



*There are given the investigations results of optimization of alloy chemistry for transition zone of bimetallic casts, consisted of steel 45 and steels of 5X3V3MFS, 3X2V8F type. This work is carried out using the simplex-checker method of the mathematical planning of the experiment.*

Д. М. КУКУЙ, Г. И. КЛЕЩЕНАК, О. Г. КЛЕЩЕНАК,  
Белорусский национальный технический университет

УДК 669.187.56.001.3

## РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СПЛАВА ДЛЯ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ (УГЛЕРОДИСТАЯ — ВЫСОКОЛЕГИРОВАННАЯ СТАЛЬ)

Качество биметаллической заготовки, состоящей из углеродистой стали 45 и высоколегированных сталей (4X5MФС, 5X3В3МФС, 3X2В8Ф и др.), определяется показателями свойств сплава на границе раздела сплавов разного химического состава, т. е. в переходной зоне. Биметаллические заготовки получают методом послойной наплавки на установке электрошлакового литья.

При разработке оптимального состава сплава для переходной зоны биметаллической заготовки, состоящей из углеродистой и высоколегированной стали, использовали симплексно-решеточный метод математического планирования эксперимента. Это позволило значительно сократить объем экспериментальной работы. Обычно данный метод планирования применяется при изучении зависи-

мости свойств несложных сплавов и их составов. В настоящей работе этот метод использовали для оптимизации состава многокомпонентной системы. Для этого была разработана программа математического планирования эксперимента. Учитывая сложный характер поверхности отклика, поиск оптимума состава проводили при построении модели неполной третьей степени. В качестве базовых псевдокомпонентов были выбраны три стали определенного состава, легирующие элементы концентрации которых варьировали в строго заданных пределах в соответствии с симплексной решеткой, в данном случае представляющей собой равносторонний треугольник. Матрица планирования для построения модели неполной третьей степени приведена в табл. 1.

Таблица 1. Матрица планирования для построения модели неполной третьей степени

Обозначение стали	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y$
1	1	0	0	$Y_1$
2	0	1	0	$Y_2$
3	0	0	1	$Y_3$
4	1/2	1/2	0	$Y_{12}$
5	1/2	0	1/2	$Y_{13}$
6	0	1/2	1/2	$Y_{23}$
7	1/3	1/3	1/3	$Y_{123}$

Определение показателей свойств сталей, выплавленных в соответствии с уравнениями и требованиями симплексно-решеточного планирования, позволило построить полиномиальные модели для всех интересующих свойств. В общем виде математическая модель записывалась так:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (1)$$

где  $b_1, b_2, b_3$  — коэффициенты, отражающие свойства псевдокомпонентов  $x_1, x_2, x_3$ ;  $b_{12}, b_{13}, b_{23}$  — коэффициенты, отражающие совмест-

ное влияние двух псевдокомпонентов;  $b_{123}$  — коэффициент, отражающий влияние трех псевдокомпонентов.

Коэффициенты модели определяются следующим образом:

$$b_1 = y_1, \quad b_2 = y_2, \quad b_3 = y_3, \quad (2)$$

$$b_{12} = 4y_{12} - 2y_2, \quad b_{13} = 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3,$$

$$b_{23} = 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3, \quad (3)$$

$$b_{123} = 27y_{123} - 12(y_{12} + y_{13} + y_{23}) + 3(y_1 + y_2 + y_3). \quad (4)$$

После построения моделей проведена статистическая проверка полученных результатов; оценивалась адекватность моделей по  $t$ -критерию. Так как

план симплексно-решеточного планирования полностью насыщен, т.е. число опытов равно числу определяемых коэффициентов полинома, степеней свободы для проверки адекватности не остается. Поэтому адекватность полученных моделей оценивали по результатам контрольных опытов.

