

## К ВОПРОСУ О ТЕМПЕРАТУРНОМ РЕЖИМЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

А.А.Бердыченко

*На основании металлографических исследований определены температуры, возникающие при образовании сварного соединения титан+титан, и минимальная энергия, необходимая для образования сварного соединения, полученного сваркой взрывом.*

Величина температуры металла, участвующего в образовании сварного соединения при любых способах сварки, является одним из основных физических параметров режима, определяющих состояние металла и качество сварного соединения. Измерение температуры металла в околошовной зоне при сварке взрывом затруднено из-за быстротечности процесса и высокой степени деформации слоёв металла, наиболее приближённых к плоскости соединения. В настоящей работе была предпринята попытка оценить температуру металла в околошовной зоне сварного соединения титан-титан, полученного сваркой взрывом, по его структурным изменениям, наблюдаемым при металлографических исследованиях [1].

Основным источником энергии, порождающим повышение температуры в околошовной зоне при сварке взрывом, является высокая степень деформации пограничных слоёв металла. Время действия нагрузок, вызывающих эти деформации, обычно оценивается как  $t=2\delta/c$  ( $\delta$  – толщина металла пластины,  $c$  – скорость звука в материале металла пластины), что составляет величину порядка микросекунды. Если принять, что температура металла в зоне соединения достигает при соударении величины порядка температуры плавления, то время остывания этого металла с учётом оценки скорости охлаждения, которая согласно выводам работы [2] в интервале температур 700–350 С равна  $3,5 \cdot 10^6$  град/с, составляет величину порядка сотни микросекунд. Таким образом, процесс образования сварного соединения при сварке взрывом происходит при высоком давлении, вызывающем высокоскоростную деформацию и нагрев локальных объёмов металла, остывание которого происходит при нормальном давлении. На структурные изменения металла околошовной зоны накладывает свой отпечаток высокая скорость деформации, нагрев и остывания.

Согласно выводам работы [1] сварное соединение титан-титан с плоской границей раздела (рис. 1, а) образуется в твёрдой фазе без расплавления металла околошовной зо-

ны. Сварное соединение в этом случае образуется в результате динамической рекристаллизации, протекающей у титана во время горячей деформации. Граница раздела здесь представляет собой полосу металла ячеистой структуры 1, поверхность соединения в которой не просматривается. Ширина этой полосы 10–20 мкм и пропорциональна энергии пластической деформации свариваемых пластин. Максимальная температура горячей деформации оценивается величиной в два раза меньшей температуры плавления [3], что для титана составляет приблизительно 800 °С.

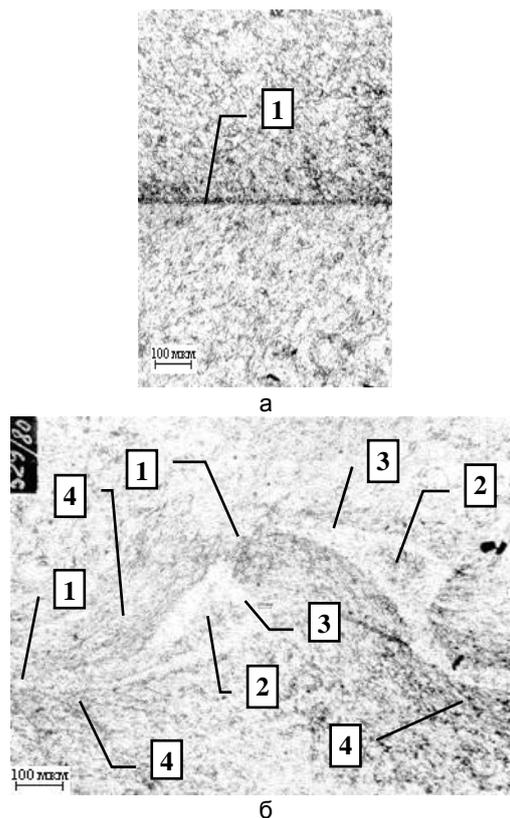


Рис. 1. Микроструктура сварного соединения титан+титан, полученного сваркой взрывом: а – с плоской границей раздела, б – с волнообразной границей раздела; 1 – полоса металла с ячеистой структурой, 2 – вихревая зона, 3 – зона рекристаллизованного металла, 4 – зона металла со следами пластического течения

