



ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ, ОБРАБОТАННЫХ ВЗРЫВОМ

В. Г. ПЕТУШКОВ, д-р техн. наук, **В. А. ТИТОВ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе подхода с позиций упругопластической теории рассмотрены общие принципы формирования остаточных напряжений и деформаций в сварных соединениях в результате локальной обработки взрывом. Даны рекомендации по оптимизации режимов взрывного нагружения. Показано, что результаты обработки не зависят от наличия и величины исходных остаточных напряжений в сваренном металле.

Ключевые слова: обработка взрывом, остаточные сварочные напряжения, релаксация напряжений, диаграмма деформирования, ударная адиабата, ударная волна

Предложенная в работах [1, 2] физическая модель механизма снятия локальной обработкой взрывом остаточных напряжений (ОН) позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные о влиянии такой обработки на несущую способность сварных соединений [3]. В основе этой модели лежит представление о формировании в ближайшей зоне взрыва двухосного напряженно-деформированного следа (НДС), образование которого обусловлено релаксацией касательных напряжений и избирательной деформацией металла за фронтом неоднородных ударно-волновых течений. Количественная оценка в одномерном приближении величины напряжений и деформаций в НДС, в том числе вследствие его так называемой вторичной релаксации [2], а также давлений ударного сжатия, необходимых для создания эффективного НДС с заданными компонентами напряжений, приведена в работах [2, 4, 5]. Снятие ОН объясняется [1, 6] взаимодействием полей напряжений в НДС и остаточных, приводящих к установлению нового состояния равновесия в сварном элементе как целом.

Рассмотрим схематически, пользуясь совмещенной диаграммой $\sigma(\epsilon)$, последовательность событий при взаимодействии НДС с напряженным металлом сварного соединения [7]. Представляет интерес отдельно остановиться на варианте взрывного нагружения, создающем одноосные деформации вдоль оси y , совпадающей с направлением распространения плоской ударной волны, и практически наиболее важном варианте обработки, вызывающем неоднородные волновые течения.

Для простоты рассуждений используем плоский трехстержневой имитатор сварного соединения, в котором средний стержень нагружен исходными ОН растяжения σ_{x1} , уравновешенными ОН сжатия σ_{x2} в крайних стержнях. Фронт ударной волны параллелен плоскости среднего стержня. Исходные ОН и деформации стержней показаны на рис. 1 точками A и B , а удельная потенциальная энергия упругой деформации системы — площадью треугольника OAC .

Нагружение среднего стержня плоской ударной волной с давлением на фронте σ_y ($\sigma_y > 0$ для волны сжатия), удовлетворяющем условию $\sigma_y/\sigma_d > 1 - \nu/(1 - 2\nu)$, где σ_d — динамический предел текучести; ν — коэффициент Пуассона, создает в нем НДС мгновенной интенсивности. При этом стержень переходит в состояние, отображающие точки которого располагаются на отрезке AP_0 (рис. 1). Уравнение его суть $\epsilon = \epsilon_1 = \text{const}$, а ординаты σ_x точек мгновенных состояний определяются величиной давления в волне и ударной адиабатой металла [1]. При $\sigma_x < \sigma_T$ НДС релаксирует с переменной скоростью деформации до равновесного или некоторого промежуточного состояния (например, соответствующего точке F на рис. 1) в течение времени, необходимого для распространения возмущения, внесенного в систему образованием НДС, к крайним стержням.

Приближенная оценка времени релаксации мгновенного НДС до равновесного расстояния [2] может быть сделана, например, на основе известных данных о зависимости скорости подвижных дислокаций от приложенных напряжений. Скорость подвижных дислокаций V в кристаллах сплава Fe + 3,25 % Si с ОЦК решеткой при напряжении сдвига около 150 МПа сос-

