



# ***3.7. Технологическая прочность металлов при сварке***



## ***Технологическая прочность***

металлов и сплавов – это способность сохранять сплошность в процессе технологических тепловых и силовых воздействий при изготовлении изделий (сварке, обработке давлением и других процессах).



Технологическая прочность – это «кинетический» параметр, непрерывно изменяющийся с течением времени в зависимости от температуры, агрегатного состояния, фазового состава структуры, скоростных технологических нагрузок и других факторов.



Для суждения о технологической прочности необходимо в процессе всего технологического цикла сопоставлять прочностные и пластические свойства материала с параметрами напряженно-деформированного состояния, создаваемого технологическими нагрузками.



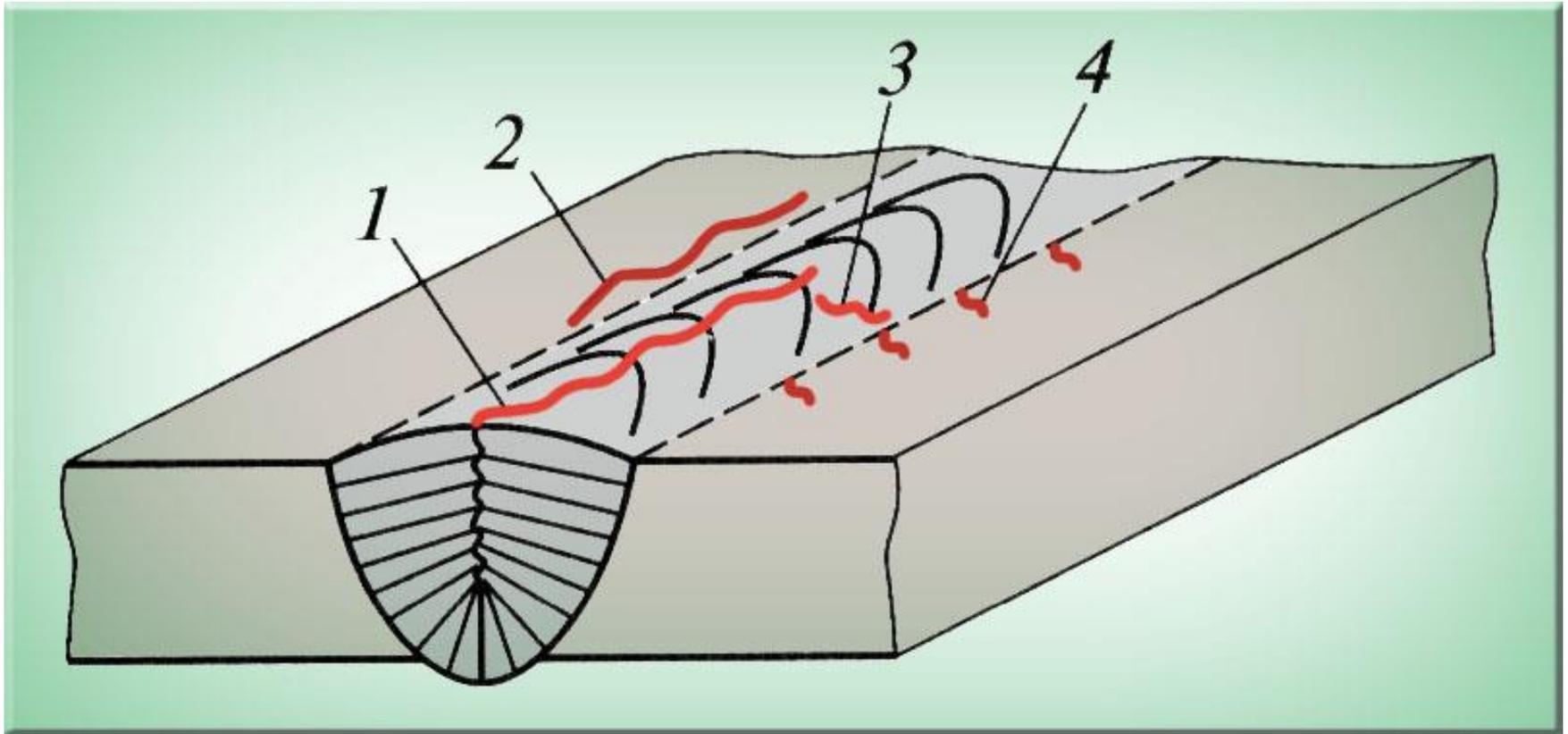
Условием обеспечения технологической прочности является следующее: в каждый текущий момент технологического цикла значения параметров деформационной способности или сопротивления материала разрушению должны превышать значения соответствующих параметров напряженно-деформированного состояния.



