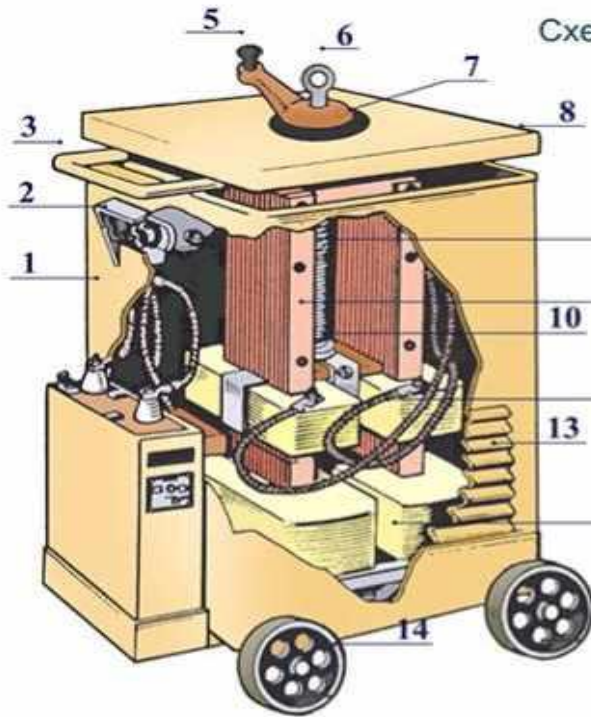
## Устройство трансформатора





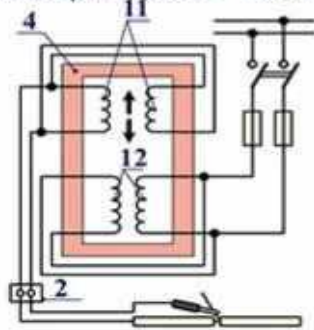
# Типовой сварочный трансформатор

Схема регулирования сварочного тока

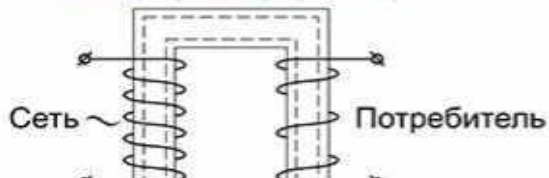


Регулирование силы сварочного тока осуществляется с помощью подвижной обмотки.

Электрическая схема



Простейшая электрическая схема трансформатора



- 1 - корпус;
- 2 - клеммы;
- 3 - ручка;
- 4 - замкнутый магнитопровод;
- 5 - рукоятка;
- 6 - рым-болт;
- 7 - шкала;
- 8 - крышка корпуса;
- 9 - винт с ленточной резьбой;
- 10 - ходовая гайка;
- 11 - вторичная обмотка;
- 12 - первичная обмотка;
- 13 - жалюзи;
- 14 - колеса



