

Э.В.Приходько, Л.А.Головко, А.С.Козачёк

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ СТРУКТУРИЗАЦИИ ХИМСОСТАВА СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗОВ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА КАТАНКИ

Целью работы является изучение возможностей методики комплексного использования факторного анализа и структурирования химического состава для построения корректной прогнозной модели свойств сталей. Показано, что использование информационных технологий и факторного анализа, наряду с методикой соответствующей «свертки» химического состава, позволяет обеспечить комплексную оптимизацию химического состава, выявить внутренние связи между параметрами и обеспечить процедуру построения корректной прогнозной модели свойств стали и сплавов целевого назначения.

структурирование химического состава, факторный анализ, свойства стали, комплексная оптимизация.

Состояние вопроса. Современная теория металлургических процессов при исследовании непрерывной цепи «состав + технология = свойства материалов» оперирует большим количеством параметров разного уровня происхождения и назначения, методы обобщения влияния которых на конечные свойства металлопродукции имеют дискуссионный характер. Результатами анализа и обобщения нами большого объема фактической информации показано, что характеристики процессов, сопровождающих формирование состава, структуры и свойств металлических расплавов и продуктов их кристаллизации, могут быть выражены как функция сочетания интегральных и парциальных параметров межатомного взаимодействия [1]. Подтверждена эффективность определения этих параметров не только для общего состава сплавов, но и его матричной, легирующей и примесной подсистем [2].

Постановка задачи. Используя методологию многофакторного физико–химического моделирования, базирующуюся на вводе в связь между составом и свойствами сталей комплекса модельных параметров, которые характеризуют химическое и структурное состояние исследуемых систем. Выбор параметров основан на данных факторного анализа.

Изложение основных материалов исследования. В табл. 1–3 приведены химический состав сталей улучшенного качества (*SAE105*, *SAE1065* и *SAE1070*), отличающихся повышенным содержанием углерода и рассчитанные [1] модельные параметры. Аналогичные данные для сварочных сталей с более высоким содержанием легирующих элементов (*Mn* и *Si*, *Ni* и *Mo*) представлены в табл.2,3. Четкое разграничение по свойствам сталей этих двух групп по отношению к параметру Z^Y (химический эквивалент системы) иллюстрирует рис. 1.

Таблица 1. Химический состав сталей улучшенного качества

Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	N2	As	Ti	B	Al	Mo
SAE1055	0,55	0,74	0,21	0,037	0,021	0,06	0,02	0,05	0,007	0,005	0,005	0,0008	0,005	0,0008
	0,55	0,62	0,20	0,026	0,012	0,03	0,01	0,02	0,007	0,005	0,005	0,0008	0,021	0,0008
	0,57	0,62	0,21	0,026	0,011	0,03	0,01	0,02	0,007	0,005	0,005	0,0008	0,018	0,0008
	0,55	0,64	0,17	0,026	0,018	0,03	0,02	0,02	0,007	0,005	0,005	0,0008	0,008	0,0008
	0,51	0,63	0,21	0,017	0,016	0,05	0,02	0,02	0,007	0,005	0,005	0,0008	0,006	0,0008
	0,56	0,75	0,24	0,031	0,014	0,06	0,03	0,03	0,006	0,005	0,005	0,0008	0,011	0,0008
	0,54	0,69	0,21	0,028	0,018	0,05	0,02	0,02	0,006	0,005	0,005	0,0008	0,006	0,0008
	0,54	0,72	0,22	0,030	0,013	0,04	0,02	0,02	0,007	0,005	0,005	0,0008	0,010	0,0008
	0,7	0,75	0,21	0,017	0,010	0,04	0,02	0,02	0,008	0,005	0,005	0,0008	0,005	0,0008
	0,62	0,69	0,25	0,034	0,015	0,06	0,02	0,03	0,005	0,005	0,005	0,0008	0,005	0,0008
SAE1065	0,63	0,67	0,20	0,024	0,012	0,07	0,01	0,02	0,005	0,005	0,005	0,0008	0,007	0,0008
	0,63	0,75	0,24	0,020	0,026	0,10	0,01	0,02	0,005	0,005	0,005	0,0008	0,005	0,0008
	0,67	0,78	0,24	0,027	0,017	0,05	0,01	0,02	0,005	0,005	0,005	0,0008	0,007	0,0009
	0,65	0,72	0,22	0,024	0,012	0,07	0,01	0,02	0,006	0,005	0,005	0,0008	0,012	0,0008
	0,65	0,77	0,24	0,026	0,017	0,05	0,01	0,02	0,005	0,005	0,005	0,0008	0,006	0,0009
	0,70	0,79	0,24	0,023	0,019	0,05	0,01	0,02	0,006	0,005	0,005	0,0008	0,005	0,009
	0,73	0,70	0,21	0,021	0,013	0,05	0,01	0,02	0,006	0,005	0,005	0,0008	0,005	0,008
	0,70	0,79	0,24	0,023	0,019	0,05	0,01	0,02	0,006	0,005	0,005	0,0008	0,005	0,009
	0,71	0,73	0,23	0,031	0,024	0,06	0,02	0,03	0,005	0,005	0,005	0,0008	0,005	0,008
	0,70	0,70	0,22	0,030	0,023	0,06	0,02	0,03	0,005	0,005	0,005	0,0008	0,005	0,008
SAE1070	0,70	0,79	0,24	0,023	0,019	0,05	0,01	0,02	0,006	0,005	0,005	0,0008	0,005	0,009
	0,22	,59	0,06	0,0038	0,0017	0,06	0,01	0,03	0,007	0,005	0,005	0,0008	0,007	0,008
	0,71	0,75	0,21	0,025	0,022	0,08	0,02	0,03	0,005	0,005	0,005	0,0008	0,007	0,008

