

КУРС ЛЕКЦИЙ-ПРЕЗЕНТАЦИЙ  
по дисциплине

**«ТЕХНОЛОГИЯ и ОБОРУДОВАНИЕ  
СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ»**

лекция №3

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ:

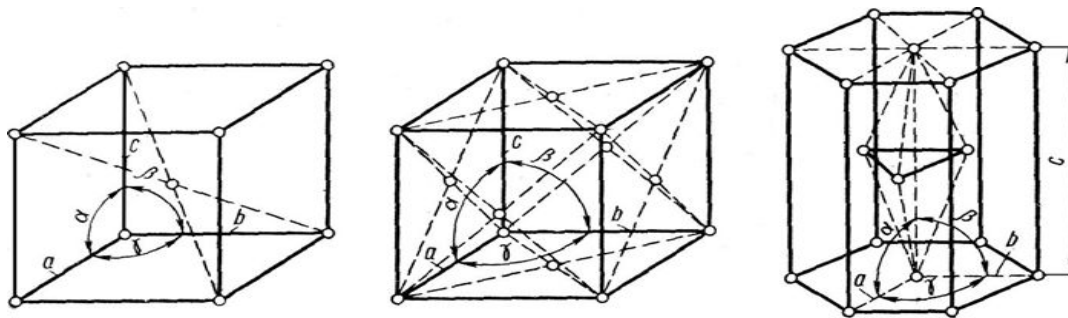
к.т.н., доцент кафедры «ОиТСП»

БЕНДИК Татьяна Ивановна

# СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИИ №3

- ❑ **Тема 3. Характеристики способов сварки**
- ❑ Классификация способов сварки давлением по основным параметрам процесса
- ❑ Схемы процессов контактной сварки.
- ❑ Основные источники тепла при сварке на переменном и постоянном токе
- ❑ Электрическое сопротивление зоны нагрева.
- ❑ Особенности электрических и температурных полей, объемной пластической деформации.

Металлическая связь характеризуется наличием свободно перемещающихся электронов («электронный газ»), несущих отрицательный заряд, и положительно заряженных ионов металла.



Формы основных элементарных ячеек пространственных кристаллических решеток:

1 – ОЦК; 2 – ГЦК; 3 – гексагональная плотноупакованная

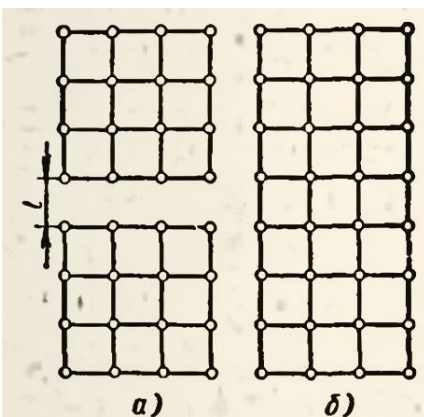
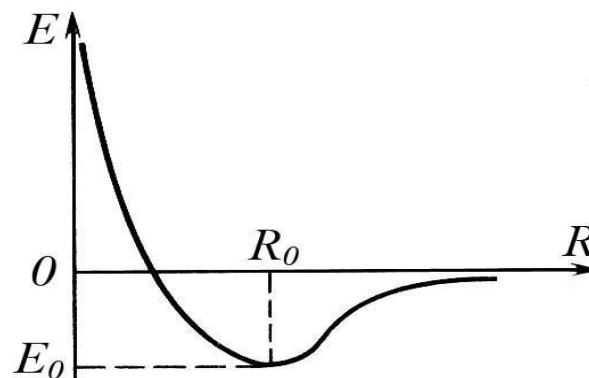
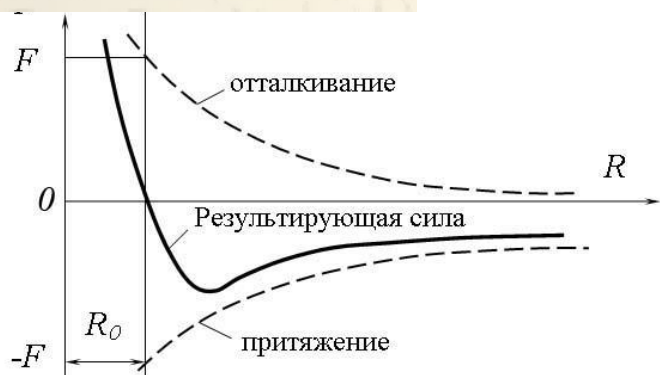


Рис. 1.1. Схема образования соединения двух тел с идеально чистыми и гладкими поверхностями:  
а — кристаллы до соединения; б — после соединения

Рассмотрим процесс образования соединения двух тел с одинаковым типом и ориентацией кристаллической решетки. Если расстояние  $l$  превышает параметр решетки, взаимодействия атомов не происходит. При этом силы притяжения (вызванные взаимодействием внешних электронов одного тела с ядрами атомов другого тела), а также силы отталкивания (вызванные взаимодействием электронов поверхностных атомов одного тела с электронами атомов другого тела и ядер обоих тел) близки к нулю.

По мере сближения появляются силы отталкивания электронов (кулоновское электростатическое взаимодействие). Внутренняя энергия системы двух тел повышается и возникает энергетический барьер, который можно преодолеть активацией контактных поверхностей.

Если продолжать сближать тела, то на определенном расстоянии  $R_0$  равнодействующая сил отталкивания и притяжения будет равна нулю, начинается объединение наружных электронных оболочек, а энергия системы достигает минимума (происходит процесс схватывания и сваривания).



$F$  - сила взаимодействия;  $E$  - энергия связи;  $R$  - расстояние между атомами

В момент образования (например при разрыве или сколе) поверхность металла является идеально чистой – ювенильной. Но мгновенно над поверхностью металла образуется электронное облако, которое активирует молекулы кислорода в окружающей атмосфере. Это приводит к образованию оксидной пленки.

Толщина оптически прозрачной оксидной пленки не превышает  $3 \cdot 10^{-8}$  м (даже самое мелкое зерно металла в 7 раз превышает толщину оксидного слоя). Значительно увеличить толщину оксидной пленки может нагрев (на поверхности появляются цвета побежалости).