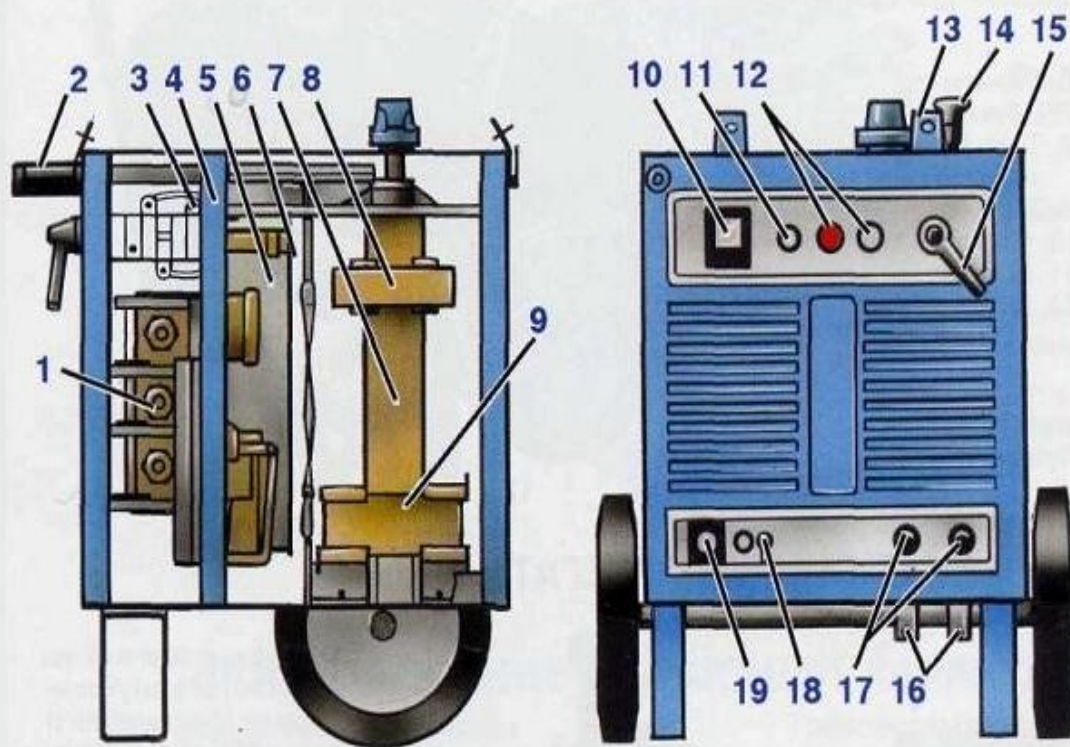
# Сварочный выпрямитель

Сварка на постоянном токе имеет целый ряд преимуществ по сравнению с аналогичным процессом на переменном токе:

- стабильно горит сварочная дуга; на улучшение этого показателя влияет отсутствие нулевых мгновенных значений сварочного тока;
- увеличена глубина проплавления свариваемых металлов;
- значительно меньше разбрызгивается металл, и сокращаются потери;
- прочность сварочного шва значительно выше;
- снижается количество дефектов шва.

Для преобразования тока из переменного в постоянный используют аппараты, которые называются *сварочные выпрямители*. Они состоят из трансформатора и блока вентиляй.

Вентиль (полупроводниковый диод) – это устройство, выполненное из полупроводниковых материалов, обладающее высокой проводимостью в одном направлении, и нулевой – в обратном.



**Сварочный выпрямитель:**

- 1 — выпрямительный блок;
- 2 — выдвижные ручки;
- 3 — предохранители;
- 4 — блок аппаратуры;
- 5 — вентилятор;
- 6 — ветровое реле;
- 7 — силовой трансформатор;
- 8 — вторичная обмотка;
- 9 — первичная обмотка;
- 10 — амперметр;
- 11 — лампа;
- 12 — кнопки выключателя;
- 13 — скобы;
- 14 — рукоятка регулирования тока;

15 — переключатель диапазонов тока; 16 — шины заземления обратного провода; 17 — токовые разъемы;  
 18 — болт заземления; 19 — штепсельный разъем для подключения к сети



**ЭНЕРГИЯ**  
СВАРКА





# Сварочные генераторы



Термин «сварочный генератор» применяют к устройству особого типа, успешно сочетающему в своей конструкции *генератор со сварочным аппаратом*. Основное функциональное назначение этого агрегата заключается в выполнении сварочных работ в местах, не обеспеченных электрической энергией.

Сварочные генераторы выполняют по различным электрическим схемам. Они могут быть с падающей внешней характеристикой (генераторы ГСО в преобразователях ПСО-300, ПСО-500 и др.), с жесткой или пологопадающей характеристикой (типа ГСГ в преобразователях ПСГ-500) и универсальные (преобразователи ПСУ-300 и ПСУ-500).

Наибольшее распространение получили сварочные генераторы с падающими внешними характеристиками, работающие по двум схемам: с независимым возбуждением и с самовозбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой.

