

СИНЕРГЕТИКА КАК ФУНДАМЕНТ ДЛЯ СОЗДАНИЯ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ И СВАРКИ МАТЕРИАЛОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

И. В. Зуев

Московский энергетический институт — технический университет, Москва, Россия

При воздействии концентрированных потоков энергии (электронный луч, лазер, струя плазмы, сжатая электрическая дуга и др.) на материалы при превышении некоторого порога мощности самовозбуждаются колебания (автоколебания) температурного поля в зоне обработки. Явление возбуждения автоколебаний температурного поля — признак самоорганизации процесса нагрева данного материала. Приведены примеры самоорганизующихся технологий однопроходной дуговой сварки металлов толщиной до 100 мм и формирования периодического рельефа поверхности при оплавлении вращающегося металлического цилиндра, созданных с учетом принципов синергетики — науки о самоорганизации структур в живой и неживой природе.

Электронно-лучевая технология (ЭЛТ) в нашей стране имеет уже тридцатилетнюю историю своего развития. За это время созданы оборудование, аппаратура, технологии, не уступающие мировому уровню. Электронно-лучевая сварка внедрена в наиболее развитые отрасли промышленности. Создан инженерный контингент страны, профессионально владеющий ЭЛТ и всей ее инфраструктурой.

Научные основы этой технологии разработаны коллективами ученых академических и прикладных институтов, вузов, предприятий. По вопросам сварки и обработки материалов лучевыми источниками энергии (концентрированными потоками энергии), а именно, электронным лучом и, во многом аналогичным по характеру воздействия на вещество, лазерным лучом, издано большое количество монографий и книг. Тем не менее вечный вопрос: куда двигаться дальше — в области ЭЛТ актуален и сегодня.

Анализ развития лучевых методов сварки и обработки примерно за последние десять лет показывает, что в качестве фундаментального направления в электронно-лучевой и лазерной технологиях используется явление возбуждения автоколебаний температурного поля при воздействии на материалы концентрированных потоков энергии (КПЭ).

Концепция самовозбуждения колебаний температурного поля (автоколебаний) в зоне обработки была сформулирована академиком Н. Н. Рыкалиным и его учениками в 1980 г. на основе экспериментальных данных [1—4].

Сущность явления возбуждения автоколебаний температурного поля в зоне воздействия на материал КПЭ, в частности электронного луча, заключается в следующем.

Непрерывный во времени (т. е. не импульсно-периодический, а именно работающий в непрерывном режиме) поток энергии электронного луча после превышения критической удельной мощности (обязательное условие), зависящей от вида материала (для большинства металлов в пределах 10^5 — 10^6 Вт/см²), начинает периодически перекрываться, рассеиваясь за пределы зоны воздействия либо потоком испаренных атомов (экранировка веществом), либо потоком вторичных электронов, в основном термоэлектронов [5] (экранировка зарядом).

Температура поверхности в зоне обработки соответственно падает от максимума (пока луч не заперт) до некоторого минимума (экранировка) с частотой перекрытия луча веществом или зарядом. Отметим, что экранировка зарядом характерна для тугоплавких металлов (вольфрам), в остальных случаях она осуществляется веществом (продуктами испарения).

Периодическая экранировка электронного луча потоком пара или потоком вторичных электронов (в том числе термоэлектронов) воспринимается как периодическая расфокусировка электронного луча, что соответствует и физическому смыслу явления.

Экспериментально установлено, что для типичных значений удельной мощности электронного луча 10^5 — 10^6 Вт/см² при общей мощности 5—15 кВт частота автоколебаний температуры поверхности по порядку величины составляет 1—10 кГц, а амплитуда колебаний температуры — 500—1000 °С.

Естественно, что изменение во времени температуры поверхности зоны воздействия приводит к аналогичным колебаниям и других параметров, зависящих от температуры, например, термоэмиссии, яркости свечения обрабатываемой зоны, интенсивности акустических колебаний в основном металле (твердом теле), фокусировки луча и др.

