



при нагреве до 1073 К железа, содержащего ^{14}C , находящегося в контакте с медью, углерод проникает в медь на глубину приблизительно 80...90 мкм (рис. 2, а), его концентрация составляет около 1 %. При этом следует учитывать, что одновременно в медь мигрируют атомы железа. Это, безусловно, способствует растворению углерода в медной матрице, как это происходило в некоторых случаях в стационарных изотермических условиях [7, 8]. Для исключения влияния указанного фактора схема эксперимента была изменена таким образом, чтобы медь и углерод взаимодействовали в чистом виде. Одним из способов введения углерода в медь является обработка меди в метане, меченом ^{14}C в тлеющем разряде. Последующее импульсное нагружение с $\dot{\epsilon} \approx 1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ при температуре 373...673 К приводит к перераспределению атомов углерода и переносу их на глубину около 200 мкм (рис. 2, б). При этом концентрация углерода в приповерхностных слоях меди доходила до 5 %. Повышение скорости деформации до $(3 \dots 7) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ в случае сварки взрывом способствует проникновению углерода в медь на еще большую глубину, составляющую приблизительно 400 мкм (рис. 2, в). Следует отметить, что проникновение углерода в медь происходило в процессе нагружения при непосредственном контакте графита, содержащего ^{14}C , с медью.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показал, что с увеличением скорости деформации углерод, подобно элементам, имеющим взаимную растворимость, проникает в медь на все большую глубину. Причем повышение температуры от комнатной до 400 °С при скорости деформации $1 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ и выше практически не влияет на протяженность зоны массопереноса. При более низких скоростях пластической деформации с повышением температуры, при которой осуществляется импульсная сварка давлением, несколько увеличивается глубина проникновения и скорость миграции углерода в медь.

Дальнейшая обработка полученных соединений показала, что при последующей деформации без нагрева происходит перераспределение растворенных галлия и углерода, а также увеличение общей глубины их проникновения. Однако повышение

температуры в процессе изотермического нагрева или статического деформирования способствует выходу исследуемых элементов из твердого раствора. При этом возникают интерметаллические соединения меди с галлием и появляется прослойка графита.

Таким образом, импульсная деформация в процессе сварки давлением приводит к растворению в меди тех элементов, которые не взаимодействовали с ней в равновесных условиях. Но поскольку образующиеся твердые растворы являются метастабильными, при последующей обработке происходит их распад, в результате чего фазовый состав металла шва приходит в соответствие с диаграммой состояний.

1. *Особливості* фазоутворення при взаємодії металів під впливом імпульсних навантажень / В. В. Арсениук, Д. С. Герцирик, В. Ф. Мазанко и др. // Метал. і оброб. матер. — 1997. — № 2. — С. 21–25.
2. *Міграція* атомів в метастабільному твердому розчині залізо–аргон / В. В. Арсениук, Д. С. Герцирик, В. Ф. Мазанко та ін. // Доп. НАНУ. — 1997. — № 8. — С. 108–112.
3. *Особенности* массопереноса при сварке железа–армко в твердом состоянии / Л. Н. Лариков, В. М. Фальченко, В. Ф. Мазанко и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 5. — С. 19–21.
4. *О механизме* влияния импульсного магнитного поля на подвижность атомов в железе и алюминии / Л. Н. Лариков, В. М. Фальченко, Д. С. Герцирик и др. // Докл. АН СССР. — 1978. — 239, № 2. — С. 312–314.
5. *Кудинов В. М., Коротеев А. Я.* Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 266 с.
6. *Двойные* и многокомпонентные системы на основе меди / М. Е. Дриц, Н. Р. Бочвар, Л. С. Гузей и др. — М.: Наука, 1979. — 248 с.
7. *Гегузин Я. Е.* Диффузионная зона. — М.: Наука, 1979. — 344 с.
8. *Особенности* фазообразования при импульсном воздействии / А. М. Гусак, В. Ф. Мазанко, Н. А. Томашевский и др. // Металлофизика. — 1992. — 14, № 3. — С. 33–36.

