



ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ НА СОДЕРЖАНИЕ δ -ФЕРРИТА В КОРРОЗИОННОСТОЙКОМ СЛОЕ

П. К. ПАЛАНИ, Н. МУРУГАН (Гос. технол. ин-т, г. Коимбатор, Индия)

Качество наплавленных деталей зависит от количества остаточного δ -феррита в наплавленном металле, что, в свою очередь, определяется параметрами процесса наплавки. Управление процессом образования феррита при наплавке можно легко обеспечить с помощью уравнений, позволяющих прогнозировать число феррита (FN) на основе таких параметров процесса, как величина тока и скорость сварки, а также расстояние между горелкой и изделием. Установлено, что изменение расстояния между горелкой и изделием оказывает наибольшее влияние на величину FN по сравнению с другими параметрами процесса.

Ключевые слова: дуговая наплавка, коррозионно-стойкий слой, параметры процесса, δ -феррит, анализ чувствительности, уравнение регрессии

Коррозия металла, ослабляя конструкцию, может привести к ее разрушению. Хотя полностью исключить коррозию невозможно, ее можно снизить до определенной степени. Для этого на менее коррозионностойкую подложку наносят защитный слой с помощью процесса наплавки [1–5] (нанесение относительно толстого слоя коррозионностойкого материала на основу из углеродистой или низколегированной стали [6–10]). Среди различных способов, применяемых для защиты поверхности, наиболее распространенным является дуговая наплавка, при которой толщина необходимого покрытия превышает 3 мм. Наплавку широко применяют в энергетике, а также в обрабатывающих отраслях промышленности [11]. Качество наплавленных деталей зависит от металлургических характеристик, в том числе от содержания δ -феррита в структуре, образующейся в наплавленном металле.

Металл шва аустенитной нержавеющей стали обычно содержит 2...7 % феррита в аустенитной матрице, что повышает свариваемость и прочность швов [12–23]. Сохранение заданного количества феррита и аустенита в шве имеет большое значение для обеспечения необходимой коррозионной стойкости и долговечности наплавленных конструкций [24].

Исследования показали, что небольшое количество первичного остаточного феррита в металле шва при комнатной температуре снижает чувствительность к образованию трещин в нержавеющей стали серии 300, являющейся полностью аустенитной в исходном состоянии [14–18]. Однако слишком большое содержание феррита способ-

ствует снижению механической прочности и коррозионной стойкости. Таким образом, в зависимости от назначения необходимо, чтобы критическое содержание феррита в стали составляло около 3...8 об. % [19–25]. Превышение этого значения (если материал эксплуатируется при высокой температуре) предполагает превращение δ -феррита в хрупкую σ -фазу [26–34]. Ограничение по содержанию феррита в швах требуется также при изготовлении деталей или конструкций из немагнитных материалов.

Большое влияние на содержание остаточного δ -феррита, образующегося при наплавке, оказывают такие параметры процесса, как ток сварки, скорость подачи проволоки, скорость сварки и расстояние между горелкой и изделием. В связи с этим возникла необходимость в разработке методологии с целью управления и оптимизации содержания δ -феррита, образующегося в процессе наплавки коррозионностойкого слоя, соответствующего составу аустенитной нержавеющей стали.

Целью данной работы является разработка уравнения регрессии для определения зависимости между количеством образующегося δ -феррита и параметрами процесса наплавки и степень влияния последних на образование δ -феррита.

Исследование выполняли в два этапа. На первом проводили эксперименты с различными параметрами процесса методом планирования эксперимента с целью построения статистических моделей для прогнозирования количества образующегося феррита, на втором был проведен анализ чувствительности на основе разработанных эмпирических уравнений.

Исследование проводили с использованием процесса дуговой наплавки порошковой проволокой (FCAW) диаметром 1,2 мм, соответствующей по

Таблица 1. Химический состав используемых материалов, мас. %

Материал	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N ₂	Cu
317L (порошковая проволока)	0,021	0,890	1,380	0,016	0,007	18,46	3,18	13,10	0,057	0,007
2062 (конструкционная сталь)	0,180	0,180	0,980	0,016	0,016	—	—	—	—	—



Таблица 2. Параметры процесса дуговой наплавки и их пределы

Параметры процесса	Программируемый предел				
	-1,682	-1	0	1	1,682
Сварочный ток $I_{св}$, А	176	190	210	230	244
Скорость сварки S , см/мин	26	29	34	39	42
Расстояние между горелкой и изделием N , мм	15	17	20	23	25

химическому составу металлу наплавки аустенитной нержавеющей стали 317L (AWS: A5-22-95; EN 12073) на подложку в виде пластины из конструкционной стали 2062. Химический состав основного и присадочного материалов, используемых в данном исследовании, приведен в табл. 1.