Не углубляясь в сложную нелинейную связь температуры поверхности и плотности пара над ней (и очень важно, скорости его удаления, т. к. именно он экранирует источник энергии), отметим, что основной причиной, приводящей к автоколебаниям, является превышение скорости ввода тейла в зону действия луча по сравнению со скоростью отвода тепла механизмом теплопроводности в элементарном акте цикла нагрева. Действительно, если электронный (лазерный) луч обеспечивает удельную мощность $\geq 10^5$ — 10^6 Вт/см², то это означает, что зона обработки, ограниченная диаметром сфокусированного луча по ширине и величиной пробега электронов (фотонов) по глубине, за десятки — сотни микросекунд нагревается до температуры кипения и начинает в виде пара разлетаться, тогда как механизм отвода тепла теплопроводностью еще не срабатывает.

Роль испарения, хотя доля его в общем энергетическом балансе процесса нагрева едва достигает 1—2 % (т. е. в пределах ошибки измерений в эксперименте), оказывается определяющей. Источник энергии, работающий на поверхности, перемещается в глубину зоны обработки (отверстие, канал). Тепловая эффективность такого источника резко повышается: в элементарном акте "нагрев — экранировка" термический КПД приближается к единице, в целом же, например, в процессе электронно-лучевой сварки, он увеличивается до значений 0,6—0,7. Это означает, что электронно-лучевая сварка с точки зрения использования энергии для плавления металла в 10—15 раз эффективнее, чем сварка поверхностной электрической дугой.

Теперь обратимся к синергетике. Это новая наука, изучающая процессы самоорганизации и распада структур как в живой, так и неживой природе [6]. Процессы самоорганизации и распада структур свойственны неравновесные фазовые переходы, отвечающие особой точке — точке бифуркации (рис. 1), по достижении которой скачкообразно изменяются свойства, обусловленные самоорганизацией процесса.



Рис. 1. Пример флуктуации (раздвоения) траектории эволюции "ребра" на поверхности вращающегося цилиндра в точке бифуркации

Самоорганизующимися считают любые автоколебательные процессы, связанные с образованием устойчивых незатухающих колебаний, которые не зависят от начальных условий, вызвавших их появление. В линейной области колебания хаотические, в нелинейной — возможны упорядоченные (автоколебания). Возникновение последних связано с диссипацией энергии, поэтому система должна быть нелинейной. В этом случае отклик системы на воздействие КПЭ не пропорционален его интенсивности.

Таким образом, система электронный (лазерный) луч — свариваемое изделие в режиме глубокого проплавления является автоколебательной, самоорганизующейся, синергетической.

Следствием этого является необходимость контроля и управления, как правило, нестабильным процессом обработки или сварки с позиций синергетики.

Действительно, пусть имеется процесс обработки (рис. 2), качество которого можно охарактеризовать значением безразмерной величины X_1 , а параметры КПЭ — величиной X_n .

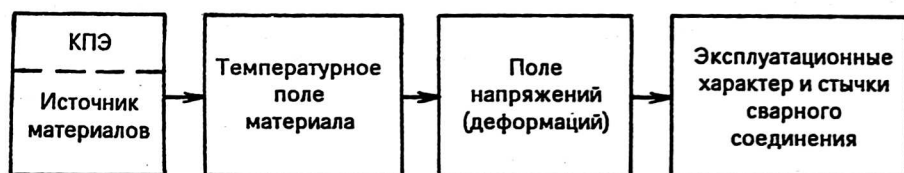


Рис. 2. Общая схема процесса обработки материала концентрированным потоком энергии

При наличии в процессе обработки только прямых связей между параметрами КПЭ и качеством обработки изменение условий процесса обработки вызывает соответствующее изменение качества процесса, при линейной связи — пропорциональное. Существенного улучшения качества обработки можно добиться путем введения в систему отрицательной обратной связи (рис. 3), которая выправляет нестабильную ситуацию. Простейшая связь параметров в этом случае имеет вид:

$$X_1 = F X_n, \quad F = \frac{K}{1 + \beta K},$$

где в традициях теории автоматического регулирования введены коэффициенты K — усиления и β — обратной связи.

