

От редакции

25 ноября 1998 года исполнился год со дня внезапной кончины известного ученого, д-ра техн. наук, профессора, академика АТН и МАВШ

Зуева Игоря Васильевича.

До последних дней своей жизни И. В. Зуев являлся главным редактором журнала "Прикладная физика". Он внес большой организаторский и творческий вклад в дело становления и развития журнала. На кафедре технологии металлов МЭИ, которую возглавлял Игорь Васильевич, ученики и аспиранты продолжают развивать его научные идеи и проводить исследования в области прогрессивных способов обработки материалов концентрированными потоками энергии. Публикуемая ниже статья является этому подтверждением.

УДК 621.791.052.539.4.014

СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ КАК ОБЪЕКТ СИНЕРГЕТИКИ

В. Н. Ластовирия, Ю. Б. Бессонова

Московский энергетический институт — Технический университет, Москва, Россия

Рассмотрены основные понятия синергетики и их приложение к процессу сварки плавлением как открытой системе с нелинейными источником и теплопроводностью среды, в которой возникают нестационарные диссипативные тепловые структуры. Сделана попытка связать тепловую эффективность сварки с развитием нагрева в режиме с обострением, обусловленным интенсивностью источника энергии.

Термин "синергетика", введенный Г. Хакеном [1] для обозначения области научных исследований, целью которых является выявление общих закономерностей в процессах образования, устойчивости и разрушения временных и пространственных упорядоченных структур в сложных неравновесных системах, быстро внедрился в научный обиход. В научную среду сварщиков его внес И. В. Зуев [2]. Только привлечением внимания к новому направлению исследований он уже заслуживает глубокой признательности научной обществу. В электронно-лучевой сварке им были введены такие атрибуты объектов синергетики, как положительная обратная связь, автоколебания, локализация тепла, квантовость процесса, диссипативная среда и пр. Это также нашло отражение в учебной литературе [3].

Синергетика — современный этап развития идей кибернетики и системных исследований нелинейных нестационарных процессов, который носит менее формальный и абстрактный характер и углубляет феноменологическую сторону конкретной материальной формы [4]. Если в кибернетике и теории систем изучаются процессы поддержания равновесия системы посредством отрицательной обратной связи, то в синергетике исследуются неравновесные процессы, происходящие вдали от равновесных структур (аттракторов). При этом флуктуации, которые возникают в точках ветвления (бифуркаций) про-

цесса, могут изменить путь эволюции системы и привести ее к качественно другому аттрактору — другой цели эволюции.

С этих позиций синергетика открывает новый стиль мышления (нелинейного мышления) — это стиль мышления постклассической науки, который распространяется на способ видения мира [5]. Классический детерминизм, избегающий случайного, неравновесного и неустойчивого, имеющий дело с обратимыми и предсказуемыми процессами, линейным представлением сложных систем, не может служить базой синергетике. Для этого необходим синтез детерминистского и вероятностного подходов. Динамичность и статичность — вот два уровня развития и самоорганизации системных объектов: уровня системы как целостности и уровня ее элементарного строения (микроуровня).

Объектом синергетики являются открытые нелинейные системы. Открытость означает наличие в ней стоков и источников обмена веществом или энергией с окружающей средой. Причем обмен происходит в каждой точке данной объемной системы (среды). Помимо открытости для самоорганизации и создания неоднородных структур необходимо наличие рассеяния, размывания этих структур. Если преобладает процесс наращивания неоднородностей в среде за счет эффекта локализации, то происходит создание нестационарных, эволюционирующих структур благодаря действию источника энергии. В противном случае преобладает рассеяние, и структур не возникает.

Существенным является нелинейность среды. Наличие нескольких качественно различных решений нелинейных уравнений уже предполагает многовариантность и альтернативность, необратимость развития процессов и, следовательно, несколько путей эволюции системы. Кроме того, следствием нелинейности являются невозможность экстраполяции по времени в силу фазовых переходов и бифуркаций; отсутствие принципа суперпозиции и подобия по масштабу; сильная чувствительность к возмущениям в силу пороговости (квантовости) процесса. В нелинейной системе возможны убыстрение и катастрофичность развития процессов.

