

6
2023

Технология Металлов

6.2023

Ежемесячный производственный, научно-технический
и учебно-методический журнал

Издается с июля 1998 г.

Англоязычная версия журнала селективно выпускается в качестве приложения к журналу Russian Metallurgy (издательство Pleiades Publishing, Ltd (США), а также в журнале Steel in Translation (издательство Allerton Press, Inc., входящее в группу компаний Pleiades Publishing, Ltd (США)).

Переводная версия журнала входит в международные реферативные базы данных систем цитирования (индексирования): Academic OneFile, Astrophysics Data System (ADS), ChemWeb, El-Compendex, Gale, Google Scholar, INIS Atomindex, INSPEC, OCLC, SCImago, SCOPUS, Summon by Serial Solutions, Web of Science.

Главный редактор журнала

Рудской А.И., академик РАН

Зам. главного редактора

Баурова Н.И., д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Юсупов В.С., д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

Баннх О.А., академик РАН

Гречников Ф.В., академик РАН

Леонтьев Л.И., академик РАН

Счастливцев В.М., академик РАН

Batako A., д-р фил. (Великобритания)

Дугин А.В., д-р фил. (Германия)

Михайлов С., д-р фил., проф. (Швейцария)

Попов А.В., д-р техн. наук, проф. (Чешская республика)

Storchak M., д-р техн. наук (Германия)

Редакционная коллегия

Алещенко А.С., канд. техн. наук

Баннх И.О., д-р техн. наук

Баскаков В.Д., д-р техн. наук, проф.

Васильев В.А., д-р техн. наук, проф.

Воронцов А.Л., проф., д-р техн. наук

Галиновский А.Л., д-р техн. наук,

д-р пед. наук, проф.

Гугис Н.Н.

Дагман А.И., канд. техн. наук

Зимовец В.Г., канд. техн. наук

Зубков Н.Н., д-р техн. наук, проф.

Ковалевский М.А., канд. экон. наук

Кожевникова И.А., д-р техн. наук

Колбасников Н.Г., д-р техн. наук,
проф.

Колесников А.Г., проф., д-р техн. наук

Колобов А.В., канд. техн. наук

Коновалов С.В., проф., д-р техн. наук

Курганова Ю.А., д-р техн. наук, проф.

Кушнарёв А.В., д-р техн. наук

Лещенко И.А., д-р техн. наук

Логонов А.В., д-р техн. наук, проф.

Лялякин В.П., д-р техн. наук, проф.

Мазур И.П., д-р техн. наук

Матюнин В.М., д-р техн. наук, проф.

Миляев И.М., д-р техн. наук

Мишнев П.А., канд. техн. наук

Нехамин С.М., д-р техн. наук, проф.

Осадчий В.Я., проф., д-р техн. наук

Попович А.А., д-р техн. наук, проф.

Пышминцев И.Ю., д-р техн. наук

Романцев Б.А., проф., д-р техн. наук

Сидельников С.Б., д-р техн. наук

Схиртладзе А.Г., д-р пед. наук, проф.

Шаталов Р.Л., д-р техн. наук, проф.

Шварц Д.Л., канд. техн. наук

Руководители региональных центров

Поволжский региональный центр Тихонов А.К., д-р техн. наук

Челябинский региональный центр Ольховацкий А.К., канд. техн. наук

Белорусский республиканский центр Судник Л.В., д-р техн. наук

За достоверность информации и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели. При использовании материалов журнала в любой форме ссылка на журнал «Технология металлов» обязательна.

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60.

Тел./факс: (499) 988-98-65, тел.: (499) 995-45-22.

<http://www.nait.ru>

e-mail: admin@nait.ru

© ООО «Наука и технологии», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

- Миляев И.М., Миляев А.И., Юсупов В.С., Лайшева Н.В.,
Лазаренко Г.Ю., Шустер Е.В.** Оптимизация термической обработки
порошкового магнитотвердого сплава Fe—30Cr—16Co—1Sm 2
- Горбачева В.Д., Сельницын Р.С.** Извлечение платины
из низкоконцентрированных азотнокислых растворов аффинажа методами
цементации и сульфидного осаждения 10

НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

- Кравченко И.Н., Карцев С.В., Величко С.А., Трифонов Г.И.,
Мартынов А.В., Петровский Д.И.** Оценка и выбор рабочих газов при
плазменных методах нанесения покрытий на стационарных и мобильных
установках 16

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

- Толымбекова Л.Б., Жунусов А.К., Келаманов Б.С.** Способы снижения
расхода электроэнергии при получении алюминия 24

ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

- Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Рожков Ю.Н., Бугаев А.В.** Технологии
упрочнения плоских ножей ТВЧ-борированием 31

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ

- Матюнин В.М., Марченков А.Ю., Волков П.В., Каримбеков М.А.,
Панькина А.А.** Влияние масштабного фактора на модуль упругости,
определяемый инструментальным индентированием 37

Оптимизация термической обработки порошкового магнитотвердого сплава Fe—30Cr—16Co—1Sm

И.М. МИЛЯЕВ*, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
А.И. МИЛЯЕВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
В.С. ЮСУПОВ, д-р техн. наук, зав. лаб., Н.В. ЛАЙШЕВА, мл. науч. сотр.,
Г.Ю. ЛАЗАРЕНКО, мл. науч. сотр., Е.В. ШУСТЕР, лаборант-исследователь

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, 119334,
Российская Федерация

*E-mail: imilyaev@mail.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-6-2-9

Статья поступила в редакцию 26.12.2022

Принята после доработки 30.01.2023

Принята к публикации 08.02.2023

Проведена оптимизация термической обработки анизотропного порошкового магнитотвердого сплава Fe—30Cr—16Co—1Sm методом планирования эксперимента с использованием программных пакетов Statgraphics и Statistica. После оптимизации получены значения остаточной индукции B_r 1,252 Тл, коэрцитивной силы H_{cb} 53,08 кА/м и магнитного энергетического произведения $(BH)_{max}$ 36,8 кДж/м³. Получены адекватные уравнения регрессии зависимостей B_r , H_{cb} и $(BH)_{max}$ от параметров термической обработки (времени выдержки при изотермической термомагнитной обработке (ИТМО), скорости охлаждения от температуры ИТМО до 580 °С и скорости охлаждения от 580 до 500 °С) в пределах изменения выбранных параметров в соответствующих фазовых пространствах. Исследованные значения магнитных гистерезисных свойств сплава Fe—30Cr—16Co—1Sm превышают аналогичные свойства одного из самых распространенных промышленных сплавов ЮНДК24 (ГОСТ 17809–72) [1] при меньшем содержании кобальта более чем на 40%.

Ключевые слова: остаточная индукция, коэрцитивная сила, максимальное энергетическое произведение, магнитотвердый сплав, поверхность отклика.

Введение

Магнитотвердые сплавы системы Fe—Cr—Co обладают уникальным сочетанием магнитных гистере-

зисных (остаточной индукции B_r , коэрцитивной силы H_{cb} , магнитного энергетического произведения $(BH)_{max}$) и механических (прочностных и пластических)

свойств [1—4]. В связи с этим они находят применение в производстве постоянных магнитов, которые испытывают большие статические или динамические нагрузки, а также когда производство постоянных магнитов наиболее эффективно при использовании технологии обработки металлов давлением (холодной или горячей прокатки, прессования, штамповки и т.д.).

Магнитотвердые сплавы системы Fe—Cr—Co являются относительно молодыми, и изучение их магнитных гистерезисных свойств шло в основном в направлении влияния различных легирующих элементов (Nb, Al, Ti, Si, Mo, W, V и др.) как на уровень свойств [5—8], так и на изучение связи микроструктуры с процессами формирования высококоэрцитивного состояния [9—12].

Целью данной работы является изучение влияния редкоземельного самария на магнитные гистерезисные свойства магнитотвердого сплава FeCrCo. Особый интерес этой тематике придает недавняя работа китайских исследователей [13], в которой было показано, что самарий сильно повышает коэрцитивную силу сплава FeCrCo.

Материалы и методики проведения экспериментов

Образцы сплава получали методом порошковой металлургии. Использовали порошки железа (марки ПЖРВ1 ГОСТ 9849—86), хрома (ПХЕ1) и кобальта (ПК-1у ГОСТ 9721—79). Исходные порошки смешивали в турбулентном смесителе С2.0 в течение 2—3 часов. Механоактивацию полученной порошковой смеси проводили в планетарной мельнице *Pulverizette-7* в течение 15 минут со скоростью 600 мин⁻¹. В порошковую смесь в ряде случаев добавляли поверхностно-активные вещества (ПАВ) — стеариновую или олеиновую кислоту. Формование образцов проводи-

ли на ручном прессе в разъемной матрице (внутренний диаметр 13,6 мм) при давлении 600 МПа. Прессовки имели относительную плотность 78—80%. Спекание прессовок проводили при температурах 1350—1400 °С в вакуумной шахтной печи СШВ-1,25/24-И1 при вакууме 10⁻² Па в течение 2,5 часов. После спекания образцы сохраняли форму прессовок и имели плотность 94—96%.

Термическую обработку спеченных образцов выполняли в стандартных муфельных печах в контейнере диаметром 60 мм, заполненном металлическим балластом. Температурно-временные режимы термической обработки регулировали программируемыми пропорционально-интегрально-дифференцируемыми регуляторами ТРМ251. Термомагнитную обработку проводили в лабораторной установке с панцирным электромагнитом в поле $H = 320$ кА/м (>4000 Э).

Магнитные гистерезисные свойства образцов измеряли на гистерезисграфе *Permagraph L* (Германия).

Исследование магнитных гистерезисных свойств сплава Fe—30Cr—14Co и оптимизацию его термической обработки проводили методами планирования эксперимента с построением центрального композиционного плана 2³ + звездные точки [14].

Выбор центрального композиционного плана был связан с тем, что выбранная область исследования магнитных гистерезисных свойств была близка к стационарной области, которая не могла быть описана с помощью линейного приближения (это было определено на основании предварительно проведенных экспериментов).

Статистическую обработку полученных результатов выполняли используя программный пакет *Statgraphics XVI Centurion*.

Исходя из механизма формирования высококоэрцитивного состояния в магни-

тотвердых сплавах системы Fe—Cr—Co, считали, что важными параметрами, определяющими уровень магнитных гистерезисных свойств сплава, являются: время проведения изотермической термомагнитной обработки (ИТМО) $t_{\text{ИТМО}}$, скорость охлаждения v_1 от температуры ИТМО до температурного интервала 580—600 °С и скорость охлаждения v_2 от температурного интервала 580—600 °С до 500 °С. Закалку образцов проводили в воде от 1300 °С с выдержкой 15 минут, нагрев контейнера до температуры начала термообработки (выше температуры ИТМО) осуществляли в течение 60—70 минут, охлаждение от температуры нагрева до температуры ИТМО — в течение 3—5 минут. Длительность начальной выдержки при температуре ИТМО составляла 40 минут.

Результаты исследования и их обсуждение

Первоначально была определена оптимальная температура проведения ИТМО

исследуемого сплава. Результат этого определения указан на рис. 1, из которого видно, что оптимальная температура ИТМО составляет 648 °С.

За нулевой (начальный) был принят режим: нагрев на 720 °С (10 мин) + охлаждение до $t_{\text{ИТМО}} = 648$ °С (40 мин) + охлаждение в магнитном поле с $v_1 = 20$ °С/ч до 580 °С + охлаждение до 500 °С со скоростью $v_2 = 6$ °С/час без магнитного поля. Варьирование параметров термообработки составляло: время проведения ИТМО (фактор A) ± 10 мин, скоростей охлаждения v_1 (фактор B) и v_2 (фактор C) ± 2 °С/ч. Результаты опытов совместно с матрицей планирования приведены в табл. 1.