Таблица 2. Химический состав сварочных сталей

Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	N2	As	Ti	B	Al	Mo	
СВ08Г2 С	0,09	1,91	0,78	0,018	0,025	0,02	0,02	0,01	0,007	0,002	0,002	0,0006	0,002	0,005	
	0,08	1,87	0,76	0,019	0,020	0,05	0,02	0,02	0,007	0,005	0,002	0,0006	0,003	0,006	
	0,08	2,01	0,86	0,014	0,016	0,04	0,01	0,01	0,008	0,005	0,005	0,0008	0	0,008	
	0,09	2,01	0,90	0,017	0,019	0,03	0,02	0,03	0,006	0,005	0,005	0,0012	0,007	0,010	
	0,08	1,7	0,89	0,016	0,021	0,03	0,02	0,02	0,007	0,005	0,0011	0,0010	0,006	0,008	
	0,08	1,7	0,89	0,016	0,021	0,03	0,02	0,02	0,007	0,005	0,0011	0,0010	0,006	0,008	
	0,08	1,91	0,82	0,016	0,025	0,03	0,01	0,02	0,008	0,005	0,005	0	0,005	0,010	
	0,075	2,004	0,829	0,020	0,029	0,025	0,018	0,031	0,0061	0,0061	0,005	0,005	0	0,005	0,010
	0,074	1,892	0,878	0,017	0,023	0,035	0,016	0,027	0,0062	0,0062	0,005	0,005	0	0,005	0,010
	0,070	1	0,34	0,010	0,007	0,010	0,56	0,020	0,0070	0,0070	0,003	0,002	0,0006	0,009	0,647
	0,071	1,323	0,399	0,013	0,012	0,015	0,634	0,027	0,0060	0,0060	0,005	0,005	0	0,008	0,623
	СВ08Г1 НМА	0,051	1,289	0,392	0,015	0,011	0,011	0,585	0,031	0,0073	0,005	0,005	0	0,005	0,60
0,061		1,19	0,335	0,015	0,011	0,011	0,579	0,029	0,0072	0,005	0,005	0	0,005	0,656	
0,067		1,258	0,355	0,014	0,013	0,037	0,557	0,034	0,0060	0,005	0,005	0	0,005	0,553	
0,069		1,221	0,341	0,013	0,014	0,032	0,616	0,025	0,0050	0,005	0,005	0	0,005	0,57	