Методика проведения эксперимента. Были определены такие независимо контролируемые параметры процесса, как ток сварки $I_{св}$, скорость сварки S и расстояние между горелкой и изделием N . Рабочий диапазон параметров установлен путем выполнения серии испытаний и контроля качества наплавленного валика с учетом внешнего вида или гладкости поверхности, а также наличия каких-либо видимых дефектов. Установлено, что скорость подачи проволоки ω_f прямо пропорциональна току сварки: $\omega_f = -6,92 + 0,0860I_{св}$ [35].

Таблица 3. Матрица плана и результаты измерения

Параметры процесса			Измеренные значения FN	Нелинейная модель		Полиномиальная модель	
$I_{св}$, А	S , см/мин	N , мм		прогнозируемое значение FN	погрешность, %	прогнозируемое значение FN	погрешность, %
190	29	17	7,28	6,441868	13,05727	7,27302	0,137219
230	29	17	5,80	5,602188	3,530984	5,53902	4,711664
190	39	17	6,48	5,848796	10,84332	6,08182	6,596381
230	39	17	4,12	5,086421	-19,059	4,34782	-5,30887
190	29	23	5,62	6,53997	-14,1128	5,67252	-0,97875
230	29	23	5,67	5,687502	-0,36048	5,89452	-3,85986
190	39	23	5,70	5,937867	-4,00593	5,78632	-1,49179
230	39	23	5,72	5,163882	10,71129	6,00832	-4,84861
176	34	20	5,75	6,521081	-11,8244	6,10514	-5,81707
244	34	20	4,75	5,135792	-7,51183	4,81994	-1,45106
210	26	20	6,17	6,255008	-1,407	6,44838	-4,36358
210	42	20	5,43	5,349706	1,55698	5,58646	-2,747
210	34	15	5,55	5,649371	-1,75898	5,99242	-7,38299
210	34	25	6,23	5,795522	7,54855	6,04242	3,154034
210	34	20	5,88	5,73122	2,613408	6,01742	-2,26708
210	34	20	6,283	5,73122	9,627621	6,01742	4,413519
210	34	20	6,101	5,73122	6,452032	6,01742	1,388967
210	34	20	5,704	5,73122	-0,47494	6,01742	-5,20854
210	34	20	6,09	5,73122	6,260101	6,01742	1,206165
210	34	20	5,301	5,73122	-7,5066	6,01742	-11,9058
Коэффициент детерминации R^2				0,387		0,823	
Коэффициент корреляции Пирсона P				0,600		0,933	
Среднеквадратическая ошибка				0,112		0,052	
Абсолютная ошибка				0,406		0,190	

После определения рабочего диапазона параметров процесса установлен верхний и нижний запрограммированный предел (соответственно на уровне +1,682 и -1,682). При этом запрограммированные значения промежуточных уровней рассчитывали по уравнению $X_i = 1,682[2X - (X_{max} + X_{min})]/(X_{max} - X_{min})$, где X_i – необходимое запрограммированное значение параметра X от X_{min} до X_{max} . Выбранные значения параметров процесса, а также единицы и обозначения этих параметров приведены в табл. 2.

Эксперименты проводили с использованием установки для синергетической сварки МИГ «Unimacro Esseti 501», находящейся в Технологическом институте (г. Коимбатор, Индия). Проведено 20 серий испытаний с использованием одной основной составной матрицы ротatableльного плана в произвольном порядке с целью исключения какой-либо систематической ошибки в системе. Испытания проводили наложением одного валика длиной 150 мм на пластины из конструкционной стали с использованием порошковой проволоки из нержавеющей стали 317L диаметром 1,2 мм в смеси защитных газов 95 % Ar + 5 % CO₂, подаваемой со скоростью 16 л/мин. Исследования проводили на постоянном токе обратной полярности при угле наклона электрода 90°.