Статистический анализ данных табл. 1, который был проведен с помощью программы *Statgraphics XVI Centurion*, с учетом соответствующих диаграмм Парето (рис. 2), позволил получить аналитические зависимости в виде регрессионных уравнений остаточной индукции B_r , коэрцитивной силы H_{cb} и максимального энер-

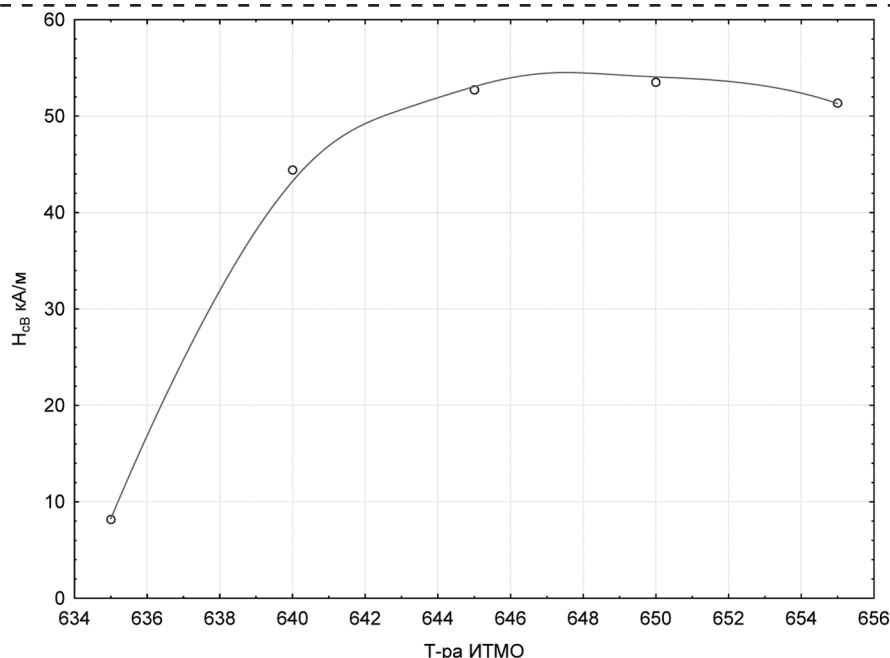


Рис. 1. Влияние температуры ИТМО на коэрцитивную силу порошкового магнитотвердого сплава Fe—30Cr—16Co—1Sm

1. Режимы термообработки и магнитные гистерезисные свойства анизотропных образцов сплава Fe—30Cr—16Co—1Sm

№ п.п.	Время проведения ИТМО (фактор А), мин	Скорость охлаждения до 580 °С (фактор В), °С/час	Скорость охлаждения до 500 °С (фактор С), °С/час	B_r , Тл	$H_{св}$, кА/м	$(BH)_{\max}$, кДж/м ³
1	30 (–1)	25 (1)	4 (–1)	1,272	41,90	28,7
2	40 (0)	20 (0)	6 (0)	1,198	44,03	26,0
3	40 (0)	20 (0)	2,64 (–1,68)	1,215	48,35	29,5
4	57 (1,68)	20 (0)	6 (0)	1,194	43,91	26,2
5	40 (0)	20 (0)	6 (0)	1,227	47,54	28,7
6	50 (1)	25 (1)	4 (–1)	1,089	51,65	24,4
7	50 (1)	15 (–1)	4 (–1)	1,256	39,33	25,3
8	40 (0)	20 (0)	9,36 (1,68)	1,173	48,37	26,4
9	23 (–1,68)	20 (0)	6 (0)	1,081	51,59	23,4
10	50 (1)	15 (–1)	8 (1)	1,170	53,43	29,6
11	30 (–1)	15 (–1)	8 (1)	1,268	20,16	13,3
12	40 (0)	28,4 (1,68)	6 (0)	1,207	53,11	33,2
13	30 (–1)	15 (–1)	4 (–1)	1,197	48,92	28,1
14	50 (1)	25 (1)	8 (1)	1,213	47,54	29,0
15	30 (–1)	25 (1)	8 (1)	1,196	46,77	27,5
16	40 (0)	11,6 (–1,68)	6 (0)	1,249	34,43	22,3
17	40 (0)	20 (0)	6 (0)	1,174	36,34	27,2

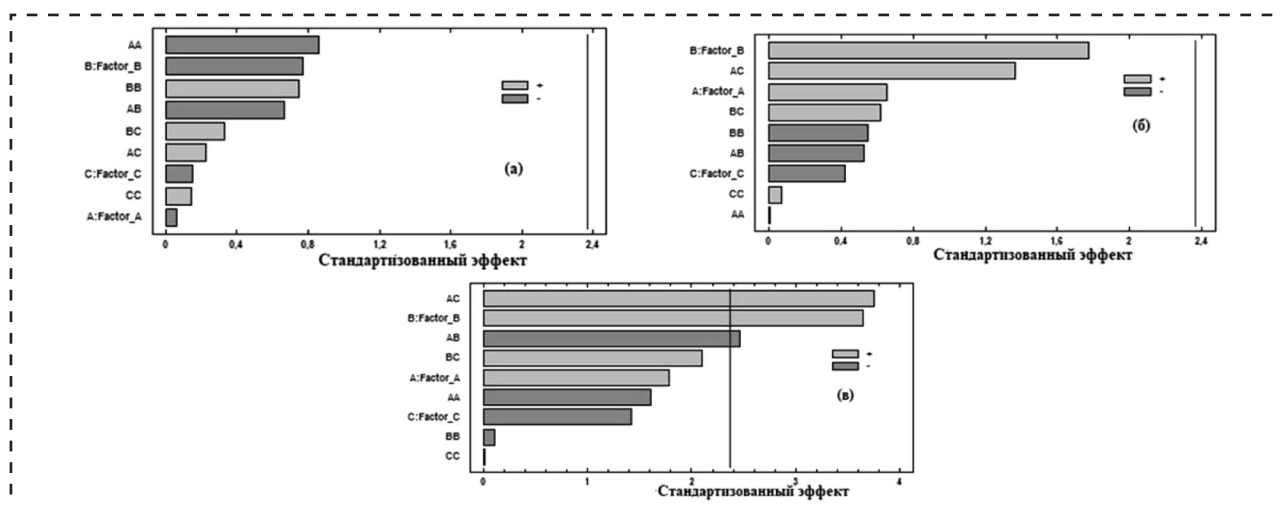


Рис. 2. Стандартизованные диаграммы Парето для остаточной индукции B_r (а), коэрцитивной силы $H_{св}$ (б) и максимального энергетического произведения $(BH)_{\max}$ (в) порошкового сплава Fe—30Cr—16Co—1Sm

гетического произведения $(BH)_{\max}$ от выбранных факторов варьирования:

$$B_r = 1,19825 - 0,00109526 \cdot \text{Factor_A} - 0,0140322 \cdot \text{Factor_B} - 0,00275578 \times \text{Factor_C} - 0,0171121 \cdot \text{Factor_A}^2 -$$

$$- 0,015875 \cdot \text{Factor_A} \cdot \text{Factor_B} + 0,005375 \cdot \text{Factor_A} \cdot \text{Factor_C} + 0,0148846 \cdot \text{Factor_B}^2 + 0,007875 \times \text{Factor_B} \cdot \text{Factor_C} + 0,00286374 \times \text{Factor_C}^2.$$

(1)

$$H_{CB} = 46,1604 + 1,55848 \cdot \text{Factor_A} + 4,20565 \cdot \text{Factor_B} - 1,01534 \times \times \text{Factor_C} - 0,0264814 \times \times \text{Factor_A}^2 - 1,645 \cdot \text{Factor_A} \times \times \text{Factor_B} + 4,235 \cdot \text{Factor_A} \times \times \text{Factor_C} - 1,43363 \cdot \text{Factor_B}^2 + 1,9275 \cdot \text{Factor_B} \cdot \text{Factor_C} + 0,189187 \cdot \text{Factor_C}^2. \quad (2)$$

$$(BH)_{\text{макс}} = 27,3688 + 1,1283 \times \times \text{Factor_A} + 2,31617 \cdot \text{Factor_B} - 0,90164 \cdot \text{Factor_C} - 1,12088 \times \times \text{Factor_A}^2 - 2,0375 \cdot \text{Factor_A} \times \times \text{Factor_B} + 3,1125 \cdot \text{Factor_A} \times \times \text{Factor_C} - 0,0778979 \cdot \text{Factor_B}^2 + 1,7375 \cdot \text{Factor_B} \cdot \text{Factor_C} - 0,007187 \cdot \text{Factor_C}^2, \quad (3)$$

где значения переменных указаны в их исходных единицах измерения.

В уравнениях (1)—(3) свободные члены дают средние значения указанных пара-

метров в выбранных пределах варьирования факторов. Из диаграмм Парето видно, что только для максимального энергетического произведения $(BH)_{\text{макс}}$ статистически значимыми являются нелинейные (квадратичные) коэффициенты AC и AB и линейный коэффициент B . Для коэрцитивной силы H_{CB} и остаточной индукции B_r линейные и квадратичные члены в уравнениях регрессии статистически незначимы. Уравнения (1)—(3) адекватно описывают исследованные части поверхностей отклика в фазовых пространствах варьируемых факторов, что подтверждается данными табл. 2.

Наглядную и полезную и информацию влияния основных факторов на магнитные гистерезисные свойства исследуемого сплава дают графики, приведенные на рис. 3, из которых следует, каким образом нужно корректировать режимы терми-

2. Экспериментальные и расчетные данные магнитных гистерезисных свойств порошкового сплава Fe—30Cr—16Co—1Sm

№ п.п.	Экспериментально полученные значения			Расчетные значения по уравнениям (1)—(3)		
	B_r , Тл	H_{CB} , кА/м	$(BH)_{\text{макс}}$, кДж/м ³	B_r , Тл	H_{CB} , кА/м	$(BH)_{\text{макс}}$, кДж/м ³
1	1,213	47,54	29,0	1,178	54,15	31,5
2	1,198	44,03	26,0	1,198	46,16	27,4
3	1,256	39,33	25,3	1,237	42,59	26,5
4	1,268	20,16	13,3	1,182	30,30	14,9
5	1,081	51,59	23,4	1,152	43,46	22,3
6	1,170	53,44	29,6	1,122	45,18	27,5
7	1,194	43,91	26,2	1,148	48,71	26,1
8	1,173	48,37	26,4	1,201	44,99	25,8
9	1,207	53,11	33,2	1,216	49,18	31,0
10	1,227	47,54	28,7	1,198	46,16	31,6
11	1,272	49,90	28,7	1,202	52,50	27,4
12	1,174	46,34	27,2	1,198	46,16	27,4
13	1,089	51,65	24,4	1,157	43,86	23,6
14	1,197	48,92	28,1	1,214	44,65	26,4
15	1,215	48,35	29,5	1,211	48,40	28,9
16	1,249	34,43	22,3	1,264	35,03	23,2
17	1,196	46,77	27,5	1,201	45,86	27,1

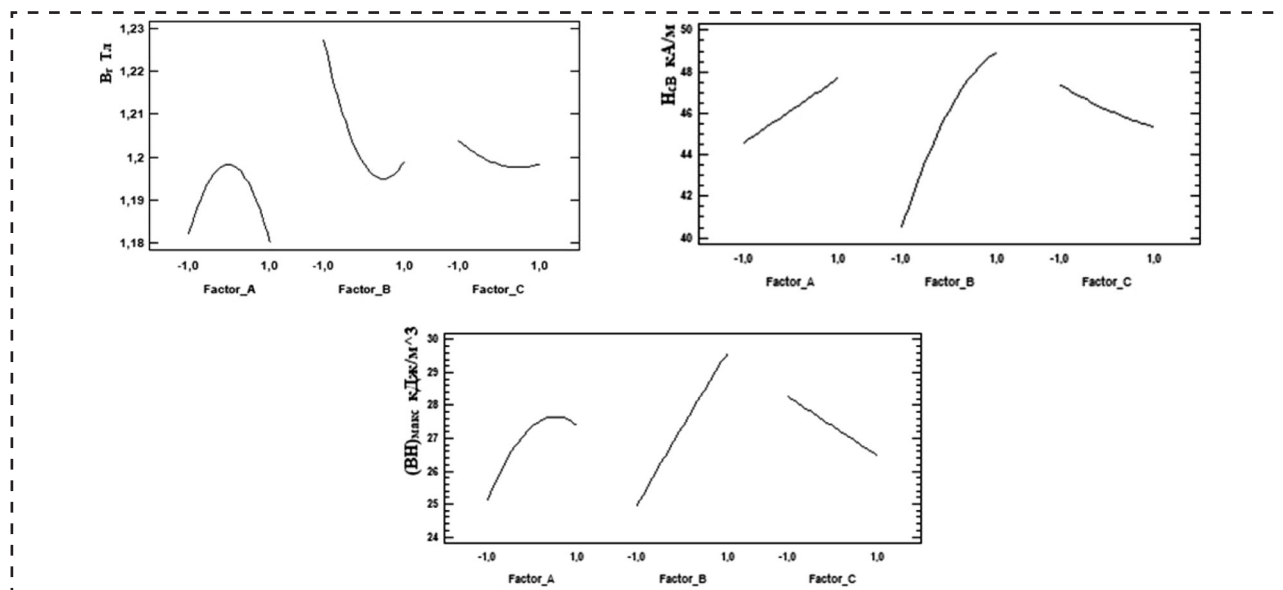


Рис. 3. Графическое представление влияния основных факторов на остаточную индукцию B_r , коэрцитивную силу H_{CB} и максимальное энергетическое произведение $(BH)_{\max}$ порошкового сплава Fe—30Cr—16Co—1Sm