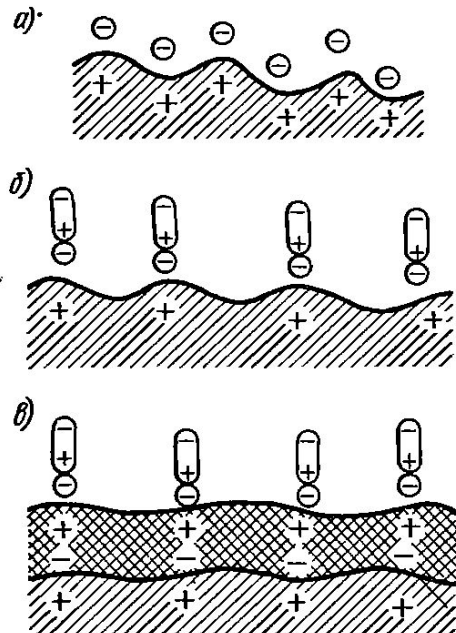
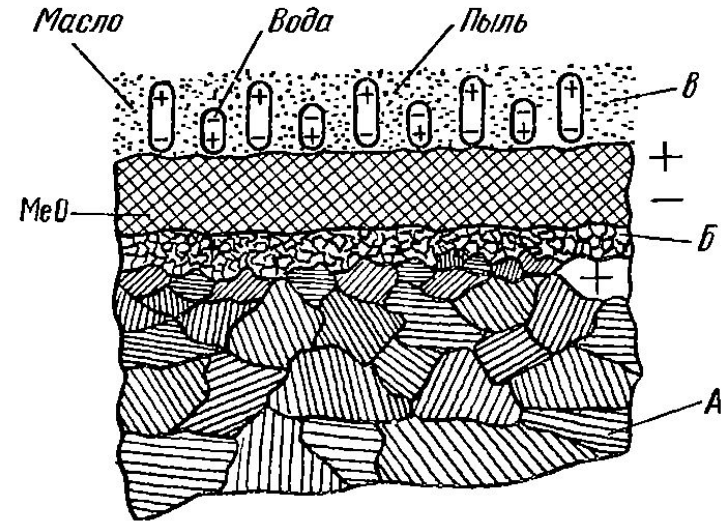


Схема строения реальной поверхности металла

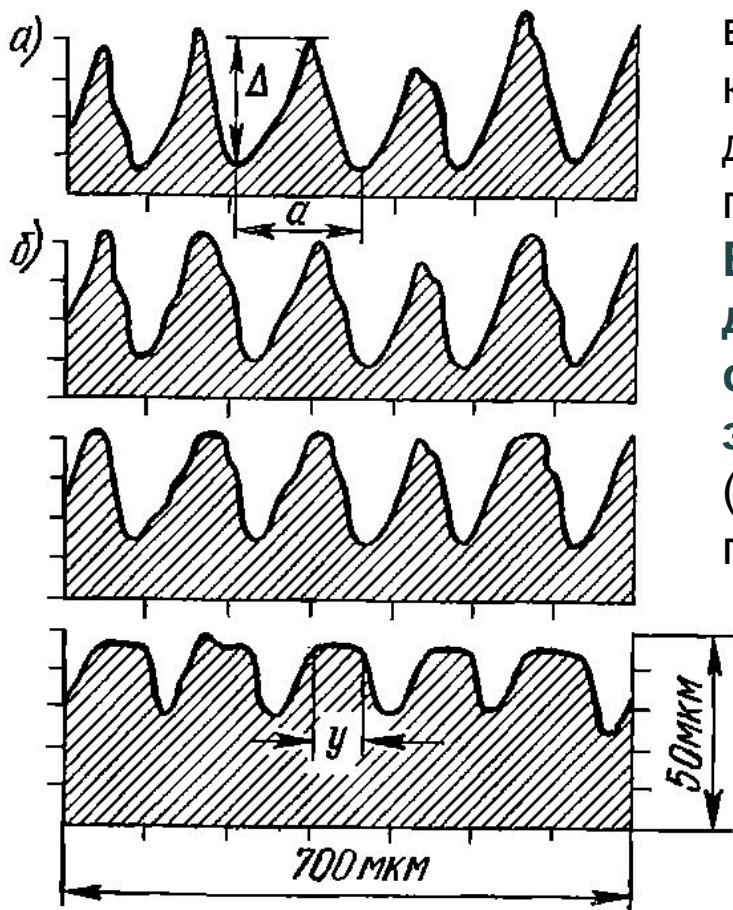


А – глубинные слои металла; Б – металлооксидная эвтектика внешнего кристаллического слоя; В – адсорбционные наслоения по оксидному слою; MeO – оксидный слой

Т а б л и ц а 1.1. Свойства оксидного слоя на железе

Цвет побежалости	Температура возникновения, °С	Приблизительная толщина слоя $\Delta \cdot 10^3$ , см
Соломенно-желтый	220—240	450
Оранжевый	240—260	500
Красно-фиолетовый	260—280	650
Синий	280—300	700
Окалина	600	5000

Профилограмма поверхности алюминиевой пластины после зачистки наждачной бумагой (а), деформации плитой под давлением 20, 100 и 200 МПа (б)

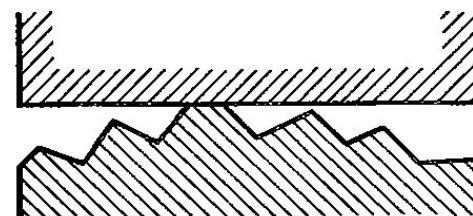


Самая тщательная зачистка металлической поверхности способна только свести к минимуму оксидные или адсорбционные наслоения, но не устранить их полностью.

Контакт между ювенильными поверхностями возможен только в двух случаях: 1 – в космическом вакууме; 2- когда пластическая деформация выдавливает и выносит за пределы плоскости контактирования все наслоения.

**Все технологические приемы сварки давление направлены на создание нужной степени пластической деформации металла в зоне сварки для удаления оксидных пленок (при способах сварки плавлением оксидные пленки растворяются в расплавленном металле).**

*Схема контактирования идеально ровной поверхности и поверхности с шероховатостью*



