

УДК 621.791.72

К РАЗРАБОТКЕ КОНЦЕПЦИИ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ТЕРМОУПРУГИМИ ЯВЛЕНИЯМИ*

Н. Д. Гайденок, Н. Ю. Серегин, Д. П. Савенков, А. В. Майтакова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: ndgay@mail

Рассмотрена концепция снижения остаточных напряжений в сварных соединениях при электронно-лучевой сварке (далее ЭЛС), обусловленных явлениями термоупругости и термопластичности металлов. На основе анализа механических и термофизических особенностей динамики процесса ЭЛС показано, что причиной коробления поверхности изделия являются термоупругие волны, определяющие главный феномен явления – продольно-поперечный изгиб изделия после процесса сварки за счет остаточных сварочных напряжений. Приводятся основные модели процесса, а также строится модель явления учитывающая структурные изменения свариваемого материала – накопление и релаксацию деформаций во время структурных переходов. Попытка подобного учета истории нагружения для материала, испытывающего фазовый переход, и данного вида сварки проводится впервые. Задача имеет также прикладное значение, т.к. себестоимость такой сварки довольно высокая, и снижение процента брака повышает рентабельность производства.

Ключевые слова: Сварные соединения, электронно-лучевая сварка, остаточные напряжения, история нагружения, физика прочности, технология сварки.

TO THE CONCEPTION OF REDUCING THE RESIDUAL STRESSES AT THE ELECTRON BEAM WELDING IN WELDED JOINTS CAUSED BY THERMOELASTIC PHENOMENA

N. D. Gaidenok, N. Yu. Seregin, D. P. Savenkov, A. V. Maytakova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: ndgay@mail.ru

The article deals with the concept of reducing the residual stresses resulting from the phenomena of thermoelastic and thermoplastic metals in welded joints at the electron beam welding (further EBW). On the basis of the analysis of mechanical and thermophysical characteristics of the dynamics of electron-beam welding (EBW) process it is shown that the cause of distortion of the products surfaces is in thermoelastic surface waves that determine the main phenomenon, precisely the longitudinal – transverse bending of the product after the welding process due to the residual welding stresses. The basic model of the process is presented and the model of the phenomenon, that takes into account the structural changes in the accumulation of material to be welded and the relaxation of strain in structural transitions, is developed. The attempt of taking into account the loading history of the material that undergoes a phase transition in this type of welding is made the first time. The problem has also the applied meaning because the cost of such welding is high and reduction of the defect rate can significantly increase the profitability of production.

Keywords: Welds, electron beam welding, residual stresses, loading history, physics strength, welding technology.

Введение и постановка проблемы. При электронно-лучевой сварке (далее ЭЛС) изделий (рис. 1) одним из дефектов шва является непровар, для устранения которого в работе [1] предлагается, по сути дела, техническая реализация основного метода теории надежности – ее повышение за счет изменения плотности распределения энергии по пятну нагрева, осуществляемого за счет многократного сканирования луча по пятну прогрева.

Типовая технология ЭЛС, осуществляемая без сканирования, приводит к дополнительному расходу энергии и увеличению времени обработки, и короблению поверхности изделия (рис. 2), выражающимся в наличии волн различного периода и амплитуды, зави-

сящих, как показали натурные наблюдения, от термо-механических параметров и геометрии процесса сварки.

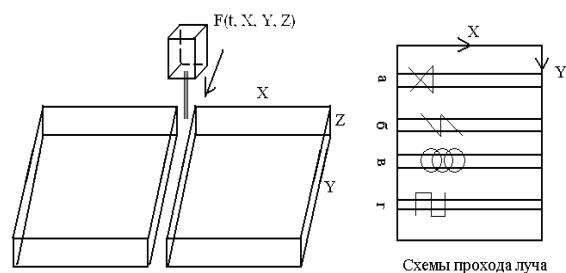


Рис. 1. Схема процесса сварки

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 7.4765.2011.