Нарушение этого условия приводит к разрушению материала, например при сварке – к образованию различного типа трещин: горячих, холодных, ламеллярных и др.



***Горячие трещины*** при сварке – это хрупкие межкристаллитные разрушения шва и зоны термического влияния, наиболее часто возникающие в твердожидком состоянии при завершении кристаллизации (рис.17).



*Рис. 17. Виды горячих трещин в шве и околошовной зоне  
(1 и 2 – продольные; 3 и 4 – поперечные)*



Возможно также образование горячих трещин в твердом состоянии при высоких температурах на этапе преимущественного развития межзеренной деформации. Потенциальную склонность к образованию горячих трещин имеют все конструкционные сплавы при любых видах сварки плавлением, а также при некоторых видах сварки давлением.



Горячие трещины образуются при критическом сочетании значений следующих факторов:

- температурного интервала хрупкости (ТИХ) в период кристаллизации металла шва,  $^{\circ}\text{C}$ ;

- минимальной пластичности в ТИХ  $\delta_{\min}$ , %;

- темпа высокотемпературной сварочной деформации  $\alpha$ ,  $\%/^{\circ}\text{C}$ .



В начальный период кристаллизации (рис. 18) появление твердой фазы не снижает деформационную способность сплава, так как деформирование металла происходит в результате относительного перемещения участков твердой фазы и циркуляции жидкой фазы между ними.