Содержание феррита измеряли с помощью прибора FERRITSCOPE® MP30 фирмы «Fischer Instruments (G.B.) Ltd.», Англия. Ферритоскоп калибровали в соответствии со стандартами WRC (Исследовательского сварочного центра). Перед измерениями его регулировали по форме образца, выполняя корректирующую калибровку по стандартам пользователя в соответствии с методиками, описанными в стандартах ANSI/AWS A 4.2 (Национальный институт стандартизации США в Американском сварочном обществе).

Линейное наблюдение проводили для шлифованной плоской верхней наплавленной поверхности каждого образца по продольной оси наплавки. Измеренные средние значения содержания феррита FN приведены в табл. 3.

Построение математических моделей. Нелинейная модель. Используя содержание феррита FN в качестве зависимого параметра и такие параметры процесса, как ток $I_{св}$, скорость сварки S и расстояние между горелкой и изделием N , в качестве независимых параметров зависимость между ними можно выразить следующим выражением [36]:

$$FN = AI_{св}^b S^c N^d, \quad (1)$$



Таблица 4. Результаты экспериментальных исследований

№ эксперимента	Параметры процесса			Измеренные значения FN	Нелинейная модель		Полиномиальная модель	
	$I_{св}$, А	S , см/мин	N , мм		прогнозируемое значение FN	погрешность, %	прогнозируемое значение FN	погрешность, %
1	200	32	21	5,73	6,072662	-5,64271	6,051	-5,305
2	210	29	23	5,70	6,078583	-6,22814	5,875	-2,978
3	210	39	20	5,79	5,480525	5,64682	5,643	2,605
4	230	34	23	5,61	5,400093	3,887105	5,831	-3,790
5	220	45	18	4,499	5,029275	-10,5438	4,362	3,141
6	190	34	20	6,399	6,166241	3,774732	6,130	4,388
7	230	29	20	5,43	5,647896	-3,85801	5,610	-3,208
Коэффициент детерминации R^2					0,599		1	
Коэффициент корреляции Пирсона P					0,798		0,92	
Среднеквадратическая ошибка					0,126		0,099	
Абсолютная ошибка					0,406		0,228	

где A , b , c и d – искомые постоянные.

Уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\log(FN) = \log(A) + b\log(I_{св}) + c\log(S) + d\log(N). \quad (2)$$

Выражение (2) можно выразить в виде математического линейного уравнения

$$K = \beta_0 x_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3, \quad (3)$$

где K – логарифмическое значение экспериментально измеренной характеристики FN; $\beta_0 - \beta_3$ – искомые постоянные; x_0 – единичный вектор-столбец; $x_1 - x_3$ – логарифмические значения сварочного тока, скорости сварки и расстояния между горелкой и изделием.

Постоянные определяли по экспериментальным данным, приведенным в табл. 3, с использованием статистической программы Systat® V11. Полученное в результате нелинейное уравнение имеет следующий вид:

$$FN = 10^{2,89} I_{св}^{-0,731} S^{-0,326} N^{0,050}. \quad (4)$$

Моделирование количества феррита FN с использованием уравнения полиномиальной регрессии. Для представления поверхности отклика с использованием коэффициентов K применяли следующее полиномиальное уравнение регрессии второго порядка [1, 37–44]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i X_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^K b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^K b_{ii} X_i^2, \quad (5)$$

Таблица 5. Дисперсионный анализ для нелинейной и полиномиальной моделей

Источник	Нелинейная модель					Полиномиальная модель				
	Сумма квадратов	Число степеней свободы df	Среднеквадратическое отклонение	F-критерий	Коэффициент корреляции P	Сумма квадратов	Число степеней свободы df	Среднеквадратическое отклонение	F-критерий	Коэффициент корреляции P
Регрессия	0,019	3	0,006	3,370	0,045	6,454	6	1,076	10,137	0
Анализ остатков	0,030	16	0,002	–	–	1,379	13	0,106	–	–

где Y – отклик; b_0 – свободный член уравнения регрессии; коэффициенты b_1, b_2, \dots, b_k – линейные, $b_{11}, b_{22}, \dots, b_{kk}$ – квадратичные, $b_{12}, b_{13}, \dots, b_{k-1k}$ – интерактивные члены.