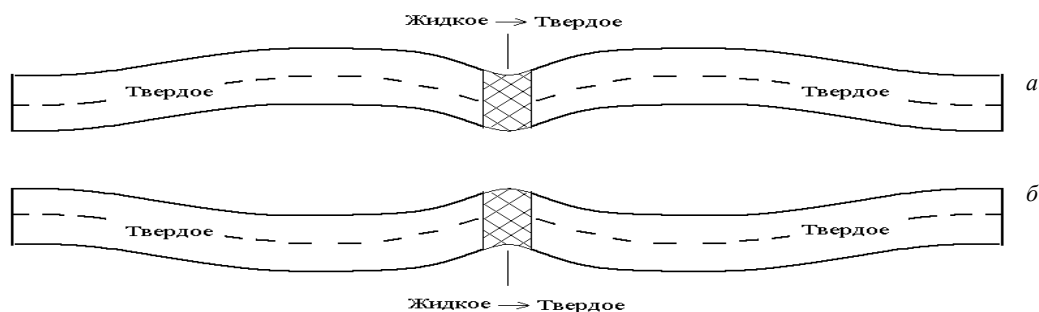


Рис. 2. Схема коробления

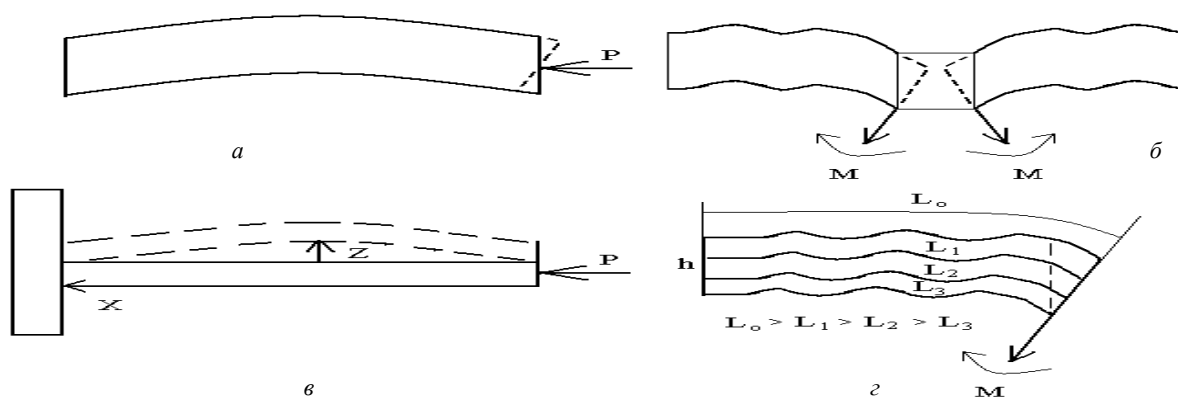


Рис. 3. Схема базовых термо-механических процессов

С механических позиций используются преимущественно два вида закрепления заготовок (пластин) при ЭЛС – с фиксированными (зашемленными) кромками и со свободными кромками.

В качестве одного из вариантов технологии процесса ЭЛС первого типа можно привести пример сварки оболочек больших размеров, который в силу угловой симметрии сопроводим иллюстрациями сечений вдоль продольной оси в диаметральной плоскости (рис. 2).

Итак, имеем следующее.

1. Каждая из частей изделия помещается одним из торцов в фиксатор.
2. Изделия сближаются на расстояние порядка 1–2 мм и жестко фиксируются по оси X.
3. Происходит движение луча по длине шва (ось Y) в соответствии с одной из схем (рис. 1, б).
4. После расплавления материала изделия происходит сварка частей изделия.

Однако, после остывания изделия на его поверхности, как уже сказано выше, появляется волнистость сварочного шва (рис. 2) вне всяких сомнений зависящих от термических параметров процесса ЭЛС и геометрии изделия.

Несмотря на то, что происходит изменение геометрии изделия по типу показанного на рис. 2, а, здесь согласно работе [2], возможен также и второй тип изменение геометрии изделия (рис. 2, б).