Гипотеза об адекватности модели принималась в случае  $t_{\text{экс.}} < t_{\text{табл.}}$ . При этом экспериментальное значение вычисляли по формуле:

$$t_{\alpha, l, f} = \frac{\Delta y \sqrt{n}}{S(y) \sqrt{n + \zeta}}, \quad (5)$$

где  $y = y_{\text{экс.}} - y_{\text{расч.}}$ ;  $n$  – число опытов в каждой

точке;  $S(y)$  – среднеквадратичная ошибка опыта;  $\zeta$  – величина, зависящая от положения стали на концентрационном треугольнике;  $\alpha$  – уровень значимости ( $\alpha = 0,05$ );  $l$  – число контрольных точек;  $f$  – число степеней свободы при определении дисперсии опыта.

Геометрическая интерпретация моделей представляется в виде диаграмм состав – свойство, на которые нанесены линии постоянных значений соответствующих величин механических свойств.

Для исследований использовали темплеты, вырезанные из биметаллических заготовок (табл. 2) в продольном направлении.

Таблица 2. Химический состав опытных сталей

Содержание элементов, мас. %							
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	PЗМ
0,32	0,43	0,89	0,90	—	1,97	—	0,030
0,50	0,46	0,75	1,98	2,00	—	—	0,015
0,38	0,48	0,75	2,95	—	—	2,10	0,050
0,38	0,44	0,80	1,50	0,97	1,00	—	0,030
0,46	0,44	0,80	2,00	—	0,96	1,02	0,025
0,49	0,43	0,82	2,58	0,08	—	1,00	0,033
0,30	0,40	0,80	1,83	0,71	0,67	0,73	0,040

Примечание: сера и фосфор не более 0,020%.

Установлено, что макроструктура литого металла, формирующаяся в процессе кристаллизации в условиях электрошлаковой наплавки, в значительной степени определяется химическим составом стали. Состав литого металла, очевидно, является также и определяющим фактором, обуславливающим образование трещин как в процессе кристаллизации, так и при последующем охлаждении.

Мелкозернистую плотную структуру, в которой практически отсутствуют дефекты усадочного характера, имеют стали 1,3,5, т. е. стали, содержащие до 1,97 % молибдена, до 2,1 % вольфра-

ма, а также одновременно легированные до 0,96 % молибденом и до 1,02 % вольфрамом.

Сталь 2, легированная дополнительно никелем, имеет удовлетворительную макроструктуру с точки зрения дисперсности кристаллитов, однако в поверхностном слое наблюдается некоторая рыхлость (глубина  $\approx (5-10) \cdot 10^{-3}$  м).

Макроструктура наиболее высокого качества была получена у стали 7.

Результаты испытаний механических свойств опытных сталей после термообработки по стандартному режиму, включающему отжиг при 1150 °С, закалку с 1100 °С в масле и отпуск при 650 °С, приведены в табл. 3.