# Стадии формирования соединения при сварке давлением

## А) Формирование физического контакта

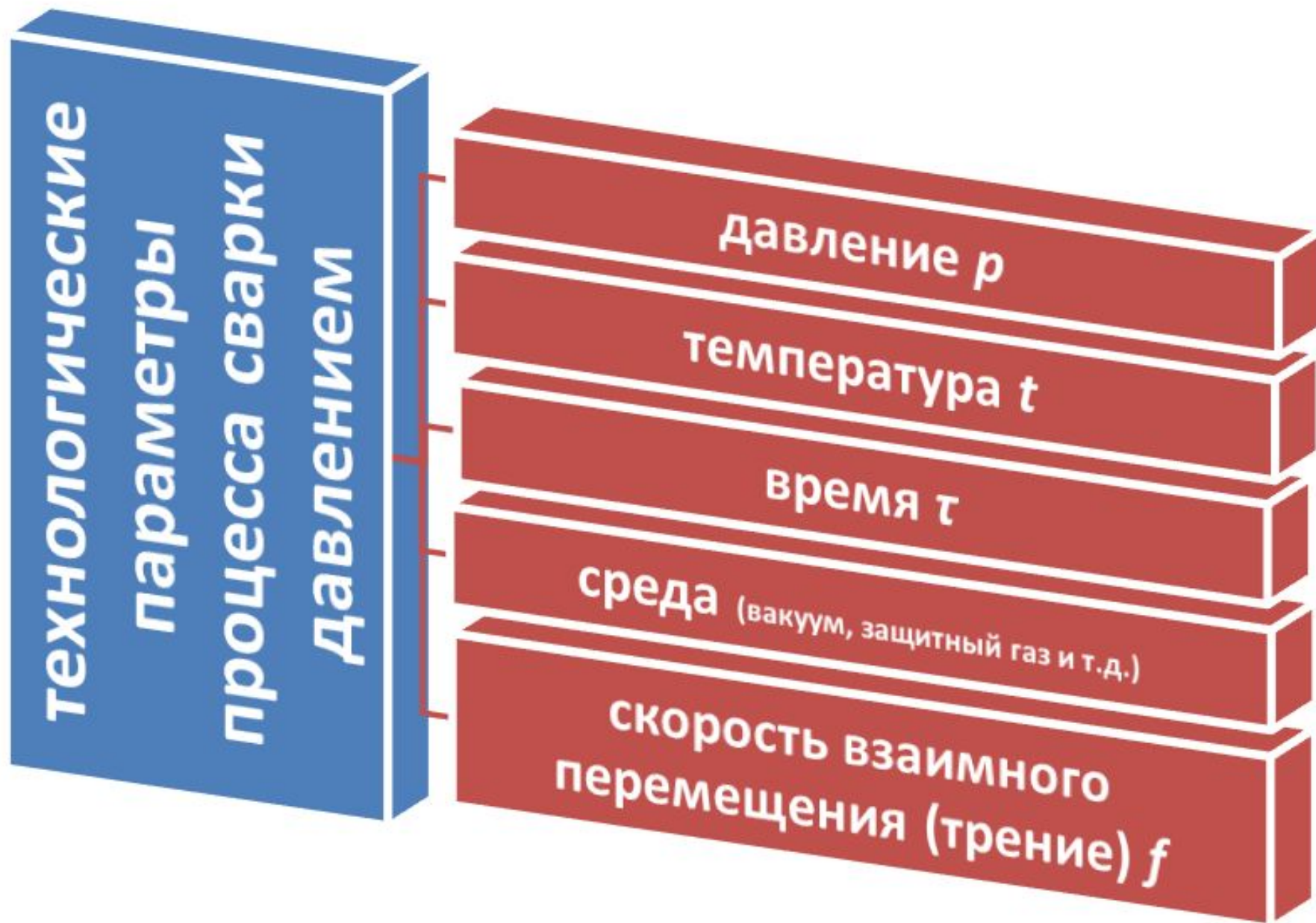
На первой стадии начинается сближение атомов, устраняются неровности и поверхностные пленки. Атомы сближаются на расстояние, необходимое для начала межатомного взаимодействия (преодоления электростатического отталкивания электронов внешних орбит).

## Б) Образование химических (металлических) связей

На второй стадии происходит активация атомов (механическая, термическая), преодолевается энергетический барьер схватывания, происходит объединение электронных оболочек и образуется сварное соединение. Эти процессы сопровождаются нагревом и деформацией деталей.

## В) Развитие релаксационных процессов по границе полученного соединения и в объеме детали

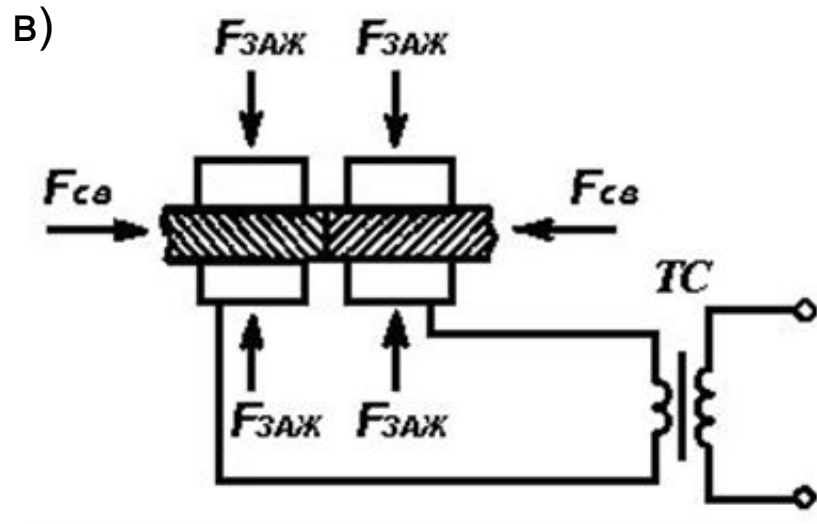
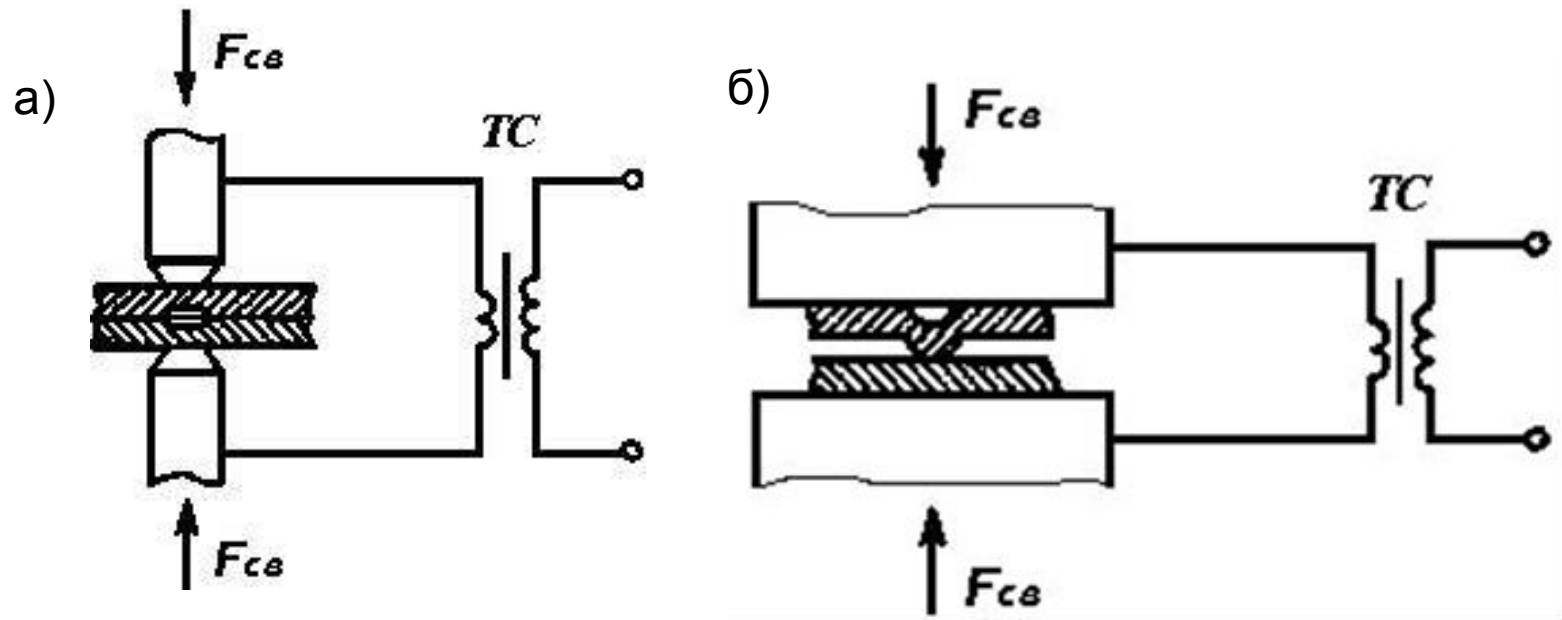
На третьей стадии через границу соединения начинается взаимная диффузия атомов, происходит кристаллизация и охлаждение соединения.