Специалисты в области технологии сварки и обработки металлов в основном знакомы с синергетикой только по работам школы И. Пригожина [6, 7], где эволюция системы связывается с бифуркациями при изменении констант среды, т. е. достижением критического значения параметров нелинейных уравнений, потерей устойчивости и возникновением других направлений развития. Однако существует отечественная школа исследователей из ИПМ им. Келдыша, МГУ и МФТИ, которые развивают иное направление в синергетике [5, 6], наиболее активным пропагандистом которого является директор ИПМ С. П. Курдюмов. Данное направление сформировалось в ходе исследований по лазерному термоядерному синтезу и проведения вычислительного эксперимента.

Для сварочных технологий интерес представляет теория так называемых "режимов с обострением" [8, 9] — некоторый тип модельных задач, которые

можно использовать при анализе сложных систем, в том числе процесса формирования провара при сварке. В них рассматривается формирование различных нестационарных диссипативных структур в одной и той же нелинейной среде за счет изменения только характера начального воздействия, как его интенсивности, так и его пространственной конфигурации. В результате действия нелинейного источника происходит локальное изменение состояния среды в режиме с обострением, в режиме сверхбыстрого нарастания процессов, при которых характерные величины (например температура) неограниченно возрастают за конечное время. В реальных процессах этот рост все же ограничен в силу различных причин (например охлаждение за счет испарения), но это не меняет характера развития.

В основе механизма такого развития лежит положительная нелинейная обратная связь. Таким образом, без изменения параметров среды в ней могут возникать разные структуры, как аттракторы, асимптотики, цели разных путей ее эволюции в результате саморазвития процессов в среде [4].

Процесс сварки можно представить в виде единой системы двух объектов: "источник энергии — сварочная ванна" [10].

Источник энергии в виде ее потока (электронный пучок, лазерный луч, плазменная струя, электрическая дуга и др.) при взаимодействии с поверхностью изделия формирует в нем некоторый источник теплоты $Q(T)$. Данный источник является управляющим воздействием для процесса формирования сварочной ванны, перемещение которой образует сварной шов. Результаты сварки, в том числе и форма провара, определяются видом источника тепла $Q(T)$, который зависит не только от типа потока энергии, но и от условий генерации этого потока. Таким образом, в процессе сварки мы имеем свариваемый металл — нелинейную среду, в которой есть только два конкурирующих процесса: это нелинейный источник $Q(T)$, отражающий положительную обратную связь, и диссипативный процесс, нелинейность которого определяется коэффициентом теплопроводности $\lambda(T)$, входящего в коэффициент температуропроводности $k(T)$.

При рассмотрении процесса нагрева в ходе сварки значения этих коэффициентов принимают постоянными, чтобы обеспечить аналитическое решение [11]. Уравнение превращается в линейное, а для его решения используют принцип наложения, который, по сути, является принципом суперпозиции. Рассматриваемая среда становится линейной, при этом теряется возможность возникновения различных нестационарных структур.

Уравнение теплопроводности в одномерном случае при наличии источника с круговой симметрией имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q(T), \quad (1)$$

а с распределением температур в начальный момент времени t_0 :

$$T(r, t_0) = T_0(r). \quad (2)$$

Будем полагать, что температура задана на конечном участке Δr_0 среды, температура остальной среды нулевая, $T = 0$.

Зададим нелинейные функции температуры из (1) в степенном виде:

$$Q(T) = q_0 T^\beta, \quad k(T) = k_0 T^\sigma, \quad q_0, k_0, \sigma > 0, \quad \beta > 1. \quad (3)$$

В результате мы получаем модель тепловых структур [5], которая первоначально представлялась как упрощенная модель ряда процессов в физике плазмы. В нашем случае модель (1) описывает процесс проплавления в неподвижной среде, если полагать, что форма провара определяется изотермой с температурой, равной температуре плавления.

Рассмотрим результат численного решения данного уравнения [9]. На развитой стадии процесса, когда тепла $w(t)$ введено гораздо больше, чем в начальный момент

$$w(t) \gg w_0 = \int_{\Delta r_0} T(r, t_0) dr, \quad (4)$$

влиянием начальных условий можно пренебречь. В этом случае температура будет зависеть только от параметров среды q_0, k_0, σ, β и переменных r, t . Следовательно, решение автомодельное, т. е. будем иметь самоподобное изменение температуры по пространству и времени. Причем возможны три типа автомодельных режима нагрева среды, соответствующих трем видам тепловых структур, возникающих в нелинейной среде и отличающихся законом движения фронта нагрева (плавления) по холодному фону.