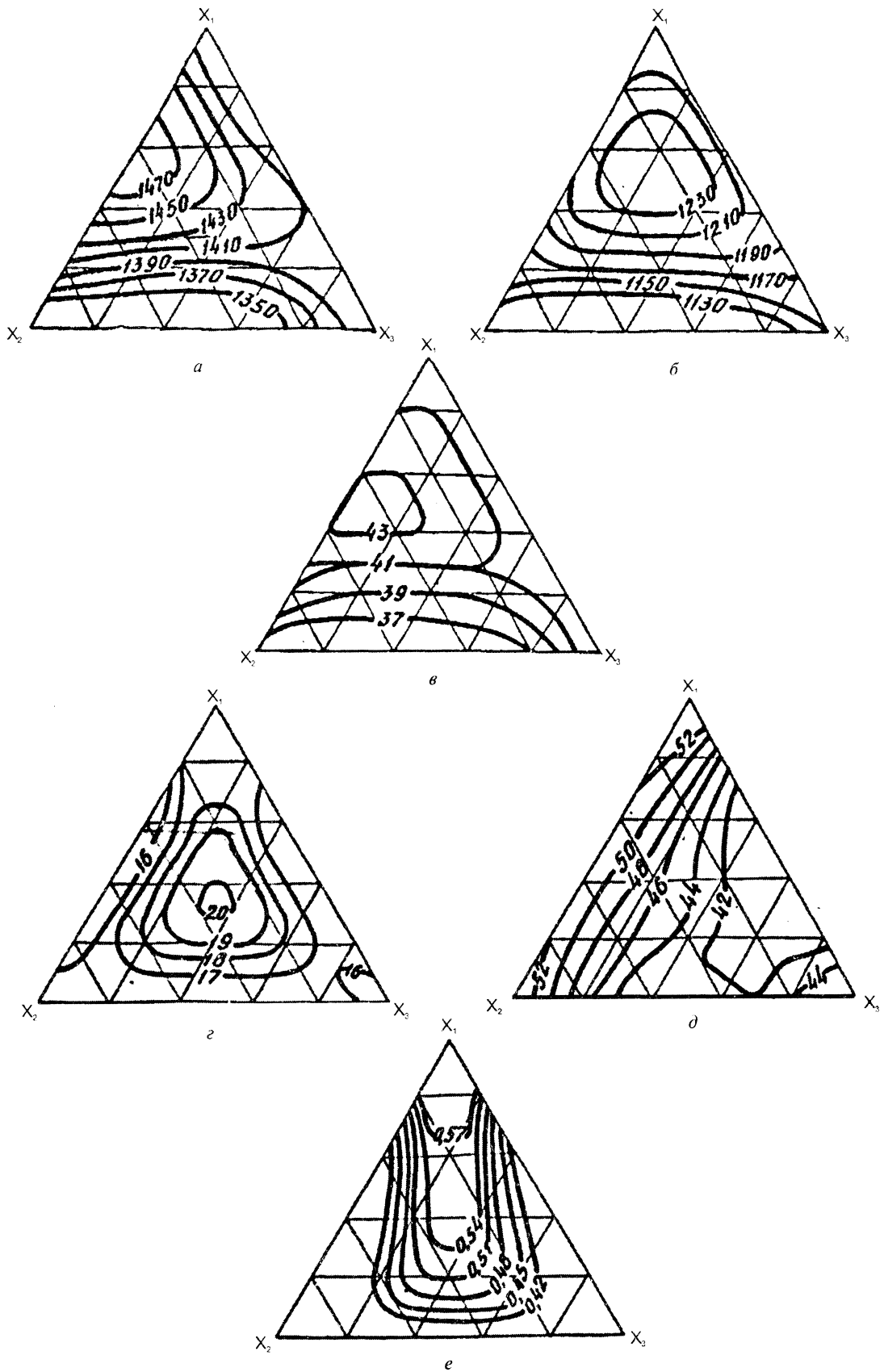
Таблица 3. Механические свойства опытных штамповых сталей

Обозначение стали	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>	Твердость HRC
1	1370	1190	23,0	60,0	0,81	38,0
2	1295	1100	18,5	56,0	0,27	36,0
3	1450	1150	17,0	51,0	0,32	43,0
4	1480	1210	13,0	50,5	0,36	43,0
5	1400	1200	13,5	34,0	0,31	40,0
6	1235	998	14,0	41,0	0,38	34,0
7	1430	1220	20,0	44,5	0,55	21,0

Геометрическая интерпретация характера изменения изучаемых свойств от составов литейных сталей показана на рисунке. Математические модели, описывающие зависимость  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ,  $\Psi$ , KCU и HRC от составов сталей, в концентрационном интервале легирования имеют следующий вид:

$$y_1 = 137x_1 + 129,5x_2 + 145x_3 + 59x_1x_2 - 4x_1x_3 - 55x_2x_3 + 157,5x_1x_2x_3, \quad (6)$$

$$y_2 = 119x_1 + 110x_2 + 115x_3 + 26x_1x_2 + 12x_1x_3 - 50,8x_2x_3 + 236,4x_1x_2x_3, \quad (7)$$