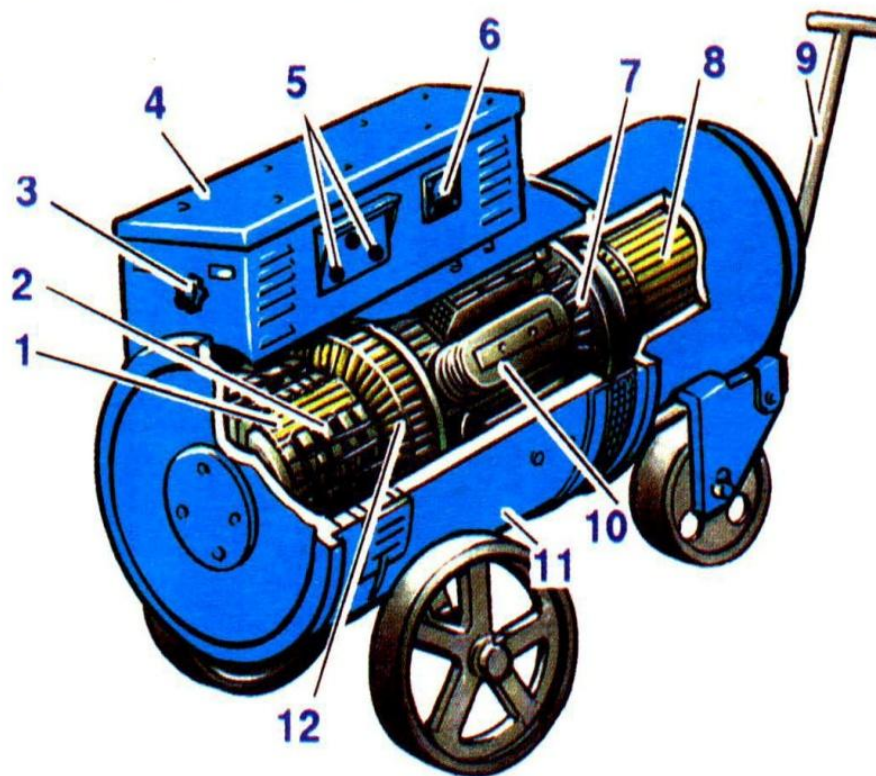


# Сварочные преобразователи

Преобразует механическую энергию электродвигателя в электрическую напряжением и диапазоном токов, необходимыми для сварки

- |                                 |                                    |
|---------------------------------|------------------------------------|
| 1. Медные пластинки коллектора  | . Вольтметр                        |
| 2. Щетки генератора             | . Вентилятор                       |
| 3. Регулировочный реостат       | . Трехфазный асинхронный двигатель |
| 4. Распределительное устройство | . Тяга                             |
| 5. Зажимы                       | . Магнитные полюсы                 |
|                                 | . Корпус                           |
|                                 | . Якорь                            |

Конструктивно состоит из трехфазного электродвигателя и сварочного генератора с независимым возбуждением