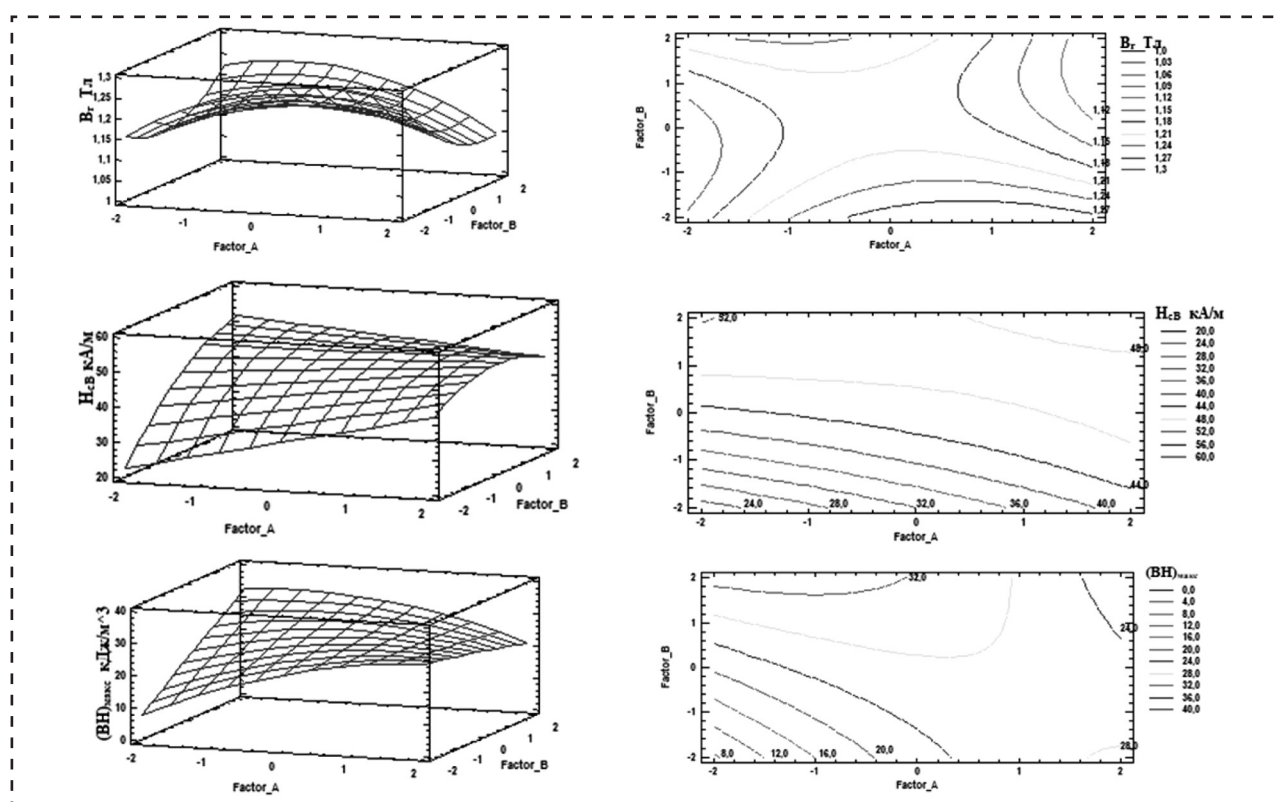


Рис. 4. Оценочные поверхности отклика в фазовых пространствах (фактор $C = 0$) и их поперечные сечения для остаточной индукции B_r , коэрцитивной силы H_{CB} и максимального энергетического произведения $(BH)_{\max}$ порошкового сплава Fe—30Cr—16Co—1Sm

ческой обработки сплава, чтобы получить требуемые свойства B_r , H_{CB} или $(BH)_{\max}$.

На рис. 4 показаны исследованные поверхности отклика магнитных гистерезис-

3. Оптимальные значения факторов A , B и C для получения оптимальных значений магнитных гистерезисных свойств порошкового магнитотвердого сплава Fe—30Cr—16Co—1Sm

Параметр	Фактор			Оптимальное расчетное значение параметра
	A	B	C	
B_r	0,484	−1,681	−1,681	1,303
$H_{св}$	1,681	0,40	1,681	61,15
$(BH)_{\max}$	−1,681	1,681	−1,681	37,12

ных свойств в соответствующих фазовых пространствах и их поперечные сечения, которые дают наглядную информацию об исследованных областях магнитных гистерезисных свойств.

В табл. 3 приведены оптимальные значения факторов A , B и C для получения оптимальных значений магнитных гистерезисных свойств.

Из данных табл. 3 следует, что для получения оптимальных значений остаточной индукции B_r , коэрцитивной силы $H_{св}$ или максимального энергетического произведения $(BH)_{\max}$ необходимо использовать различные режимы термической обработки.

Выводы

1. На порошковом магнитотвердом сплаве Fe—30Cr—16Co—1Sm после его обработки по оптимальному режиму получены: остаточная индукция B_r 1,252 Тл, коэрцитивная сила $H_{св}$ 53,08 кА/м и максимальное энергетическое произведение $(BH)_{\max}$ 36,8 кДж/м³. Средние значения B_r , $H_{св}$ и $(BH)_{\max}$ составляют 1,237 Тл, 49 кА/м и 34 кДж/м³ соответственно. Полученный уровень магнитных гистерезисных свойств практически мало отличается от уровня таких же свойств сплава ЮНДК24 (ГОСТ 17809—72), но при этом содержит на 40% меньше кобальта и не содержит никеля.

2. Статистическая обработка экспериментальных результатов, полученных после проведения термообработки по разным

режимам, показала, что такие факторы, как время проведения ИТМО, скорости охлаждения в различных температурных интервалах по-разному влияют на получение оптимальных значений параметров гистерезисных свойств — B_r , $H_{св}$ и $(BH)_{\max}$.

3. Ожидаемого увеличения коэрцитивной силы $H_{св}$ в исследованном сплаве не наблюдалось.

Работа выполнена в рамках государственного задания 075-01176-23-00.

Список литературы

- ГОСТ 24897—81. Материалы магнитотвердые деформируемые. Марки, технические требования и методы контроля.
- Kaneko H., Homma M., Nakamura K. New Ductile Permanent Magnet of Fe—Cr—Co System // AIP Conference Proceedings «Magnetism and Magnetic Materials». 1971. No 5. P. 1088—1092.
- Павлов И.М., Мехед Г.Н., Кавалерова Л.А., Миляев И.М., Васильева Ж.А. Механические свойства сплавов системы Fe—Cr—Co в литом и деформируемом состоянии. Сб. «Пластическая обработка металлов и сплавов», АН СССР Институт металлургии им. А.А. Байкова. М.: Наука, 1979. С. 208—213.
- Мехед Г.Н., Миляев И.М., Мусорина И.Е., Кавалерова Л.А., Савков Е.Д. Механические свойства сплава ХК15 при растяжении и кручении. Сб. «Пластичность металлов и сплавов с особыми свойствами». АН СССР, Институт металлургии им. А.А. Байкова. М.: Наука, 1982. С. 90—93.
- Kaneko H., Homma M., Fukunaga T., Okada M. Fe—Cr—Co permanent magnet alloys containing Nb and Al // IEEE Transactions on Magnetics. 1975. MAG-11. No 5. P. 1440—1442.
- Kaneko H., Homma M., Nakamura K., Miura M. Fe—Cr—Co permanent magnet alloys containing silicon // IEEE Transactions on Magnetics. 1972. P. 347—348.
- Sugimoto S., Okada M., Ohtani Y., Homma M. The effect of titanium on microstructure and magnetic properties of Fe—Cr—Co hard magnetic materials // Journal of Applied Physics. 1985. V. 57. No 1. P. 4167—4169.
- Миляев И.М., Юсупов В.С., Стельмашок С.И., Миляев А.И. Магнитные и механические свойства магнитот-

- вердых сплавов Fe—Cr—Co, легированных молибденом и вольфрамом // Инновационные металлические материалы. Монография. Магнитогорский государственный технологический университет им. Г.Н. Носова, 2016. С. 59—75.
9. Магат Л.М., Иванова Г.В., Лапина Т.П., Солина Л.В., Шур Я.С. Структурные превращения и магнитные свойства высококоэрцитивного сплава Fe—Cr—Co—Si // Физика металлов и металловедение. 1975. Т. 40. № 1. С. 55—60.
 10. Иванова Г.В., Щеголева Н.Н., Сериков В.В., Клейнерман Н.М., Белозеров Е.В., Уймин М.А., Гавико В.С., Мушников Н.В. Структурные превращения в высокопрочных магнитотвердых сплавах Fe—Cr—Co—W—Ga // Физика металлов и металловедение. 2010. Т. 109. № 5. С. 474—482.
 11. Устиновщиков Ю.Д., Пушкарев Б.Е., Ульянов Д.Г., Фокин Д.Г. Микроструктура и магнитные свойства сплава Fe₆₀Cr₃₀Co₁₀ // Металлы. 2004. № 4. С. 50—58.
 12. Han X.H., Bu S.J., Wu X., Sun J.B., Zhang Y., Cui C.X. Effect of multistage aging on the microstructure, domain structure and magnetic properties of Fe—24Cr—12Co—1,5Si ribbon magnets // Journal of Alloys and Compounds. 2017. V. 694. P. 103—110.
 13. Tao S., Ahmad Z., Zhang P., Zheng X., Zhang S. Effects of Sm on structural, textural and magnetic properties of Fe—28Cr—20Co—3Mo—2V—2Ti hard magnetic alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2020. V. 816. P. 152619.
 14. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 340 с.

Требования к статьям для журналов, включенных в Перечень ВАК

Обязательное указание в каждой статье:

- УДК
- Название статьи
- Аннотация
- Ключевые слова
- Информация об авторах: ученая степень, наименование организации
- E-mail
- Наличие пристатейных библиографических списков у всех статей в формате, установленном журналом из числа предусмотренных действующим ГОСТом

Аннотации статей, ключевые слова, полная информация об авторах должны быть указаны на русском и английском языках.

Извлечение платины из низкоконцентрированных азотнокислых растворов аффинажа методами цементации и сульфидного осаждения

В.Д. ГОРБАЧЕВА*, аспирант, Р.С. СЕЛЬНИЦЫН, канд. техн. наук, доцент

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, 119049, Российская Федерация

*E-mail: vvilmova@bk.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-6-10-15

Статья поступила в редакцию 27.12.2022

Принята после доработки 03.02.2023

Принята к публикации 08.02.2023

Представлены результаты извлечения платины из низкоконцентрированного азотнокислого платиносодержащего раствора методами сульфидного осаждения и цементации. Проблемой исследования послужил вопрос о возможности извлечения платины (IV) из азотнокислых маточных растворов аффинажа сложного ионного и количественного состава. В ходе проведения работы было установлено, что наилучший результат извлечения платины 99,9% был достигнут при цементации цинком, а последующая азотнокислая обработка кека дает возможность получить платино-палладиевый концентрат с содержанием платины не менее 96,1%.

Ключевые слова: аффинаж, цементация, сульфидное осаждение, платина, металлы платиновой группы, благородные металлы, маточные растворы, переработка промышленных отходов, извлечение.

Введение

Доизвлечение благородных металлов из низкоконцентрированных отработанных растворов аффинажных предприятий представляет собой одну из сложных и актуальных технологических задач современной металлургической промышленности [1, 2].

Проблема извлечения остаточного содержания благородных металлов из сбросных промышленных растворов затронула все ведущие предприятия, осуществляющие аффинирование драгоценных металлов в России. Трудность таких растворов вызвана сложным химическим составом, малым содержанием благородных метал-

лов (от тысячных долей мг/дм³ до десятков мг/дм³), высокой концентрацией примесей (от сотых долей мг/дм³ до десятков г/дм³), высокой кислотностью растворов и большим солевым фоном.

Все эти факторы обуславливают необходимость в исследовании низкоконтентированных маточных растворов и принятии новых технологических решений.

В ряду производственных и экономически выгодных методов переработки сырья, содержащего платиноиды, выделяют процессы цементации и сульфидного осаждения.

Известна технология ОАО «ЕЗОЦМ» очистки растворов от металлов-примесей путем гидралитического осаждения, достоинством которой является получение платины чистотой 99,95% [3].

Другим изобретением является получение платиновых металлов из шламов [4]. Предложенный способ заключается в двухстадийном выщелачивании, получении коллективного раствора с содержанием Pt, Pd, Ir от 5 до 50 г/дм³ и осаждении платиновых металлов гидразином. Одним из достоинств изобретения является практически полный перевод платиноидов в раствор, а недостатком — отсутствие возможности разделения платиноидов и получения чистых металлов.

С проблемой доизвлечения редких платиновых металлов исследователи также столкнулись [5]. С целью извлечения платиноидов автоклавным выщелачиванием ими были испытаны такие органические реагенты, как муравьиная, щавелевая кислоты, формальдегид. Предметом исследования изобретения послужили сульфатные, сульфато-хлоридные и хлоридные промрастворы электролитных шламов. Достоинством способа является минимальная концентрация остаточного содер-

жания в растворе до <0,2 мг/дм³, доступность реагентов и их низкая стоимость.

Представленная исследовательская работа направлена на изучение поведения благородных и цветных металлов, содержащихся в азотнокислых маточных растворах аффинажа, при изменении параметров водородного показателя (рН) и температуры.