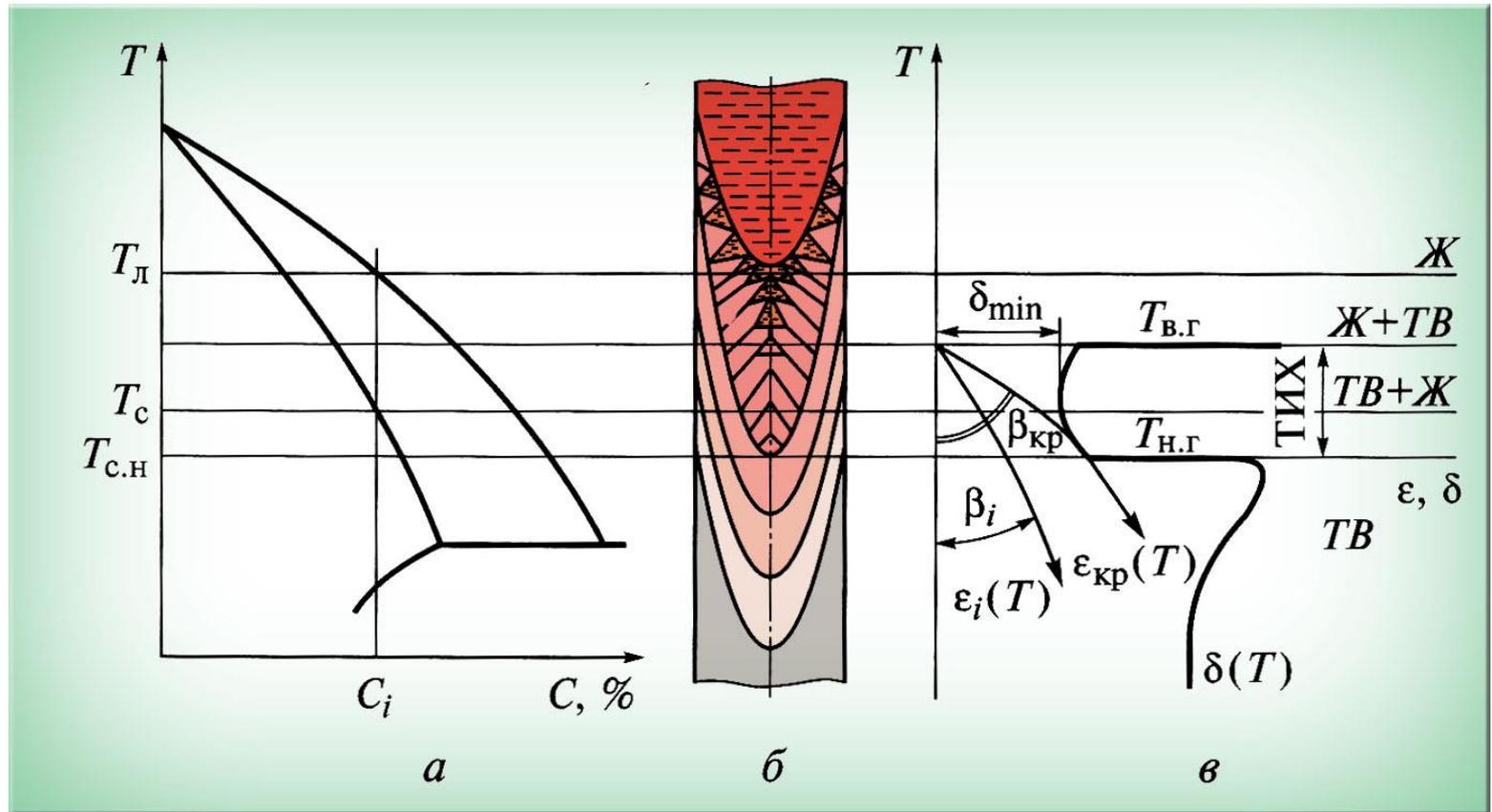


Рис. 18. Схема процесса образования горячих трещин в сварных швах: а – диаграмма состояния сплава ( $C_i$  – состав сплава;  $T_L$ ,  $T_D$ ,  $T_{C.H}$  – температуры ликвидуса, равновесного и неравновесного солидуса); б – процесс кристаллизации сварного шва; в – распределение пластичности  $\delta$  (ТИХ – температурный интервал хрупкости;  $\delta_{min}$  – минимальная пластичность в ТИХ;  $\epsilon$  – интенсивность сварочных деформаций; Ж, ТВ – жидкая и твердая фазы)

По мере дальнейшего охлаждения сплавов непрерывно снижается объем жидкой фазы и металл переходит в твердое состояние, что приводит к соприкосновению кристаллов при деформировании. Это ограничивает циркуляцию жидкой фазы и резко снижает деформационную способность сплава до минимума ( $\delta_{\min}$ ).



Температура, соответствующая этому состоянию, называется верхней границей ТИХ ( $T_{В.Г}$ ). При деформации такого металла кристаллиты воспринимают в местах контакта напряжения, что приводит к появлению определенного уровня сопротивления деформирования.

Этому соответствует начало развития высокотемпературной собственной сварочной деформации. Нижняя граница ТИХ ( $T_{Н.Г}$ ) соответствует неравновесному солидусу  $T_{С.Н}$ , при котором еще сохраняются такие жидкие прослойки между кристаллитами.

При охлаждении сплава ниже  $T_{Н.Г}$  жидкая фаза полностью затвердевает и деформационная способность сплава резко возрастает и достигает максимума, так как деформация распространяется на весь объем полностью затвердевшего металла.