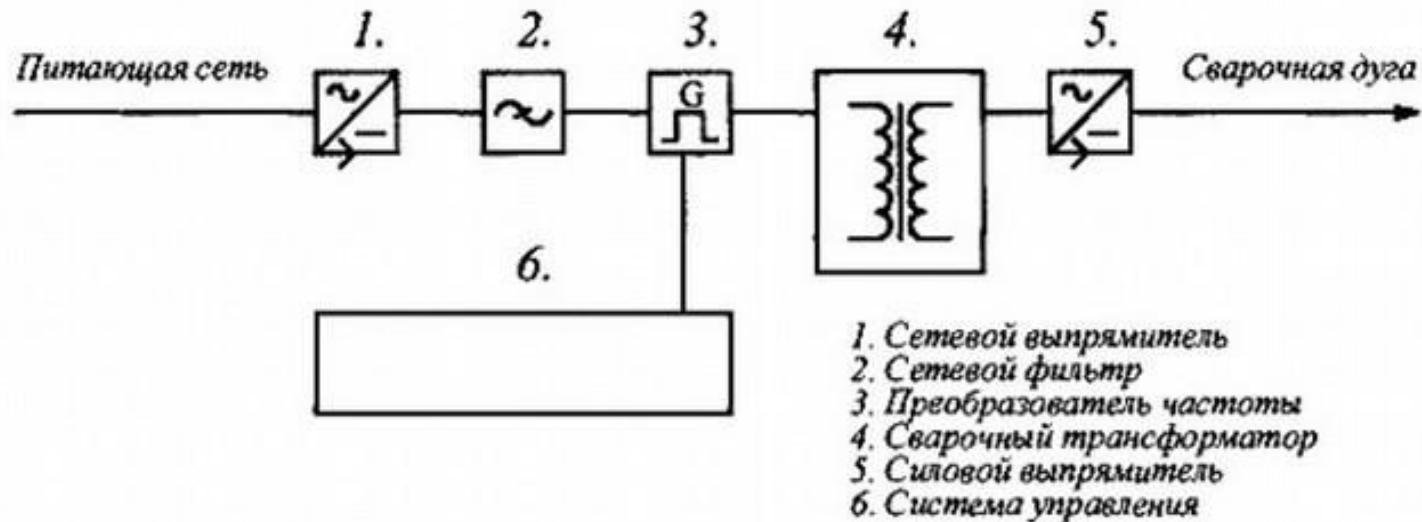




# ИНВЕРТОРЫ

**Сварочный инвертор** - это последнее слово техники в сварочном производстве. Инвертор имеет габариты в 10 раз меньше габаритов выпрямителей и трансформаторов с теми же характеристиками, а главное – инверторный аппарат имеет КПД около 90%.

Принцип работы инвертора и этапы его работы проиллюстрирован рисунком. Основным принципом работы сварочного инвертора является многократное поэтапное преобразование электрической энергии.



### ***Преимущества:***

1. Небольшие габариты и масса делают аппарат очень удобным для применения в домашних условиях. Но оборудование обладает и другими достоинствами, отличающими его от техники старого образца.
2. Электроды для инверторной сварки могут быть как для постоянного, так и для переменного тока. Это существенное преимущество, особенно когда необходимо выполнить соединение чугунных конструкций или деталей из цветных металлов и сплавов.
3. Инверторная сварка своими руками – процесс менее трудоемкий и сложный, чем сварка аппаратами старого типа, благодаря схеме управления, позволяющей выполнять большое количество функций, направленных на облегчение сварки. Например: облегченный розжиг сварочной дуги, предотвращение залипания электрода при смене режима работы и другие.

### ***Недостатки инверторов:***

1. Аппарат обладает повышенной чувствительностью к пыли, как и все прочие электронные устройства на основе полупроводниковых элементов. Эксплуатация оборудования невозможна без периодической чистки, которую в сезон необходимо производить до 4 раз.
2. Некоторые модели устройств нельзя использовать для сварки в условиях отрицательных температур из-за повышенной чувствительности к холоду.
3. Сварка инвертором для начинающих может показаться неудобной из-за короткого сварочного кабеля, длина которого по установленным нормам не должна превышать 2,5 метра.

Создание инверторов стало возможным благодаря созданию ТРАНЗИСТОРОВ.

(Выпрямители работают на диодах и тиристорах,  
инверторы – на транзисторах)

Инверторная технология позволила создавать программируемые полуавтоматы и автоматы синергетического принципа действия, например, Fronius Synergy и другие, позволяющие реализовать в одном аппарате самые различные технологии сварки (от сварки на переменном токе до лазерной).



День завтрашний – за гибридной сваркой!