## К ВОПРОСУ О ТЕМПЕРАТУРНОМ РЕЖИМЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

Однородность структуры металла внутри полосы ячеистой структуры не даёт основание считать, что какие-либо её участки претерпевали фазовое  $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращение, температура которого для титана 882 °С, или подвергались расплавлению во время цикла сварки. Измельчение зерна в результате отжига сварного соединения на месте полосы ячеистой структуры свидетельствует о том, что деформирование титана происходило в  $\alpha$ -фазе. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что максимальная температура металла внутри полосы ячеистой структуры во время образования сварного соединения не превышала 882 °С, однако следует учитывать, что отсутствие  $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращения может быть связано с малой продолжительностью существования высоких температур. С другой стороны отсутствие структурных изменений, характерных  $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращению, ставит под сомнение возможность расплавления металла полосы ячеистой структуры.

При изучении волнообразного соединения (рис. 1, б) были рассмотрены структурные изменения, происходящие в характерных его участках. Металл вершин волн 1, сопрягающихся с впадинами противоположной поверхности, имеет структуру, идентичную ячеистой структуре, наблюдаемой в безволновом соединении, и также окружён металлом со следами пластического течения. Повышение режимов сварки приводит к увеличению толщины полосы ячеистой структуры и большей степени рекристаллизации в ней. Отжиг соединения здесь также приводит к измельчению зерна титана, деформированного в  $\alpha$ -фазе.

Наибольшие структурные изменения претерпевает металл вихревых зон 2, располагающихся на скатах волн. Они состоят из вытянутых от их центра к периферии зёрен с мелкопластинчатой внутризёрненной структурой, которая свидетельствует о протекании  $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращения. Расположение вытянутых зёрен указывает на направление теплоотвода при остывании металла сварного соединения после процесса сварки взрывом. Отжиг соединения при температуре до 850 °С не изменяет существенно структуру металла вихревых зон. Таким образом, наружную поверхность вихревых зон можно считать изотермой температуры фазовой перекристаллизации, которая равна 882 °С.

Вихревые зоны окружает зона рекристаллизованного металла 3, структура которого представлена наиболее крупным зерном  $\alpha$ -фазы титана, размер которого всё же меньше,

чем в исходном металле. Зона рекристаллизованного металла окружена металлом со следами пластического течения, пересекающегося сетью линий сдвига и переходных полос. Отжиг соединения в интервале температур 450–800 °С показал, что нагрев соединения до температуры 550–600 °С приводит к рекристаллизации металла в этой зоне. Это даёт основание считать, что в процессе остывания сварного соединения металл на границе между зоной рекристаллизации и зоной металла со следами пластического течения 4 нагревался до такой же температуры. Таким образом, по границе между этими зонами располагается изотерма 550–600 °С.

На основании сделанных выводов можно построить примерную карту температурных полей волнообразного соединения (рис. 2). Изотермы на этой карте соответствуют максимальной температуре, до которой нагревается металл за момент времени от соударения до остывания соединения.

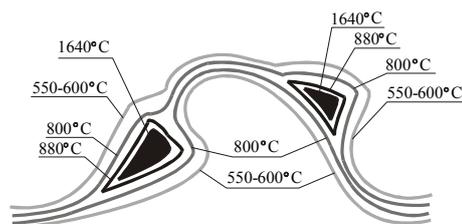


Рис. 2. Примерная карта температурных полей сварного волнообразного соединения, полученного сваркой взрывом