Каждый режим сопровождается ростом температуры со временем по закону, в соответствии с которым $T(r, t)$ при некотором значении координаты r неограниченно возрастает за конечное время. Такое развитие называют ростом в режиме с обострением, наступающим с приближением к некоторому моменту времени t_f — моменту обострения. При этом радиус фронта тепловой волны меняется следующим образом:

растет с развитием процесса при $\beta > \sigma + 1$ (HS-режим);

постоянен с развитием процесса при $\beta = \sigma + 1$ (S-режим);

уменьшается с развитием процесса при $\beta < \sigma + 1$ (LS-режим).

Первые два случая допустимы, при этом из второго следует, что тепловая волна неподвижна, а процесс имеет метастабильную локализацию в конечной области пространства, именуемой фундаментальной тепловой длиной L_T . Этот эффект известен как эффект инерции тепла [12, 13].

Третий случай, когда радиус фронта нагрева уменьшается, противоречит второму началу термодинамики. Поэтому сокращение эффективной ширины области нагрева со временем возможно, если фронт тепловой волны на стадии установившегося автомодельного режима находится на бесконечности. Получаемые решения имеют следующий вид:

$$T(r, t) = g(t) f\left(\frac{r}{(t - t_f)^\alpha}\right), \quad \alpha = \frac{\beta - \sigma - 1}{\beta - 1}, \quad g(t) \sim (t - t_f)^{-1/(\beta-1)}. \quad (5)$$

Итак, в зависимости от степени интенсивности нелинейного источника, которая задается величиной параметра β , разворачиваются следующие процессы в открытой нелинейной среде (рис. 1).