The paper considers copper interaction with hallium and carbon under the conditions of vacuum percussion, magnetic-pulse and explosion welding. Formation of solid solutions in mass transfer zone is noted. Dependences of dissolved element concentration and its penetration depth on temperature, deformation rate and welding process are determined.

Поступила в редакцию 22.03.2001,
в окончательном варианте 31.05.2001

УДК 621.791.624.046.5

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАТОРА И ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ

В. А. БРОДОВОЙ, инж., О. И. ГУЩА, д-р техн. наук, А. З. КУЗЬМЕНКО, инж., П. П. МИХЕЕВ, д-р техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Экспериментально показано, что в результате взаимодействия остаточных напряжений, которые возникают под влиянием циклического нагружения в зонах концентратора и трещины усталости, с напряжениями, наводимыми упрочняющими обработками, формируется результирующее поле остаточных напряжений, которое может существенно отличаться от первоначального.

Ключевые слова: остаточные напряжения, концентрация напряжений, сопротивление усталости, усталостная трещина, упрочняющая обработка

Для повышения циклической прочности сварных соединений применяют различные способы упрочнения. Весьма эффективными являются способы, основанные на наведении в зоне концентратора остаточных напряжений сжатия [1]. Эти напряжения взаимодействуют со сварочными остаточными напряжениями, а также с возникающими под влиянием циклического нагружения в зонах концентратора и усталостной трещины. В результате формируется новое поле остаточных напряжений, которое может существенно отличаться от его первоначально составляющих по знаку, уровню и характеру распределения компонент напряже-

ния. При циклическом нагружении эти остаточные напряжения в свою очередь претерпевают изменения и перераспределяются.

Таким образом, при оценке влияния остаточных напряжений на процессы зарождения и распространения усталостного разрушения возникает необходимость учитывать взаимодействие и кинетику этих напряжений.

В настоящей работе рассмотрено взаимодействие остаточных напряжений в зонах концентратора и трещины усталости с остаточными напряжениями сжатия, наводимыми дополнительно высокочастотной проковкой и точечным нагревом, а также их кинетику под влиянием внешнего циклического нагружения.

Образец из стали СтЗсп размерами 14×160×240 мм с концентраторами в виде боковых выкружек (рис.1) нагружали осевым отнудевым циклическим сжатием. Теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 2,48$. Максимальные напряжения номинального цикла нагружения составляли