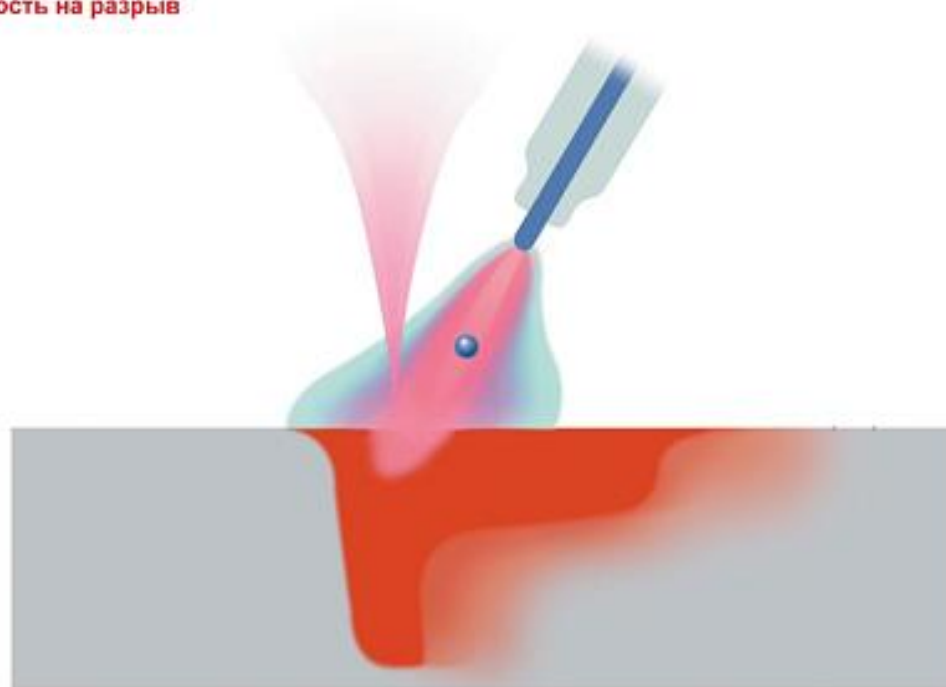


## ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

Большая глубина проплавления  
Высокая скорость сварки  
Малое тепловложение  
Высокая прочность на разрыв

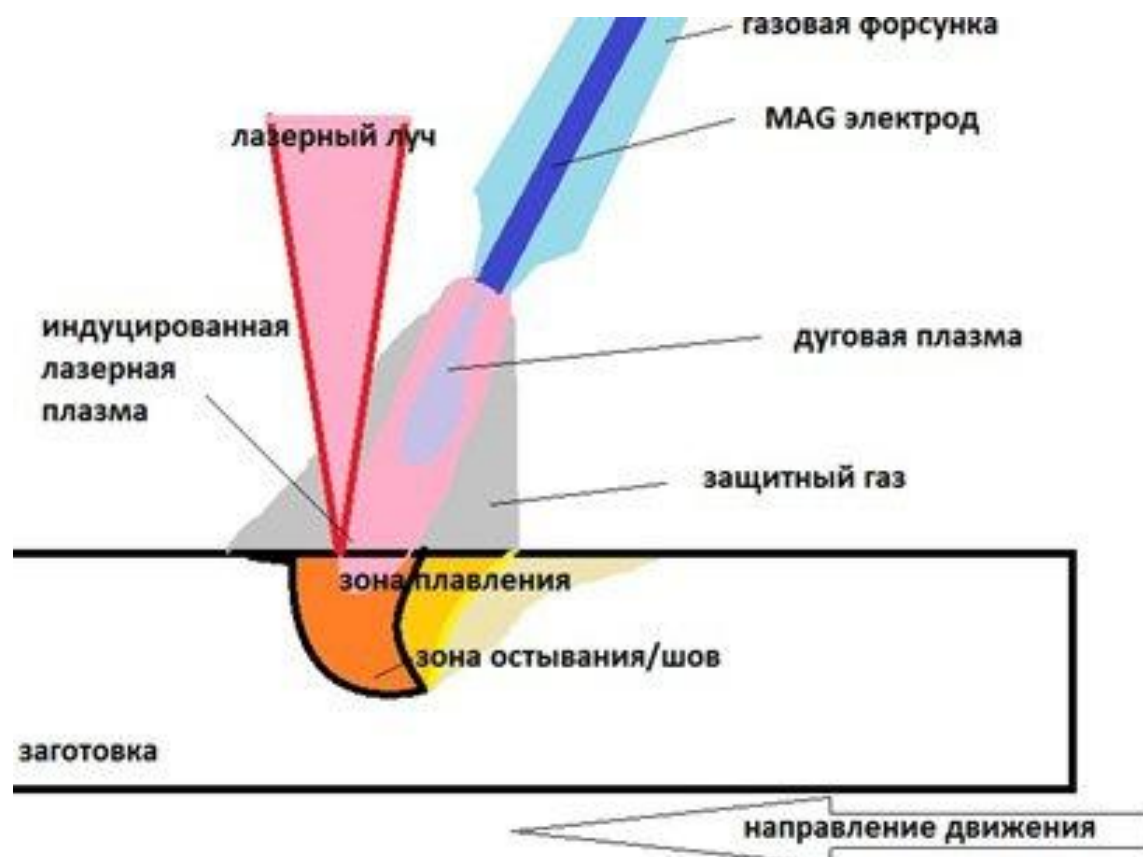
## ДУГОВАЯ СВАРКА

Недорогой источник энергии  
Способность по перекрытию зазора  
Возможность влияния на микроструктуру



## ГИБРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Улучшенные физико-химические свойства  
Повышенная скорость сварки, большая толщина шва  
Экономия затратной энергии лазерного излучения  
Малая деформация, повышенная способность по  
перекрытию зазора



Принцип действия лазерной гибридной сварки

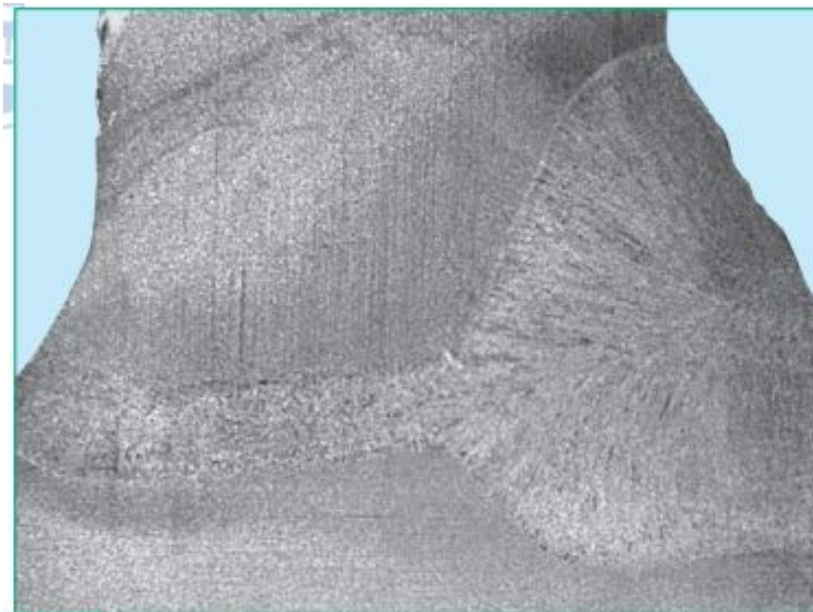


## ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

**Гибридная лазерная сварка** объединяет в одном процессе лазер и дугу. Одновременное использование двух этих методов позволяет объединить их достоинства и устранить недостатки.

**Дуга** действует на поверхности и создает широкий шов, который в свою очередь заполняет зазоры. Она также переносит в расплавленный металл дополнительный материал. Эти характеристики позволяют сварщику непосредственно влиять на металлургические свойства и на адгезию сварочного шва к поверхностям заготовок.

**Лазерная сварка** обеспечивает большую глубину проплава и высокую скорость, снижая при этом подводимую энергию. Она также снижает термические деформации до уровня, который недостижим в случае использования дуги.



**Рис.2** Фотография типичного результата сварки, полученного совместным использованием горелки MIG и лазерного луча. В более глубокой части сварного шва видна изящная форма лазерной скважины


Лазерно-гибридная сварка предлагает производителям возможность достижения производительности и качества на порядок выше традиционных сварочных процессов.

С помощью HLAW процесса можно достичь высокой скорости сварки тонких материалов со снижением тепловложения до 80-90%.

Это обеспечит не только быстрое производство пластин и листов, но и значительное снижение деформаций, что в свою очередь снизит или устраним затраты из-за простоя производства.

К.Пауль, Ф.Ридель

# ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА – ОБЪЕДИНЯЯ УСИЛИЯ



**Г**ибридная лазерная сварка совмещает в себе достоинства дуговой и лазерной сварки. Появление производственных автоматических систем на основе мощных твердотельных лазеров открывает новые области ее применения.

В Институте Фраунгофера, расположенном в немецком городе Кемниц, создана рабочая группа под названием "тепловые соединения", занимающаяся научными проектами по гибридной лазерной сварке. Как правило, эта технология объединяет дуговую сварку – сварку металлическим электродом в активном газе или в инертном газе (MAG/MIG) – с лазер-

**случаях преодолеть трудности позволит технология гибридной лазерной сварки.**

Благодаря успешным разработкам конструкций твердотельных лазеров исследователи и инженеры в последние годы проявляют большой интерес к гибридной лазерной сварке. Достоинства новых источников лазерного излуче-

Спасибо  
за внимание!