# Классификация основных способов сварки давлением по основным технологическим параметрам процесса

Основные параметры процесса	Способы сварки
Давление ( $p$ - процессы)	Холодная сварка
Давление, температура ( $p, t$ - процессы)	Сварка взрывом Магнитно-импульсная сварка
Давление, температура, время, взаимное перемещение ( $p, t, \tau, f$ - процессы)	Сварка трением Ультразвуковая сварка
Давление, температура, время ( $p, t, \tau$ - процессы)	Контактная точечная сварка Контактная рельефная сварка Контактная шовная сварка Контактная шовно-стыковая сварка Контактная стыковая сварка Ударная конденсаторная сварка Сварка прокаткой Высокочастотная сварка Прессовая сварка дугой, управляемой магнитным полем
Давление, температура, время, среда ( $p, t, \tau, A$ - процессы)	Диффузионная сварка Ударная сварка в вакууме Термокомпрессионная сварка Сварка косвенным импульсным нагревом Контактная стыковая сварка Контактная рельефная сварка Газопрессовая сварка Прессовая сварка с нагревом дугой, управляемой магнитным полем Сварка прокаткой



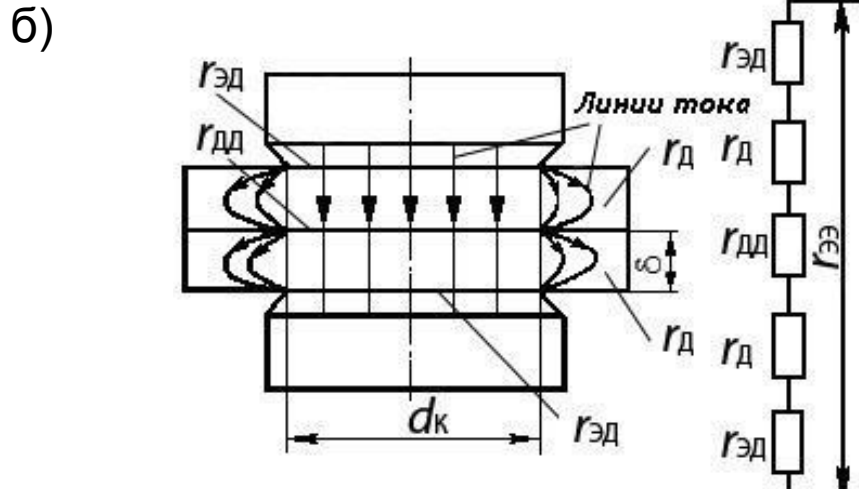
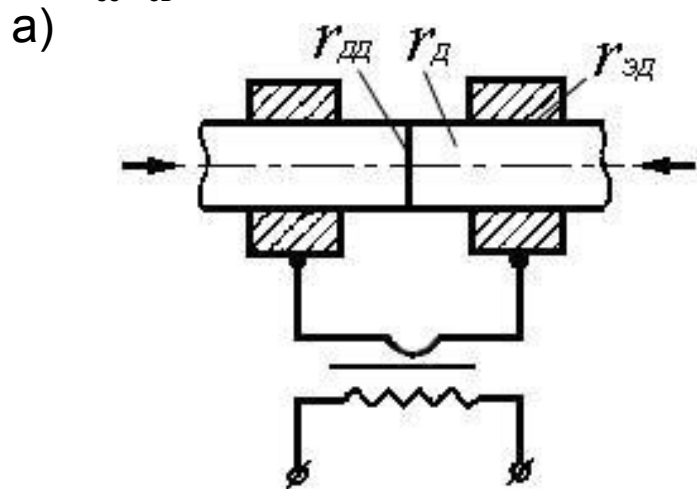


Контактная сварка:  
 а - точечная; б – рельефная; в – шовная; г – стыковая

Нагрев и плавление металла в зоне соединения происходят за счёт выделения теплоты на электрических сопротивлениях при прохождении через них электрического тока. Полное количество теплоты, генерируемое между электродами при протекании переменного тока длительностью  $\tau_{св}$ , определяется законом Джоуля-Ленца:

$$Q_{зэ дж} = \int_0^{\tau_{св}} i_{св}^2(\tau_{св}) \cdot r_{зэ}(\tau_{св}) \cdot d\tau,$$

где  $i_{св}(\tau_{св})$  – мгновенные значения сварочного тока, обычно изменяющиеся в процессе протекания тока;  $r_{зэ}(\tau_{св})$  – сумма сопротивлений участка электрод-электрод в моменты времени  $\tau \leq \tau_{св}$ .