© В. А. Бродовой, О. И. Гуца, А. З. Кузьменко, П. П. Михеев, 2001

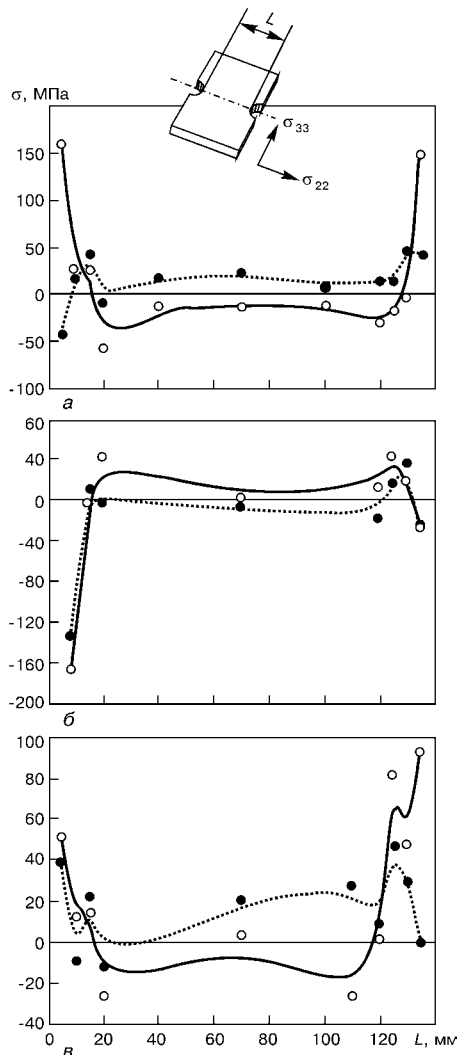


Рис. 1. Эпюры остаточных напряжений в образце СтЗсп с концентраторами $\alpha_{\sigma} = 2,48$: *a* — после 10 циклов нагружения циклическим сжатием; *б* — после высокочастотной проковки зоны концентраторов; *в* — после 10 циклов повторного нагружения сжатием; здесь и на рис. 2 ● — σ_{22} ; ○ — σ_{33}

-120 МПа. Остаточные напряжения σ измеряли неразрушающим акустическим методом [2].

Уровень остаточных напряжений в зоне концентратора стабилизируется после первых нескольких циклов нагружения [3]. Поэтому были зафиксированы напряжения, образовавшиеся после 10 циклов нагружения (рис. 1, *a*). Как видно из рисунка, под влиянием циклического сжатия в зонах концентраторов возникло двухосное поле растягивающих остаточных напряжений (σ_{22} — поперечные и σ_{33} — продольные), максимальное значение которых достигает 150 МПа. Затем образец в выкружках был поочередно обработан высокочастотной проковкой. Под ее воздействием в зонах концентраторов были сняты растягивающие и сформированы двухосные остаточные напряжения сжатия (рис. 1, *б*), максимальные значения которых превышали -160 МПа. Некоторое различие в измеренных значениях напряжений у различных кромок образца можно объяснить очередностью обработки концентраторов.

Образец повторно нагружали циклическим сжатием. С учетом упрочняющего влияния предыдущего нагружения образца максимальное напряжение номинального цикла нагружения было установлено несколько выше предыдущего и составило -125 МПа. После повторных 10 циклов нагружения сжатием в зонах концентраторов опять возникло поле двухосных растягивающих остаточных напряжений. Максимальное их значение достигало 90 МПа.

Другой аналогичный образец нагружали пульсирующим сжатием с $\sigma_{\min} = -125$ МПа. После 10 циклов в зонах концентраторов зафиксировано поле двухосных остаточных напряжений

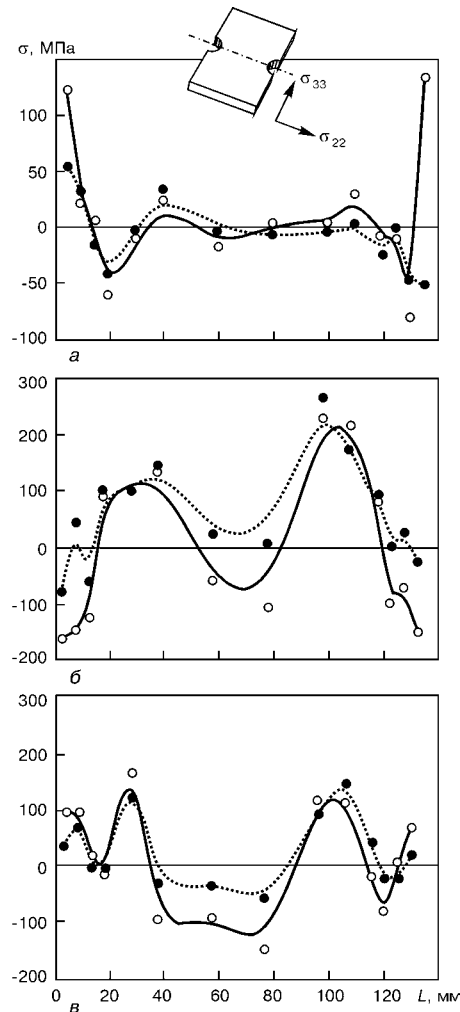


Рис. 2. Эпюры остаточных напряжений в образце СтЗсп: *a* — после 10 циклов нагружения пульсирующим сжатием; *б* — после обработки точечным нагревом; *в* — после 10 циклов повторного нагружения сжатием