Целью данной работы послужило установление возможности осаждения платины из маточных растворов аффинажа при влиянии параметров рН раствора (рН = 0,1—5,0) и температуры ($t = 22—80\text{ }^{\circ}\text{C}$) методами цементации и сульфидного осаждения.

Методика исследований

Выбор методов исследования обусловлен термодинамической возможностью протекания процессов: малой растворимостью образованных веществ (сульфидов металлов) при сульфидном осаждении и вытеснением более положительных элементов, чем вытесняющий металл, в случае проведения процесса цементации.

Для проведения экспериментов использовали реактор стеклянный химический с рубашкой вместимостью 50 дм³.

Предметом исследования послужил азотнокислый маточный раствор аффинажа, полученный в результате выщелачивания серебряно-палладиевых гранул (химический состав показан в табл. 1) в азотной кислоте (HNO₃) 57% (х. ч.), осаждения серебра хлоридом натрия (NaCl), восстановления золота метабисульфитом натрия (Na₂S₂O₅), осаждения палладия хлоридом аммония (NH₄Cl). Химический состав раствора представлен в табл. 2; рН 2,5; $\rho = 1171,68\text{ г/дм}^3$; ОВП = 750 мВ.

Изучение образцов растворов, полученных в ходе гидрометаллургических

1. Химический состав гранул

Благородные металлы, %				Неблагородные элементы, %						
Au	Ag	Pt	Pd	Sn	Bi	Zn	Ni	Pb	Fe	Cu
0,16	16,57	0,18	2,94	0,43	0,14	4,10	5,63	0,09	0,09	69,67

2. Химический состав маточного раствора

Благородные металлы, мг/дм ³				Неблагородные элементы, мг/дм ³				
Au	Ag	Pt	Pd	Cu	Zn	Ni	Na	Al
3	1	51	7	57 350	5390	4340	3420	290

процессов, проводили при использовании методов масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (*SUPEC 7000*) и атомно-абсорбционной спектрометрии (*solid AA 790×735×650*).

В качестве реагентов для сульфидного осаждения платины применялись натрия сульфид марки А (ГОСТ 596—89) и натрия тиосульфат технический высшего сорта (ГОСТ 244—76). Цементацию платины выполняли с применением порошка алюминиевого марки ПА-1 (ГОСТ 6058—73) и порошка цинкового марки ПЦ1 (ГОСТ 12601—76).

Для проведения эксперимента в реактор закачивали исходный маточный раствор объемом 0,03 м³. Реагенты для каждого типа маточного раствора рассчитывались стехиометрически. Принимая во внимание сложный химический состав и большое количество примесей, реагент добавлялся в избытке 150% от стехиометрии.

Эксперименты с сульфидным осаждением и цементацией платины были проведены при условиях изменения технологических параметров водородного показателя (рН) и температуры (*t*, °С). Значение рН раствора регулировалось за счет добавления азотной кислоты 57% (х. ч.).

Измерение ОВП проводили с помощью портативного ОВП-метра модели *Milwaukee MW105 MAX*.

Эксперименты осуществлялись в области кислой среды (рН < 7) в диапазоне

температур 22—80 °С, ограниченном условиями работы оборудования аффинажного производства.

Результаты и их обсуждение

Предположительно, условием растворения платины в азотной кислоте послужило разрушение кристаллической решетки серебряно-палладиевого сплава в виде гранул лигатурным весом 65 686,4 г.

Проведенная экспериментальная работа показала, что образование сульфидов зависит главным образом от значения рН и параметра произведения растворимости, которые оказывают большое влияние на полноту и возможность осаждения. При осаждении сульфида платины PtS₂ из азотнокислого маточного раствора в кек переходят и PdS, CuS, ZnS, NiS, Al₂S₃, т.е. те сульфиды, ПР которых составляет менее 10⁻⁸ (табл. 3) [6].

Добавление сульфида натрия в маточный раствор (при расходе реагента 12 г/дм³) способствовало выделению черной мелкодисперсной взвеси. Согласно графику (рис. 1) значение извлечения платины варьируется в диапазоне от 54,9 до 75,0%, а в случае повышения температуры с 22 до 80 °С извлечение достигает 75,4% при рН = 0,2. Безусловно, кислотность раствора и температура прямо пропорционально влияют на прямое извлечение: выделение платины из азотнокислого

3. Расчетные данные растворимости образовавшихся сульфидов

Форма сульфида KtS	Произведение растворимости $PR_{KtS} [H^+]$	Растворимость сульфида P_{KtS} , моль/л
Cu_2S	$2,5 \cdot 10^{-48}$	$5,79 \cdot 10^{-73}$
ZnS	$1,6 \cdot 10^{-24}$	$2,37 \cdot 10^{-25}$
NiS	$3,2 \cdot 10^{-19}$	$9,48 \cdot 10^{-15}$
Al_2S_3	нет данных $\sim 1 \cdot 10^{-32}$	$\sim 0,93 \cdot 10^{-41}$
PtS_2	нет данных $\sim 8 \cdot 10^{-73}$	$\sim 5,93 \cdot 10^{-122}$
PdS	нет данных $\sim 8 \cdot 10^{-73}$ $\sim 6,5 \cdot 10^{-71}$	$\sim 5,93 \cdot 10^{-122}$ $\sim 3,91 \cdot 10^{-118}$

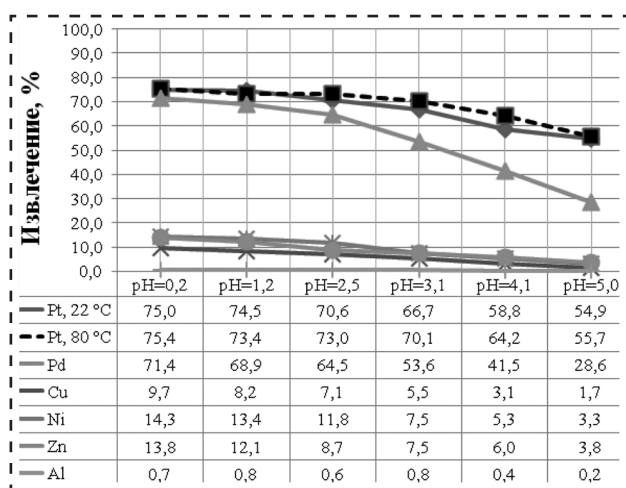


Рис. 1. Зависимость извлечения цветных металлов сульфидом натрия из маточного раствора при изменении параметра pH ($t = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

раствора тем выше, чем выше кислотность раствора и его температура.

Использование в качестве реагента тиосульфата натрия (расход $22,5 \text{ г/дм}^3$), который доказал свою экономическую и техническую эффективность при извлечении благородных металлов [7], способствует изменению цвета раствора с синего на зеленый и осаждению платины до 84,2%, палладия до 58,7% совместно с примесями цветных металлов (рис. 2) в виде черного мелкодисперсного осадка.

Механизм процесса осаждения протекает по следующей реакции (1):

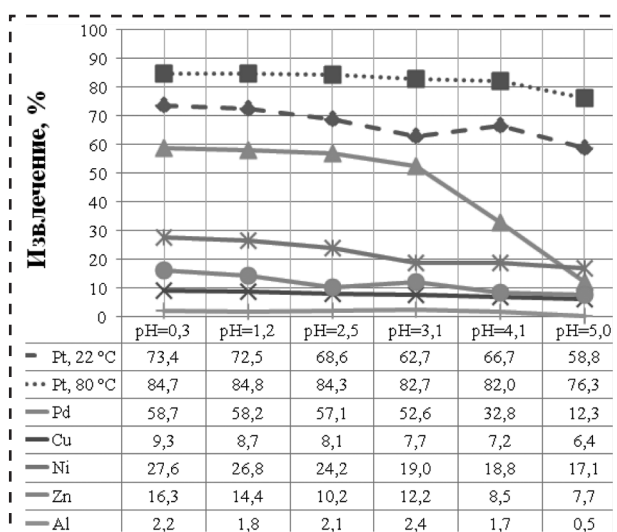
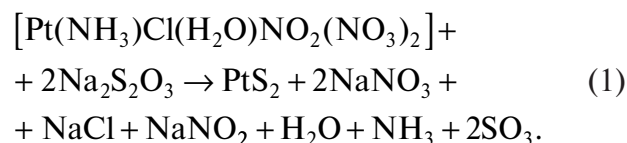


Рис. 2. Зависимость извлечения цветных металлов тиосульфатом натрия из маточного раствора при изменении параметра pH ($t = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

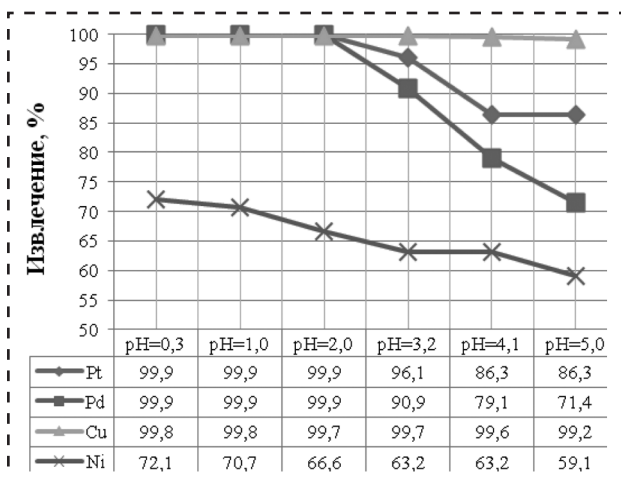


Стоит предполагать, что связь с платиной тиосульфат осуществляет посредством атома серы, подтверждением чего могут служить результаты РСА, выполненные исследователями [8].

При проведении процесса цементации алюминием не было обнаружено контактного вытеснения элементов из раствора, увеличение температуры с $22 \text{ до } 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$,

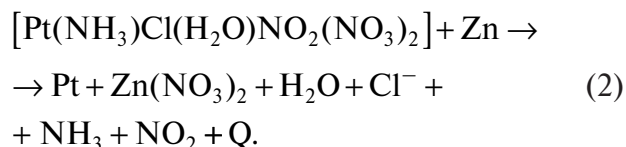
4. Результаты химического анализа платинового порошка

Pt, %	Pd, %	Au, %	Ag, %	Cu, %	Fe, %	Zn, %	Ni, %	Bi, %	Cd, %
96,1	2,56	<0,001	<0,001	0,94	0,05	0,018	0,21	0,121	<0,001


 Рис. 3. Зависимость извлечения цветных металлов цементацией цинковой пылью из маточного раствора при изменении параметра pH ($t = 22^\circ\text{C}$)

а также активное перемешивание раствора не способствовали осаждению металлов. Такой факт может быть вызван высоким сродством алюминия к кислороду и образованием оксидной пленки на поверхности алюминия при контакте с раствором, что препятствует процессу цементации.

Наилучший результат был достигнут при осаждении платины цинковой пылью (при расходе цинка 100 г/дм^3). Добавление цинка сопровождалось проявлением экзотермической реакции с выделением газов NH_3 , Cl^- , NO_2 (2) и изменением цвета раствора с синего на светло-зеленоватый, что свидетельствует об остаточном содержании солей цветных металлов (например, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$) в маточном растворе.



Экспериментальная работа показала, что при $\text{pH} = 2,0$ и менее извлечение пла-

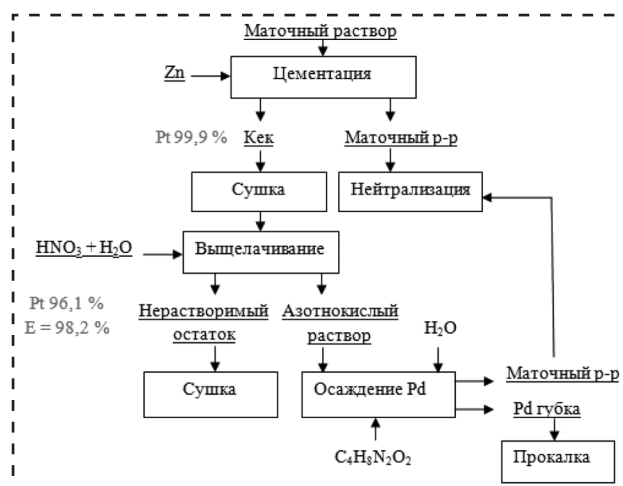


Рис. 4. Технологическая схема получения концентрата Pt—Pd

тины достигает 99,9%. Совместно с платиной в ке́к также переходят палладий (до 99,9%), медь (до 99,8%), никель (до 72,1%) и др. металлы (рис. 3). Показатель ОВП = -30 мВ .

Полученный ке́к был высушен при температуре $t = 150\text{—}180^\circ\text{C}$ в течение 5 ч, после сушки масса ке́ка составила $1843,0\text{ г}$. С целью удаления большого количества примесей полученный ке́к подвергся процессу выщелачивания в 20%-м растворе азотной кислоты в течение 1 ч при температуре $t = 70\text{—}80^\circ\text{C}$.

