



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВАРКИ ВЗРЫВОМ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНАТОРНОГО АЛГОРИТМА МГУА И РАСШИРЕНИЯ ВЫБОРКИ ДАННЫХ

Чл.-кор. НАН Украины А. Г. ИВАХНЕНКО, М. Е. ВЕРЕВКИН, Г. А. ИВАХНЕНКО, инженеры
(Международ. науч.-учеб. центр информац. технологий и систем НАН Украины и М-ва образования и науки Украины)

Исследована зависимость геометрических характеристик волнообразной поверхности между плитами, образующейся при сварке взрывом, от расположения и размера плит, а также количества используемой взрывчатки. Приведены результаты исследований свойств комбинаторного алгоритма метода группового учета аргументов (МГУА) применительно к поставленной задаче. Проведена идентификация модели с помощью комбинаторного алгоритма МГУА с использованием расширения выборки данных. В качестве основного критерия взят критерий регулярности, в качестве вспомогательного — критерий минимума смещения.

Ключевые слова: сварка взрывом, МГУА, комбинаторный алгоритм, расширение выборки

В настоящее время сварка взрывом находит широкое применение в ряде отраслей современной промышленности. По данным информационного центра делового сотрудничества [1], предложения, касающиеся сварки взрывом, на бирже технологий составляют около 45 % их общего количества.

Сварка взрывом является перспективным способом и широко применяется на предприятиях во многих городах Украины, в том числе Киеве, Днепропетровске, Кривом Роге [2]. Однако процессы, имеющие место при этом способе сварки, пока еще исследованы мало. В настоящее время не существует физической модели, которая описывала бы сварку взрывом. В данной работе нами принята попытка восполнить этот пробел.

На рис. 1 схематически изображена сварочная установка, состоящая из основной плиты толщиной x_4 , наковальни и флаера, который сталкивается с основной плитой и соединяется с ней. Толщину флаера (удельную массу) обозначим x_3 . В состав сварочной установки также входят буфер, взрывчатка, позволяющая получить ударную волну для разгона флаера, и детонатор. Количество взрывчатки на единицу массы флаера обозначим x_2 . В зоне сваривания происходит взаимопроникновение

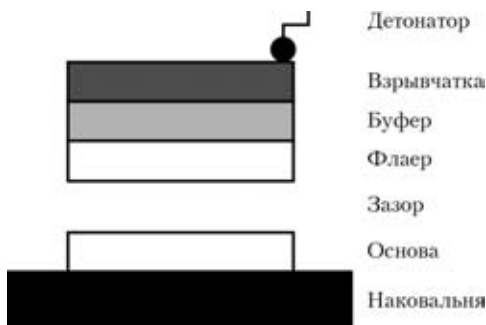


Рис. 1. Схема сварочной установки

волнистой формы, которое охарактеризуем двумя переменными y_1 и y_2 — соответственно длина и амплитуда волны. В исследовании также используется переменная x_1 — зазор между основной плитой и флаером.

Длина и амплитуда образующихся волн являются в нашем эксперименте выходными величинами. Они имеют порядок соответственно десять и сто микрометров. Размер начальной выборки данных (таблица) составляет 6×16 . Она является результатом 16 измерений шести величин, две из которых — это упомянутые выше выходные величины (длина и амплитуда волны). Наша задача состоит в поиске «наилучшей» зависимости выходных величин y_1 и y_2 от входных — x_1 , x_2 , x_3 и x_4 .