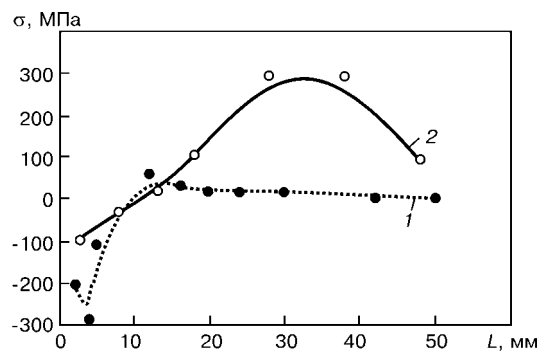


Рис. 3. Кинетика продольной компоненты остаточных напряжений в зоне трещины: 1 — образец с трещиной в исходном состоянии; 2 — после точечного нагрева

растяжения (рис. 2, *a*), максимальный уровень которых составлял 125... 130 МПа.

Затем образец подвергли обработке точечным нагревом. Точки нагрева располагали на расстоянии 35 мм от края каждого концентратора. Образец нагревали сначала с одной стороны, а после полного охлаждения — с другой. Под влиянием обработки уровень и распределение остаточных напряжений существенно изменились (рис. 2, *б*). В зонах концентраторов сформировались двухосные сжимающие напряжения с максимальными значениями -160 МПа. В зонах нагрева возникли остаточные напряжения растяжения, максимальный уровень которых достигает предела текучести стали.

После 10 циклов повторного нагружения циклическим сжатием в зонах концентраторов снова сформировались остаточные напряжения растяжения (рис. 2, *в*). Максимальные их зна-



чения составляли 70... 100 МПа. Несколько уменьшился уровень напряжений в точках нагрева.

С возникновением трещины усталости в зоне ее вершины формируется поле остаточных напряжений. На рис. 3 представлены эпюры остаточных напряжений, возникших в зоне усталостной трещины и после точечного нагрева образца. Образец из стали СтЗсп размерами 12×250×700 мм имел в центре концентратор в виде сквозного отверстия с надрезами, инициировавшими возникновение трещины усталости. Образец нагружали отнулевым циклическим растяжением на машине ЦДМ-200Пу. В зоне трещины усталости максимальные остаточные напряжения сжатия первоначально достигали предела текучести стали. После обработки точечным нагревом сжимающие напряжения у вершины трещины уменьшились до -100 МПа.

Таким образом, остаточные напряжения, возникающие под влиянием циклического нагружения в зонах концентраторов и трещины усталости, взаимодействуют с напряжениями, искусственно наводимыми способами упрочняющей обработки. Такое

взаимодействие зафиксировано как на стадии зарождения усталостного разрушения, так и после возникновения трещины усталости. Формируются результирующие поля остаточных напряжений, которые во многом определяют сопротивление материалов и сварных соединений зарождению и распространению усталостных трещин.

1. *Trufiakov V. I., Mikheev P. P., Kudryavtsev Yu. F.* Fatigue strength of welded structures. Residual stresses and strengthening treatments // *Welding and Surfacing*. — 1995. — Vol. 3. — P. 1–100.
2. *Гуца О. И., Махорт Ф. Г.* Акустический способ определения двусосных остаточных напряжений // *Приклад. механика*. — 1976. — № 10. — С. 32–36.
3. *Бродовой В. А., Михеев П. П., Гуца О. И.* Некоторые закономерности формирования остаточных напряжений в зонах концентратора и трещины усталости при циклическом нагружении // *Автомат. сварка*. — 2001. — № 2. — С. 9–12.

It has been experimentally demonstrated that interaction of residual stresses in the concentrator zones and fatigue cracks due to cyclic loading with stresses, induced by strengthening treatment results in formation of a residual stress field that differs essentially from the initial one.