После этого нерастворимый осадок был высушен при температуре $t = 150\text{—}180^\circ\text{C}$ в течение 5 ч и проанализирован, а раствор нейтрализован раствором NaOH .

Химический анализ концентрата Pt—Pd представлен в табл. 4.

Согласно проведенной экспериментальной работе была предложена технологическая схема извлечения платины из низкоконтентированного азотнокислого платиносодержащего раствора с получением Pt—Pd концентрата (рис. 4).

Выводы

Проведенная экспериментальная работа по извлечению платины из низкоконтентированного азотнокислого платиносодержащего раствора показала следующие результаты:

1. Отмечается невозможность селективного извлечения платины из маточного раствора вследствие сложного ионного и количественного химического состава раствора.

2. Наилучшая степень извлечения платины ($E = 99,9\%$) из азотнокислого маточного раствора была получена при цементации цинком при условии $pH = 2,0$ и менее и $t = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Предложенная технологическая схема позволяет получить концентрат Pt—Pd с содержанием платины не менее $96,1\%$ и извлечением платины $E = 98,2\%$.

Список литературы

1. Сметанников А.Ф., Оносов Д.В., Коротченкова О.В., Оносова Е.Ф. Извлечение Pd, Pt, Ag из отходов переработки К—Mg руд. Сборник тезисов докладов XXIII Международной Черняевской конференции по химии, анализу и технологии платиновых металлов. Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2022. С. 79. DOI: 10.26902/Chern-2022-055.
2. Зелях Я.Д., Королев А.А., Тимофеев К.Л., Краюхин С.А., Воинков Р.С. Селективное выделение платиновых металлов из многокомпонентного сырья. Сборник тезисов докладов XXIII Международной Черняевской конференции по химии, анализу и технологии платиновых металлов. Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2022. С. 80. DOI: 10.26902/Chern-2022-056.
3. Скоморохов В.А. и др. Новый процесс в аффинаже платины в ОАО «ЕЗОЦМ» // Цветные металлы. 2007. № 6. С. 54—55.
4. Способ извлечения платиновых металлов из шламов / Н.И. Тимофеев, В.И. Богданов, А.В. Ермаков Пат. РФ 2171855. Оpubл. 10.08.2001.
5. Лапшин Д.А., Грабчак Э.Ф., Кожанов А.Л., Дылько Г.Н., Мамсик М.Ю. Извлечение платиновых металлов из растворов шламового производства. Сборник тезисов докладов XIX Международной Черняевской конференции по химии, анализу и технологии платиновых металлов. Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2010. С. 57.
6. Christian Gary D., Dasgupta Purnendu K., Schug Kevin A. Analytical chemistry // Seventeen Wiley. 2014. P. 826.
7. Hanckl Ralph Peter, Ji Jinxing, West-Sells Paul George. Method for thiosulfate leaching of precious metal-containing materials. 8097227 (US). 2010.
8. Kaewthong A., Saunders G.C., Henderson W. The thiosulfate ($S_2O_3^{2-}$) ion; a neglected but simple hetero-donor ligand towards platinum (II), palladium (II) and nickel (II) // Inorganica Chimica Acta. 2022. V. 534. DOI: doi.org/10.1016/j.ica.2022.120808.

Уважаемые авторы!

Со второго полугодия 2018 г. (с № 7/2018) статьям, опубликованным в научных журналах ООО «НиТ», на основании договора с фирмой Crossref/NEICON присваивается индекс DOI.

Загрузку метаданных статьи в базу Crossref осуществляет сам автор по инструкции, приведенной на сайте <http://elpub.ru>. Необходимые для загрузки дополнительные данные и инструкции редакция передает автору по e-mail после выпуска очередного номера журнала.

Загруженный в Crossref индекс DOI следует указывать при цитировании статьи в списках литературы.

Оценка и выбор рабочих газов при плазменных методах нанесения покрытий на стационарных и мобильных установках

И.Н. КРАВЧЕНКО^{1, 2*}, д-р техн. наук, проф., С.В. КАРЦЕВ², канд. техн. наук, доц., С.А. ВЕЛИЧКО³, д-р техн. наук, проф., Г.И. ТРИФОНОВ⁴, канд. техн. наук, А.В. МАРТЫНОВ³, канд. техн. наук, доц., Д.И. ПЕТРОВСКИЙ¹, канд. техн. наук, доц.

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева», Москва, 127434, Российская Федерация

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, 101900, Российская Федерация

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», г. Саранск, 430000, Республика Мордовия, Российская Федерация

⁴Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, 394064, Российская Федерация

*E-mail: kravchenko71@yandex.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-6-16-23

Статья поступила в редакцию 08.12.2022

Принята после доработки 24.01.2023

Принята к публикации 08.02.2023

Представлены результаты оценки и выбора рабочих газов при плазменно-порошковой наплавке, которые защищают расплавленный металл и электрод от окисления и способствуют устойчивому горению плазменной дуги. Применение в промышленности плазменных методов с выбранными газами позволяет наносить износостойкие покрытия на детали машин и оборудования. Разработана мобильная установка для плазменной наплавки на базе автомобиля «КамАЗ», для которой рассмотрены теплофизические особенности применения горячих углеводородов, а также даны рекомендации по их практическому применению и управлению.

Ключевые слова: плазменная дуга, плазменное напыление, инертные газы, активные газы, горячие углеводороды, плазмообразующий и транспортирующий потоки.

Введение

В работах известных ученых [1—3] отмечается, что ремонт с восстановлением деталей является серьезной, далеко не реализованной научно-технической проблемой, решающей важные народнохозяйственные задачи.

При восстановлении изношенных поверхностей деталей применяются различные методы и способы нанесения покрытий, имеющие свои преимущества. К одному из таких способов газотермического нанесения покрытий относится плазменное напыление [4, 5]. В его основе лежит процесс нагрева напыляемого материала до жидкого или пластического состояния, перенос его высокотемпературной плазменной струей газа к подложке с последующим образованием слоя покрытия. В качестве напыляющих материалов можно применять различные порошки, проволоки, прутки и т.д.

Рабочий газ при плазменном напылении является плазмообразующим газом, который должен быть инертным по отношению к распыляемому материалу и иметь высокие значения энтальпии. Поток плазмообразующего газа интенсивно охлаждает столб дуги, горящей в сравнительно узком водоохлаждаемом канале плазмотрона, образуя таким образом плазменную струю. Характеристики плазменной струи в значительной мере определяются видом плазмообразующего газа, который может быть одним из следующих групп [6—8]:

1. Одноатомные (инертные) газы и их смеси (Ar; He; Ar+He);
2. Двухатомные (активные) газы и их смеси (N_2 ; NH_4 ; воздух и др.);
3. Одноатомные газы в смеси с двухатомными ($Ar+H_2$; $Ar+N_2$ и др.)

От правильного выбора газа зависит качество и функциональные свойства покрытий, полученных плазменным методом.

Целью исследования является анализ особенностей и выбор рабочих газов, применяемых при осуществлении технологии плазменного нанесения износостойких покрытий.

Материалы исследования

Экспериментальные исследования для стационарных способов газотермического нанесения покрытий проводились на базе установки ОДО «ТЕНА» с использованием различных инертных и активных газов. Для мобильного способа газотермического нанесения покрытий работы проводились на базе автомобиля «КамАЗ» с использованием горячих углеводородов выхлопных газов. Регулирование окислительно-восстановительного потенциала плазменной струи распыляемого материала выполнялись за счет изменения угла опережения впрыска топлива двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Результаты исследования и их обсуждение

При плазменном напылении и наплавке рабочий газ должен защищать расплавленный металл и электрод от окисления и способствовать устойчивому горению плазменной дуги. При плазменно-порошковой наплавке газ транспортирует присадочный порошок в плазмотрон с его дальнейшим вдуванием в плазменную дугу [9]. Таким образом, газовая среда не должна образовывать химические соединения с наплавляемым и основным металлами.

Известно, что одной из важнейших характеристик плазмообразующих газов является их энтальпия (теплосодержание) [10—12]. При нагреве одноатомных газов вклад в энтальпию вносят только тепловое движение молекул и ионизация.

Для двухатомных газов кроме ионизации дополнительным источником энер-

гии является процесс диссоциации. В результате этого плазма многоатомных газов обладает высокой энтальпией при более низких температурах, что необходимо учитывать в технологии нанесения покрытий. Для получения плазменных струй с высокой тепловой мощностью в качестве добавок используют горючие газы (ацетилен, метан, пропан). Такие добавки позволяют регулировать окислительно-восстановительный потенциал струи по отношению к распыляемому материалу.

В качестве рабочих газов при плазменной наплавке используют инертные газы (аргон, гелий), активные газы (азот, водород) и смеси газов.

Физико-химические свойства этих газов представлены в таблице. Результаты анализа таблицы показывают, что наибольшая энтальпия плазмы у водорода, которая в 7,7 раза выше, чем у азота и в 16 и 15 раз выше, чем у аргона и гелия соответственно. Коэффициент теплоотдачи от плазмы к частице материала у водорода в 8,6 раза выше, чем у азота и в 29 раз выше, чем у аргона и гелия.

Несмотря на преимущества водорода перед другими газами, по физико-химическим свойствам наибольшее применение находит аргон (Ar). Аргон обеспечивает высокую степень защиты расплавленного металла от окисления и поддерживает устойчивость горения плазменной дуги. При использовании аргона необходимо относительно низкое напряжение возбуждения дуги, которое обеспечивают источники питания с напряжением холостого хода до 80 В. При этом для использования в качестве газа азот или водород требуются источники питания с напряжением холостого хода, соответственно, 160 В и 320 В.

Гелий (He) — инертный газ, но легче аргона, поэтому при плазменной наплавке его расход на 30—40% больше расхода аргона. Из таблицы видно, что у гелия более высокая теплоемкость и энтальпия чем у аргона, что позволяет более интенсивно нагревать зону наплавки, а значит, увеличивать проплавляющую способность дуги. Однако применение аргоно-гелиевой смеси газов (30% Ar + 60% He) способствует лучшей защите расплавленного металла,

Физико-химические свойства плазмообразующих газов

Характеристика	Водород	Азот	Аргон	Гелий
Атомная или молекулярная масса	2,016	28,0016	39,94	4,0024
Плотность при 0 °С и 760 мм рт. ст., кг/м ³	0,084	1,2505	1,783	0,1785
Вязкость при 20 °С и 760 мм рт. ст., мкпз	88	170	221	196
Теплоемкость при 20 °С и 760 мм рт. ст., кал/кг·°С	3,408	0,250	0,125	1,251
Коэффициент теплопроводности при 0 °С и 760 мм рт. ст., Мкал/ч·м·°С	150	20,9	14	130
Потенциал ионизации, В:				
однократный	13,5	14,5	15,7	24,5
двукратный		29,4	27,5	54,1
Энтальпия плазмы, ккал/кг	76 600	9950	4670	5110
Температура плазмы, °С	5000	7200	14 000	20 000
Напряжение дуги, В	62	60	40	47
Энергия, подводимая к дуге, кВт	120	65	48	50
Коэффициент использования энергии на нагрев газа, %	80	60	40	48
Коэффициент теплоотдачи от плазмы к частице материала, %	26	3	0,9	0,9

чем в случае использования одного гелия. Кроме того, он значительно дороже аргона, что сдерживает его применение.

Активные газы (азот N_2 , водород H_2) при наплавке используются в виде газовых смесей: 70—80% Ar + 20—30% N_2 ; 95% Ar + 5% N_2 и др. Из работы [4] следует, что чрезмерное добавление в аргон двухатомных газов нежелательно, так как из-за этого возрастает напряженность электрического поля в столбе плазменной дуги, увеличивается тепловая нагрузка на внутренние стенки сопла плазматрона, снижается устойчивость дугового разряда и в конечном итоге затрудняется возбуждение дуги из-за вероятности возникновения «двойной дуги».

При использовании H_2 , который имеет большую теплопроводность и теплоемкость, напряжение дуги возрастает, что приводит к увеличению длины дуги на 20—30 мм, 15 мм из которых приходится на внутрисопловую часть плазматрона.

При использовании N_2 вместо Ar с равными значениями силы тока дуги прямого действия и расходе газа увеличивается проплавление основного металла и улучшается качество наплавленных валиков, что связано с большим теплосодержанием и большей теплопроводностью азотной плазмы. Таким образом, в случае использования при плазменной наплавке азота сила тока дуги прямого действия уменьшается на 8—12%.

Чрезмерное использование в смесях активных газов приводит к их растворению в металле сварочной ванны, окислению с последующим появлением пор в наплавленном металле [13]. Эта причина является сдерживающим фактором для применения в смесях с аргонном водорода — не более 5%. При этом даже небольшие добавки H_2 существенно повышают тепловые характе-

ристики плазменной дуги и качественное формирование наплавленного металла.