Начальная выборка данных

№ испытаний	Выходные параметры		Входные параметры			
	Амплитуда волны, мкм	Длина волны, мкм	Зазор, мм	Масса взрывчатки на единицу массы флаера, г	Толщина флаера, мм	Толщина основной плиты, мм
1	10	200	3	0,8	3	6
2	20	230	6	1,5	3	6
3	30	280	6	0,8	6	6
4	35	290	3	1,5	6	6
5	10	200	6	0,8	3	12
6	35	270	3	1,5	3	12
7	16	240	3	0,8	6	12
8	40	310	6	1,5	6	12
9	16	260	6	1,5	3	12
10	25	300	3	1,5	6	12
11	12	220	6	0,8	3	6
12	40	270	3	1,5	3	6
13	20	260	3	0,8	6	6
14	40	300	6	1,5	6	6
15	10	200	3	0,8	3	12
16	20	200	6	0,8	6	12



Построение эксперимента. Для нахождения модели сварки взрывом нами использованы данные работы [3] (см. таблицу). Иранские ученые провели структурную идентификацию модели зависимости геометрии сварочного шва от толщин плит, расстояния между ними и удельного количества взрывчатки тремя разными способами, в одном из которых использовали двухуровневый алгоритм метода группового учета аргументов (МГУА). Особенность указанной работы состоит в том, что для поиска закономерностей применяется комбинаторный алгоритм МГУА, основанный на принципе самоорганизации моделей [4], т. е. использование для определения модели двух выборок данных, которые обрабатываются по очереди. Оценку коэффициентов полиномиальной модели получают на основании одной выборки, а структуру модели и количество ее аргументов — на основании другой. При таком способе обработки данных двух выборок последовательно учитываются два критерия перебора множества моделей-кандидатов: внешний критерий погрешности модели RR и критерий ее несмещенности BS [5]. Смещенность модели равна нулю, если модели, полученные на обеих выборках, оказываются одинаковыми. Критерии погрешности и несмещенности не зависят друг от друга. Истоки данного метода относятся еще к 1960-м годам. Этот новаторский подход был предложен в работе [6].

Применим к полученным данным комбинаторный алгоритм МГУА, а также произведем расширение выборки. Комбинаторный алгоритм имеет преимущество перед многорядным: для отыскания оптимальной модели используется метод полного перебора. Сначала из всех возможных линейных по параметрам моделей выбирается небольшое количество наиболее точных, а потом применяется доопределение модели по критерию минимума смещения. Расширение выборки обычно осуществляют двумя способами — путем моделирования новых экспериментальных данных (расширение вниз) или новых данных измерений (расширение вправо). В настоящей работе нами использован новый комбинированный способ, который объединяет в себе оба упомянутых выше [7].

Отбор проводили по двум критериям последовательно, т. е. лучшие по основному критерию модели проверяли по дополнительному критерию. Для каждой полученной модели вычисляли также среднюю процентную погрешность по формуле

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|y_{ij} - \bar{y}_{ij}|}{y_{ij}}, \quad i = 1, 2,$$

где n — количество измерений; i — номер выходной величины, для которой вычисляется погрешность; $y_1 = y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n}$ и $y_2 = y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n}$ — выходные векторы.

Эксперименты с расширением выборки. Сначала алгоритм МГУА был применен непосредственно к начальной экспериментальной выборке. Лучшими оказались модели

$$y_1 = -28,8893 + 0,1917y_2 + 7,2411x_2 - 0,4495x_4,$$

$$y_2 = 164,2421 + 2,5758y_1 + 5,9153x_3.$$

Для них значения критериев регулярности и минимума смещения равны соответственно $RR = 36,8719$, $BS^2 = 1,0186 \cdot 10^{-3}$ и $RR = 443,5273$, $BS^2 = 5,7911 \cdot 10^{-4}$, относительная погрешность составляет $MAPE = 20,67\%$ для y_1 и $MAPE = 5,162\%$ для y_2 .