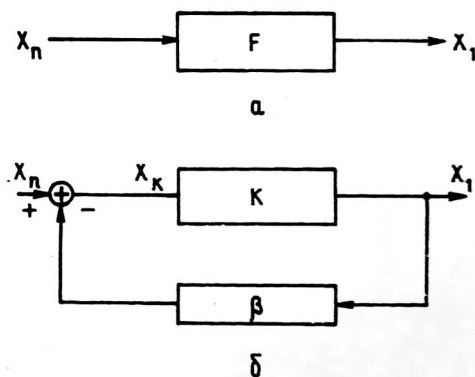


Рис. 3. Схема связей в системе:
а — прямые связи; б — схема отрицательной обратной связи

Приняв для определенности $F = 1$ и $K = 100$, получаем $\beta = 0,99$.

Если X_n выбран из таких соображений, что в силу изменения условий технологического процесса произойдет уменьшение K , например на 50 %, то при наличии обратной связи X_1 изменится только на 1 %.

Стандартный путь для практической реализации в рассматриваемой системе такого типа обратной связи состоит в том, что создают систему контроля, например температуры зоны обработки, и управляющий сигнал заводят в источник энергии (рис. 4).

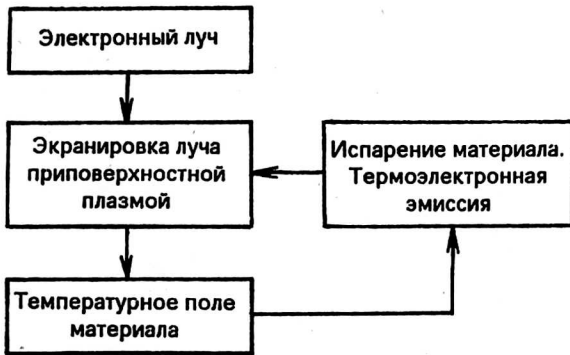


Рис. 4. Схема обратных связей при возникновении автоколебаний температурного поля в зоне воздействия на материал

Из-за сложностей, связанных с разработкой качественной системы контроля и с управлением КПЭ, такой подход далеко не прост в реализации.

Синергетическое же решение данной проблемы состоит в том, что нужно эффективно использовать естественные внутренние взаимосвязи в системе. Например, температурное поле в зоне обработки материала за счет гидродинамических, газодинамических и плазменных процессов может влиять на величину потока энергии, вводимого в материал. Поэтому, изучив механизмы таких обратных связей, можно научиться эффективно управлять сварочным процессом с минимальным внешним контролем. Система "обрабатываемые материалы — КПЭ" в значительной мере будет контролировать себя сама. Кроме того, такой подход может привести к совершенно неожиданным новым техническим решениям.

Как правило, принципиальное новшество не только позволяет увеличить (уменьшить) известные характеристики в несколько раз, но и открывает новые сферы использования. Например, за счет развертки на поверхности мишени процесса электронно-лучевого воздействия в автоколебательном режиме (воздействие на быстровращающуюся мишень) в поле центробежных сил и в условиях резонанса двух колебательных систем (автоколебательный процесс нагрева и вращающаяся мишень) получают автоструктуры рельефа закристаллизовавшегося металла [7] (рис. 5, 6). По геометрии этих автоструктур можно с хорошей точностью определить (восстановить) многие параметры процесса нагрева: мощность, КПД, температуру поверхности, вязкость расплава в момент воздействия, частоту автоколебаний, амплитуду изменения температуры, скорость перемещения источника и т. д., так как связь этих параметров установлена в следующем виде.

Частота вращения цилиндра (Гц)

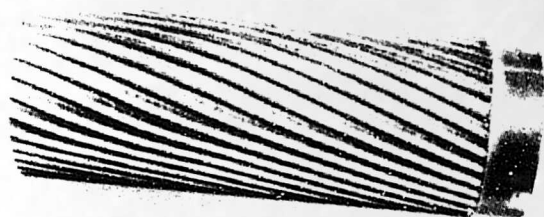
$$f \geq \left(\frac{\sigma}{8\pi^2 \rho R^2 \Delta R} \right)^{1/2},$$

где σ — поверхностное натяжение участка расплава под электронным лучом, Н/см;

ρ — плотность материала цилиндра, г/см³;

R — радиус цилиндра, см;

ΔR — глубина проплавления, см.



а

Рис. 5. Примеры автоструктур: а — на поверхности цилиндра из коррозионно-стойкой стали; б — на поверхности цилиндров и конусов из конструкционных металлических материалов (стали, титана, меди и др.)