Правильность оценки изотерм и их расположения можно проверить расчётным путём. Решение уравнения теплопроводности для мгновенного линейного источника тепла, который расположен, согласно приведённым выше рассуждениям, в центре вихревой зоны, имеет следующее выражение для определения температуры в зависимости от времени  $\tau$  на расстоянии  $r$  от центра линейного источника

$$T(r, \tau) = \frac{Q}{4\pi\lambda\tau} e^{-\frac{r^2}{4f\tau}}; \quad (1)$$

где,  $Q$  – энергия линейного источника, отнесённая к единице длины, в Дж/м;  $\lambda$  и  $f$  – теплопроводность и температуропроводность, в Вт/(м град) и  $m^2/c$  соответственно. Из формулы (1) можно определить время  $\tau_{\max}$ , за которое на расстоянии  $r_0$  от центра источника (центра вихревой зоны) температура достигает максимума. Исходя из условия  $dT(r, \tau)/d\tau=0$  находим

$$\tau_{\max} = \frac{r^2}{4f}. \quad (2)$$

Учитывая, что  $f = \lambda / c\rho$ , где  $c$  и  $\rho$  – теплопроводность и плотность металла, из (1) и (2) получим

$$T_{\max(r)} = \frac{Q}{\pi r^2 c e \rho}. \quad (3)$$

Из (3) можно отыскать энергию мгновенного источника  $Q$ , позволяющую на расстоянии  $r_i$  от его оси прогреть металл до температуры  $T_{\max 0}$

$$Q = T_{\max 0} r_i^2 \pi c e \rho. \quad (4)$$

Тогда площадь металла внутри изотермы с температурой  $T_{\max 0}$ , которая при линейном источнике представляет собой окружность, будет равна

$$S_i = \frac{\pi r_i^2}{4} = \frac{Q}{4 T_{\max i} c e \rho}, \quad (5)$$

а отношение площадей внутри изотерм с температурами  $T_{\max 0}$  и  $T_{\max i}$  будет равно

$$\frac{S_i}{S_0} = \frac{T_{\max 0}}{T_{\max i}}. \quad (6)$$

Используя зависимость (6) можно оценить размер различных зон сварного соединения по размеру и температуре на изотермической границе какой-либо известной зоны. На полученной карте температурных полей, представленной на рисунке 4, наиболее достоверно определена температура на границе между зонами рекристаллизации и пластической деформации, так как рекристаллизация проходит в этой зоне после окончания высокоскоростной деформации и действия импульсных нагрузок, а температура изотермы, окружающей зону рекристаллизации, определялась по началу процесса рекристаллизации зёрен деформированной зоны титана, располагающихся на границе между зонами рекристаллизации и пластической деформации, при отжиге сварного соединения и составляет 550–600 °С.

Для проверки предложенной методики провели оценку её адекватности посредством измерения на металлографических шлифах сварных соединений титан+титан площади зон рекристаллизации и перекристаллизации и сравнения площади зон перекристаллизации с расчётными площадями этих зон, полученными по формуле (6). Из представленных

в таблице 1 результатов видно, что расчётная зона перекристаллизации в 1,8–2,0 раз больше реально существующих зон. Однако такое несоответствие вполне естественно и объяснимо, так как предложенная методика не учитывает теплоты фазового превращения, времени пребывания металла при указанных температурах и скорости фазового  $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращения. Большая локальность зоны нагрева и большая скорость охлаждения за счёт теплоотвода в холодный окружающий металл не позволяет всему металлу, находящемуся внутри расчётной изотермы температуры фазового перехода, претерпеть  $\alpha \leftrightarrow \beta$ -превращение. Таким образом, предложенная методика позволяет оценить температурный режим сварки взрывом.

Таблица 1

Экспериментальные и расчётные площади зон рекристаллизации, перекристаллизации и расплава

П л о щ а д ь з о н , ( $S \times 10^8 \text{ м}^2$ )			
Эксперимент		Расчёт	
рекристаллизации	перекристаллизации	перекристаллизации	расплава
2,5495	0,8162	1,5906	0,8555
3,6114	1,0988	2,2531	1,2118
14,4490	5,2387	9,0148	4,8482
0,0054	0,0025	0,0048	0,0024
0,0033	0,0012	0,0025	0,0018