Метод решения. Наиболее адекватным объяснением процесса могут послужить феномены расширения материала при нагревании и последующего накопления деформаций в зонах термического разупрочнения находящимися вблизи сварочного канала, и динамически перемещающимися вместе с ним. Однако скорости процессов релаксации и перехода металла в упруго-пластичное состояние не совпадают, что и приводит к описываемым явлениям (рис. 1).

Явление коробления сваренных пластин обусловлено, как высокой интенсивностью передачи тепла электронного луча свариваемому материалу, так и достаточно высокой скоростью сварки. Что приводит к большим градиентам температуры, либо между верхней и нижней поверхностями изделия (ось Z, рис. 3), либо между внешней и внутренней проводящий к выгибанию изделия, как правило, наружу (рис. 2, а) [2]. При этом размер сварочной ванны и зоны термического влияния (далее ЗТВ), довольно небольшой (по сравнению с другими видами сварки), но значения скоростей нагрева материала в зоне может быть выше чем при других видах сварки.

Рассмотрим «пластичное ядро» («разупрочненное ядро»), виде зоны разупрочнения окружающую сварочную ванну, стесненную внешними нагретыми слоями. В случае жесткого закрепления концов пластин, это приводит к изменению схемы закрепления, так как появляется новая степень свободы. Что может

к преобразованию накопленной (в «холодных зонах») потенциальной энергии сил упругости, в работу по деформированию разупрочненного ядра. С точки зрения механики можно рассмотреть данный феномен, как потерю устойчивости системы.

В связи с этим в процессе исследования данной проблемы необходимо решить следующие задачи.

1. Расчет различных температурных полей в телах с несколькими агрегатными состояниями – от твердого до газообразного испарения металла – «Термопроцесс».

2. Расчет термоупругих деформаций на основании закономерностей для конкретных схем закрепления с учетом появления во время сварки зоны разупрочнения и изменения реологических модели деформирования материала в ЗТВ. Термопроцесс. Здесь в виду правильной геометрической формы изделия достаточно решать задачу Стефана (фазовые переходы под действием температуры) на регулярной сетке [3].

Классической задачей Стефана называют простейшую одномерную задачу промерзания (застывания), кристаллизации (плавления), когда теплофизические характеристики, начальные и граничные условия принимаются постоянными. Рассмотрим процесс застывания шва в виде параллелепипеда длиной L (рис. 4). Задача о распределении температуры при наличии фазового перехода и о скорости движения границы раздела фаз сводится к решению уравнений теплопроводности для жидкой (1) и твердой (2) фаз где $x = \xi(t)$ – граница раздела фаз:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1^2 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < \xi(t) \quad (1),$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2^2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \xi(t) < x < L. \quad (2)$$

С дополнительными условиями:

$$T_1 = C_1, x = 0, \quad (3),$$

$$T_2 = C, t = 0, \quad (4),$$

а на границе фазового перехода заданы условия:

$$T_1(\xi - 0, t) = T_2(\xi + 0, t) = T_\phi, \quad (5)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, a_1^2, a_2^2$ коэффициенты теплопроводности и температуропроводности твердого и расплавленного

металла, постоянны. Индексы «-», «+» обозначают значения соответствующих величин слева и справа от фронта фазового перехода. Не нарушая общности можно положить температура фронта (границы раздела сред) $T_\phi = 0$.

Существуют различные варианты решения данной задачи. Наиболее универсальным методом решения задач Стефана являются численные методы, которые начали разрабатываться с 50-х годов 20 века. В настоящее время известны четыре основных разностных метода: ловли фазового фронта в узел разностной сетки, выпрямления фронтов, сглаживания коэффициентов и схемы сквозного счета. Характерная особенность первых двух методов состоит в том, что в них разностные схемы строятся с явным выделением искомого фронта фазового перехода. Для двух последних методов используются разностные схемы сквозного счета. Помимо выше указанных на практике также используется метод, где коэффициенты температуропроводности представляются в виде немонотонной функции от температуры $k_*(T)$ (рис. 5) и дальше идет расчет по однородной схеме

