

ЛИТЕРАТУРА

1. Атомные взрывы в мирных целях. Сборник. М., «Атомиздат», 1970.
2. А. Н. Ромашов, Н. Н. Симонов.— В сб.: Взрывное дело, № 64/21. М., «Недра», 1968.
3. В. Н. Родионов и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
4. Механика твердых деформируемых тел. Т. 7. М., ВИНТИ, 1973.

ТОНКАЯ СТРУКТУРА ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ БИМЕТАЛЛА, СВАРЕННОГО ВЗРЫВОМ

М. А. Баранов, Б. Ф. Демьянов, А. Н. Золотарев

(Барнаул)

Все более широкое применение сварки взрывом требует детального исследования областей металла вблизи сварного шва. В процессе соударения свариваемых пластин значительное количество энергии взрыва выделяется в форме тепла. Внутри металла 80—90% тепловой энергии обусловлено переходом в тепло энергии пластической деформации и лишь 10—20% выделяется при упругом сжатии металла при прохождении ударных волн [1]. На границе контакта металлов за счет трения их поверхностей дополнительно выделяется некоторое количество теплоты, что приводит к расплавлению металлов на границе и их сварке.

В работах [2, 3] использовано следующее распределение температуры по объему биметалла в различные моменты времени после сварки взрывом:

$$U(x, t) = \frac{Q}{2c\rho \sqrt{\pi a^2 t}} e^{-x^2/4a^2 t}, \quad (1)$$

где Q — количество тепла, выделившегося в момент времени $t=0$; c — удельная теплоемкость материала; ρ — плотность; a — коэффициент температуропроводности. Расстояние x отсчитывается от границы контакта. При этом начальное распределение температуры взято в виде δ -функции.

Вследствие высокой температуропроводности металлов происходит быстрое выравнивание температур. Через 10^{-4} — 10^{-3} с после сварки взрывом распределение температуры по всему сечению биметалла будет практически равномерно [4, 5]. Однако, как указывается в работе [3], распределение температур в начальный момент времени не имеет вида δ -функции, так как еще необходимо добавить тепло, выделившееся за счет пластической деформации, которая захватывает значительную область вблизи сварного шва. Учитывая это, взято следующее начальное распределение температуры:

$$U(x, 0) = A e^{-x^2/\sigma^2}, \quad (2)$$

где σ — дисперсия.

За счет действия упругих волн тепло выделяется по всему объему равномерно, что приводит к повышению температуры на некоторую величину U_0 . Для удобства примем U_0 за начало отсчета, тогда $U(x, t)$ — температура металла в точке x в момент времени $t-U_0$, $A = T_{пл} - U_0$ ($T_{пл}$ — температура плавления металла).

Можно показать, что даже при краевом условии $(\partial U/\partial x - kU)|_{x=L} = 0$ (k — коэффициент теплоотдачи материала, L — толщина свариваемого листа) решение задачи теплопроводности можно записать в виде

$$U(x, t) = \frac{A\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + 4a^2 t}} e^{-x^2/(\sigma^2 + 4a^2 t)}, \quad (3)$$

что соответствует распределению температуры в бесконечном стержне [6]. Таким образом, распределение (3) остается гауссовым в каждый момент времени.

Параметр σ может быть определен из условия сохранения количества теплоты q в начальный момент времени

$$c\rho \int_{-\infty}^{+\infty} U(x, 0) dx = q. \quad (4)$$

Отсюда $\sigma = q/\sqrt{\pi c\rho}$. Здесь ρ — плотность; C — теплоемкость образца металла объемом $V=L$. Оценка показала, что время растекания температуры составляет около 10^{-2} с.

Таким образом, в процессе сварки взрывом металл подвергается лишь кратковременному воздействию температур, близких (и даже равных) температуре плавления.