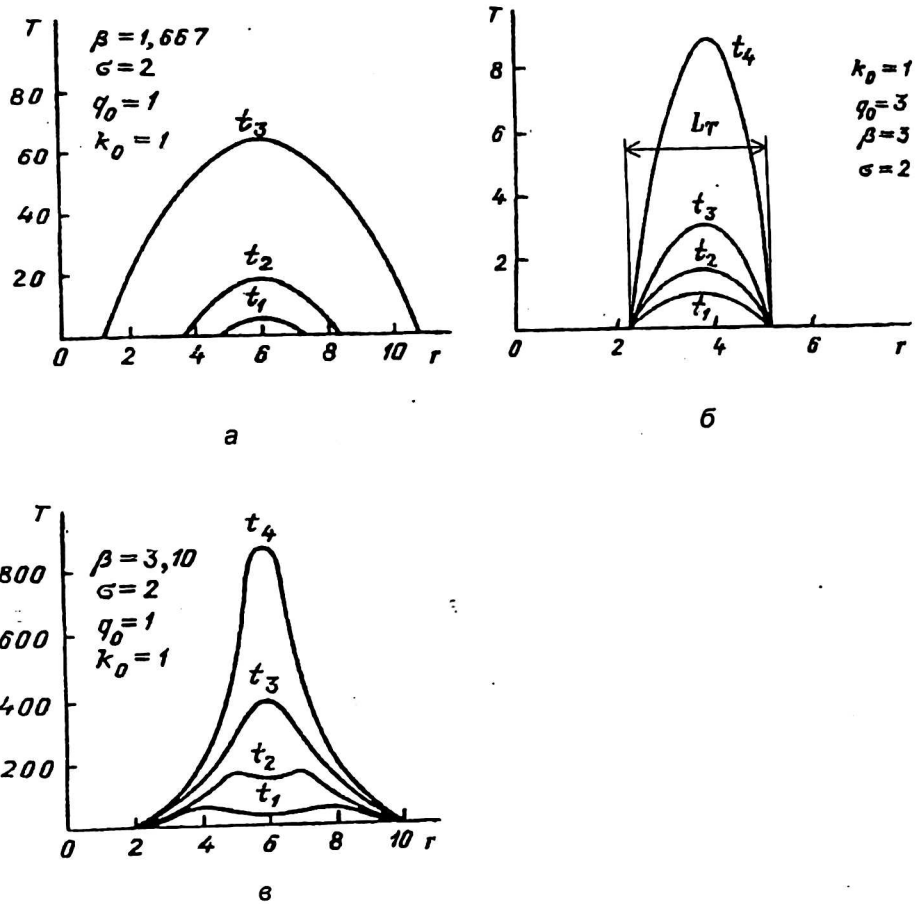


Рис. 1. Примеры процессов — нестационарных диссипативных структур, возникающих в нелинейной среде, в том числе при нагреве металла с нелинейной теплопроводностью потоком энергии и идущих в режиме с обострением:
 а — HS-режим (в среде возникают тепловые волны с неограниченно-растущей амплитудой);
 б — S-режим (тепло локализуется на некоторой фундаментальной длине);
 в — LS-режим (с сокращающейся эффективной шириной зоны с большей температурой)

HS-режим (рис. 1, а) — процесс, когда отсутствует локализация, происходит размывание структур. Это режим неограниченно разбегающейся от центра волны. Данный режим имеет место в том случае, если диссипативный, размывающий фактор интенсивнее, чем фактор локализации — работа нелинейного источника энергии.

S-режим (см. рис. 1, б) — режим развития процесса с обострением, когда на асимптотической стадии процесс локализуется и развивается внутри неко-

торой фундаментальной длины L_T . Английское "s" в названии удачно согласуется с термином "standing wave" — стоячая волна.

LS-режим (см. рис. 1, в) — определенный тип развертывания процессов в открытой нелинейной среде в режиме с обострением, когда происходит все более интенсивное развитие процесса во все более узкой области вблизи максимума. Это — "сходящиеся волны тепла", причем эффективная область локализации сокращается. Имеет место тогда, когда фактор, создающий неоднородности в среде (действие объемных нелинейных источников), работает значительно сильнее, чем рассеивающий, размывающий фактор. Главная характеристика LS-режима состоит в том, что он развивается медленнее S-режима. "Тепловая энергия" слабее "размазывается" по пространству, чем в случае S-режима [4].

Данные нестационарные диссипативные структуры существуют весьма короткое время, равное времени достижения максимальной глубины провара, характерной для используемого потока энергии при сварке и его параметров. Если допустить, что сварной шов формируется путем дискретного перемещения источника вдоль стыка и задержкой его на время развития тепловой структуры, обеспечивающей провар, то по форме провара можно оценить вид этой структуры.

Естественно предположить, что дуговые и плазменные способы сварки, в которых плотность мощности источника не превышает 10^4 Вт/см², способны осуществлять нагрев только в HS-режиме с большой потерей тепла на нагрев изделия. Лучевые способы сварки с плотностью мощности потока энергии более $10^5 \div 10^6$ Вт/см² следует отнести к источникам, которые обеспечивают нагрев в S-режиме, а при больших плотностях — и в LS-режиме. Это подтверждает наличие малой зоны термического влияния и кинжальной формы провара.

Мерой самоорганизации процесса сварки может служить тепловая эффективность, которая определяется термическим КПД [14], величина которого для различных способов сварки составляет 0,1—0,7. Причем минимальные значения характерны для сварки поверхностной дугой, а максимальные — для электронно-лучевой (ЭЛС) и лазерной сварки.

В качестве иллюстрации сказанного рассмотрим рис. 2, где приведены три провара, выполненные ЭЛС при ускоряющем напряжении 75 кВ на различных токах пучка. Хорошо видно, что с ростом глубины провара наблюдается локализация зоны плавления металла. Это можно объяснить локализацией тепла и переходом от HS- к S-режиму нагрева, происходящему с ростом плотности мощности (с ростом мощности при постоянном диаметре пятна нагрева). Очевидно, что в силу малого времени существования нестационарных структур на процесс локализации тепла будет заметно влиять скорость сварки. При значительной скорости движения нелинейного источника и достаточной плотности его мощности обеспечивается как бы цепочка последова-

тельно осуществленных вдоль стыка режимов нагрева с локализацией тепла. Уменьшение скорости и плотности мощности источника сместит процесс в сторону размывания возникающих неоднородных структур и большего рассеяния тепла.