При стыковой сварке (а) теплота выделяется в контакте между торцами свариваемых стержней за счёт контактного сопротивления  $r_{дд}$  и в самих стержнях с собственным сопротивлением  $r_{д}$ . Контактными сопротивлениями  $r_{эд}$  между электродами и свариваемыми стержнями можно пренебречь, т. к. они относительно малы, тогда

$$Q_{зэ дж} = \int_0^{\tau_{св}} [r_{дд}(\tau_{св}) + 2r_{д}(\tau_{св})] \cdot i_{св}^2(\tau_{св}) \cdot d\tau.$$

Явлением Пельтье называется выделение или поглощение (в зависимости от направления тока) теплоты, избыточной над джоулевой, которое происходит в контакте разнородных проводников или полупроводников при прохождении ПОСТОЯННОГО тока. Теплота Пельтье определяется по формуле

$$Q_{\text{п}} = \pm k_{\text{п}} I_{\text{св}} \tau_{\text{св}},$$

где  $k_{\text{п}}$  – коэффициент Пельтье (Дж/Кл);  $I_{\text{св}}$  – величина постоянного сварочного тока;  $\tau_{\text{св}}$  – время протекания сварочного тока.

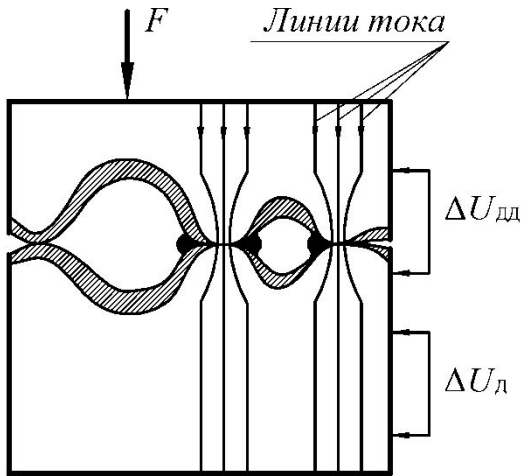
Явлением Томсона называется выделение или поглощение теплоты, избыточной над джоулевой, при прохождении постоянного тока по неравномерно нагретому проводнику или полупроводнику. Теплота Томсона определяется по формуле

$$Q_{\text{т}} = \pm k_{\text{т}} (t_2 - t_1) I_{\text{св}} \tau_{\text{св}},$$

где  $k_{\text{т}}$  – коэффициент Томсона (В/К);  $(t_2 - t_1)$  – разница температур.

Перечисленные явления, особенно явление Пельтье, при точечной сварке обычно вызывают смещение литого ядра в одну из свариваемых деталей. Для смещения литого ядра в зону контакта деталь–деталь необходимо предпринимать меры, направленные на снижение степени охлаждения детали, в которой литое ядро отсутствует.

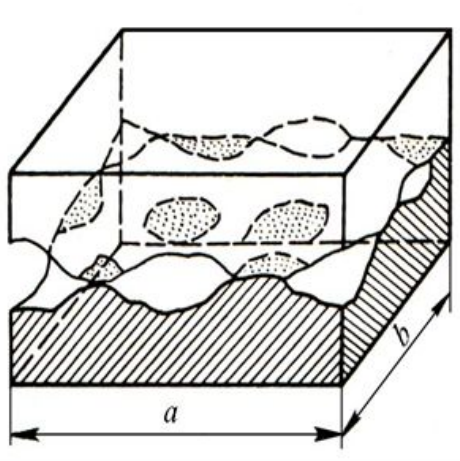
Под контактными сопротивлениями при различных способах контактной сварки понимают сопротивления, сосредоточенные в узкой области контактов деталь–деталь  $r_{\text{дд}}$  и электрод–деталь  $r_{\text{эд}}$ .



$$r_{\text{дд}} = \Delta U_{\text{дд}} / I.$$

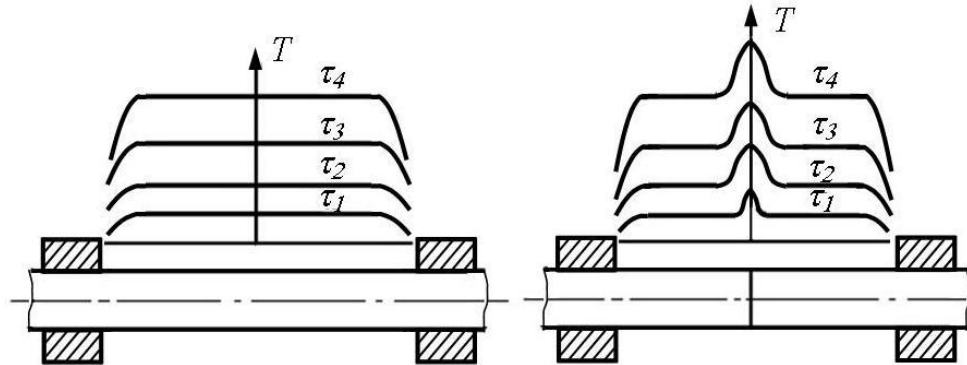
Влияние состояния поверхности на сопротивление  $r_{\text{дд}}$  и  $r_{\text{эд}}$  очень велико. В таблице приведены результаты измерений контактных сопротивлений двух различно обработанных пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 3 мм, сжатых электродами с усилием 2000 Н (диаметр контактной поверхности электродов 10 мм). Контактное сопротивление уменьшается при росте усилия сжатия. Это вызвано увеличением фактической площади контакта за счёт смятия микровыступов, увеличения их числа, разрушения поверхностных пленок и удаления неэлектропроводных поверхностных образований.

Модель волнистой и шероховатой поверхности



Значение контактных сопротивлений двух пластин с различным состоянием поверхностей

Состояние поверхностей пластин	Величина контактного сопротивления $r_{\text{дд}}$ , мкОм
Обработанные наждачным кругом	100
Травленные	300
Обработанные резцом	1 200
С наличием окалины	80 000
С наличием ржавчины и окалины	300 000



При стыковой сварке на постоянном токе сопротивление каждой выступающей из зажимов детали

$$r_d = \rho_t \ell_0 / S,$$

где  $\rho_t$  – удельное электрическое сопротивление при температуре  $t$ ;  $\ell_0$  – установочная длина;  $S$  – площадь сечения.