Значения коэффициентов указанного полинома определяли с помощью статистической программы Systat® V11. Полная модель оценки, использующая параметры в натуральном виде, может быть описана следующим уравнением:

$$FN = 33,58 + 0,0548 I_{св} - 0,264 S - 2,5999 N - 0,00047 I_{св}^2 + 0,00022 S^2 + 0,00384 N^2 - 0,00114 S I_{св} + 0,000815 N I_{св} + 0,02175 S N. \quad (6)$$

С целью упрощения несущественные коэффициенты в уравнении (6) можно опустить. Для этого применяются t - и F -критерии. С использованием методики последовательного расчета, включенной в программу Systat®, в модель автоматически по одной вводят переменные с $F \geq 4,0$ и исключают переменные с $F \leq 4,0$. После определения значимых коэффициентов строят конечную модель с параметрами в натуральном виде, определенными с помощью указанной методики:

$$FN = 39,57 + 0,0197 I_{св} - 0,4889 S - 2,446 N - 0,00048 I_{св}^2 + 0,00815 N I_{св} + 0,02175 S N. \quad (7)$$

Выбор уточненной модели. Из двух построенных таким образом моделей (нелинейной и полиномиальной) на основе определенных критериев, таких как дисперсионный анализ (ANOVA), коэффициент детерминации R^2 , коэффициент корреляции Пирсона P , степень точности и среднеквадратическая погрешность, выбрали наиболее точ-

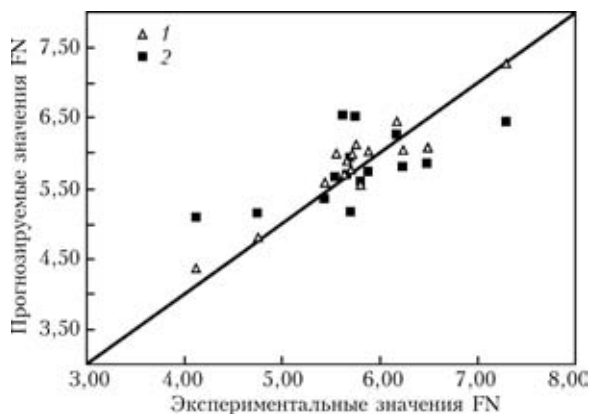


Рис. 1. Диаграмма разброса данных для полиномиальной (1) и нелинейной (2) моделей

ную. Сравнительные данные приведены в табл. 3–5.

Адекватность построенных моделей проверяли методом дисперсионного анализа (ANOVA) [32–40] (табл. 5). Метод позволил установить, что расчетный коэффициент F для нелинейной модели составляет 3,370, а для полиномиальной – 10,137. Соответственно значение R^2 и уточненное значение R^2 для нелинейной модели составляют 0,39 и 0,27, а для полиномиальной 0,82 и 0,74.

Как видно из рис. 1, в полиномиальной модели точки находятся ближе к линии 45° по сравнению с нелинейной моделью.

Для обеспечения точности разработанных моделей были проведены дополнительные эксперименты. Значения R^2 , P и RMSE для нелинейной и полиномиальной моделей составляют соответственно 0,599; 0,79; 0,126 и 1; 0,92; 0,099.

Как следует из рассмотренного выше, между экспериментальными и прогнозируемыми значениями при использовании уравнения полиномиальной

Таблица 6. Чувствительность содержания феррита (FN) к параметрам процесса наплавки

Параметры процесса			Чувствительность		
$I_{св}$, А	S , см/мин	N , мм	$d(FN)/dI_{св}$	$d(FN)/dN$	$d(FN)/dS$
176	34	20	0,01374	-0,2721	-0,0539
190	34	20	0,0003	-0,158	-0,0539
210	34	20	-0,0189	0,005	-0,0539
230	34	20	-0,0381	0,168	-0,0539
244	34	20	-0,05154	0,2821	-0,0539
210	26	20	-0,0189	-0,169	-0,0539
210	29	20	-0,0189	-0,1038	-0,0539
210	34	20	-0,0189	0,005	-0,0539
210	39	20	-0,0189	0,11375	-0,0539
210	42	20	-0,0189	0,179	-0,0539
210	34	15	-0,05965	0,005	-0,1627
210	34	17	-0,04335	0,005	-0,1192
210	34	20	-0,0189	0,005	-0,0539
210	34	23	0,00555	0,005	0,01135