тавляет $4 \cdot 10^{-2}$ см/с [8]. Задав типичные значения вектора Бюргера $b \approx 2,5 \cdot 10^{-8}$ см и плотности подвижных дислокаций (верхняя оценка) $\rho_0 \approx 10^{10}$ см⁻², найдем, что в процессе релаксации мгновенного НДС можно ожидать реализации скорости деформации $\dot{\gamma} = \rho b V \approx 10$ с⁻¹, которой соответствует коэффициент динамической вязкости $\mu_\sigma \approx 10^6$ Па·с [9], а следовательно, характерное время релаксации НДС равно примерно $\mu_\sigma/E \approx 5$ мкс. Эта оценка является достаточно грубой прежде всего вследствие отсутствия достоверных данных о плотности и скорости подвижных дислокаций. Можно предположить, что для рассматриваемого класса материалов при значительно больших напряжениях $\sigma_x = \sigma_d \approx 3\sigma_T$ характерное время релаксации мгновенного НДС окажется меньшим, по крайней мере, на порядок и, таким образом, составит доли или единицы микросекунд [10].

Поскольку взаимодействие НДС с ОН в ближней и дальней зонах взрыва сварных соединений осуществляется со скоростью упругих волн, т. е. в микросекундном интервале времен, можно ожидать, что, начиная с некоторого момента после образования НДС, процессы его релаксации и уравнивания с полем ОН в сварном соединении происходят одновременно.

Разделив условно эти процессы во времени, можно представить, что с момента начала взаимодействия НДС с полем ОН установление нового равновесия системы отображается совместным деформированием стержней вдоль прямых FD и BA (рис. 1); при этом если в состоянии установившегося равновесия $\sigma(D) \gg \sigma_T$, то процесс релаксации продолжается вдоль прямой DA до точки K , где $\sigma(K) = \sigma_1$. При напряжениях в НДС $\sigma_x \leq \sigma_T$ (например, точка P_0 , которой соответствует $\sigma_x = \sigma_T$ этап вторичной релаксации НДС отсутствует и система приводится

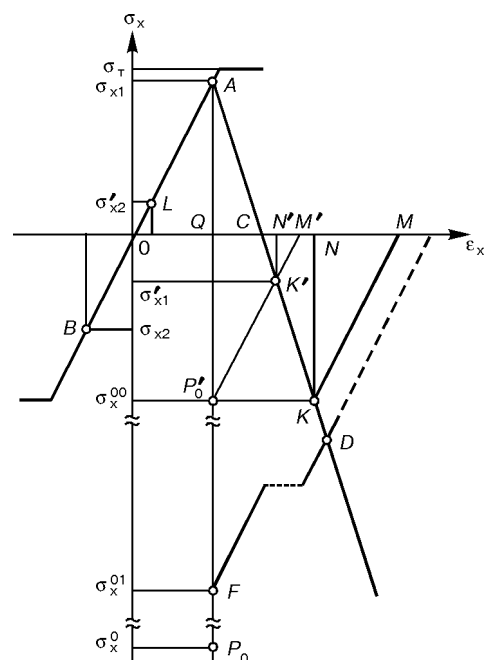


Рис. 1. Взаимодействие НДС, образованного в условиях одноосной деформации при нагружении и разгрузке, с напряженным металлом

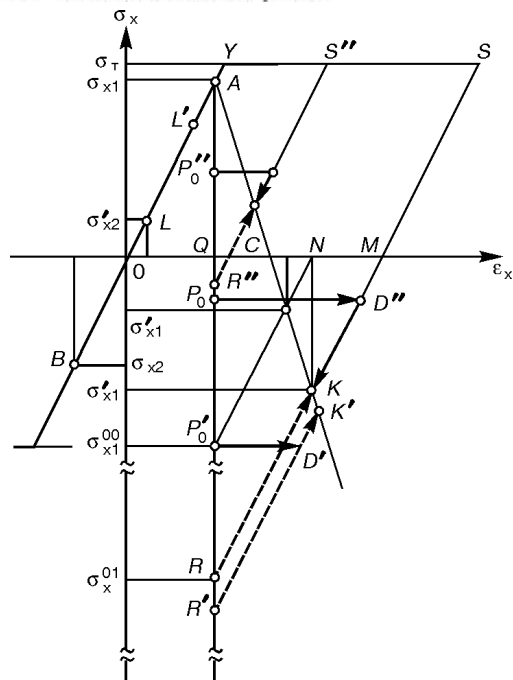


Рис. 2. Взаимодействие эффективного НДС с напряженным металлом (σ_x^{01} — ОН в НДС мгновенной интенсивности)

в новое состояние равновесия путем упругого деформирования соответствующих стержней вдоль траекторий P_0K' и BL с образованием результирующих ОН растяжения σ_{x2} в крайних стержнях и ОН сжатия σ_{x1} в среднем стержне, причем удельная потенциальная энергия системы отобразится площадью треугольника CKM .