Марка стали	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>Cr</i>	<i>Ti</i>
CB08XM	0,07	0,56	0,27	0,016	0,012	0,01	0,67	0,82	0,007
	0,08	0,54	0,26	0,014	0,010	0,01	0,65	0,86	0,006
	0,06	0,6	0,25	0,012	0,008	0,05	0,50	0,83	0,005
	0,07	0,58	0,28	0,013	0,010	0,04	0,53	0,83	0,004
	0,07	0,43	0,21	0,016	0,009	0,03	0,50	1,05	0,004
	0,1	0,50	0,27	0,015	0,007	0,03	0,55	1,04	0,003
	0,08	0,45	0,18	0,019	0,008	0,03	0,58	0,97	0,003
	0,06	0,58	0,26	0,016	0,010	0,03	0,54	0,90	0,002
CB10XMA	0,08	0,58	0,22	0,013	0,017	1,08	0,54	0,03	0,002
	0,09	0,56	0,22	0,010	0,015	1,05	0,55	0,03	0,002
	0,08	0,54	0,25	0,010	0,009	1,20	0,52	0,02	0,003
	0,09	0,55	0,23	0,011	0,008	1,10	0,53	0,03	0,002
	0,07	0,65	0,26	0,009	0,011	1,17	0,50	0,02	0,003
	0,08	0,57	0,19	0,014	0,008	1,23	0,55	0,03	0,003
	0,08	0,56	0,25	0,012	0,011	1,02	0,42	0,03	0,003
	0,08	0,60	0,23	0,015	0,009	1,10	0,53	0,02	0,003
CB08Г1HMA	0,07	1	0,34	0,010	0,007	0,56	0,64	0,01	0,007
	0,07	1,31	0,41	0,013	0,016	0,67	0,65	0,01	0,05
	0,06	1,17	0,38	0,012	0,016	0,63	0,61	0,02	0,054
	0,06	1,24	0,31	0,010	0,011	0,57	0,65	0,01	0,005
	0,07	1,12	0,27	0,013	0,012	0,58	0,62	0,01	0,003
	0,06	0,98	0,25	0,012	0,008	0,55	0,61	0,02	0,002
	0,06	1,24	0,36	0,010	0,012	0,67	0,60	0,01	0,001
	0,08	1,39	0,43	0,015	0,012	0,68	0,65	0,02	0,001

Дополнительное введение концентрации углерода в роли независимого параметра во взаимосвязь $\sigma_B=f(Z^Y)$ позволяет описать единым уравнением эти два массива, что является подтверждением определяющей роли углерода на прочностные свойства сталей.

$$\sigma_B = 2612.8 + 2588.9Z^Y + 66832[C] \quad r \approx 0,94 \quad (1)$$

Взаимосвязь расчетных и экспериментальных значений σ_B (для выборочных сталей по данным табл.1) представлена на рис.2. Как показал опыт предыдущих исследований, для выявления влияния легирующих компонентов на свойства для каждой стали необходим углубленный индивидуальный подход.

Возвращаясь к анализу *Mo-Ni*-содержащих сталей (Кривой Пог, 162 плавки) (*C*–0,06÷0,09%; *Mn*–0,55÷1,4%; *Si*–0,2÷0,45%; *Mo*–0,45÷1,1%; *Ni*–0,5÷1,25%; *Ti*–0,001÷0,005%; *S*–0,008÷0,017; *P*–0,007÷0,02%) с использо-

ванием предложенной ранее методике структурирования химсостава в легирующую подсистему объединили *Mn*, *Mo* и *Ni*.

Таблица 3. Модельные параметры и свойства сталей (по табл.1–2)

Марка стали	σ_B , Н/мм ²	ψ , %	d	$tg\alpha$	Z^Y
SAE1055	905	43	2,73242	0,08875	1,20816
	875	41	2,73233	0,08877	1,20318
	885	46	2,72910	0,08879	1,20482
	845	35	2,73303	0,08875	1,20250
	800	44	2,73807	0,08869	1,20138
	870	42	2,73045	0,08876	1,20980
	830	43	2,73383	0,08873	1,20518
	910	39	2,73365	0,08874	1,20600
SAE1065	1050	33	2,71063	0,08894	1,21635
	925	38	2,72119	0,08884	1,21259
	995	28	2,72312	0,08885	1,21187
	835	39	2,72095	0,8884	1,21043
	990	41	2,72020	0,08883	1,21509
	975	39	2,71452	0,08890	1,21687
	1010	30	2,71770	0,08887	1,21387
	985	44	2,71736	0,08887	1,21527
SAE1070	1090	39	2,71016	0,08893	1,21901
	1110	33	2,70630	0,08898	1,21744
	1090	41	2,71016	0,08893	1,21901
	1060	33	2,70879	0,08895	1,21885
	1060	36	2,71034	0,08894	1,21705
	1050	39	2,71016	0,08893	1,21901
	1010	40	2,78823	0,08829	1,17326
	1060	24	2,70946	0,08895	1,21892
CB08Г2С	645	58	2,79199	0,08808	1,22419
	635	50	2,79418	0,08806	1,22291
	640	53	2,79175	0,08805	1,22931
	605	56	2,78924	0,08808	1,23201
	585	60	2,79006	0,08809	1,22354
	615	55	2,79453	0,08804	1,22736
	610	52	2,79247	0,08807	1,22578
	660	57	2,79285	0,08804	1,23010
CB08Г1Н МА	585	71	2,80816	0,08807	1,20514
	620	68	2,80706	0,08807	1,21666
	585	68	2,80706	0,08807	1,21666
	600	64	2,81023	0,08804	1,20988
	585	67	2,81023	0,08804	1,20988
	665	67	2,80875	0,08807	1,21078
	700	66	2,80706	0,08807	1,21666
	585	65	2,80993	0,08805	1,21358