При протекании переменного тока сопротивление той же детали возрастает:

$$r_d = K_n \rho_t \ell_0 / S,$$

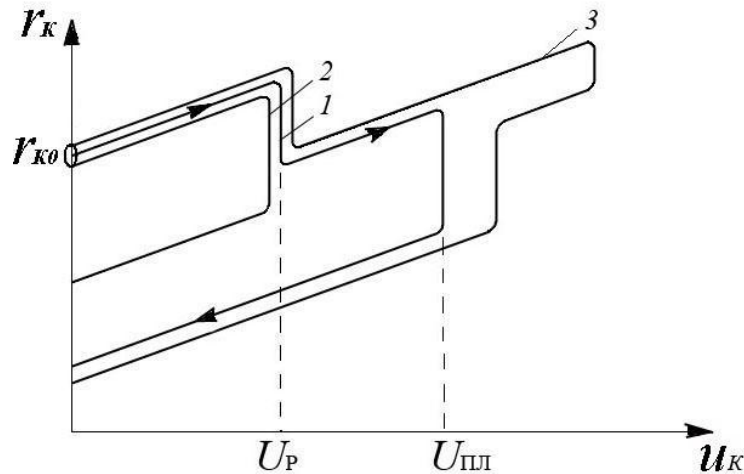
где  $K_n$  – коэффициент поверхностного эффекта.  $K_n$  заметно растет до достижения температуры ферромагнитного превращения при стыковой сварке деталей из углеродистых сталей диаметром более 25 мм

Удельное электрическое сопротивление при сварке растет с повышением его температуры:

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

где  $t$  – температура нагрева;  $\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление при температуре 0 °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

У низкоуглеродистой стали при нагреве до 800 °С  $\rho_t$  повышается в 10 раз, меди – в 4,4 раза, титана – в 3 раза, никеля – в 6,5 раза.



Зависимость сопротивления контакта  $r_k$  от падения напряжения на нем называется *r*-*u* характеристикой. *r*-*u* характеристика может быть легко получена экспериментально. Для этого необходимо в процессе протекания сварки измерять ток  $i_{св}$  и величины падения напряжений на контакте  $u_k$ . Сопротивление контакта в разные промежутки времени прохождения сварочного тока определяется по закону Ома.

Перед пропуском сварочного тока начальное холодное сопротивление контакта деталь–деталь равно  $r_{k0}$ . При включении сварочного тока начинают расти напряжение на контакте и его температура.  $r_k$  растёт до момента достижения в контакте напряжения  $U_p$ , которое называют напряжением размягчения. Этому напряжению соответствует температура, которая называется температурой размягчения  $T_p$ . Для сталей  $T_p = 600...700$  °C, для алюминиевых сплавов – 400...450 C. При напряжении на контакте, равном  $U_p$  наблюдается резкое снижение  $r_k$  из-за увеличения фактической площади контакта.

При достижении в контакте падения напряжения, равного напряжению  $U_{пл}$ , в зоне сварки появляется расплавленный металл и начинается рост зоны расплавления (кривая 1).

Если процесс сварки идет в соответствии с кривой 2, то в зоне свариваемого контакта достигается лишь температура размягчения  $T_p$ , плавления металла не происходит, соединение образуется в твердой фазе без образования расплавленного ядра.

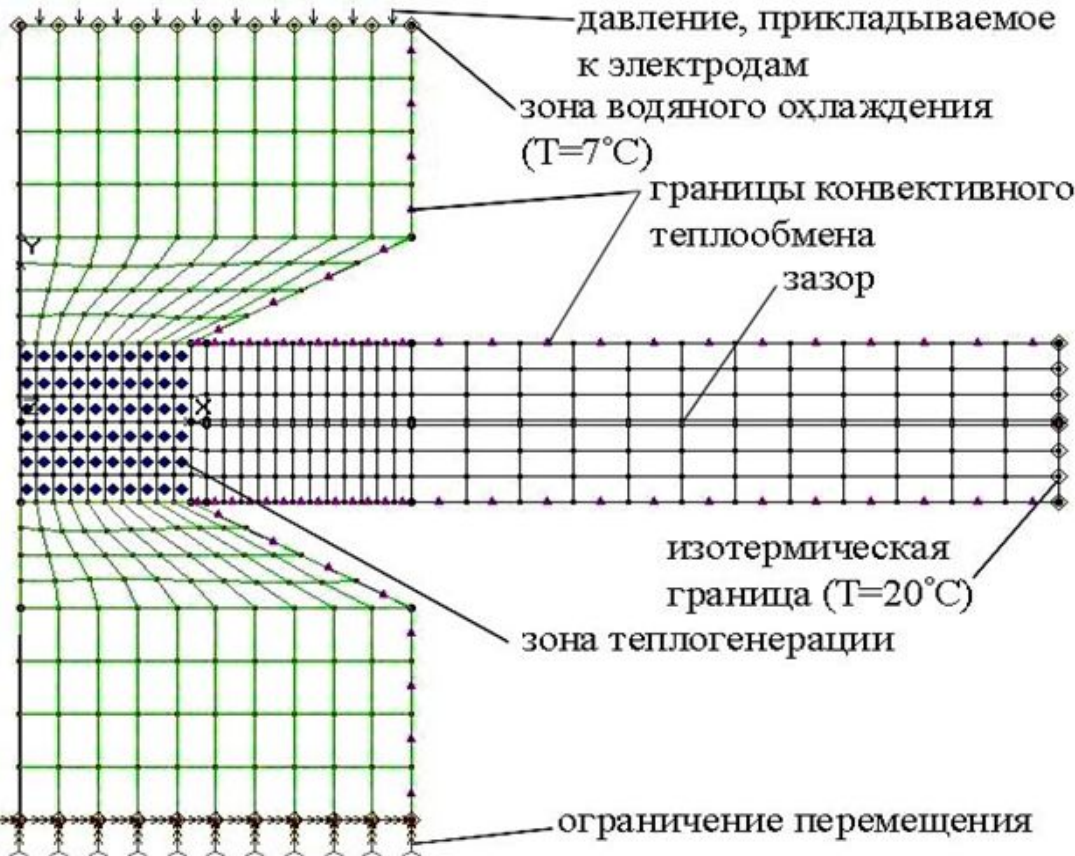
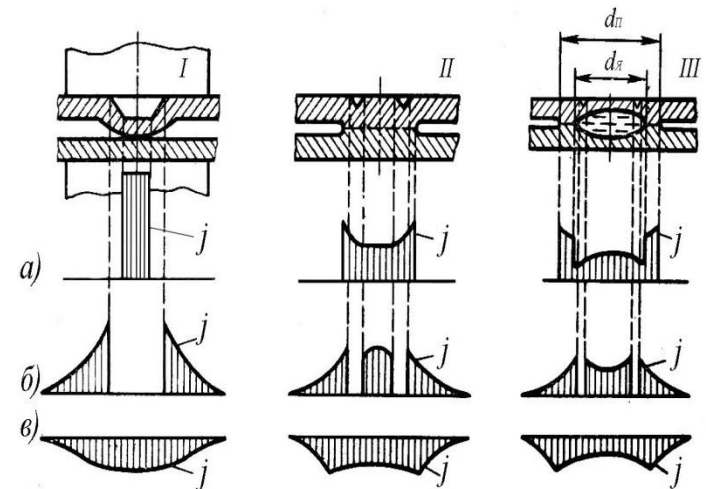
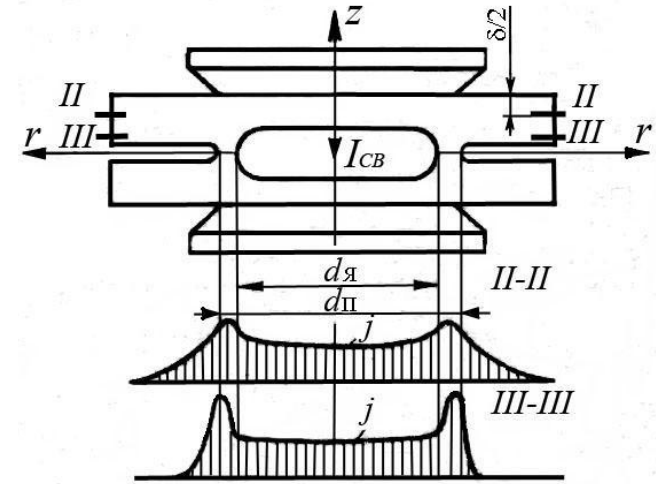
При ходе процесса сварки в соответствии с кривой 3 в зоне контакта наблюдается перегрев. Металл нагревается до температуры выше  $T_{пл}$ . Падение напряжения на свариваемом контакте значительно превышает напряжение плавления  $U_{пл}$ , и происходит выплеск расплавленного металла.