В реальных случаях локального взрывного нагружения сварных соединений, создающего в металле неоднородные волновые конфигурации, существенный вклад в эффект перераспределения ОН вносят пластические деформации, возникающие как вследствие релаксации напряжений при формировании НДС, так и обусловленные особенностями поля массовых скоростей за фронтом неоднородных ударных волн, когда появляется возможность пластического течения («растекания») металла в ближней зоне взрыва вдоль и поперек направления распространения детонации [6]. Поэтому состояние металла в образующемся в данном случае следе отображается в зависимости от мгновенной интенсивности НДС, полноты его вторичной релаксации и величины образовавшихся пластических деформаций точками D_i (рис. 2), абсциссы которых $\epsilon(D_i) > \epsilon(A) = \epsilon_x$, а ординаты зависят от интенсивности и геометрии нагружения.

На рис. 2 показаны три частных случая взаимодействия НДС различной интенсивности с ОН в трехстержневом имитаторе сварного соединения: $\sigma_x < \sigma_{x1} < \sigma_\tau$ (точка D''), $\sigma_x < \sigma_\tau$ (точка D) и $\sigma_x > \sigma_\tau$ (точка D'). Когда, например, компонент НДС σ_x , совпадающий с направлением действия ОН растяжения σ_{x1} , меньше σ_τ , а сопутствующая его образованию пластическая деформация равна отрезку P_0D , уравновешивание системы происходит путем деформирования среднего стержня вдоль прямой DK , а крайних — вдоль $L'L$, так что конечным напряжениям и деформациям стержней отвечают точки K и L .

Если использовать представление об эффективном НДС приведенной эффективности $\sigma_x^0 = \alpha' \sigma_\tau$ [2, 7], где α' — коэффициент приведения, то траекториями совместного деформирования стержней в системе будут соответственно RK и BL . В данном случае ОН в стержнях уменьшаются по абсолютной величине и изменяют свои знаки, а потенциальная энергия системы будет пропорциональной треугольнику CKM . Данную ситуацию можно представить и так: средний (растянутый) стержень мгновенно изымается из системы и заменяется другим, имеющим большую длину и находящимся в ином напряженном состоянии [1, 7]. Последнее может изменяться в зависимости от конкретных условий нагружения стержня, но в отличие от исходного этот стержень, как правило, сжат, что в совокупности с его пластическими

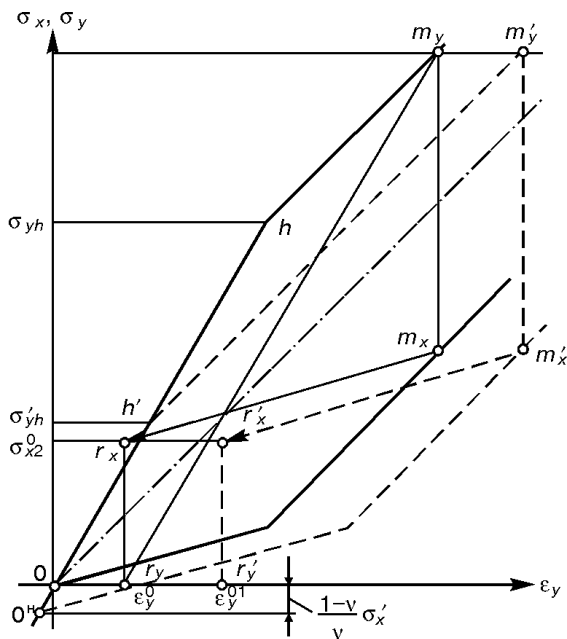


Рис. 3. Построения на ударной адиабате $\sigma - \epsilon_y$, иллюстрирующие влияние ОН на состояние металла в зоне НДС

деформациями и обуславливает полезный эффект снятия ОН обработкой взрывом.