Далее нами было улучшено качество аппроксимации за счет расширения матрицы наблюдений вниз. В работе [8] нобелевских лауреатов Р. Энгла и К. Грэнжера доказано, что результаты аппроксимации начальной выборки данных улучшаются при введении дополнительных аддитивных признаков, т. е. выборка данных расширяется вправо. Расширим выборку вниз и проверим, каким образом это повлияет на точность модели. Указанное выполняли с помощью генерации средних точек — строк, являющихся полусуммой соседних. Наиболее весомым аргументом для каждой выходной величины оказалась другая выходная величина, которая использовалась в качестве аргумента. Увеличение количества строк не привело к улучшению модели, а даже ухудшило ее. Однако при многократном отборе «лучших» средних точек оценка значительно улучшилась. Справедливо будет отметить, что использование дополнительных строк может существенно улучшить оценку аппроксимации, так и не повлияв на нее. Все зависит от конкретной экспериментальной выборки.

Затем расширим выборку вправо, дополним ее новыми столбцами, которые можно получить путем перемножения начальных или вычисления их средних значений (аналог средних точек для столбиков). На примере данной выборки видно, как влияет расширение вправо на качество аппроксимации выходных величин. Результаты, полученные для y_1 и y_2 , показали, что расширение выборки вправо очень эффективно, особенно за счет мультипликативных признаков. Если же выборка расширяется за счет аддитивных признаков, то положительный эффект проявляется только вначале, и поэтому нет смысла в добавлении многих аддитивных признаков. В большинстве задач вообще следует ограничиться лишь средним из всех входных векторов.

Следующий шаг — расширение начальной выборки данных как вниз, так и вправо. Полученную выборку анализировали следующим образом: сначала находили модель по данным левой верхней подвыборки размером 5×5 , потом 6×6 и так до 24×24 (рис. 2). Оказалось, что само по себе добавление «средних точек» не дает ощутимого эффекта, зато вместе с добавлением новых факторов оно становится эффективным способом улучшения качества аппроксимации выходных величин. Отметим, что при значительной схожести векторов y_1 и y_2 ($\text{corr}(y_1, y_2) \approx 0,8392$) точность модели была улучшена без их использования в качестве входных переменных.

Очень важно то, что на практике длину и амплитуду получаемого при сварке волнистого кон-

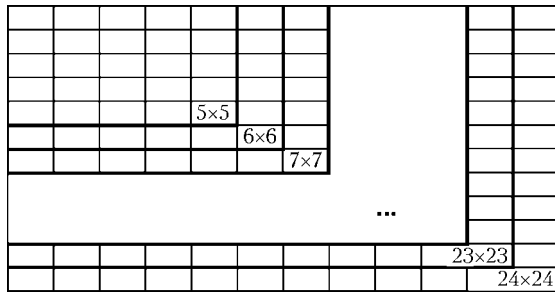


Рис. 2. Способ формирования подвыборок для анализа изменения критериев качества аппроксимации

тура в месте соединения плит нужно определять одновременно, т. е. значения y_1 и y_2 до самого начала процесса сварки неизвестны. На самом деле, задача сварщика состоит в том, чтобы определить амплитуду и длину волны заблаговременно в зависимости от толщины основной плиты и фляера, зазора между ними и массы взрывчатки на единицу массы фляера.

Нахождение наилучшей модели. После таких обнадеживающих результатов откажемся от использования y_1 и y_2 как независимых переменных при поиске наилучшей модели. Таким образом автоматически достигается, что результаты настоящей статьи можно использовать непосредственно в реальных условиях — на производстве. Для улучшения модели начальную выборку данных дополнительно дополнили четырьмя столбиками — $1/x_1, 1/x_2, 1/x_3, 1/x_4$. Введение признаков такого вида улучшает информативность выборки и качество модели, поскольку при этом учитывается новый вид зависимости.