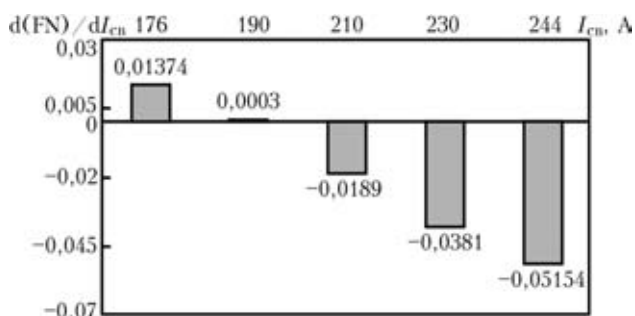


Рис. 2. Чувствительность FN к току сварки ($S = 34$ см/мин, $N = 20$ мм)

регрессии наблюдается достаточно хорошее согласование. Таким образом, для данного исследования как наиболее точное было выбрано полиномиальное уравнение.

Анализ чувствительности. Качественную и количественную эффективность параметров процесса можно определить с использованием анализа чувствительности, с помощью которого можно установить и определить порядок значимости критических параметров [37]. Такой анализ может помочь инженерам-технологам эффективно выбирать параметры процесса и контролировать содержание феррита без многочисленных экспериментов методом проб и ошибок и в результате сэкономить время и материалы.

Ниже приведены уравнения чувствительности содержания феррита, полученные путем дифференцирования уравнения (6) [37]:

чувствительность к току сварки:

$$d(FN)/d(I_{св}) = 0,0197 - 2 \cdot 0,00048I_{св} + 0,00815N, \quad (8)$$

к скорости сварки:

$$d(FN)/d(S) = -0,4889 + 0,02175N, \quad (9)$$

к расстоянию между горелкой и изделием:

$$d(FN)/d(N) = -2,446 + 0,00815I_{св} + 0,02175S. \quad (10)$$

Расчетные значения чувствительности к току, скорости сварки и расстоянию между горелкой и изделием, полученные с использованием указанных уравнений, приведены в табл. 6 и на рис. 2–6. При соответствующем увеличении значений параметров процесса положительные значения чувствительности означают, что количество образующегося остаточного феррита FN увеличивается, отрицательные – снижается.

Чувствительность к току сварки. Как видно из рис. 2, феррит, образующийся в процессе наплавки, более чувствителен к току сварки в области повышенных значений тока. Чувствительность имеет положительное значение при токе ниже 190 А, т. е. воздействие тока сварки заключается в увеличении образования феррита в областях более низких значений тока и в снижении скорости образования феррита в областях повышенных значений. Чувствительность FN к току сварки выше в областях более низких значений N (рис. 3). Кроме того, повышение силы тока вызывает снижение FN. Однако если величина

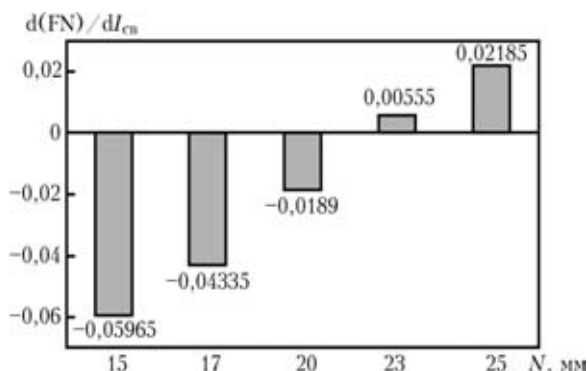


Рис. 3. Чувствительности FN к току сварки ($I_{св} = 210$ А, $S = 34$ см/мин)

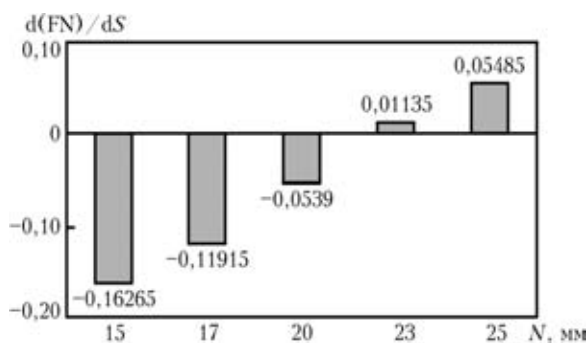


Рис. 4. Чувствительность FN к скорости сварки ($I_{св} = 210$ А, $S = 34$ см/мин)

N находится в области повышенных значений (например, выше 22 мм), с увеличением силы тока значение FN начинает возрастать.