Продолжение табл.3

СВ08ХМ	460	75	2,81	0,0878	1,2079
	460	75	2,8086	0,0878	1,2084
	440	75	2,8119	0,0878	1,2045
	480	72	2,8093	0,0878	1,2065
	470	73	2,8110	0,0878	1,2061
	500	70	2,8046	0,0878	1,2130
	480	71	2,8105	0,0878	1,2053
	470	73	2,8116	0,0878	1,2072
СВ10ХМА	510	73	2,8094	0,0882	1,1975
	500	72	2,8077	0,0882	1,1972
	510	72	2,8085	0,0882	1,1987
	520	71	2,8074	0,0882	1,1976
	500	75	2,8100	0,0882	1,2001
	510	72	2,8105	0,0882	1,1984
	500	72	2,8081	0,0882	1,1945
СВ08Г1Н МА	500	71	2,8089	0,088	1,2041
	730	68	2,8079	0,088	1,2179
	660	71	2,8100	0,088	1,2116
	630	71	2,8120	0,088	1,2083
	570	70	2,8111	0,088	1,2042
	510	74	2,8131	0,088	1,1987
	570	68	2,8103	0,088	1,2110
	690	68	2,8055	0,088	1,2204

Параметры Z^Y и d , характеризующие систему в целом, и параметры Z_i^Y и d_i для подсистемы $Mn+Mo+Ni$ рассчитывались по описанной ранее методике. Описательные модели для σ_B и ψ этого массива сталей имеют следующую структуру:

$$\sigma_A = -27615.2 + 5146.9d + 6295.9Z^Y + 2415.2d_i - 477.2Z_i^Y \quad r \approx 0,89 \quad (2)$$

$$\psi = 886.4 - 103.8d - 264.2Z^Y - 82.1d_i + 17.7Z_i^Y \quad r \approx 0,75 \quad (3)$$

Общий вклад в обобщающий критерий, характеризующий химическое и структурное состояние этой стали, вносит легирующая подсистема:

$$\sigma_A = -13969.1 + 5370.8d_i - 593.6Z_i^Y \quad r \approx 0,72 \quad (4)$$

$$\psi = 664.8 - 220.9d_i + 26.3Z_i^Y \quad r \approx 0,59 \quad (5)$$

Для массива сварочных сталей (примерный химический состав в табл.2) СВ08ХМ + СВ10ХМА + СВ08Г1ХМ (221 плавка, по три испытания свойств для одной плавки, выплавленных на ОАО "АрселорМиттал Кривой Рог") в легирующую подсистему выделены Mn , Cr , Ni и Mo . Для этого объединенного массива получена прогнозная модель для σ_B через

модельные параметры легирующей подсистемы с коэффициентом корреляции $r \approx 0,79$, в том числе доля легирующей подсистемы $r = 0,54$.