Холодные трещины объединяют категорию трещин в сварном соединении, формальными признаками которых являются: возможность их визуального наблюдения практически сразу после охлаждения соединения; их блестящий кристаллический излом без следов высокотемпературного окисления.



***Холодные трещины*** – локальные хрупкие разрушения материала сварного соединения, возникающие под действием собственных сварочных напряжений. Размеры холодных трещин соизмеримы с размерами зон сварного соединения.



Локальность разрушения объясняется частичным снятием напряжений при образовании трещин, а также ограниченностью зон сварного соединения, в которых возможно развитие трещин без дополнительного притока энергии от внешних нагрузок.



Характерными особенностями большинства случаев возникновения холодных трещин являются следующие:

- 1) наличие инкубационного периода до момента образования очага трещины;
- 2) образование трещин происходит при значениях напряжений, составляющих менее 0,9 кратковременной прочности материалов в состоянии после сварки.



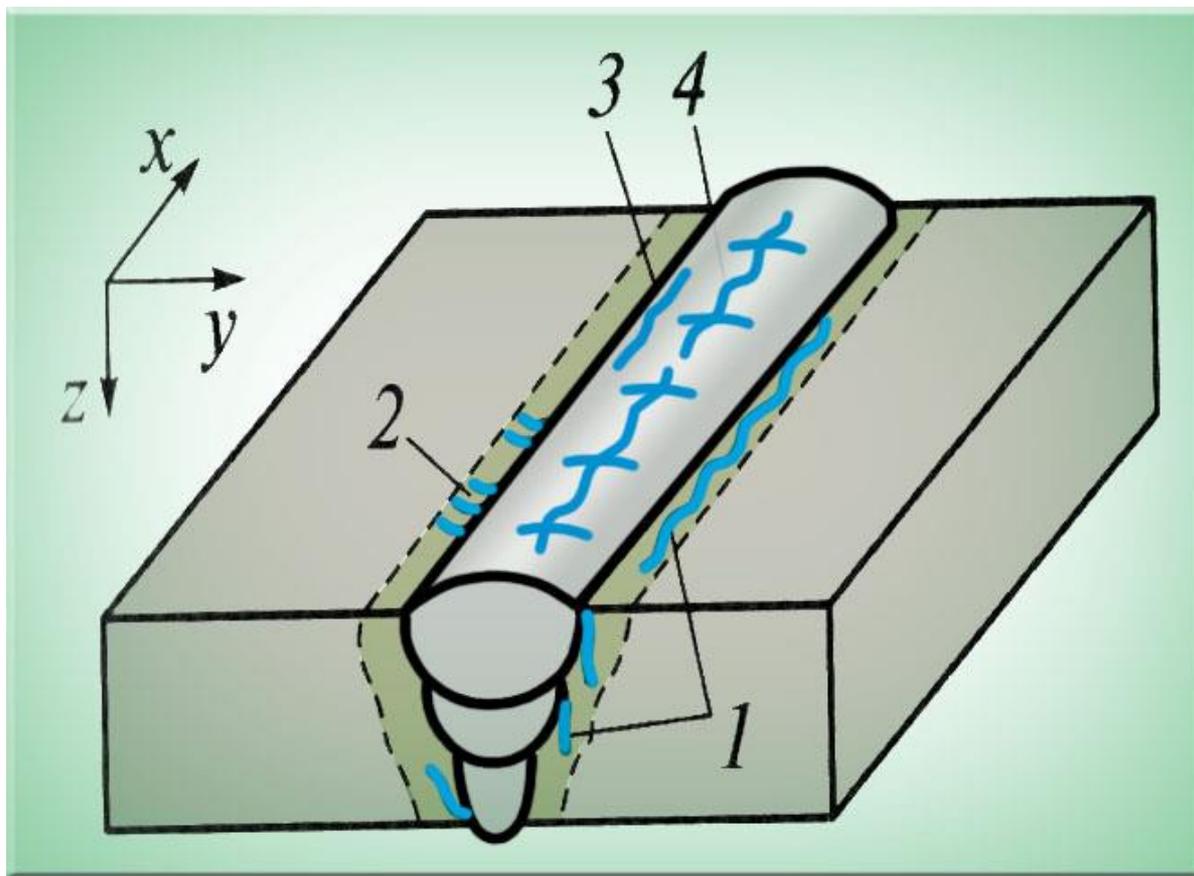
К образованию холодных трещин при сварке склонны углеродистые и легированные стали, некоторые титановые и алюминиевые сплавы. При сварке углеродистых и легированных сталей холодные трещины могут образоваться, если стали претерпевают частичную или полную закалку.