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \sum k_i(T) \frac{\partial T}{\partial X_i} + F(t, X, Y, Z) + \text{теплоотдача}(\sim U(T^4)) \quad (6)$$

$$X_i = (X, Y, Z)$$

$$T(0, X, Y, Z) = T_0 - \text{начальные условия} \quad (7)$$

$$T(t, 0, Y, Z) = T_x(0) - \text{граничные условия} \quad (8)$$

.....

$$T(t, X, Y, L) = T_z(L) - \text{граничные условия}$$

В виду симметричности по оси X задачу (6) можно свести к двум измерениям (для поперечного изгиба), т. е. профильной задаче, дискретная схема которой показана на рис. 6.

Для исследования термонапряжений в случае продольного изгиба можно даже ограничиться и одномерной задачей

Механика. В общем случае деформация данного соединения, можно в первом приближении выразить через упругий изгиб пластины. Задачу будем решать в перемещениях.

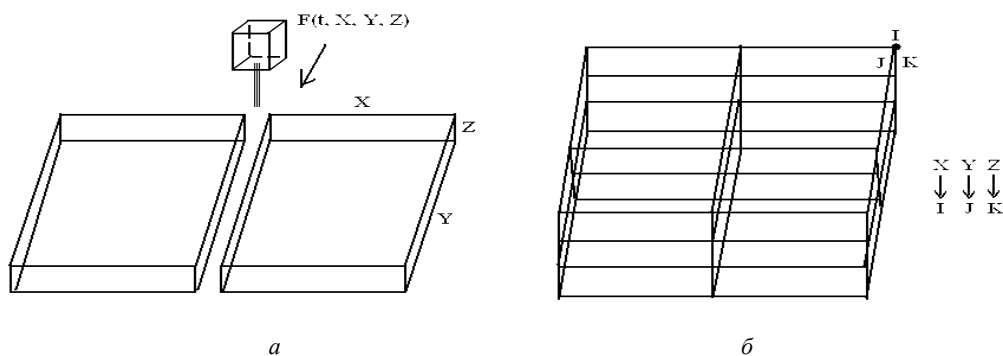


Рис. 4. «Термопроцесс»