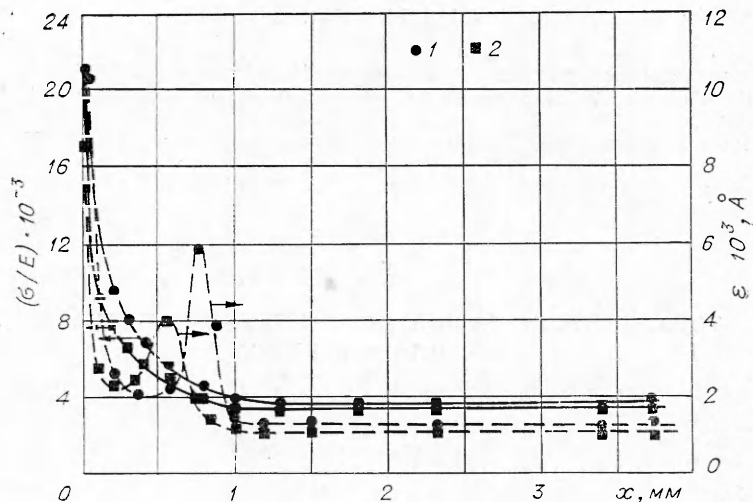


Рис. 1. Зависимость микронапряжений σ/E и размеров субзерен ϵ в Бр. АМЦ9-2 от расстояния x до сварного шва в биметалле.
1 — Бр. АМЦ-2+Бр. АМЦ-2; 2 — Бр. АМЦ9-2+Ст. 08 кп.

Сколько-либо значительное развитие таких термически активируемых процессов, как рекристаллизация, полигонизация, возврат, за этот промежуток времени невозможно.

В работе исследовались образцы биметаллов Бр. АМЦ9-2+Бр. АМЦ9-2 и Бр. АМЦ9-2+Ст. 0,8 кп, полученных сваркой взрывом с параметром $r=1,5$. Толщина свариваемых пластин бронзы и стали $L=4$ мм. Микроструктура исследовалась методом угольных реплик на электронном микроскопе УЭМВ-100 К. Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре ДРОН-2,0 методом послойной съемки.

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости размера субзерен и микронапряжений в бронзе от расстояния до границы сварки. Кривая изменения размеров субзерен имеет два максимума, причем при приближении к границе сварки размер субзерен возрастает. Для $x > 1$ мм в биметаллах Бр. АМЦ9-2+Бр. АМЦ9-2 и Бр. АМЦ9-2+Ст. 0,8 кп величина субзерен остается постоянной и равной 1100 \AA , что несколько выше их величины (800 \AA) в образце, находящемся в исходном состоянии. Микронапряжения также имеют постоянную величину $\sigma/E \approx 4 \cdot 10^{-3}$, однако их значения приблизительно втрое выше исходного. Образование такой субструктуры говорит о деформации металла в этой области только посредством прохождения ударных волн.

В области $x < 1$ мм. наряду с действием ударных волн, деформация осуществляется также посредством пластического течения. Об этом свидетельствует возрастание микронапряжений второго рода и изменение величины субзерен. Факт увеличения размеров субзерен говорит о том, что наряду с пластической деформацией металл подвергался температурному воздействию, что характерно при сварке взрывом.

Возрастание микронапряжений происходит постепенно вплоть до границы сварного шва до значения $\sigma/E = 21 \cdot 10^{-3}$ для пары Бр. АМЦ9-2+Бр. АМЦ9-2 и $\sigma/E = 17 \cdot 10^{-3}$ для Бр. АМЦ9-2+Ст. 0,8 кп. Вследствие более сильной способности бронзы к упругим микронапряжениям в области $x < 1$ мм в биметалле, полученном при соударении бронзы с бронзой, значительно выше, чем в биметалле, полученном при соударении бронзы со сталью.

На кривой размера субзерен (см. рис. 1) наблюдаются два четко выраженных максимума. Первый, непосредственно у границы контакта, можно объяснить тем, что здесь прошел процесс рекристаллизации. Это подтверждается и структурой бронзы (рис. 2). Размер зоны рекристаллизации ≈ 6 мкм. Рекристаллизованное зерно равноосно и имеет размеры $0,03 \times 0,15$ мкм.

Характерная деталь рекристаллизованной зоны — резкая граница с остальной частью металла. По-видимому, в первые моменты после взрыва, когда металл нагрет в узкой области около границы до высокой температуры, происходит быстрое зародышеобразование. Скорость образования зародышей рекристаллизации стимулируется высокой скоростью и степенью пластической деформации [7], а также тем, что для бронзы характерно образование в процессе пластической деформации избытка дислокаций одного знака, приводящего к большим искажениям кристаллической решетки. Деформация вблизи зоны контакта носит турбулентный характер, это и обуславливает высокую плотность зародышей рекристаллизации и образование мелкозернистой структуры. Вследствие быстрого выравнивания температуры сам процесс рекристаллизации происходит уже при сравнительно низких температурах, достаточных для протекания