б

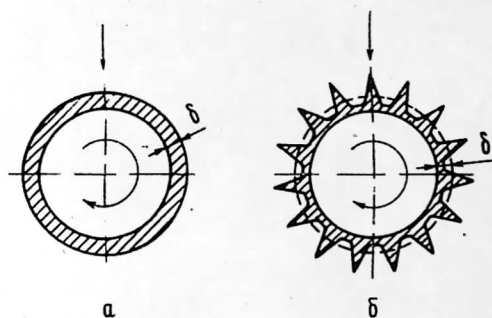


Рис. 6. Схема оплавления сплошного металлического цилиндра электронным лучом, равномерно перемещающимся вдоль образующей цилиндра по линии, перпендикулярной плоскости чертежа:

а — оплавление поверхности вращающегося цилиндра на глубину δ при обычных режимах нагрева; б — перераспределение объема расплавленного металла и образование рельефа поверхности при резонансном режиме нагрева

Скорость перемещения электронного луча относительно вращающегося цилиндра

$$V \leq \left(\frac{\eta_n \eta_t q f d}{2\pi R \Delta R S_{пл}} \right)^{1/2},$$

где η_n — эффективный КПД электронно-лучевого нагрева;

η_t — термический КПД проплавления металла;

q — мощность электронного луча, Вт;

d — диаметр электронного луча, см;

$S_{пл}$ — теплосодержание расплава, Дж/см³.

По существу, по результатам воздействия концентрированного потока энергии на вращающуюся мишень можно разработать своеобразный прибор — спектрометр теплового процесса.

Оплавление электронным лучом в автоколебательном режиме вращающейся цилиндрической мишени сопровождается по меньшей мере двумя эффектами:

аккумуляция тепла за источником энергии и аномальное уменьшение интенсивности отвода тепла перед ним;

аккумуляция рентгеновского излучения и вторичного излучения электронов практически в плоскости (ширина 2—5 мм) источника энергии, перпендикулярной направлению его перемещения, т. е. проведение традиционной операции (оплавление вращающегося цилиндра) в условиях, обеспечивающих самоорганизацию процесса нагрева, сразу дает несколько эффектов: новую технологию оребрения цилиндра, аномалии температурного поля, своеобразную спектрометрию процесса нагрева.

Другим примером реализации идей синергетики является искусственное построение самоорганизующегося процесса сварки плавлением. Этот процесс реализовался как альтернатива электронно-лучевой сварке металлов больших толщин, но на воздухе, без вакуумной камеры.

В работах [8, 9] рассмотрена дуговая сварка неподвижным плавящимся электродом. В этом случае между двумя свариваемыми массивными металлическими пластинами плотно устанавливают металлический изолированный электрод толщиной 1—3 мм. Дугу возбуждают между кромкой электрода и основным металлом. Дуга самопроизвольно со скоростью до 5 м/с перемещается по кромке электрода в узком зазоре, отбрасывая расплавленный металл электрода в зазор и заполняя его. Иными словами, процесс электронно-лучевой сварки заключается в том, что дуга с частотой до 50 Гц перемещается по передней стенке канала (в данном случае искусственного) и переносит жидкий металл на заднюю стенку ванны. Возвратно-поступательное движение дуги по торцу электрода осуществляется автоколебательно за счет взаимной нелинейной связи электрического и температурного полей в плавящемся электроде.

Самоорганизующийся процесс дуговой сварки неподвижным плавящимся электродом (ДСНПЭ) позволяет сваривать за один проход сталь толщиной 20—100 мм со скоростью 10—40 м/ч (рис. 7). Если сравнить производительность выполнения сварного шва глубиной 100 мм электронным лучом и ДСНПЭ, то (это произведение глубины шва на скорость сварки) для электронного луча она составляет около $1 \text{ см}^2/\text{с}$, а для ДСНПЭ — $4\text{—}5 \text{ см}^2/\text{с}$. Отметим, что величина термического КПД для ДСНПЭ достигает 0,8.