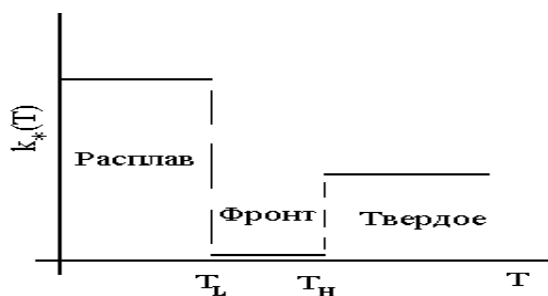


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры

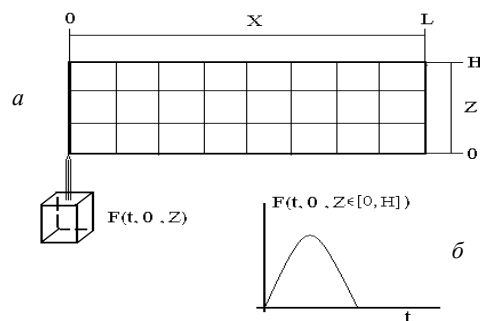


Рис. 6. Редукция к профильной задаче

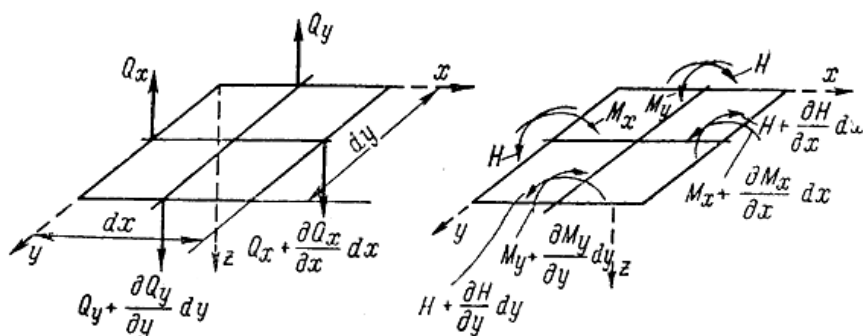


Рис. 7. Силовые факторы действующие на прямоугольный элемент пластины

Можно описывается уравнениями Кармана [4] – «дифференциальный формализм». Для поперечного изгиба пластины – $[0, L] \times [0, 1]$, сечение которой показано на рис. 4.а, они согласно [5] для переменных $f(x, y)$ – функция напряжений, которая связана с силовыми факторами следующими соотношениями:

$$N_x = h \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}; N_y = h \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}; T_{xy} = T_{yx} = -h \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}, \quad (9.1)$$

где N_x, N_y , – погонные (на единицу длины) нормальные усилия; T_x, T_y – погонные перерезывающие усилия; $q(x, y)$ – нагрузка и $w(x, y)$ – смещение вдоль координаты Z (прогиб пластины) (рис.7) имеют следующий вид:

$$\nabla^2 \nabla^2 f = E \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right], \quad (9.2.1)$$

$$\nabla^2 \nabla^2 w = \frac{1}{D} \left[q(x, y) + h \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \right], \quad (9.2.2)$$

где D – цилиндрическая жесткость пластины выражаемая как:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (9.3)$$

где E – модуль Юнга; h – толщина пластины; μ – коэффициент Пуассона

Запишем для уравнений (9.2) граничные условия

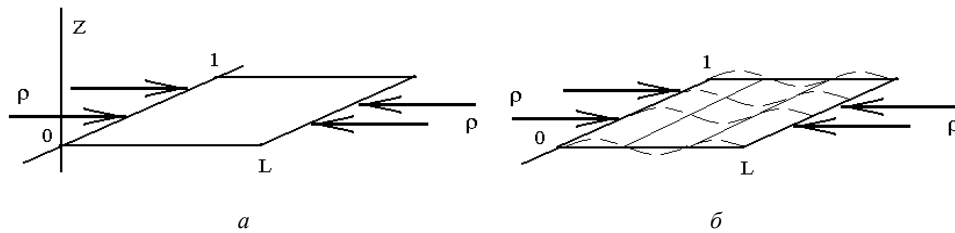
$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq L, y = 0, \quad M_y = 0, Q_y^0 = 0, \\ 0 \leq y \leq 1, x = 0, \quad w = 0, M_x = 0, \\ 0 \leq x \leq L, y = 1, \quad M_y = 0, Q_y^0 = 0, \\ 0 \leq y \leq 1, x = L, \quad w = 0, M_x = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где M_x, M_y – изгибающие моменты; Q_y^0 – перерезывающая сила; w – как мы уже говорили, прогиб срединной поверхности (см. рис. 7) означают тот факт, что пластинка закреплена на сторонах параллельных y оси шарнирно, а кромки параллельные оси x свободны.

Совместное решение уравнений (9) при начальных условиях (10) дают решение в виде (11) – рис. 8, б при этом надо учитывать что в данном случае мы считаем что пластина единичной ширины. Каждую такую пластину можно приближенно считать балкой (но при этом учитывать влияние соседних полосок (балок), на рис. 7. данные усилия обозначены как H) и использовать уравнения для балки приведенные в следующем разделе.

$$w(x, y) = \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cdot \sin(m\pi y) \quad (11)$$

Однако, в первом приближении для понимания общей концепции физических (механических) особенностей достаточно рассмотреть положения, относящиеся к теории продольно – поперечного изгиба [7] – «интегральный формализм». И более того, в силу принципа суперпозиции можно провести независимое исследование выше указанных видов изгиба.

Рис. 8. Решение уравнений Кармана, функции смещения по z $w(x, y)$

Как уже было сказано выше, данные вопросы довольно детально изучены в рамках теории сопротивления материалов [7]. Поэтому приведем здесь только итоговые результаты.