Итак, аппроксимирована выходная величина с помощью подвыборки размером $(n + 1)n, 6 \leq n \leq 21$, где n — количество используемых незави-

MAPE, %; RR-1000

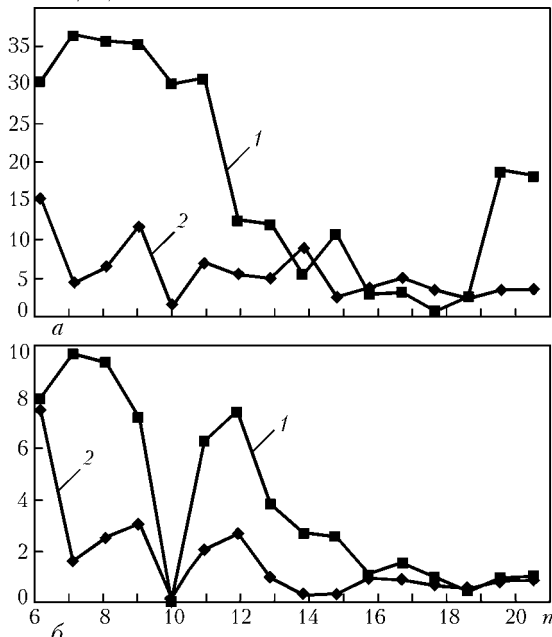


Рис. 3. Зависимость погрешности MAPE (1) и критерия регулярности RR (2) от количества строк и столбцов в $(n + 1)n$ -подвыборке данных с аддитивным $(n + 1)$ -м столбцом: а, б — выходные величины соответственно y_1, y_2

симых переменных, а также количество строк. С каждым шагом количество строк и столбцов подвыборки увеличивалось на 1, аналогично рис. 2, и для новой подвыборки вычислялась новая модель. В каждую подвыборку включался также аддитивный фактор $1/4(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)$.

Результаты показали, что самый важный параметр, от которого зависят обе выходные величины, — это удельное количество взрывчатки. В меньшей степени на выходы влияет толщина фляера, а толщина основной плиты практически не влияет на форму волнистого контура между свариваемыми взрывом поверхностями.

Наилучшая модель:

$$y_1 = 182,356662048 + 10,863406557668x_1 + 124,0341248788x_2 + 10,863406557668x_3 + 5,4317032788332x_4 + 330,715922928 \frac{1}{x_4} - 15,98347606x_1x_2 + 0,24185654156x_1x_3 + 0,4613825486x_1x_4 - 11,4229643128x_2x_3 + 0,5116753672x_3x_3 + 1,137106842x_1x_2x_3 - 0,544132x_1x_2x_4 - 0,283593x_1x_3x_4 - 0,792656x_2x_3x_4 + 0,287267x_1x_2x_3x_4.$$

Показатели модели следующие: $RR = 3,5625 \cdot 10^{-3}$; $MAPE = 0,711\%$; $BS^2 = 7,79 \cdot 10^{-2}$. Они намного лучше предыдущих, что свидетельствует о необходимости использования аддитивного вектора, который является средним значением всех факторов.

Кривые RR и $MAPE$ на рис. 3, б имеют ярко выраженный минимум при $n = 10$. Следовательно, оптимальной является модель, полученная на подвыборке 11×10 . Интересно, что при $n = 10$ также достигается минимум критерия регулярности для выхода y_1 (рис. 3, а), а большое значение средней относительной процентной погрешности объясняется, вероятно неточностью измерений амплитуды.

Итак, оптимальная модель для y_2 следующая:

$$y_2 = 121,27555756 - 10,57224957254x_1 - 42,28899829017x_2 + 129,76965057 \frac{1}{x_2} - 10,5722495725x_3 - 237,867936006 \frac{1}{x_3} - 5,28612478627x_4 + 8,921349846x_2x_3 + 17,25386x_2x_4 + 7,0527133x_1x_2x_3 - 0,7336352x_2x_3x_4 - 0,4578947x_1x_2x_3x_4.$$

Показатели модели $RR = 2,04 \cdot 10^{-4}$, $MAPE = 0,058\%$, $BS^2 = 2,0084 \cdot 10^{-4}$ очень хорошие. Полученная модель рекомендуется нами в качестве наилучшей для описания процессов при сварке взрывом.