При всех значениях скорости сварки чувствительность к току сварки остается постоянной (табл. 6), т. е. содержание феррита нельзя изменить путем изменения только скорости сварки.

Чувствительность к скорости сварки. Как следует из рис. 4, образование δ -феррита более чувствительно к скорости сварки в области более низких значений N , средний уровень которых соответствует нулевой чувствительности. В области повышенных значений N наблюдаются положительные значения чувствительности к скорости сварки. При $N < 22$ мм содержание феррита снижается, выше — увеличивается.

Чувствительность к расстоянию между горелкой и изделием. Чувствительность образования феррита к величине N при различных значениях S и $I_{св}$ показана на рис. 5 и 6. В обоих случаях она имеет положительные значения в областях повышенных значений скорости и тока сварки. Кроме того, чувствительность к расстоянию между горелкой и изделием максимальна при значении сварочного тока 176 и 244 А, т. е. даже незначительные изменения N вызывают существенное изменение величины FN в областях более высоких или более низких значений тока.

В заключение следует отметить, что в процессе работы установлены зависимости между параметрами процесса и количеством δ -феррита, образующимся в процессе наплавки порошковой проволокой 317L на пластины из конструкционной стали. Для выведения уравнений регрессии (нелинейной

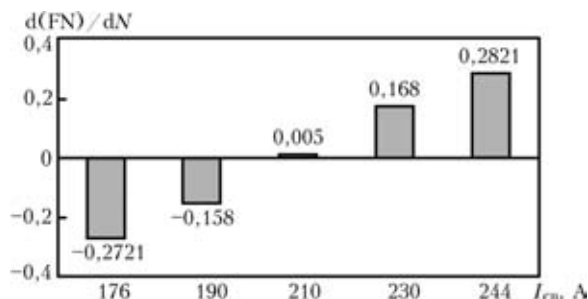


Рис. 5. Чувствительность FN к расстоянию между горелкой и изделием ($S = 34$ см/мин; $N = 20$ мм)

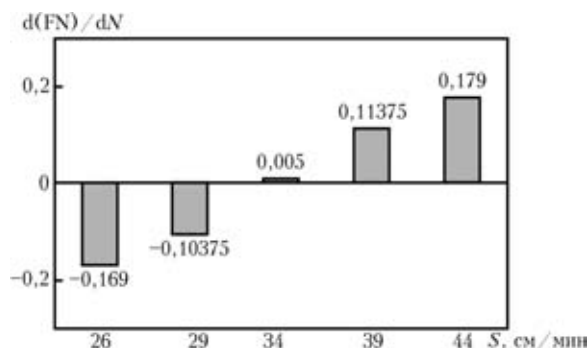


Рис. 6. Чувствительность FN к расстоянию между горелкой и изделием ($I_{св} = 210$ А; $N = 20$ мм)

и полиномиальной моделей) использовали методологию изучения поверхности отклика. Установлено, что модель, использующая полиномиальное уравнение, является вполне удовлетворительной.

С использованием анализа чувствительности определили параметры процесса, оказывающие наибольшее влияние на образование δ -феррита.

Для контроля образования остаточного феррита более эффективно контролировать параметры N и S , наибольшее влияние оказывает изменение расстояния между горелкой и изделием.

Авторы выражают благодарность Всеиндийскому совету технического образования и Большой комиссии Университета (Нью-Дели, Индия) за финансовую поддержку в приобретении оборудования и материалов.