Поступила в редакцию 17.05.2001,
в окончательном варианте 06.07.2001

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

В. Ю. Орловский (ИЭС) защитил 4 июля 2001 г. кандидатскую диссертацию на тему «Исследование термодинамики и кинетики растворения азота в жидких высокорекрационных и тугоплавких металлах при высоких температурах».

В работе по собственным экспериментальным данным рассчитаны основные термодинамические константы, характеризующие процесс растворения азота в жидких металлах IVA и VA групп, выведены обобщающие зависимости теплоты смешения. Получены численные значения параметров взаимодействия азот-азот для чистых ванадия и ниобия и обобщающие зависимости коэффициента активности азота от содержания легирующих эле-

ментов и определены численные значения параметров взаимодействия азота первого, второго и третьего порядков и их температурные зависимости. Диссертантом изучена кинетика взаимодействия азота с жидкими высокорекрационными металлами. Определены значения константы скорости химико-абсорбционного процесса K_B химических реакций растворения азота в жидких ванадии, ниобии, цирконии и титане.

Полученные основные термодинамические величины вносят определенный вклад в теорию металлургических процессов и могут быть использованы для определения параметров газового режима в процессах специальной электрометаллургии при легировании металла азотом из газовой фазы и дегазации металла.

УДК 621.791(688.8)

ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Устройство колебания токоподводного мунштука при наплавке цилиндрических заготовок, отличающееся тем, что оно оснащено направляющей рейкой, на которой подвижно установлен корпус с мунштуком, а привод выполнен в виде кривошипно-шатунного механизма, шатун которого соединен с указанным корпусом. Патент Украины 32631. В. А. Неведомский, С. Н. Шилиук (Новокраматорский машзавод) [1].

Способ получения гранул из расплавов и устройство для его осуществления, отличающийся тем, что перед подачей расплава в формообразующие емкости, ток расплава разделяется на заданные дозы, каждая из которых подается в соответствующую формообразующую емкость. Патент Украины 32649. П. А. Чакин, Е. В. Родин, Б. М. Климовский [1].

Устройство для лазерной обработки материалов, отличающееся тем, что оно снабжено патрубком с кварцевым иллюминатором, смонтированным в корпусе над отражателем, зеркалом, закрепленным в корпусе с возможностью его перемещения, при этом отверстие выполнено в торце отражателя, его ось пересекает оптическую ось отражателя в его рабочем фокусе, а патрубок с

кварцевым иллюминатором и зеркало установлены с возможностью направления лазерного луча в упомянутое отверстие. Патент РФ 2165830. Э. Б. Гусев, М. И. Опарин, Б. П. Салтыков (Россия), А. Клаус (Германия) [12].

Способ плазменной наплавки, отличающийся тем, что параметры импульса тока выбирают из условия осуществления в период этого импульса ускоренного нагрева расплава на заданной ширине разделки и вытеснения его к периферии образуемой сварочной ванны, а в период паузы тока — удержания и ускоренного охлаждения расплавленного металла в разделке, при этом расход плазмообразующего газа в периоды импульса и паузы тока поддерживают постоянным. Патент РФ 2165831. С. Р. Аманов (ОАО «Автоваз») [12].

Механизм импульсной подачи сварочной проволоки, отличающийся тем, что в него введены, по меньшей мере, одна ось вращения каждого якоря, на котором закреплен соответствующий зажим для проволоки, при этом якорь установлен с возможностью колебаний относительно оси, выполнен в виде магнита, расположенного в зоне действия магнитных полей соответствующего формирователя магнитного поля, и жестко связан с соответствующим упругим элементом, в формирователь магнитного поля выполнен в виде кольца с полюсными высту-

*Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетенях Украины «Промислова власність» (2001, № 1), РФ «Изобретения. Полезные модели» (2001, № 12–17). В квадратных скобках указан номер бюллетеня.