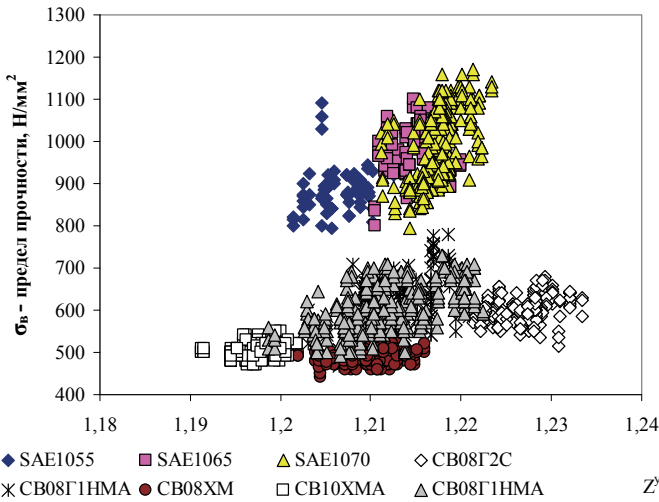


Рис.1. Взаимосвязь предела прочности сталей с параметром Z^Y

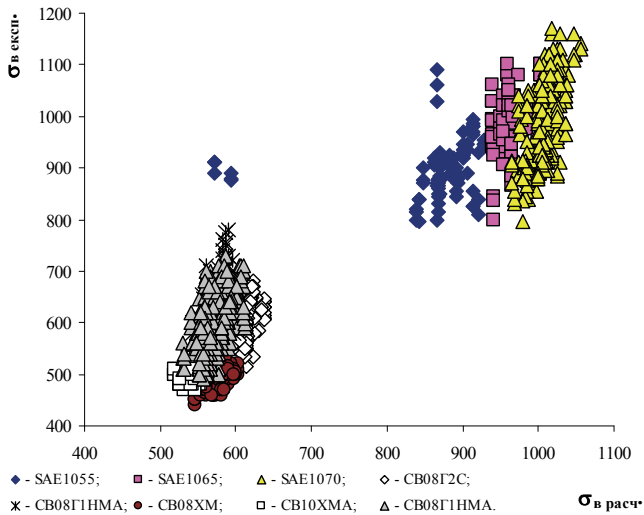


Рис.2. Взаимосвязь экспериментальных и рассчитанных значений сталей $\sigma_B = f(Z^Y, [C])$

Для выявления влияния каждой из подсистем на служебные свойства сталей и сплавов по схеме «состав – структура – свойство» (при

стабильной технологии) предложено использовать разработанную ранее методологию решения указанных задач на основе многомерного факторного анализа. Суть метода заключается в выявлении «скрытых» закономерностей, объединении взаимозависимых переменных в отдельные интегральные факторы. В результате осуществляется замена группы переменных одним фактором, чем обеспечивается простая структура и оптимальная группировка параметров. Предложенный подход проиллюстрирован

на примере массива из 406 плавок сталей улучшенного качества. Выборочный химсостав приведен в табл. 1.

Как следует из рис.3 в результате факторного анализа исходные компоненты химсостава были «свернуты» к 4 факторам. При этом существенные нагрузки на первый фактор (F_1) имеют Mn и Si , на второй фактор (F_2) – Mo и Cr , C и Ti на фактор (F_3) и никель «нагружает» четвертый фактор, что предполагает его отдельный учет.