Холодные трещины возникают в процессе охлаждения после сварки ниже температуры  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  или в течение последующих нескольких суток. Они могут образовываться во всех зонах сварного соединения и располагаться параллельно или перпендикулярно по отношению к оси шва.



Место образования и направление трещин зависят от состава основного металла и металла шва, соотношения компонент сварочных напряжений и некоторых других обстоятельств. В соответствии с геометрическими признаками и характером излома холодные трещины получили определенные названия (рис.19):



*Рис. 19. Виды холодных трещин в сварных соединениях углеродистых и легированных сталей: 1 – «откол»; 2 – «частокол»; 3 – «отрыв»; 4 – продольные холодные трещины в шве.*

- «**откол**» – продольные трещины в зоне термического влияния;
- «**отрыв**» – продольные трещины в зоне сплавления со стороны шва (аустенитного);
- «**частокол**» – поперечные трещины в зоне термического влияния.



Наиболее часто возникают холодные трещины вида «откол». Образование холодных трещин начинается с появления очага разрушения, как правило, на границах бывших аустенитных зерен на околошовном участке зоны термического влияния, примыкающих к линии сплавления (рис.20).



*Рис. 20. Межкристаллитный характер разрушения на участке очага холодной трещины (А) и смешанной на участке ее развития (В)*



Протяженность очагов трещин составляет несколько диаметров бывших аустенитных зерен. При этом разрушение не сопровождается заметной пластической деформацией и наблюдается как практически хрупкое.



Это позволяет отнести холодные трещины межкристаллитному (межзеренному) хрупкому разрушению. Дальнейшее развитие очага в микро- и макротрещину может носить смешанный или внутризеренный характер.



Основными факторами, обуславливающими образование холодных трещин в сварном соединении из углеродистых и легированных сталей, являются:



1) структурное состояние металла сварного соединения, характеризуемое наличием составляющих мартенситного и бейнитного типа ( $S_D$ , %) и размером бывшего аустенитного зерна ( $d_3$ , мкм), свойства указанных структурных составляющих зависят от химического состава и в первую очередь от содержания углерода (C, %);

- 
- 2) концентрация диффузионного водорода в зоне зарождения очага трещины ( $H_d$ , см<sup>3</sup>/100 г металла);
  - 3) растягивающие сварочные напряжения I рода ( $\sigma_{св}$ , МПа).



Способы предотвращения холодных трещин в сварных соединениях направлены на уменьшение или устранение отрицательного действия основных факторов (обуславливающих их образование) путем:

- 
- 1) регулирования структуры металла сварных соединений;
  - 2) снижения концентрации диффузионного водорода в шве;
  - 3) уменьшения уровня сварочных напряжений.



В соответствии с этим различают способы: металлургические, технологические и конструкционные.



## ***Металлургические способы***

предотвращения холодных трещин направлены на регулирование структуры металла сварных соединений путем рационального выбора химического состава основного металла и сварочных материалов.



Желательно иметь в их составе минимальное содержание углерода и легирующих элементов, повышающих прокаливаемость сталей, одновременно обеспечивая требуемые механические свойства шва и зоны термического влияния.



## ***Технологические способы***

предотвращения холодных трещин предусматривают регулирование структуры металла сварных соединений путем рационального выбора теплового режима сварки.