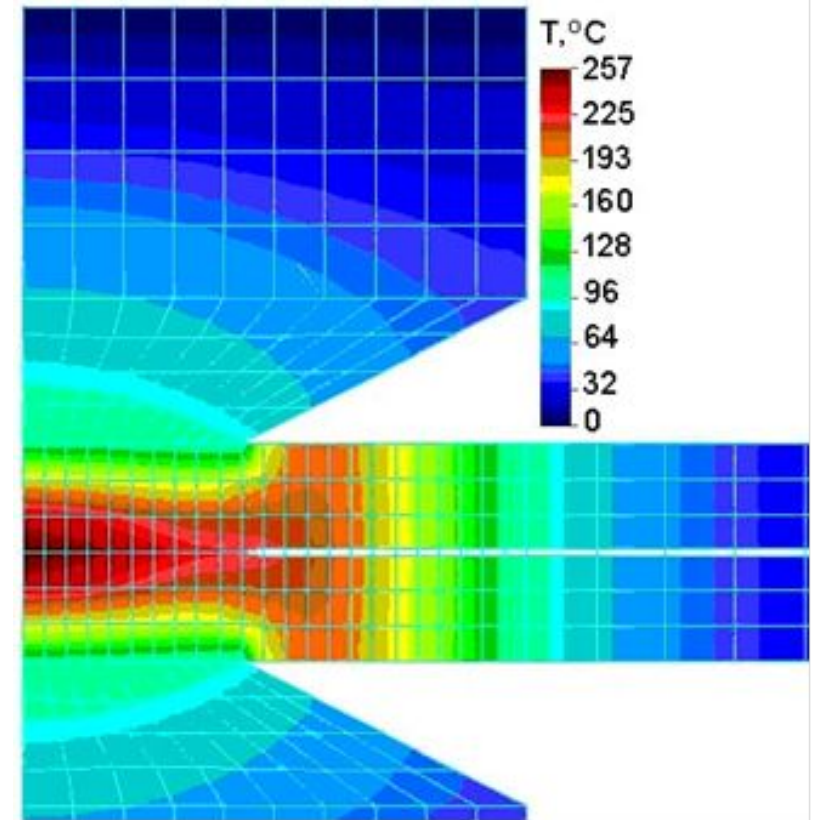
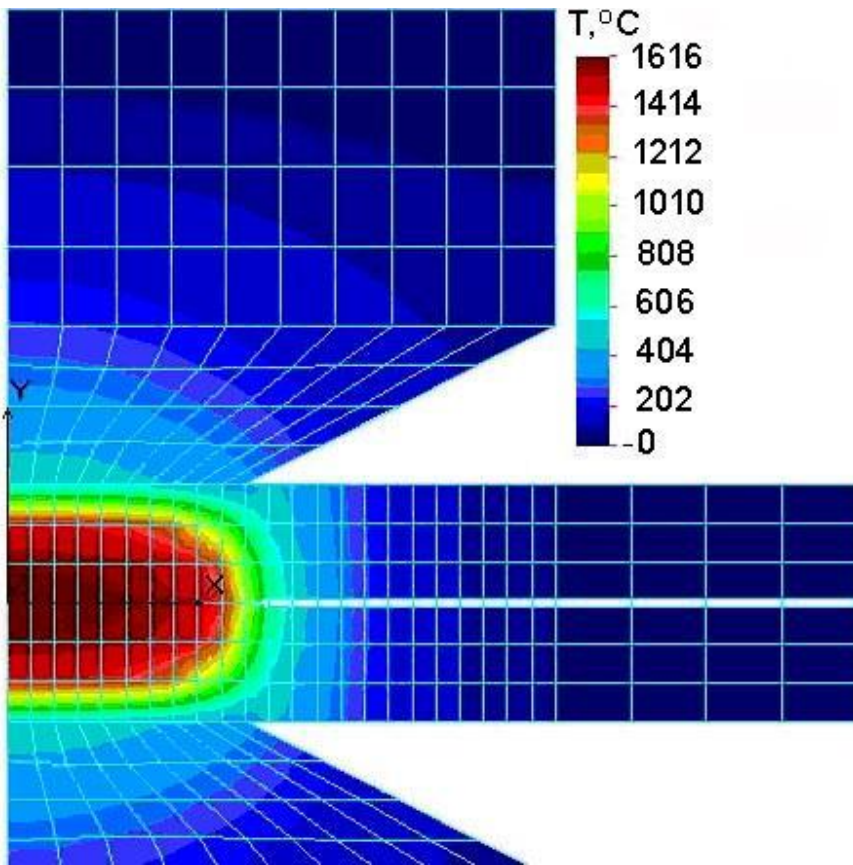
Напряжения размягчения и плавления являются характеристиками свариваемых материалов.