Поперечный изгиб. Здесь результатом является «Сила Эйлера» P_3 , выражение которой для одномерного случая имеет вид

$$P_3 = \frac{\pi^2 EJ}{L^2}, \quad (12)$$

где E – модуль Юнга; J – момент инерции; L – длина пластины. Сила P_3 , возникающая в результате температурных деформаций пластины, в первом приближении, достаточном для практических потребностей, м. б. представлена в виде

$$P = E \cdot \Delta L = E(L_{\max} - L(T_0)), \quad (13)$$

где $L_{\max}$ – максимальная длина пластины, достигнутая в результате температурных деформаций при нагреве изделия до расплава металла и последующего остывания до исходной температуры.

При характеристике поперечного изгиба сделаем ссылку на рис. 3, где показаны основные особенности данного феномена, достаточные для применения классических уравнений данного вида изгиба [7].

Меры по снижению деформаций. Причиной деформаций, как показал выше проведенный анализ, является объем тепловых затрат – действительно, в пластине не подверженной термовоздействию не наблюдается никаких градиентов и, как следствие, никаких дополнительных напряжений. Причем, величина деформации, в первом приближении, пропорциональна объему тепловых затрат. Это обусловлено тем фактом, что металл в «разупрочненном ядре» испытывает значительные деформации со стороны внешних нагретых упругих слоев, не успевающие релаксироваться. Поэтому основной концепцией стратегии борьбы продольным изгибом, является либо уменьшение этих деформаций в абсолютных величинах, либо изменение технологии таким образом, чтобы остаточные деформации в разных частях изделия компенсировали друг друга.

Одним из критериев при горизонтальном градиенте температуры, является то, что напряжения не должны превосходить определенного предела (12).

Для уменьшения поперечного изгиба также справедливо аналогичное утверждение – напряжения, вызванные вертикальными градиентами температуры не должны превосходить определенного предела, определяемого аналогом соотношения (9).

В связи с этим весь комплекс технических мер, направленных на снижение деформаций изделия или,

иначе говоря, приведения градиентов температуры в определенные пределы, можно разделить на три класса:

1. Изменение состава и структуры технологического оборудования.
2. Изменение технологии ЭЛС.
3. Изменение параметров и геометрии деталей изделия.

Однако, как показывают многочисленные технические решения, оптимум достигается в виде комбинации выше предложенных мер.

В качестве примеров, соответствующих типам мер, можно указать следующие:

1. Внести структурные изменения в устройство установки ЭЛС, регулирующие жесткость крепления оболочек;

2. Вертикальный градиент температур может быть уменьшен изменением режима сканирования электронного луча

3. Возможен локальный прогрев обратной стороны шва дополнительным источником энергии (как заранее, так и непосредственно в процессе сварки)

С формальных позиций острота проблемы коробления готовых изделий, может быть в определенной степени понижена в результате решения классической экстремальной задачи, которая представима в следующем агрегированном виде:

$$Z = c_0 O + c_T T + c_I I \rightarrow \max \quad (14)$$

$$a_0 O + a_T T + a_I I < \Phi,$$

где O , T и I – объем, c_i и a_i – степень уменьшения деформации и затраты по применению выше указанных мер.

Решение данной экономической задачи при предложенном типе экстремума, характере ограничения и знаках коэффициентов заведомо имеет место. Но, однако, конкретную, не только инженерную, но и формальную трудность представляет генерация практического вида технических решений. Методом, применяемым в данном случае, является морфологический анализ, геометрической моделью которого для рассматриваемого случая служит 3-х мерный куб.

Объем генерируемых и, как следствие, анализируемых вариантов существенным образом уменьшается посредством организации процесса генерации – здесь необходимо произвести упорядочивание технических мер (измерений) по возрастанию размерности вариантов [8].

Эффективным методом, который, по сути дела, в настоящее время уже используется при решении данной задачи, является жадный алгоритм, имеющий

своим практическим воплощением ранжировку мер по величинам коэффициентов a_i и разработку данного измерения. Таким шагом является изменение только технологии ЭЛС (многопроходность, дискретность) при сохранении прочих условий процесса.