Положим в общем случае $\sigma_x/\sigma_\tau = r' = \alpha' - 1$. Тогда с помощью анализа, сделанного в [7], найдем, что, например, при $r = 1,6$, $f = 2/3$, $k = 0,75$ (f — отношение площадей зон действия исходных ОН растяжения и сжатия; $k = \sigma_{x1}/\sigma_{x2}$) система в целом удлинится примерно на $0,9(\sigma_\tau/E)$, а конечные ОН в системе изменят знаки. Предельное состояние σ_x' не всегда целесообразно. Зачастую бывает достаточно, чтобы конечные значения ОН были близки к нулю, для чего интенсивность нагружения должна удовлетворять условию $r' = fk$ или $\sigma_x^0 = \sigma_{x2}$ (рис. 2). Рассматриваемый процесс полезно также наглядно интерпретировать и таким образом, что под действием взрыва средний стержень только деформируется вдоль траектории $A'YS$, приобретая пластическую деформацию YS . Последующее совместное деформирование стержней происходит вдоль отрезков YL и SK и приводит к тому же конечному напряженному состоянию системы.

Рассмотрим далее, как на величину напряжений и деформаций в НДС влияет наличие исходных ОН. В этом случае уравнения, описывающие упругое поведение металла в координатах σ_x, σ_y , имеют вид [1, 2]

$$\sigma_y = \frac{1-\nu}{\nu} (\sigma_x + \sigma'_x), \quad \sigma_y = \sigma_d + \sigma_x + \sigma'_x. \quad (1)$$

Здесь σ'_x — исходные продольные ОН растяжения, из которых следует, что в момент наступления текучести

$$\sigma_{yh}^n = \sigma_{yh} + \frac{1-\nu}{\nu} \sigma'_x, \quad \sigma_{xh}^n = \sigma_{xh} + \frac{1-\nu}{\nu} \sigma'_x, \quad (2)$$

где σ_{xh}, σ_{yh} — главные напряжения в точке, соответствующей пределу текучести Погонио при отсутствии начальной напряженности; $\sigma_{xh}^n, \sigma_{yh}^n$ — то же при ее наличии.

С учетом соотношений теории ударных волн в металлах [1] для области пластичности можно получить выражения

$$\sigma_y^n = K\epsilon_y \pm \frac{2}{3} \left(\sigma_d - 2\frac{\mu}{\lambda} \sigma'_x \right), \quad \sigma_x^n = K\epsilon_y \mp \frac{1}{3} \left(\sigma_d - 2\frac{\mu}{\lambda} \sigma'_x \right), \quad (3)$$

где K, μ, λ — константы Ламе; σ_x^n, σ_y^n — главные напряжения на фронте волны при наличии в металле исходных ОН.

Если до одинакового давления нагружать металл с исходными ОН и без таковых, то деформация в направлении распространения волны при нагружении изменится на величину $\epsilon_y^n - \epsilon_y = -\sigma'_x/E$, в результате чего остаточная одноосная деформация составит

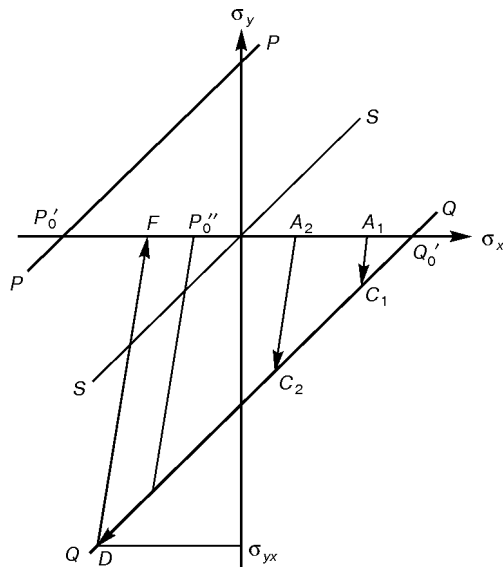


Рис. 4. Траектории отображающих точек напряженного состояния в плоскости главных напряжений для металла с различными ОН, нагруженного плоской ударной волной

$$\epsilon_y^{ост} = \epsilon_y^0 - \sigma'_x / E.$$

Полученные соотношения показывают, что при наличии в металле исходных ОН его поведение при нагружении плоской ударной волной описывается в системе координат, начало которой транслировано в точку O'' (рис. 3), координаты последней суть $\frac{1-\nu}{\nu} \sigma'_x, \frac{\sigma'_x}{E}$.