Материал	$U_p$ , В	$U_{пл}$ , В	Материал	$U_p$ , В	$U_{пл}$ , В
Сталь	0,34	0,75	Серебро	0,09	0,37
Никель	0,22	0,65	Вольфрам	0,40	1,10
Медь	0,12	0,43	Цинк	0,1	0,17

При контактной сварке в зоне соединения протекают сложные взаимосвязанные процессы, основными из них являются:

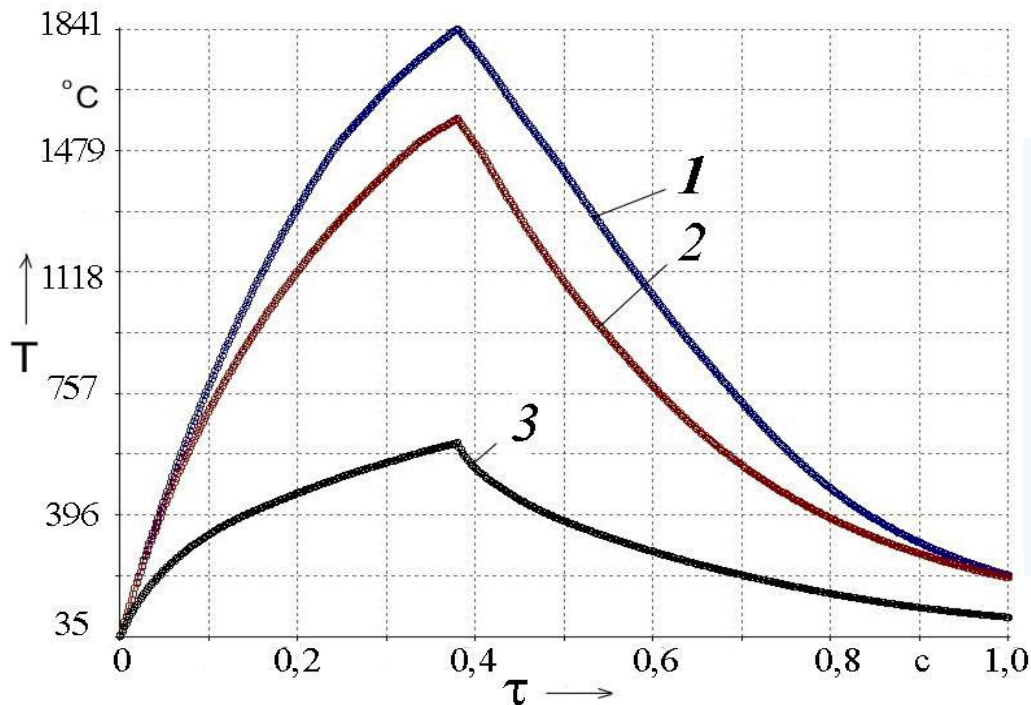
- протекание электрического тока через зону сварки;
- нагрев деталей и электродов в результате прохождения тока;
- плавление и кристаллизация металла зоны сварки;
- неизотермическое деформирование нагретого металла.





Распределение температуры при точечной сварке: а - в момент  
выключения тока; б - через 0,3 с после выключения тока





Изменение температуры в процессе сварки:  
 1 - в центре расплавленного ядра;  
 2 - на границе ядра;  
 3 - в центре контакта электрод-деталь.  
 Сталь Ст.3; 2+2 мм;  $I_{CB} = 11,95$  кА;  $t_{CB} = 0,38$  с;  $d_{\text{э}} = 8$  мм;  $F_{CB} = 6500$  Н

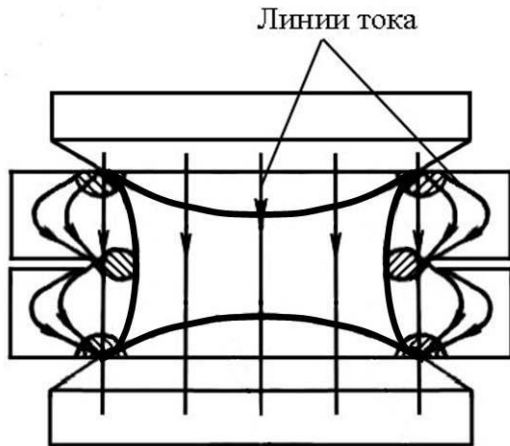
Анализ графиков изменения температур показывает, что в момент выключения тока температура в центре ядра достигает 1800...1840 °C. Максимальная температура в центре контакта электрод-деталь достигает 550...600 °C. При таких температурах в зоне контактирования заметно снижается предел текучести свариваемых металлов и металла электродов, что ведет к образованию вмятин и повышенному износу электродов.

В зависимости от роли процессов тепловыделения и теплоотвода различают ЖЕСТКИЕ и МЯГКИЕ режимы сварки.

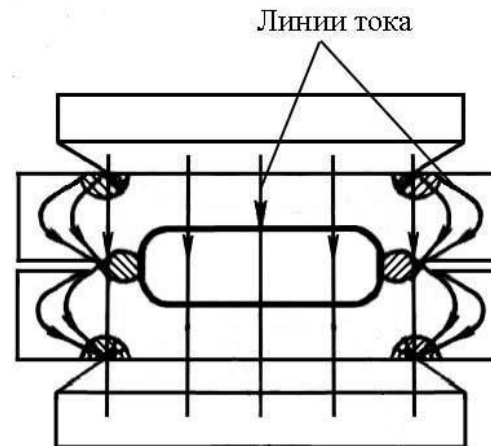
Жесткий режим характеризуется кратковременным мощным импульсом тока, когда  $\tau_{св} < 0,02\delta$  при сварке деталей толщиной  $\delta = (1...4)$  мм. Температурное поле в этом случае определяется преимущественно тепловыделением: изотерма температуры ликвидуса имеет при этом в сечении форму, близкую к прямоугольнику (а), углы которого вытянуты в сторону областей с повышенной плотностью тока (к периферии контактов). При жестких режимах  $Q_2 + Q_3 < 20\% Q_{э\text{э}}$  и увеличивается склонность к образованию начальных выплесков. Для их предотвращения повышают сварочное усилие.

Мягкие режимы характеризуются значительной длительностью протекания сварочного тока ( $\tau_{св} > 0,1\delta$ ). При этом происходит значительный теплообмен внутри деталей и с электродами ( $Q_2 + Q_3 > 80\% Q_{э\text{э}}$ ). Изотерма температуры ликвидуса имеет в сечении форму овала или эллипса (б). Скорость нагрева и охлаждения, а также величина  $F_{св}$  меньше, чем при использовании жестких режимов.

а)



б)



Форма ядра при сварке на жестких (а) и мягких (б) режимах (заштрихованы области наибольших плотностей тока)

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

**КАКИЕ БУДУТ ВОПРОСЫ?**