Таким образом, в настоящей статье индуктивным способом найдена зависимость выходных величин (амплитуды и длины волны, образующейся на стыке свариваемых поверхностей после соединения) от входных величин (толщины основной плиты, фляера, зазора между плитами и массы взрывчатого вещества на единицу массы фляера). В процессе исследований настоящей работы по-



лучен богатый набор данных, в который вошли дополнительные факторы (мультипликативные и аддитивные) и строки, около 15 моделей для разных способов расширения начальной выборки, зависимости критерия регулярности RR и погрешности $MAPE$ от размера выборки данных.

Оказалось, что обе выходные величины очень похожи как по своим моделям, так и по виду полученных графиков. Основным показателем для определения амплитуды и длины волны является параметр x_2 (удельная масса взрывчатого вещества на единицу массы фляера), который доминирует над остальными. В меньшей мере выходные величины зависят от толщины фляера x_3 . Волнистый контур в месте соединения двух поверхностей от зазора между плитами и от толщины основной плиты практически не зависит.

Отметим также, что проведенное нами исследование является единственным в своем роде в Украине. Надеемся на тесное плодотворное сотруд-

ничество в дальнейшем двух наук — кибернетики и сварки.

1. Інформаційний центр ділового співробітництва // www.uatechnology.org.
2. Інформаційний портал о взрывчатых веществах // www.explosive.ru.
3. *Nariman-Zadeh N., Darvizeh A., Gharababaei H.* Modeling and prediction of process parameters in explosive welding of plates using GMDH-type neural network and singular value decomposition // *Iranian J. Sci. and Technol.* — 2001. — **25**, № 81. — P. 453–461.
4. *Ивахненко А. Г.* Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. — Киев: Техника, 1975. — 311 с.
5. *Ивахненко А. Г., Степанко В. С.* Помехоустойчивость моделирования. — Киев: Наук. думка, 1985. — 215 с.
6. *Круг Г. М., Круг О. Ю.* Математический метод классификации древней керамики // *Тр. Ин-та археологии АН СССР.* — М.: Наука, 1965. — С. 317–323.
7. *Ivakhnenko A. G., Savchenko E. A., Ivakhnenko G. A.* Concrete optimization of square data samples as the first stage of the optimization of a piscvminant or predictive mode // *Pattern Recogn. and Image Analysis.* — 2004. — **14**, № 4. — P. 489–494.
8. www.nobel.se/economics/laureates/2003/ccoadv.pdf.

A dependence was studied between the geometrical features of wavy interface of the plates formed in explosion welding on plate location and size, as well as on the amount of the explosive used. The paper also gives the results of studying the properties of the combinatorial algorithm of the method of group accounting for arguments (MGAA) for the posed problem. The model was identified by MGAA combinatorial algorithm, using a data sampling extension. Regularity criterion is used as the main criterion, and minimum displacement criterion is the auxiliary criterion.

Поступила в редакцию 21.06.2004

III ВСЕУКРАИНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

25–27 мая 2005 г.

г. Киев

Приглашаются молодые остепененные и неостепененные научные сотрудники, аспиранты и специалисты возрастом до 35 лет.

Тематика конференции:

- Прогрессивные технологии сварки и соединения материалов
- Прочность, надежность и долговечность сварных конструкций
- Технологии наплавки, нанесения покрытий и обработки поверхности
- Процессы специальной электрометаллургии
- Новые конструкционные и функциональные материалы
- Автоматизация процессов сварки и родственных технологий
- Фундаментальные исследования физико-химических процессов (термодинамика, кинетика, микроструктура, фазовые превращения, электронная структура, свойства).

Желающим принять участие в конференции и выступить на ней с докладом необходимо до 20 марта 2005 г. прислать по электронной почте тезисы доклада в объеме одной страницы формата А (редактор Word, без иллюстраций, набор через 1,5 интервала, шрифтом № 14).

По всем вопросам просьба обращаться в оргкомитет:
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, СНМИ;
Тел.: (044) 261-51-34 www.paton.kiev.ua,
E-mail: sci-youth@paton.kiev.ua