Рис. 2. Микрошлифы проваров в нержавеющей стали типа 12X18H10T при ускоряющем напряжении 75 кВ и токах 26, 19 и 12 мА; глубина провара H соответственно 8,8; 5,7 и 3,1 мм, ширина провара B — 5,2; 4,2 и 3,8 мм

В таблице приведены числовые данные для проваров, представленных на рис. 1. Из них следует, что рост интенсивности пучка сопровождается ростом самоорганизации процесса проплавления, что увеличивает степень неоднородности системы “источник тепла — металл”. Соответственно растут степень локализации тепла в изделии, тепловая эффективность процесса сварки и затраты мощности на единицу глубины провара при ЭЛС нержавеющей стали типа 12X18H10T.

Ток пучка, мА	Относительное значение μ_T	Коэффициент формы провара	P/H , Вт/мм
12	$0,7 \mu_{T_{\max}}$	0,9	290
19	$0,9 \mu_{T_{\max}}$	1,36	250
26	$\mu_{T_{\max}}$	1,85	220

Отсюда следует, что используемый источник энергии не является оптимальным для всех трех случаев сварки. Его максимально эффективное использование будет на больших значениях тока. Для рассмотренных проваров необходим источник с другими — оптимальными параметрами (очевидно, диаметром пучка), чтобы процесс шел в режиме с локализацией тепла. И этот оптимум существует [15], а поиски его имеют практический интерес [16].

Таким образом, встает задача оптимизации процесса сварки как повышение степени его самоорганизации не только с позиций экономии энергии источника, но и с позиций качества провара, величины зоны термического

влияния, деформации изделия. Критерием оптимизации может служить максимум термического КПД.

Л и т е р а т у р а

1. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980.
2. Зуев И. В. Синергетика как фундамент для создания самоорганизующихся технологий обработки материалов концентрированными потоками энергии // Матер. конф. "Электронно-лучевая сварка". В 2-х сб. — М.: ЦРДЗ. 1993. Сб. 1. С. 9—16.
3. Зуев И. В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. — М.: Изд-во МИЭ, 1998. — 162 с.
4. Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. — М.: Наука, 1994.
5. Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетики и прогнозы будущего. Сер. Кибернетика — неограниченные возможности и возможные ограничения. — М.: Наука, 1997. — 285 с.
6. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. — М.: Наука, 1986.
7. Николс Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение. — М.: Мир, 1990.
8. Самарский А. А., Галактионов В. А., Курдюмов С. П., Михайлов А. П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. — М.: Наука, 1987.
9. Наука, технология, вычислительный эксперимент. Сер. Кибернетика — неограниченные возможности и возможные ограничения. — М.: Наука, 1993.
10. Ластовирия В. Н. Процесс электронно-лучевой сварки как объект управления формой прова-ра // Сварочное пр-во. 1997. № 5. С. 2—5.
11. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951.
12. Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент. Сер. Кибернетика — неограниченные возможности и возможные ограничения. — М.: Наука, 1988.
13. Самарский А. А., Змитренко И. В., Курдюмов С. П., Михайлов А. П. Эффект метастабильной локализации тепла в среде с нелинейной теплопроводностью // ДАН СССР, 1975. Т. 223. № 6. С. 1344—1347.
14. Зуев И. В. Самоорганизация (синергетика) процессов сварки и пайки. Работа формирования шва // Сварочное пр-во. 1995. № 5. С. 13—16.
15. Зуев И. В., Родякина Р. В. Тепловая эффективность электронно-лучевого нагрева // Там же. № 3. С. 14—15.
16. Fuerschbach P. W. Measurement and prediction of energy transfer efficiency in laser beam welding // Welding Reseach Supplement. 1996. № 1. P. 24s—34s.

WELDING BY MEANS OF MELTING AS A SYNERGETIC OBJECT

V. N. Lastovirya, Yu. B. Bessonova

Moscow Power Engineering Institute — Technical University, Moscow, Russia

The basic synergetics concepts and their appendix to the process of welding by means of melting, which is the open system with nonlinear source and nonlinear heat conduction of the environment, in which non-stationary dissipative thermal structures are formed, were considered. There was made an attempt to connect thermal efficiency of welding with development of heating in a regime with heat localization, caused by intensity of the source of energy.