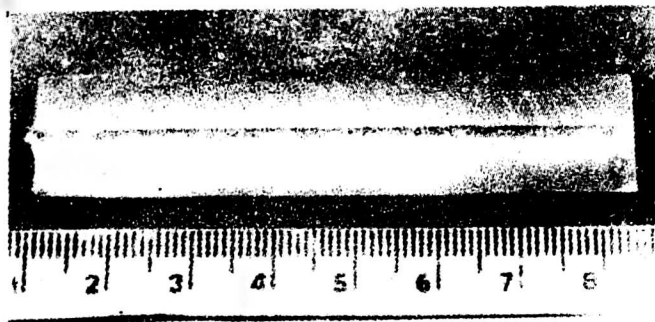


Рис. 7. Поперечный разрез пластин из низкоуглеродистой стали размером 200x75x9 мм, соединенных самоорганизующейся дуговой сваркой (мощность сварки 12 кВт, время сварки 50 с)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Традиционные источники тепла для сварки и обработки материалов: газовое пламя, свободно горящая электрическая дуга, плазменная струя — являются, как правило, поверхностными.

Отношение глубины зоны проплавления металла такими источниками к ширине этой зоны составляет 0,5—1,0.

Источники тепла типа электронного луча и лазера обеспечивают (в отличие от перечисленных) концентрацию мощности более 10^5 Вт/см², и за счет испарения материала из зоны обработки, которое вследствие автоколебаний температурного поля имеет дискретный характер, углубляются в материал на большую глубину (до десятков сантиметров). Отношение глубины проплавления к его ширине в этом случае составляет 10—100. Соответственно тепловая эффективность (КПД), представляющая собой отношение теоретически необходимой мощности для плавления материала к подводимой мощности, для традиционных поверхностных источников составляет 0,05—0,3, для концентрированных потоков энергии (электронный луч, лазер), осуществляющих нагрев в объеме материала — 0,5—0,7, т. е. в 2—14 раз больше. Эта разница очевидна, так как самоорганизующийся процесс нагрева “работает” на принципе использования минимума энергии, тогда как в “организованный” процесс мы вкладываем часто столько, сколько этой энергии есть.

Изучение самоорганизации процесса нагрева материала КПЭ — это, по существу, создание элементов новой физики. Дополнительные возможности открывает использование резонансных режимов нагрева. Судя по всему, идеи синергетики могут явиться научным фундаментом для технологического прорыва в области обработки и сварки материалов в ближайшее десятилетие.

Литература

1. Зуев И. В., Селищев С. В., Скобелкин В. И. // ДАН СССР. 1980. Т. 255. № 6. С. 1372—1375.
2. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В., Скобелкин В. И., Селищев С. В. // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. № 12. С. 1953—1961.
3. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. — М.: Машиностроение, 1985. — 496 с.
4. Углов А. А., Селищев С. В. Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии. — М.: Наука, 1987. — 150 с.
5. Аполлонов В. В., Прохоров А. М., Хмара В. А., Яшнов Ю. М. // ДАН СССР. 1990. Т. 310. № 3. С. 572—574.
6. Хакен Г. Синергетика. — М.: Мир, 1980. — 404 с.
7. Галкин А. Г., Зуев И. В., Селищев С. В. // ДАН СССР. 1989. Т. 309. № 5. С. 1112—1114.
8. Артеменко А. И., Зуев И. В., Селищев С. В. и др. // ДАН СССР. 1989. Т. 309. № 6. С. 1368—1371.
9. Зуев И. В. // Сварочное производство. 1992. № 19.

SYNERGETICS AS THE BASIS FOR WORKING OUT OF SELF-ORGANIZING TECHNOLOGIES OF MATERIALS' TREATMENT AND WELDING BY MEANS OF CONCENTRATED FLOWS OF ENERGY

I. V. Zuev

Moscow Power Engineering Institute — Technical University, Russia

Under the treatment of materials by means of concentrated flows of energy (electron beam, laser, plasma stream, compressed electric arc and some others) in the case of some power threshold exceeding the oscillations (auto-oscillations) of temperature field in the zone of treatment are self-stimulated. The phenomenon of auto-oscillations of the temperature field stimulating is the indication of heating process's self-organization for such material. The examples of self-organizing technologies of arc welding of the metals with the thickness up to 100 mm for one pass and periodical surface structure forming under the melting of rotating metallic cylinder's edges are shown. Both these two technologies were worked out with regard for main principles of synergetics, which is the science, studying the processes of self-organization and disintegration of structures in animate and inanimate nature.