Разработанную методику можно использовать для оценки энергии, затраченной для образования того или иного сварного соединения. Известно, что 95 % энергии, затраченной на пластическую деформацию металла, переходит в тепло. Процесс распространения тепла в плоском сварном соединении (см. рисунок 1, а) можно оценить по уравнению для мгновенного плоского источника [4]

$$T(x, t) = \frac{Q_1}{2c\rho\sqrt{\pi f t}} e^{-\frac{x^2}{4ft}}, \quad (7)$$

где  $Q_1$  – интенсивность мгновенного плоского источника тепла. Тогда время  $\tau_{\max}$ , за которое на расстоянии  $x$  от плоского источника температура достигнет максимальной величины можно определить как

$$\tau_{\max} = \frac{x^2}{2f}, \quad (8)$$

## К ВОПРОСУ О ТЕМПЕРАТУРНОМ РЕЖИМЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

а уравнение изотерм максимальных температур будет выглядеть следующим образом

$$T_{\max}(x) = \frac{Q_1}{c\rho x\sqrt{2\pi e}}. \quad (9)$$

Положение той или иной изотермы (координату  $x$ ) можно определить путём исследования металлографических шлифов. Граница раздела свариваемых поверхностей при безволновом характере сварного соединения представляет собой, как было показано выше, полосу мелкозернистой структуры (см. рис. 1, а), внешние границы которой соответствуют изотерме 550–600 °С. Ширина этой полосы с увеличением энергии пластической деформации растёт от 0,010 до 0,025 мм. Тогда из (9) с учётом экспериментальной поправки, определённой выше, можно определить, что интенсивность мгновенного плоского источника тепла  $Q_1$  для такого вида сварного соединения должна составлять 70–170 кДж/м<sup>2</sup>. Этот результат хорошо согласуется с данными работы [5]. В ней предлагается оценивать критическую энергию схватывания  $W_{\text{сх}}$  как

$$W_{\text{сх}} = c_v \rho A \left[ \frac{Q_a}{R \ln(\nu\tau)} - T_0 \right], \quad (10)$$

где  $c_v$  и  $\rho$  – теплоёмкость металла,  $A$  – толщина нагретой зоны,  $Q_a$  – энергия активации схватывания,  $R$  – газовая постоянная,  $\nu$  – частота колебания атомов ( $10^{13} \text{ с}^{-1}$ ),  $\tau$  – время. Приведённые в работе расчёты показывают, что критическая энергия схватывания для соединения титан+титан составляет 156 кДж/м<sup>2</sup>. В то же время критическая энергия пластической деформации, оцененная по критерию Астрова как

$$W_{2\text{кр}} = 0,606 + 0,184 \ln(\text{HB}/\delta), \quad (11)$$

где  $(\text{HB}/\delta)$  – отношение твёрдости по Бринеллю к предельной пластической деформации металла, составляет 800 кДж/м<sup>2</sup>.

Таким образом, предложенная методика позволяет оценить температурный режим сварки взрывом и энергию, затраченную на образование сварного соединения, по исследованию структуры сварного соединения. С её помощью удалось показать, что при образовании сварного соединения с плоской границей раздела, характерной для нижней границы области сварки, температурное поле имеет стационарный характер. При волнообразном соединении температурное поле имеет сложный характер с максимумами в центре вихревых зон, расположенных на скатах волн, в то время как максимальной степени деформации подвергается металл гребней волн.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бердыченко А.А. Особенности структуры сварного соединения титан+титан, полученного сваркой взрывом в среде воздуха и инертных газов / А.А. Бердыченко // Вестник Томского государственного университета: Общественный периодический журнал. Бюллетень оперативной научной информации. – 2006. – № 65. – С. 35–42.
2. Захаренко И.Д. Тепловые эффекты в зоне соединения при сварке взрывом / И.Д. Захаренко, Т.М.Соболенко // Физика горения и взрыва. – 1971. № 3. – с. 433–436.
3. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С.С.Горелик. – М.: Металлургия, 1978. – 568 с.
4. Рыкалин Н.Н. Расчёт тепловых процессов при сварке: учеб. для вузов / Н.Н. Рыкалин. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1951. – 296 с.
5. Липоватый Б.Н. Энергетические условия, обеспечивающие схватывание металлов при сварке взрывом / Б.Н. Липоватый, В.С. Седых, А.П. Соннов // Сб. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград: Изд. ВолгПИ, 1987. – С. 28–35.