1. Murugan N., Parmer R. S. Mathematical models for bead geometry prediction in austenitic stainless steel surfacing by MIG welding // Intern. J. for the Joining of Materials. — 1995. — 7(2/3). — P. 71–80.
2. Murugan N., Parmer R. S. Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding // Welding J. — 1997. — 76(10). — P. 391–402.
3. Khodadad Motarjemi A., Kocak M. Fracture assessment of weld repaired clad steel wide plates by SINTAP defect assessment procedure // Welding in the World. — 2001. — 45, Special issue. — P. 27–33.
4. Davis J. R. ASM specialty handbook on stainless steel. — ASM Intern., 2nd print, 1996. — P. 107–119.
5. Laser cladding for repair of engineering components: Australian / N. Alam, L. Jarvis, D. Harris, A. Solta // Welding J. — 2002. — 47, 2nd quart. — P. 38–47.
6. Heston Tim. Cladding operations doubles life of boiler tubing // Welding J. — 2000. — 79(7). — P. 45–47.
7. Joo Suk Lee, Insup Kim, Akihiko Kimura. Application of small punch test to evaluate sigma-phase embrittlement of pressure vessel cladding material // J. of Nucl. Sci. and Technol. — 2003. — 40(9). — P. 664–671.
8. Missori S., Murdolo F., Sili A. Single-pass laser beam welding of clad steel plate // Welding J. — 2004. — 83(2). — P. 65–71.