Кривые равных значений механических свойств опытных штамповых сталей после электрошлаковой обработки. Отжиг 1150 °С, закалка 1100 °С, отпуск 650 °С: а –  $\sigma_B$ , МПа; б –  $\sigma_{0.2}$ , МПа; в – твердость HRC<sub>3</sub>; г –  $\delta$ , %; д –  $\Psi$ , %; е – KCU, МДж/м<sup>2</sup>

$$y_3 = 23x_1 + 18,5x_2 + 17x_3 - 31x_1x_2 - 25,6x_1x_3 - 5x_2x_3 + 228,3x_1x_2x_3, \quad (8)$$

$$y_4 = 60x_1 + 56x_2 + 51x_3 - 30x_1x_2 - 74x_1x_3 - 50x_2x_3 + 60,5x_1x_2x_3, \quad (9)$$

$$y_5 = 8,1x_1 + 2,7x_2 + 3,2x_3 - 7,2x_1x_2 - 10,2x_1x_3 + 3,4x_2x_3 + 64,5x_1x_2x_3, \quad (10)$$

$$y_6 = 38x_1 + 43x_2 + 43x_3 + 24x_1x_2 - 2x_1x_3 - 22x_2x_3 + 54x_1x_2x_3, \quad (11)$$

где  $y_1 - \sigma_b$ ;  $y_2 - \sigma_{0,2}$ ;  $y_3 - \delta$ ;  $y_4 - \Psi$ ;  $y_5 - \text{КСУ}$ ;  $y_6 - \text{твердость HRC}$ .

Результаты проверки адекватности моделей в трех контрольных точках внутри симплекса с помощью  $t$ -критерия свидетельствуют о том, что гипотеза об адекватности моделей в данном случае не отвергается.

На основании анализа результатов исследований был установлен оптимальный состав сплава для переходной зоны биметаллической заготовки, %: С - 0,30-0,50; Si - 0,40-0,60; Mn - 0,60-0,90; Ni - 1,6-2,0; Mo - 0,1-0,5; W - 0,1-0,3; Cr - 0,9-1,6; PЗМ - 0,01-0,05 при наплавке на сталь 45 сталей типа 5ХЗВ3МФС и 3Х2В8Ф.



**НОВЫЕ ПАТЕНТЫ ПО ЛИТЬЮ И МЕТАЛЛУРГИИ В ПАТЕНТНОМ ФОНДЕ РЕСПУБЛИКАНСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БИБЛИОТЕКИ**

**Пат. 2178001 РФ, МПК7 С21В 13/00. Способ обработки измельченного материала в псевдоожоженном слое и способ получения расплава чушкового чугуна или жидких полуфабрикатов стали.**

В способе обработки измельченный материал поддерживают в псевдоожоженном слое при помощи обрабатывающего газа, проходящего снизу вверх и за счет этого обрабатывают.

**Пат. 4022 РБ, МПК7 С22В 21/06, С22В 9/10. Дегазатор для алюминия и алюминиевых сплавов.**

Изобретение относится к литейному производству и может быть использовано для получения плотных отливок из алюминия и его сплавов с высокими механическими свойствами.

**Пат. 4029 РБ, МПК7 С22В 34/22. Способ утилизации отработанного алюмоманадиевого катализатора.**

Для разделения входящих в состав катализатора компонентов применяют обработку минеральной кислотой. В качестве минеральной кислоты используют ортофосфорную кислоту.

**Пат. 2177041 РФ, МПК7 С21 1/08. Способ получения серого чугуна.**

Изобретение относится к области металлургии и может быть использовано для получения серых чугунов различных марок на базе единого базового расплава с пониженным содержанием углерода и кремния.

**Пат. 19917008 DE, С21С 1/08. Легирующее формованное изделие для печей чугунолитейных цехов.**

Предложено изделие, содержащее гранулят с карбидом кремния и связующее. Изделие отличается тем, что связующее содержит мелассу и гидроксид кальция.

Ознакомиться с описаниями изобретений и заказать отдельные страницы копий, а также осуществить тематический поиск в Internet можно по адресу:

г. Минск, проспект Машерова, 7, Республиканская научно-техническая библиотека,  
читальный зал патентной документации (502 к.),  
тел.: 226-65-05