Таким образом, из приведенного анализа следует, что газовая среда при плазменном напылении или наплавке должна состоять из трех потоков: 1 — плазмообразующего потока (обычно аргон), который сжимает и стабилизирует дугу и защищает электрод от окисления; 2 — защитного потока, который предохраняет от окисления расплавленный металл (аргон, гелий, азот, газовая смесь); 3 — транспортирующего потока при плазменно-порошковой наплавке (аргон, гелий, азот, смесь газов).

При ремонте агрегатов не всегда имеется возможность их демонтажа и доставки на предприятия технического сервиса. В связи с этим возникает острая необходимость в разработке передвижной установки для плазменной наплавки или напыления.

Для этого разработана экспериментальная мобильная плазменная установка на базе автомобиля «КамАЗ», позволяющая выполнять плазменное напыление с оплавлением покрытий (рис. 1) [14, 15].

Блок-схема мобильной многофункциональной плазменной установки показана на рис. 2. Плазменная установка обладает многофункциональностью и может выполнять работы по плазменному напылению покрытий, плазменному оплавлению покрытий, плазменному упрочнению, а также плазменной резке металлов и плазменной наплавке покрытий.

Учитывая, что мобильная многофункциональная плазменная установка смонтирована на шасси автомобиля, источником газов (в виде горячих углеводородов) может служить ДВС базового автомобиля. Практика показала, что дизельный двигатель может работать достаточно длительное время при противодавлении



Рис. 1. Мобильный вариант плазменной установки на базе автомобиля «КамАЗ»

в 0,25 МПа без заметного ущерба для его надежности. Избыточный кислород, который содержится в отработавших газах дизельного двигателя, работающего на максимальных холостых оборотах, в пределах 15–18% от общего объема отработавших газов может служить окислительной средой для плазмотронов. Таким образом, дизельный ДВС автомобиля может использоваться как источник горячих углеводородов. В зависимости от условий работы двигателя, температура углеводородов находится в диапазоне 200–350 °С.

Известно, что в состав отработавших газов дизельного ДВС входят следующие углеводороды: метан, формальдегид, акролеин, метиловый спирт, этиловый спирт, муравьиная кислота, уксусная кислота, фенолы, полициклические ароматические углеводороды и сильный восстановитель — угарный газ. Рассматриваемые углеводороды можно использовать для нейтрализации кислорода и других соединений благодаря наличию большого количества свободных как положительных, так и отрицательных радикалов с повышенной химической активностью, созданных высокой температурой отработавших газов.

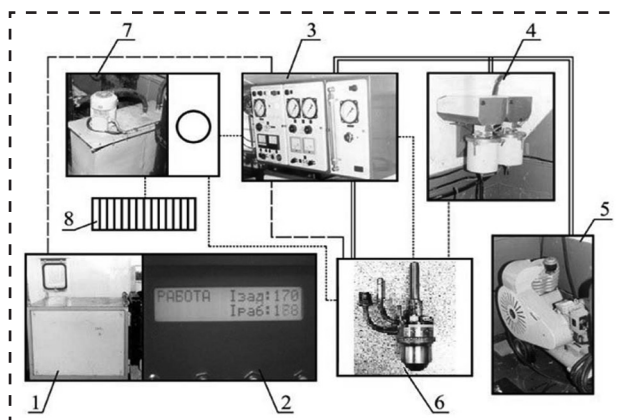


Рис. 2. Блок-схема multifunctionальной плазменной установки:

1 — блок питания; 2 — микроконтроллер; 3 — пульт управления; 4 — дозаторы; 5 — компрессор; 6 — плазмотрон; 7 — система охлаждения плазмотрона; 8 — радиатор

Преимуществом мобильной плазменной установки является легкое управление количеством и составом углеводородов, содержащихся в отработавших газах. Существует несколько способов управления, а именно: 1 — отношением количества всасываемого воздуха в цилиндры к количеству подаваемого топлива (величина α); 2 — дросселированием выпуска, изменяя коэффициент γ , который показывает количество не выброшенных отработавших газов в свежем заряде цилиндра; 3 — изме-

нением угла опережения впрыска топлива. Из всех способов управления наиболее эффективным является третий.

Оптимальный режим работы ДВС при максимальном КПД устанавливается подбором угла опережения впрыска топлива насоса высокого давления (ТНВД) по критерию максимальной площади индикаторных диаграмм после верхней мертвой точки (рис. 3). Из диаграммы видно, что при увеличении угла опережения впрыска топлива появляется отрицательная работа, которая измеряется площадью индикаторной диаграммы до верхней мертвой точки. Это приведет к снижению КПД и увеличению максимального давления сгорания P_z . Следовательно, работа дизельного двигателя будет жесткой.

Из рис. 3 видно, что изменение угла опережения впрыска топлива приводит к сдвигу точки отрыва кривой давления в цилиндре от синусоиды. Тогда уменьшение угла опережения впрыска топлива ведет к сдвигу не только точки отрыва, но и всей кривой давления на такт расширения. Это способствует уменьшению

максимального давления цикла P_z и сдвигу фазы догорания топлива на фазу такта расширения. Тогда время догорания существенно уменьшается до срабатывания выпускного клапана. В результате такого явления будет повышаться температура отработавших газов, а в них увеличиваться доля углеводородов. Увеличение количества углеводородов достигается не только уменьшением времени догорания смеси, но и из-за резкого падения давления и температуры в цилиндре во время такта расширения.

Уменьшение угла опережения впрыска топлива приводит к обогащению отработавших газов более сложными молекулами углеводородов, являющимися продуктами термического распада (крекинга) сложных молекул углеводородов дизельного топлива.

Предельным углом опережения впрыска топлива является угол, при котором основная часть углеводородов, содержащаяся в дизельном топливе, перейдет в частицы молекул и радикалы, которые используются как восстановитель. Оставшаяся часть

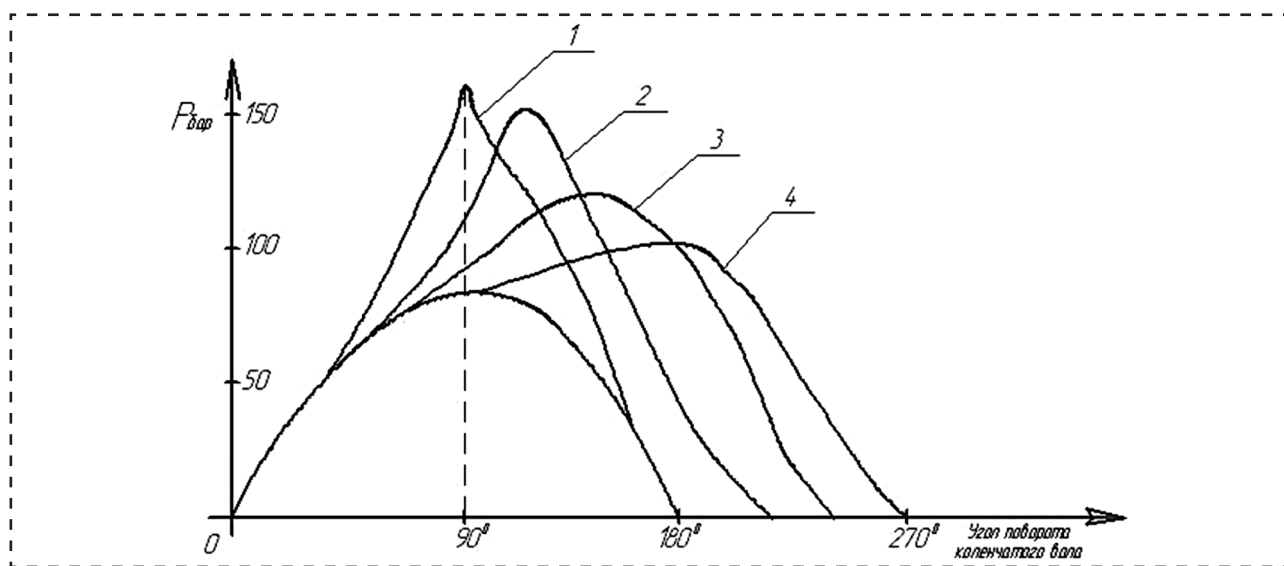


Рис. 3. Индикаторные диаграммы дизельного ДВС в зависимости от изменения угла опережения впрыска топлива:

1 — увеличенный угол; 2 — нормальный угол; 3 — уменьшенный угол; 4 — предельно уменьшенный угол

топлива при сгорании будет совершать механическую работу, достаточную только для прокрутки коленчатого вала двигателя.

Для такого ДВС КПД в общем виде можно определить по формуле:

$$\eta_{\ell} = 1 - \frac{Q_n^I + Q_n + Q_m}{Q} = 1 - q_n^I, \quad (1)$$

где Q — степень использования тепловой энергии топлива, %; Q_n^I — потери на тепло при теоретическом цикле, %; Q_n — потери на тепло при действительном цикле, %; Q_m — потери тепла на преодоление силы трения движущихся частей двигателя, %.

В том случае, когда ДВС работает только на себя, механический КПД равен нулю. С учетом этого формула (1) запишется

$$\frac{Q_n^I + Q_n}{Q} = \frac{Q_n}{Q} = q_n^I, q_n^I = 0. \quad (2)$$

Тогда

$$\frac{Q_n^I + Q_n}{a} = q_n^I. \quad (3)$$

Полученное выражение (3) составляет соответствующий баланс энергии вида

$$Q_a = Q_i + Q_m + Q_r + Q_o, \quad (4)$$

где Q_a — количество тепловой энергии топлива, выделившейся при его сгорании в цилиндре ДВС; Q_i — количество тепловой энергии, эквивалентное индикаторной работе ДВС; Q_m — количество тепловой энергии, эквивалентное механической работе ДВС (потери на трение); Q_r — количество тепловой энергии, содержащейся в отработавших газах непосредственно за выпускным клапаном; Q_o — количество тепловой энергии, теряемой на охлаждение без учета затрат энергии на осуществление этой потери.

Подставляя значения в формулу (4), получим

$$Q_i = 0, \text{ при } \eta_0 = 0, \quad (5)$$

где Q_m — механические потери; $Q_{m_{\min}}$ — минимальные механические потери при данных оборотах коленчатого вала двигателя; Q_r — количество тепловой энергии, содержащейся в отработавших газах, увеличится, поскольку догорание осуществляется на такте расширения и на такте выпуска; Q_o — количество тепловой энергии, теряемой на охлаждение, несколько уменьшится, поскольку увеличивается температура отработавших газов, которые практически не соприкасаются с системой охлаждения.

Из приведенных формул следует, что для предельного положения угла опережения подачи топлива получается

$$Q_i = 0, Q_m = Q_o + Q_r. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что потери тепла суммируются из количества теплоты, отданной в систему охлаждения Q_o и температуры отработавших газов. Количество теплоты Q_o зависит только от конструкции системы выпуска отработавших газов двигателя. Часто эта величина принимается одинаковой для разных конструкций двигателей. При уменьшении угла впрыска топлива увеличивается теплота, переданная отработавшим газам Q_r , и теплота, отдаваемая в систему охлаждения двигателя Q_o . Хотя эти величины не являются полезными, их сумма Q_m определяет механические потери и одновременно определяет холостые обороты для выбранного режима работы двигателя. Кроме того, величина Q_m определяет энергию, которая затрачивается на преобразование углеводородных молекул в горячие радикалы. В зависимости от потерь на трение P_r эта величина составляет 8—12% от величины подводимой тепловой энергии при использовании дизельного топлива.

Таким образом, это значение нужно учитывать при проектировании систем

газопитания плазменных установок, использующих горячие углеводороды для регулирования окислительно-восстановительного потенциала плазменной струи распыляемого материала.

Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования по выбору рабочих газов при плазменно-порошковой наплавке, обеспечивающих надежную защиту расплавленного металла и электрода от окисления, а также способствующих устойчивому горению плазменной дуги. Газовая среда при плазменном напылении или наплавке состоит из трех потоков: 1 — плазмообразующий поток (аргон); 2 — защитный поток (аргон, гелий, азот, газовая смесь); 3 — транспортирующий поток (аргон, гелий, азот, смесь газов).

2. Разработана передвижная установка для плазменной наплавки на базе автомобиля «КамАЗ». Используя горячие углеводороды в качестве плазмообразующего газа при плазменном напылении (наплавке), экспериментально подтверждено влияние изменения угла опережения впрыска топлива на точку отрыва кривой давления в цилиндре от синусоиды насосного хода. Определена величина отработанных газов, равная 8—12%, направленная на получение плазменной струи.