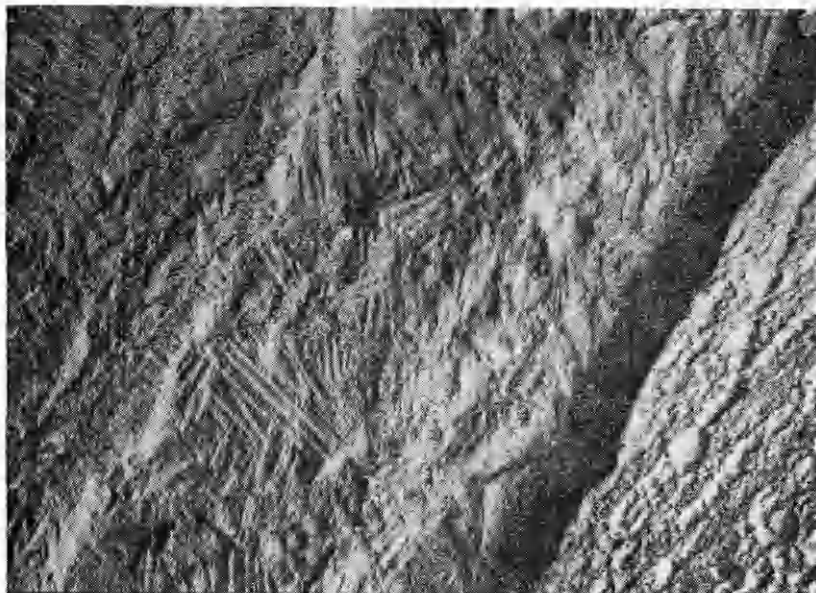


Рис. 2. Зона рекристаллизации в Бр. АМЦ9-2. $\times 8800$.

процесса роста зародышей, но недостаточных для образования их в других областях металла. Это приводит к появлению резкой границы.

Начало рекристаллизации сплавов на медной основе после большой степени деформации ($\sim 70\%$) может происходить уже при 180°C [7]. Средний размер субзерен в зоне рекристаллизации равен 7500 и 10 5000 Å для биметаллов Бр. АМЦ9-2+Ст. 08 кп и Бр. АМЦ9-2+Бр. АМЦ9-2 соответственно. За зоной рекристаллизации расположена область, где прошел процесс полигонизации. Субзерна имеют размер в обоих биметаллах ~ 2000 Å.

Второй максимум в области начала пластической деформации может быть связан с рекристаллизацией «на месте». Такой рост может происходить при температурах, меньших температур начала рекристаллизации. В медных сплавах с низким значением энергии дефекта упаковки всегда образуется избыток дислокаций одного знака, и рекристаллизация «на месте» может происходить только при малых степенях деформации. С увеличением пластической деформации избыток дислокаций одного знака растет, разориентировка субзерен увеличивается, рост их прекращается [7]. В [4] в меди, сваренной взрывом, также наблюдается рост субзерен в основании волны, где степень деформации наименьшая.

Максимумы, соответствующие рекристаллизации «на месте» на кривых $\epsilon(x)$ для биметаллов Бр. АМЦ9-2+Бр. АМЦ9-2 и Бр. АМЦ9-2+Ст. 08 кп, находятся на различном расстоянии от границы контакта, размер субзерен достигает 6000 и 4000 Å соответственно. Эти различия показывают значительную зависимость структуры биметалла от свойств свариваемых пар металлов при прочих равных условиях.

Слабое снятие упрочнения, обусловленное ростом субзерен [8], объясняет тот факт, что на кривой микронапряжений в точке, соответствующей рекристаллизации «на месте», эта зона не обнаруживается.

Поступила в редакцию
7/VIII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Металловедение и прочность материалов.— Тр. Волгоградского политехн. ин-та. Т. IV. Волгоград, 1971, с. 201.
2. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
3. И. Д. Захаренко. ФГВ, 1971, 7, 2, 269.
4. W. Lucas. J. of the Institute of metals, 1971, 99, 335.
5. И. Д. Захаренко, Т. М. Соболенко. ФГВ, 1971, 7, 3, 433.
6. В. С. Владимиров. Уравнения математической физики. М., «Наука», 1977.
7. С. С. Горелик. Рекристаллизация металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1967.
8. М. Л. Бернштейн. Структура деформированных металлов. М., «Металлургия», 1977.