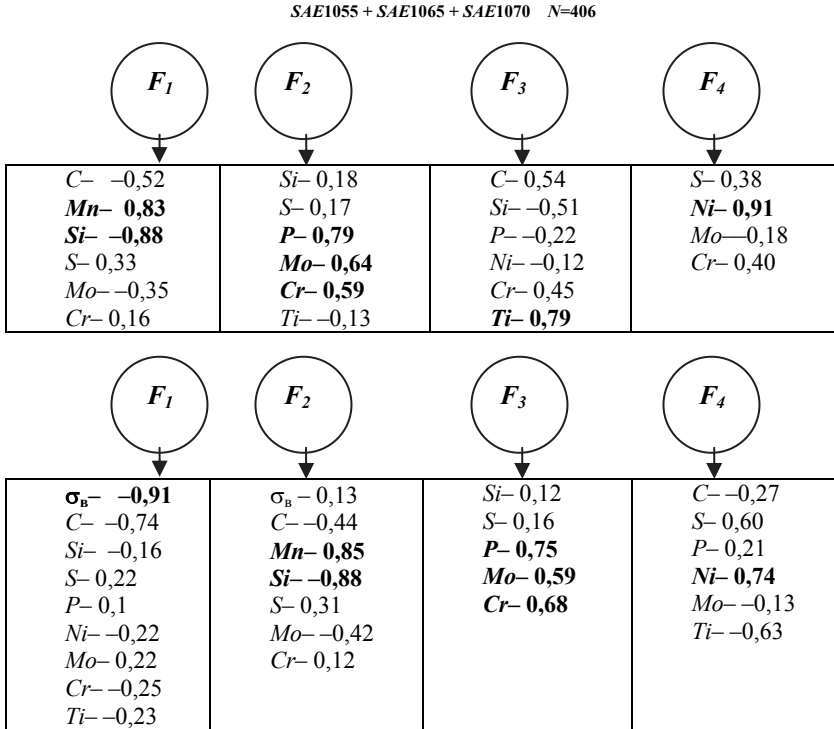


Рис.3. Результаты поэтапного факторного анализа сталей улучшенного качества ($SAE1055+SAE1065+SAE1070$)

С целью выявления определяющей подсистемы в формировании прочностных свойств сталей на втором этапе моделирования в массив данных вводятся значения предела прочности. Как следует из рис.2 основной разброс значений σ_B связан с содержанием углерода. Нагрузки σ_B и C на фактор F_1 равны 0,91 и 0,74 соответственно. При этом фактор F_1 объясняет 35% общей дисперсии выборки. Распределение нагрузок общей дисперсии по факторам иллюстрирует диаграмма на рис.4. Учитывая значимые нагрузки Mn и Si (0,85 и 0,88) наряду с σ_B (0,13) в качестве следующих модельных параметров в структуре прогнозной модели следует включить Z^Y и d_i для подсистемы [$Mn; Si$].

Согласованное их изменение в подсистеме иллюстрирует рис.5. Полученный на основе факторного анализа комплекс модельных параметров обеспечивает точность прогнозной модели на уровне

$$\sigma_B = -11653.4 + 4414.7d_l - 339.6Z_l^Y \quad r \approx 0,79 \quad (6)$$

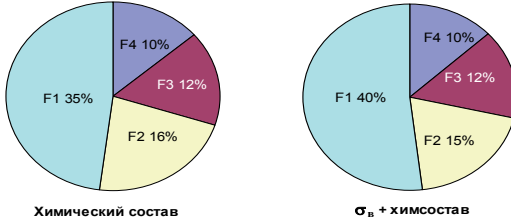


Рис.4. Диаграмма распределения дисперсий выборки по факторам

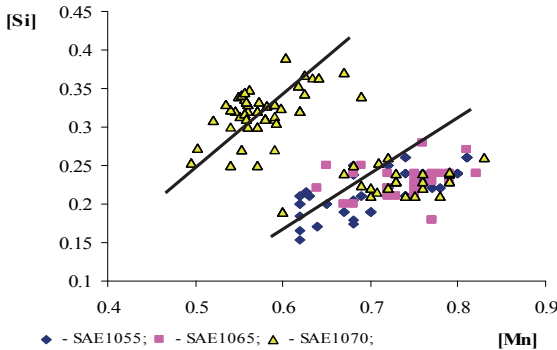


Рис.5. Взаимосвязь Si с Mn в сталях улучшенного качества

Выводы. Таким образом, использование факторного анализа позволяет наряду с методикой соответствующей «свертки» химического состава выявить внутренние связи между параметрами и обеспечить процедуру построения корректной прогнозной модели свойств сталей.

1. Приходько Э.В. Эффективность комплексного легирования сталей и сплавов. – К.: Наукова думка. –1995. –291с.
2. Приходько Э.В., Головки Л.А. Выявление скрытых закономерностей при прогнозировании критических температур доэвтектоидных сталей. //Сб. научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». К.: Наукова думка. –Вып.6. –2003. –С.237–243.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. Д.Н.Тогобицкой*

Е.В.Приходько, Л.А.Головко, О.С.Козачок

Використання методики структуризації хімічного складу сталей для підвищення точності прогнозів показників якості катанки

Цілью роботи є вивчення можливостей методики комплексного застосування факторного аналізу та структурування хімічного складу для побудови коректної прогнозної моделі властивостей сталей. Показано, що використання інформаційних технологій і факторного аналізу, разом з методикою відповідного «згуртування» хімічного складу, дозволяє забезпечити комплексну оптимізацію хімічного складу, виявити внутрішні зв'язки між параметрами та забезпечити процедуру побудови коректної прогнозної моделі властивостей сталі і цільового призначення.