Список литературы

1. Батищев А.Н., Голубев И.Г., Спицын И.А. Перспективные методы восстановления и упрочнения. М.: ЦНИИТЭИ, 1983. 28 с.
2. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П. Работоспособность и долговечность восстанавливаемых деталей и сборочных единиц. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1993. 120 с.
3. Черноиванов В.И., Лялякин В.П., Голубев И.Г. Организация и технология восстановления деталей машин. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. 568 с.
4. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
5. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.
6. Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление / Пер. с яп. В.Н. Попов; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
7. Ильюшенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громыко Г.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларус. навука, 2011. 357 с.
8. Тушинский Л.И., Плехов А.В., Токарев А.О., Сиднев В.И. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий. М.: Мир, 2004. 384 с.
9. Коротков В.А., Бердников А.А., Толстов И.А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями. Челябинск: Металл, 1993. 144 с.
10. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.
11. Боровский Г.В., Григорьев С.Н., Маслов А.Р. Современные технологии обработки металлов. М.: Машиностроение, 2015. 304 с.
12. Кадырметов А.М. Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 81 (07). С. 1—18.
13. Трифионов Г.И., Жачкин С.Ю. Толщина покрытия детали при плазменном напылении // Современные материалы, техника и технологии. № 1 (16). 2018. С. 77—82.
14. Карцев С.В., Кравченко И.Н., Гладков В.Ю., Зубачев С.М. Мобильная плазменная установка для нанесения износостойких покрытий // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. СПб: СПбГПУ, 2004. С. 215—220.
15. Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Бобряшов Е.М., Салеев Н.И. Автономная мобильная плазмогенерирующая установка для упрочнения и восстановления деталей машин и оборудования // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10—2. С. 151—154.

Способы снижения расхода электроэнергии при получении алюминия

Л.Б. ТОЛЫМБЕКОВА^{1*}, канд. техн. наук, доцент,

А.К. ЖУНУСОВ¹, канд. техн. наук, доцент, Б.С. КЕЛАМАНОВ², канд. техн. наук, доцент

¹НАО «Торайгыров университет», г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан

²НАО «Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова», г. Актобе, 030000, Республика Казахстан

*E-mail: lyazat-t@mail.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-6-24-30

Статья поступила в редакцию 12.12.2022

Принята после доработки 18.01.2023

Принята к публикации 08.02.2023

Представлены результаты исследований по применению катодных блоков с чугунной заливкой, проведенных в условиях серии электролиза АО «Казахстанский электролизный завод». Исследовано поведение катодных блоков с чугунной заливкой в процессе эксплуатации, также проведен анализ влияния данных блоков на технико-экономические показатели электролизеров с целью снижения расхода электроэнергии. В результате исследования опытным путем доказано, что применение катодных блоков с чугунной заливкой позволит снизить падение напряжения в подине на 20 мВ и соответственно снизит расход электроэнергии на 80 кВт·ч/т. На электролизерах с катодными блоками с чугунной заливкой производительность выше на 0,2%, чем на электролизерах с углеродистой массой.

Ключевые слова: катодный блок, алюминий, электролизер, напряжение, электроэнергия.

Введение

Современная тенденция развития производства первичного алюминия направлена на применение электролизеров с повышенной токовой нагрузкой 300—400 кА, что, в свою очередь, требует применения в их конструкции катодных блоков с пониженным

удельным электросопротивлением [1, 2]. При использовании в рецептуре катодных блоков сырьевых материалов, прошедших высокотемпературную обработку, повышается стойкость к термическим напряжениям и химическая стойкость к расплаву электролита. Увеличение содержания графита до 70—100% в катодных блоках

позволяет снизить электросопротивление, но при этом также повышает теплопроводность блоков, что в итоге усложняет задачу по снижению расхода электроэнергии [2—4]. Альтернативным методом уменьшения электросопротивления является снижение перепада напряжения в подине, что, в свою очередь, позволяет увеличить срок службы электролизеров [3]. Величина перепада напряжения в подине обусловлена качеством электрического контакта в соединении «катодный блок—токоподвод» [4, 5].

Существуют несколько способов монтажа токоподводов в катодные блоки, самые распространенные из них (рис. 1):

- специальной углеродистой массой;
- чугуновой заливкой.

По технологии заделки метод с использованием углеродистой массы является наиболее простым, не требующим дополнительных ресурсов. Заделка чугуновой заливкой более затратный и технически сложный процесс, но данный метод позволяет снизить электросопротивление в контакте «катодный блок—токоподвод». Снижение электросопротивления соответственно влияет на снижение удельного расхода электроэнергии, что делает данный метод экономически выгодным [4—6].

Данная технология также становится актуальной ввиду ежегодных повышений цен на электроэнергию и ее дефицита в целом.

Монтаж токоподводов в катодные блоки с помощью заливки чугуна применяется достаточно давно. Однако ввиду негативных факторов при использовании данного метода, таких как разрушение блоков из-за образования трещин в стенках и углах, которые, в свою очередь, негативно влияют на срок службы электролизеров (рис. 2), данный метод не нашел широкого распространения. Образование трещин в катодных блоках связано с термоударами и различиями коэффициентов термического расширения между углем и сталью. Риск образования трещин, вызванный этим более высоким температурным расширением затвердевшего стального токоподвода по отношению к угольному блоку, при повторном нагреве будет увеличен при недостаточном предварительном нагреве до заливки [7]. Состав чугуна также является важным параметром. Трещины в стенках обычно вызваны поперечным давлением со стороны токоподвода, тогда как угловые трещины связаны с продольным изгибом токоподвода и термоударом [8, 9]. В целях исключения данных дефектов были внесены различ-

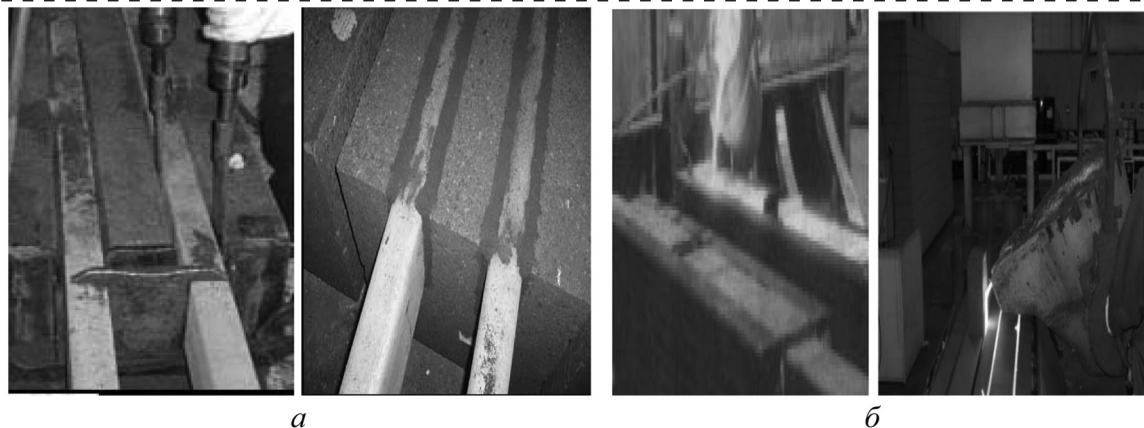


Рис. 1. Катодные блоки с заделкой токоподвода с помощью углеродистой массы (а) и с помощью чугуновой заливки (б)

ные изменения в форму катодных блоков и токоподвода (в блоках количество пазов увеличилось до двух, токоподвод изготавливается не на всю длину катодного блока, а частями), а также стал широко применяться метод монтажа токоподвода с помощью углеродистой массы [8—10].

Что касается влияния на расход электроэнергии, то метод монтажа с использованием углеродистой массы уступает методу с чугунной заливкой (удельное электросопротивление углеродистой массы $< 80 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, тогда как у чугуна $< 2 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$). В связи с имеющейся разницей в электропроводности используемых материалов метод с чугунной заливкой вновь начинает применяться масштабно. Недостаток метода, связанный с образованием трещин, остался в прошлом. Разработаны различные способы заливки чугуна в катодные блоки, позволяющие при этом сохранить качество блоков и не создавать дефекты. Сущность нового способа заливки чугуна заключается в предварительном нагреве катодных блоков. В целях предотвращения появления трещин были определены параметры нагрева катодного блока и токоподвода перед заливкой чугуна. Катодные секции представляют собой композитную систему с ярко выраженными свойствами механической неоднородности: упругие модули и коэффициенты линейного температурного расширения входящих в нее материалов (токоподвод, катодный блок) отличаются на порядки. Так, модуль Юнга углеграфитовой матрицы и спеченной подовой массы составляют, соответственно, $6,35 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ и $1,0 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, в то время как модуль нормальной упругости стального токоподвода равен $2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Расчеты температуры подогрева с использованием коэффициентов теплового расширения в температурном диапазо-

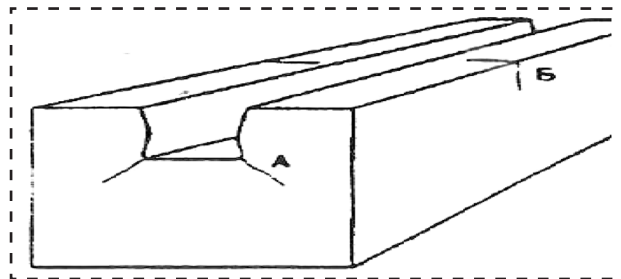


Рис. 2. Дефекты в катодных блоках — трещины в стенках (а) и угловые трещины (б)

не нагрева токоподвода и катодных блоков, чугуна и различных типов катодных блоков показывают, что недостаточный предварительный нагрев до заливки может привести к серьезному повреждению блоков во время предварительного нагрева перед вводом электролизера в эксплуатацию. На практике катодные блоки нагреваются до температуры $400\text{—}500^\circ\text{C}$. Независимо от параметра нагрева при температуре нагрева от 400 до 1000°C катодных блоков и токоподводов напряженное состояние блока перед заливкой незначительное и в этот момент разрушение катодного блока не происходит. Нагрев производится на станциях предварительного нагрева блоков, токоподводов. Для этой цели широко используется установка фирмы *Hotwork* [9—11]. Положительная тенденция наблюдается в случае увеличения времени нагрева до 6 часов и при дополнительной изоляции катодного блока от источника нагрева. Приготовление чугуна для заливки токоподводов включает в себя расплавление чугуна, легирование его феррофосфором и ферросилицием путем их введения в расплав. Легирование чугуна позволяет снизить себестоимость чугуна и уменьшает его усадку. Оценка качества выплавки проводится путем исследования химического состава пробы с помощью эмиссионного спектрометра *ARL-72000*. Как правило, производители катодных блоков для расширения линей-

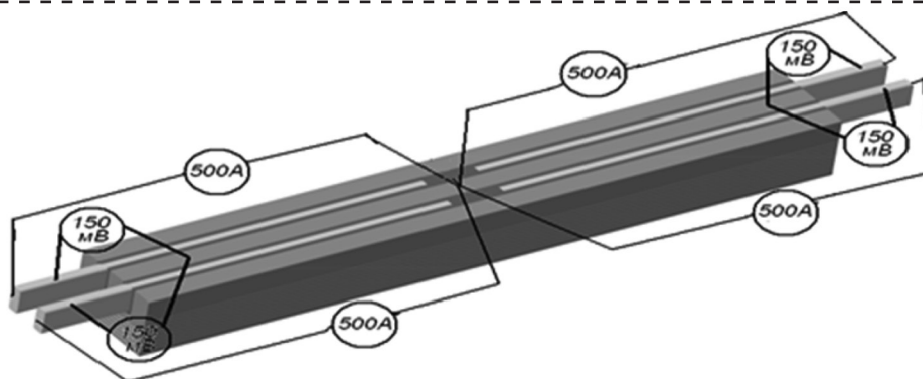


Рис. 3. Замер перепада напряжения в контакте «катодный блок—токоподвод»

ки изготавливаемой продукции самостоятельно производят монтаж токоподводов в катодные блоки методом чугунной заливки. Стоимость смонтированных катодных блоков с чугунной заливкой дороже, чем катодных блоков с углеродистой массой. При сравнении получаемых результатов от трудозатрат, стоимости углеродистой массы и снижения расхода электроэнергии можно отметить, что катодные блоки с чугунной заливкой имеют преимущества.

Материалы и методы

На АО «Казахстанский электролизный завод» (Казахстан) с декабря 2020 г. по сегодняшний день проводятся испытания катодных блоков с 50% графитизацией с чугунной заливкой на трех электролизерах и с 70% графитизацией с чугунной заливкой на трех электролизерах. По замерам

перепада напряжения в контакте «катодный блок—токоподвод», производимых в 4 точках (рис. 3), можно отметить, что на блоках с чугунной заливкой и 50% графита значение перепада напряжения составляет 15 мВ (табл. 1, № 1), 70% — 14 мВ (табл. 1, № 2) и с углеродистой массой — 48 мВ (табл. 1, № 3).

Максимальное значение перепада напряжения на катодных блоках с 50% графитизацией и чугунной заливкой составляет 31 мВ, 70% — 26 мВ, с углеродистой массой — 122 мВ.

На электролизерах с катодными блоками с чугунной заливкой замер перепада напряжения в подине составляет 290 мВ, тогда как на электролизерах с катодными блоками, смонтированными с помощью углеродистой массы, данные значения составляют 320 мВ (табл. 2).