В работе исследован подход к разработке общей концепции устранения коробления пластины ЭЛС, вызванного механическими явлениями, причиной которых, в свою очередь является термический режим ЭЛС. Показано, что практически все (или в большинстве из них) коробление можно устранить путем сохранения вертикальных и горизонтальных градиентов температуры в заданных пределах, определяемых на основе условий, типа «Сила Эйлера» или его аналога для вертикального градиента. В общем случае, для этого необходима разработка автоматизированной системы управления ЭЛС. В которой, посредством решения уравнений термоупругости, представленных в дифференциальном (уравнения типа Кармана) или в интегральном виде, программным (в ряде случаев и аппаратным – путем прошивки ПЗУ) способом (ЛУС-ЧПУ) для различных типов изделий, производится выбор оптимального режима в виде динамики амплитуды термонагрева по траектории луча – задача оптимального управления распределенными системами.

Библиографические ссылки

1. Экспериментальные исследования по оптимизации технологии ЭЛС алюминиевых сплавов / Ю. Н. Серегин, В. Д. Лаптенко, Н. В. Успенский, В. П. Ниткин // Технологии и оборудование ЭЛС : материалы конф. 2011. С. 71–80.
2. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. Киев : Наукова думка, 1976. 320 с.
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1972. 740с.
4. Савельев И. В. Курс физики. М. : Наука, 1973. 420 с.
5. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. М. : Наука, 1965. 480 с.
6. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения : пер. с англ. М. : Мир, 1980. 612 с.
7. Писаренко Г. С. Сопротивление материалов. Киев : Высш. школа, 1979. 696 с.
8. Половинкин А. П. Теория изобретательства. М. : Высш. школа, 1975. 340 с.

References

1. Seregin Y. N, Laptenok V. D, Uspenskiy N. V, Nitkin V. P. *Materialy konferencii "Tekhnologii i oborudovanie dlya E'LS"* (Materials Conf. "Technology and Equipment ELS"). 2011, p. 71–80.
2. Maxnenko V. I. *Raschetnye metody issledovaniya kinetiki svarochnykh napryazhenij i deformacij* (Calculation methods of studying the kinetics of welding stresses and strains). Kiev, Naukova dumka, 1976, 320 p.
3. Tixonov A. N, Samarskiy A. A. *Uraveneniya matematicheskoy fiziki* (The equations of mathematical physics). Moscow, Nauka, 1965, 480 p.
4. Savel'ev I. V. *Kurs fiziki* (Physics course). Moscow, Nauka, 1973, 420 p.
5. Timoshenko S. P. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials). Moscow, Nauka, 1965, 480 p.
6. Poston T., Stuart I. *Teoriya katastrof i eyo prilozheniya* (Catastrophe theory and its applications). Moscow, Mir, 1980, 612 p.
7. Pisarenko G. S. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials). Kiev, Vysshaya shkola, 1979, 696 p.
8. Polovinkin A. P. *Teoriya izobretatel'stva* (The theory of invention). Moscow, Vysshaya shkola, 1975, 340 p.

© Гайденов Н. Д., Серегин Н. Ю., Савенков Д. П., Майтакова А. В., 2013

УДК 621.762

Ю. И. Гордеев¹, А. К. Абкарян¹, Г. М. Зеер¹, А. А. Лепешев²

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЛЕГИРУЮЩИХ КЕРАМИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ НА СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ*

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: aaa@mail.sibsau.ru

Получены новые данные о влиянии добавок керамических наночастиц на свойства твердых сплавов WC-Co, WC-TiC-Co, TiC-Ni-Mo с использованием расчетных и экспериментальных методов. Конечные физико-механические и эксплуатационные свойства твердосплавных композитов модифицированных наночастицами находятся в прямой зависимости от параметров их микроструктуры, соотношения объемных долей и размеров карбидных и сверхтвердых частиц.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 14.513.11.0039 от 20.03.2013 г.