На рис. 3 показаны построения на ударной адиабате для случаев $\frac{1-\nu}{\nu} \sigma'_x$ и $\sigma_x = 0$.

Используя полученные соотношения, можно показать, что $\sigma_x^{ост} = (\sigma_y / \sigma_{yH}) - \sigma_d = \sigma_x^0$, откуда следует вывод о независимости интенсивности НДС от величины и знака исходных ОН. Наличие последних приводит лишь к изменению мгновенной остаточной деформации (рис. 3), а если принять во внимание существование этапа релаксации НДС ($\epsilon_y^{00} \rightarrow \epsilon_y^{00} + \epsilon_{yH}^{00}$ [2]), то можно заключить, что состояние металла в релаксированном НДС не зависит от его исходного напряженного состояния, если $\sigma_x < 0$ (ОН растяжения) и $0 < \sigma_x < 2\lambda/3K$ (ОН сжатия).

General principles of formation of residual stresses and strains in welded joints as a result of a local explosion treatment are considered from the positions of elastic-plastic theory. Recommendations are given on optimizing conditions of explosion loading. It is shown that results of treatment do not depend on the presence and initial residual stresses in weld metal.

На рис. 4 приведены траектории нагружения металла, имеющего различные ОН, из которого видно, что если давление ударного сжатия σ_y достаточно, чтобы перевести напряженный металл в состояние текучести, его мгновенное состояние будет характеризоваться точкой F , положение которой не зависит от абсциссы точки A_1 . Этот вывод подтверждается результатами экспериментальных исследований напряжений и деформаций металла в зоне НДС [6]. Заметим, что поправка, вносимая вторым членом в формулах (3) для стали Ст3 при $\sigma'_x = 300$ МПа, не превышает $\sim 0,5\%$.

1. Петушков В. Г., Фадеев Ю. И. О взрывной обработке сварных соединений // Физика горения и взрыва. — 1980. — № 5. — С. 64–68.
2. Гришаевко А. И., Петушков В. Г. Остаточное напряженно-деформированное состояние металла после локального взрывного нагружения // Автомат. сварка. — 1996. — № 9. — С. 9–14.
3. Kudinov V. M., Petushkov V. G. Increase of load-carrying capacity of welded metal structures by a local explosion treatment // The 8th Intern. conf. of high energy rate fabrication, San Antonio, June 17–21, 1984 (Book of abstracts). — N. Y.: ASME, 1984. — P. 253–260.
4. Petushkov V. G., Fadeenko Yu. I., Kudinov V. M. Physical mechanism of explosion treatment of welded joints // The 8th Intern. colloquium on gasdynamics of explosions and reactive systems (Minsk, Aug. 24–28, 1981) (Book of abstracts). — Minsk: S.I., 1981. — P. 164.
5. Давыденко А. В., Петушков В. Г. Перераспределение произвольной системы внутренних напряжений в нормально падающей ударной волне // Журн. прикл. механики и техн. физики. — 1983. — № 2. — С. 98–102.
6. Петушков В. Г., Фадеев Ю. И., Кудинов В. М. Снятие остаточных напряжений в сварных швах взрывом // Тр. 11 совещ. по обработке металлов взрывом (Новосибирск, 8–10 сент. 1981 г.). — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1982. — С. 103–105.
7. Петушков В. Г., Пащин А. Н. Оценка эффективности снижения сварочных напряжений приложением внешней нагрузки // Автомат. сварка. — 1975. — № 7. — С. 19–23.
8. Красовский Я. А. Физические основы прочности. — Киев: Наук. думка, 1977. — 144 с.
9. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — 2-е изд., доп. и перераб. — Новосибирск: Наука, 1980. — 222 с.
10. Могилевский М. А. Особенности механизма деформации металлов при нагружении плоской ударной волной: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Новосибирск, 1969. — 25 с.
11. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. — М.: Наука, 1976. — 704 с.

Поступила в редакцию 27.09.2000