9. *Rajasekaran S.* Surface topography of pulsed current gas metal arc clads // *Surf. Eng.* — 2000. — **16**(6). — P. 495–500.
10. *Nishimoto K., Ogawa K.* Corrosion properties in weldments of stainless steels. Pt 1: Metallurgical factors affecting corrosion properties // *Welding J.* — 1999. — **13**, № 11. — P. 2–11.
11. *Buvanasekaram G., Venkateswara Prasad N.* Effect of cladding parameters on intergranular corrosion and bonding properties of cladding stainless steel layers // *Proc. of National conf. on recent advances in materials processing.* — Annamalai Univ., 2001. — P. 136–147.
12. *Dhanuka M. P.* Measurement of delta-ferrite content in austenitic stainless steel weld metals using WRC-92 diagram // *Proc. of Intern. welding symp., Mumbai, 2003.* — P. 219–222.
13. *Smith D. V.* A practical approach to ferrite in stainless steel weld metal // *Welding J.* — 1988. — **67**(6). — P. 57–69.
14. *Ahmad N., Mazur W.* Assessment of the repair strategy and the effects of the repair on the reactor pool liner. — Confidential Technical report CMIT(C)-2-3-155, CSIRO Manufacturing and Infrastructure Technology, Aug., 2003, Australia.
15. *Welding* consumable development for a cryogenic (4K) application / S. F. Kane, A. L. Farland, T. A. Siewert, C. N. McCowan // *Welding J.* — 1999. — **78**(8). — P. 292–300.
16. *The effect of delta-ferrite phase in weld metal of stainless steel on the mechanical properties at cryogenic temperature* / M. Saito, Horiya, A. Yamamoto et al. // *Materials and welding research lab., Nagasaki-R7d Centre, Japan.* <http://www.ena.or.jp/we-net/ronbun/1996/e16/naga1996.html>.
17. *Delong W. T.* Ferrite in austenitic stainless steel weld metal // *Welding J.* — 1974. — **53**(7). — P. 273–286.
18. *Prasad Rao K., Prasanna Kumar S.* Assessment criterion for variability of delta-ferrite in austenitic weld and clad metals // *Ibid.* — 1984. — **63**(7). — P. 231–239.
19. *Olson D. L.* Prediction of austenitic weld metal microstructure and properties // *Ibid.* — 1985. — **64**(10). — P. 281–295.
20. *Kotecki D. J.* Standards and industrial methods for ferrite measurement // *Ibid.* — 1988. — **77**(5). — P. 49–52.
21. *Kotecki D. J., Siewert T. A.* WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metals: a modification of the WRC-1988 diagram // *Ibid.* — 1992. — **71**(5). — P. 171–178.
22. *Kotecki D. J.* Ferrite determination in stainless steel welds // *Ibid.* — 1974. — **76**(1). — P. 24–37.
23. *Siewert T. A., McCowan C. N., Olson D. L.* Ferrite number prediction to 100 FN in stainless steel weld metal // *Ibid.* — 1988. — **67**(12). — P. 289–296.
24. *Ames N., Ramberg M., Johnson M., Johns T.* Comparison of austenitic, super austenitic and super duplex weld properties produced using GTAW flux // *Stainless Steel World, KCI Publ. BV, 2001.*
25. *Effect of welding parameters on the content of delta-ferrite in austenitic stainless steel weld and clad metals* / K. Prasad Rao, K. N. Krishnan, V. Rama Rao, G. J. Guru Raja // *Proc. of National IIW, Welding seminar, 1986, India.* — P. 64–72.
26. *Cui Y., Lundin Carl D.* Ferrite number as a function of the Larson–Miller parameter for austenitic stainless steel weld metals after creep testing // *Metallurg. and Materials Transac. A.* — 2004. — **35**. — P. 3631–3634.
27. *Vitek J. M., Iskander Y. S., Oblow E. M.* Improved ferrite number prediction in stainless steel arc welds using artificial neural networks. Pt 1: Neural network development // *Welding J.* — 2000. — **79**(2). — P. 34–40.
28. *Vitek J. M., Iskander Y. S., Oblow E. M.* Improved ferrite number prediction in stainless steel arc welds using artificial neural networks. Pt 2: Neural network development // *Ibid.* — 2002. — **79**(2). — P. 41–50.
29. *Balmforth M. C., Lippold J. C.* A new ferritic-martensitic stainless steel constitution diagram // *Ibid.* — 2000. — **79**(12). — P. 339–345.
30. *Kotecki D. J.* A Martensite boundary on the WRC-1992 diagram // *Ibid.* — 1999. — **78**(5). — P. 180–192.
31. *Barnhouse E. J., Lippold J. C.* Microstructure/property relationships in dissimilar welds between duplex stainless steels and carbon steels. www.aws.org/wj/supplement.
32. *The metallographic examination of archaeological artifacts, Laboratory Manual, June, 2003, MIT, Summer Institute in Materials Science and Material Culture.*
33. *Vitek J. M., David S. A., Hinman C. R.* Improved ferrite number prediction model that accounts for cooling rate effects. Pt 1: Model development // *Ibid.* — 2003. — **82**(1). — P. 10–17.
34. *Vitek J. M., David S. A., Hinman C. R.* Improved ferrite number prediction model that accounts for cooling rate effects. Pt 2: Model results // *Ibid.* — 2003. — **82**(2). — P. 43–50.
35. *Palani P. K., Murugan N.* Modeling and simulation of wire feed rate for steady current and pulsed current gas metal arc welding, communicated for possible publication // *Intern. J. of Computer Applications in Technology.*
36. *Kim I. S., Son J.-S., Young-Jae Jeung.* Control and optimization of bead for multi-pass welding in robotic arc welding processes: Australian // *Welding J.* — 2001. — **46**, 3-d quart. — P. 43–46.
37. *Sensitivity analysis for process parameters in GMA Welding process using Factorial design method* / I. S. Kim, K. J. Son, Y. S. Yang, P. K. D. V. Yaragada // *Intern. J. of Machine Tools and Manufacture.* — 2003. — **43**. — P. 763–769.
38. *Design of experiments study to examine the effect of polarity on stud welding* / S. Ramasamy et al. // *Welding J.* — 2002. — **81**(2). — P. 19–26.
39. *Applied statistics and probability for engineers* / D. C. Montgomery et al. — New York: John Wiley & Sons Inc., 1999.
40. *Walpole, Myers.* Probability and statistics for engineers and scientists. — 6th ed. — New Jersey: Prentice Hall, 1998.
41. *Cheremisinoff N. P.* Practical statistics for engineers and scientists. — Technomic publ. Co. Inc., 1987.
42. *Cochran W. G., Cox G. M.* Experimental designs. — 2nd ed. — Singapore: John Wiley & Sons, 1957.
43. *Khuri A. I., Cornell J. A.* Response surfaces, designs and analyses. — New York: Marcell Dekker Inc., 1996.
44. *Montgomery D. C.* Design and analysis of experiments. — 5th ed. — New York: John Wiley & Sons Inc., 2001.

The quality of clad parts depends upon the quantity of residual δ -ferrite in deposited metal, which, in turn, depends upon the cladding process parameters. Control of the ferrite formation process in cladding can be readily provided by using equations which allow prediction of the ferrite number based on such process parameters as current and welding speed, as well as distance between the torch and workpiece. Variations in distance between the torch and workpiece were found to have the highest effect on the FN value, compared with other process parameters.

Поступила в редакцию 11.05.2005