1. Перепад напряжения в контакте «блок—токоподвод», мВ

№ 1						№ 2						№ 3					
№ катода	Точка замера				средн.	№ катода	Точка замера				средн.	№ катода	Точка замера				средн.
	1	2	3	4			1	2	3	4			1	2	3	4	
1	12	17	12	13	14	1	9	19	26	11	16	1	40	42	51	48	45
2	13	13	17	16	15	2	7	16	19	6	12	2	54	39	31	52	44
3	17	13	14	31	19	3	7	21	20	10	15	3	58	69	60	72	65
4	11	14	16	17	15	4	16	20	16	9	15	4	49	78	53	62	61
5	15	15	12	14	14	5	10	8	10	13	10	5	72	49	118	91	83
6	13	12	16	14	14	6	6	14	11	18	12	6	74	35	63	45	54

Окончание табл. 1

№ 1						№ 2						№ 3					
№ катода	Точка замера				средн.	№ катода	Точка замера				средн.	№ катода	Точка замера				средн.
	1	2	3	4			1	2	3	4			1	2	3	4	
7	10	12	13	15	13	7	9	16	21	21	17	7	25	32	47	52	39
8	12	14	13	17	14	8	26	22	13	8	17	8	25	38	29	36	32
9	15	27	21	12	19	9	18	11	11	13	13	9	23	31	39	44	34
10	14	10	13	12	12	10	21	18	10	13	16	10	41	45	53	51	48
11	9	12	9	12	11	11	14	10	11	9	11	11	33	45	50	78	52
12	19	18	14	13	16	12	16	16	21	26	20	12	63	105	98	84	88
13	13	15	19	14	15	13	17	16	11	14	15	13	41	83	37	31	48
14	14	19	15	13	15	14	15	15	14	10	14	14	40	122	48	30	60
15	11	13	19	15	15	15	13	12	16	16	14	15	41	51	25	32	37
16	12	14	14	11	13	16	15	18	18	10	15	16	79	80	26	29	54
17	12	13	16	14	14	17	15	16	15	16	16	17	50	78	32	33	48
18	14	12	17	16	15	18	14	11	18	16	15	18	42	42	62	86	58
19	12	27	14	27	20	19	12	12	10	9	11	19	25	32	47	50	39
20	16	14	19	12	15	20	17	16	10	12	14	20	35	32	49	44	40
21	11	14	15	18	15	21	10	9	11	10	10	21	46	45	44	38	43
22	13	13	13	11	13	22	10	14	20	19	16	22	21	21	20	28	23
23	14	20	15	12	15	23	8	11	8	10	9	23	33	79	31	37	45
24	15	14	13	15	14	24	13	17	9	12	13	24	21	25	23	21	23
25	10	10	8	11	10	25	8	12	11	11	11	25	55	23	34	29	35
26	11	15	30	13	17	26	12	9	19	13	13	26	37	48	39	36	40
27	18	10	18	13	15	27	10	14	11	12	12	27	28	28	92	72	55

2. Средние значения перепада напряжения в контакте «блок—токоподвод», мВ

Электролизеры	1	2	3	среднее
Катодные блоки с чугуновой заливкой	286	294	290	290
Катодные блоки с углеродистой массой	324	320	316	320

3. Среднее установочное напряжение на электролизерах, В

Электролизер	Время после ввода электролизера в эксплуатацию, сут										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
С катодными блоками с чугунной заливкой	8	4,08	4,03	4	3,99	3,99	3,99	3,98	3,98	3,97	3,97
С катодными блоками углеродистой массой	8	4,1	4,05	4	4	4	3,99	3,99	3,99	3,98	3,99

Одним из важных факторов для оценки влияния катодных блоков с чугуновой заливкой является установочное напряжение на электролизере. По истечении после-

пускового периода (через 90 дней после ввода в эксплуатацию) на электролизерах с катодными блоками с чугуновой заливкой установочное напряжение составляет 3,97 В,

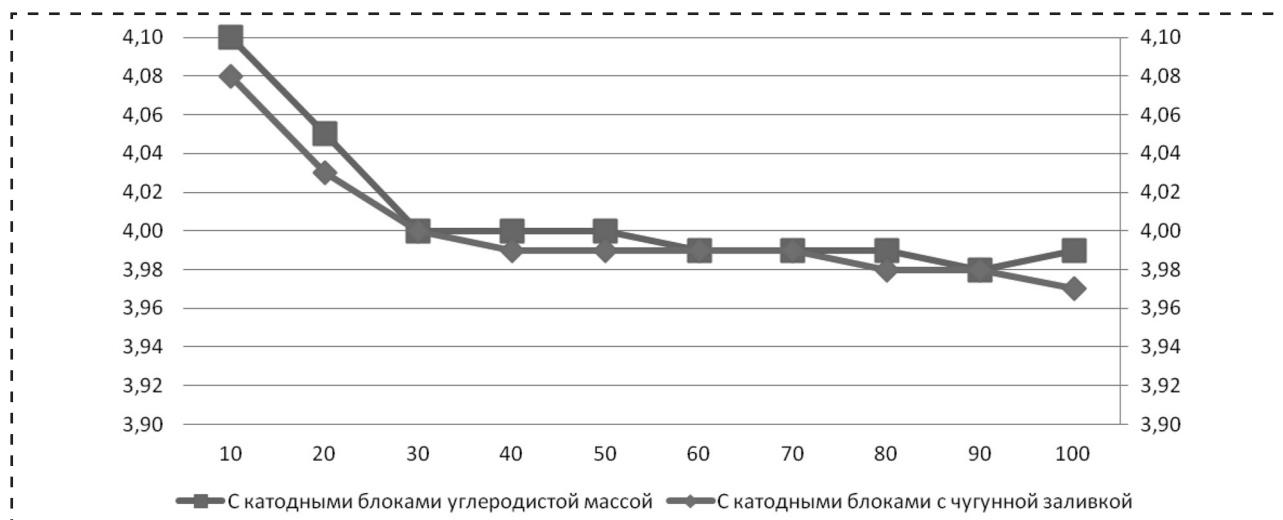


Рис. 4. Снижение установочного напряжения после ввода электролизеров в эксплуатацию

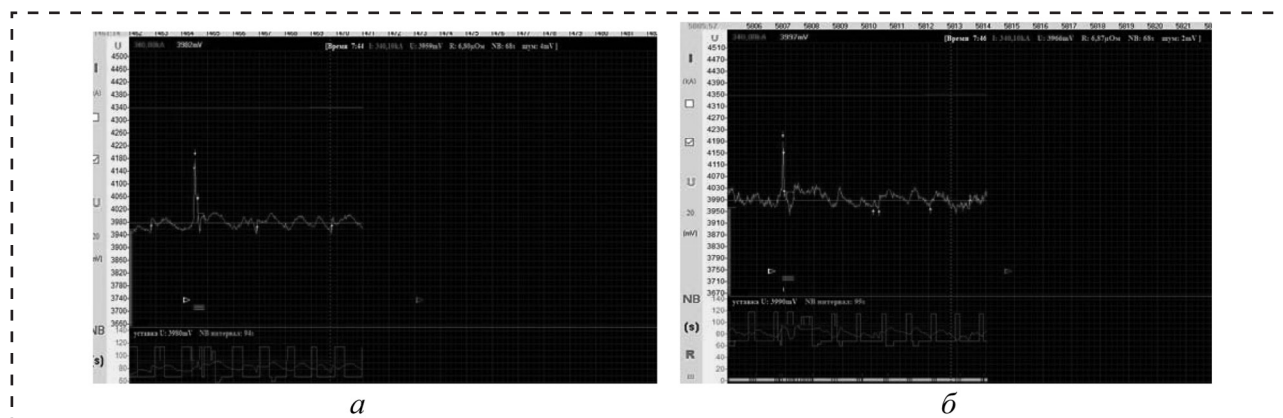


Рис. 5. Установочное напряжение на электролизерах с чугунной заливкой (а) составляет 3,97 В, на электролизерах с катодными блоками с углеродистой массой (б) 3,99 В

4. Установочное напряжение на электролизерах, В

Катодные блоки	1	2	3	среднее
С чугунной заливкой	3,97	3,96	3,97	3,97
С углеродистой массой	3,99	3,99	3,99	3,99

а на электролизерах с катодными блоками с углеродистой массой — 3,99 В (табл. 3).

Снижение установочного напряжения соответствует снижению расхода электроэнергии на 80 кВт·ч/т.

Как видно из рис. 5, установочное напряжение на электролизерах с катодными блоками с чугунной заливкой на 20 мВ ниже, чем на электролизерах с углеродистой массой.

На электролизерах с катодными блоками с чугунной заливкой производительность на 0,2% выше, чем на электролизерах с углеродистой массой.

Выводы

На основании результатов опытно-промышленных испытаний, проводимых на АО «Казахстанский электролизный завод», на электролизерах с катодными

блоками с чугуновой заливкой можно отметить, что при применении катодных блоков с чугуновой заливкой с 50%-й графитизацией и 70%-й графитизацией существенной разницы не наблюдается. Что касается катодных блоков с углеродистой массой, то отмечаются низкие перепады напряжения и снижение уставочного напряжения на 20 мВ. Соответственно снижение расхода электроэнергии составляет ~80 кВт·ч/т, что соответствует экономии электроэнергии на 21 200 МВт·ч в год или 350 тыс. \$ в год. Реализация данного проекта направлена на оптимизацию технологических параметров, что ведет к повышению производственных показателей, в том числе и к увеличению производительности электролизеров.

Список литературы

1. **Ножко С.И., Сухов О.Ю.** Практика увеличения производительности алюминиевых электролизеров второго поколения путем увеличения силы тока // Цветные металлы. 2013. № 2. С. 63—66.
2. **Юрков А.Л.** Огнеупорные и углеродные катодные материалы для алюминиевой промышленности // Красноярск: «Бона компани», 2005. 257 с.
3. **Толымбекова Л.Б., Жунусов А.К., Морсков Ю.А.** Способы увеличения производительности электролизера путем корректировки технологических параметров // Современные наукоемкие материалы. 2022. № 1. С. 91—95.
4. **Дигонский С.В.** Закономерности электрометаллургии алюминия // Технология металлов. 2007. № 7. С. 6—13.
5. **Jensen Erik A., Bjornstad Hans Petter, Hansen Jan D.** Pre-heating collector bars and cathode blocks prior to rodding with cast iron by passing a current through the collector bars // Light Metals. 2011. P. 1017—1022.
6. **Yungang B., Yu M., Jihong M.** Study on cathode structure optimization of aluminum reduction cell // Light Metals. 2014. P. 1333—1337.
7. **Bykov P.O., Kuandykov A.B., Zhunusov A.K., Tolymbekova L.B., Suyundikov M.M.** Complex processing of primary aluminum to remove impurities of non-ferrous metals. Metallurgija. 2023. V. 62. No 2. P. 293—295.
8. **Fakoya Femi Richard.** Characterisation of the Material Behaviour of Cathode Steel Collector Bar at High Temperatures and Low Stress Levels // Light Metals. 2014. P. 1227—1231.
9. **Орлова В.С.** Поиск резервов снижения затрат на материальные ресурсы // Молодой ученый. 2014. № 4.2. С. 141—143.
10. **Зум Э., Пффефер М.** Катодный узел для производства алюминия // Патент № 2019105133. 2020. Бюл. № 24.
11. **Багаев Б.М., Злобин В.С., Тихомиров В.Н., Евменов В.А., Новиков А.Н.** Оптимизация нагрева подины алюминиевого электролизера топочными газами // Цветные металлы. 1997. № 9. С. 66—68.

ВНИМАНИЕ! ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ!

При представлении статьи в редакцию необходимо соблюдать следующие условия для учета в системе РИНЦ:

- указывать достоверное место работы автора (точное название организации, совпадающее с названием, зарегистрированным на сайте <http://elibrary.ru>);
- библиографические ссылки давать **без ошибок** (название статьи, полное название журнала, год, том, номер издания, страницы).

При несовпадении представленных и учтенных в elibrary данных автора система на запросы НЕ отвечает, т.к. не находит этих данных на своем портале.

В этом случае редакция не принимает никаких претензий.

УДК 621.785.621.793

Технологии упрочнения плоских ножей ТВЧ-борированием

В.П. ЛЯЛЯКИН^{1*}, д-р техн. наук, проф., гл. спец., В.Ф. АУЛОВ¹, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., Ю.Н. РОЖКОВ¹, мл. науч. сотр., А.В. БУГАЕВ², канд. техн. наук, доцент

¹ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Москва, 109428, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева», Москва, 127550, Российская Федерация

*E-mail: valpal-1938@mail.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-6-31-36

Статья поступила в редакцию 26.10.2022

Принята после доработки 08.12.2022

Принята к публикации 08.02.2023

С помощью ТВЧ-нагрева образцов из стали 65Г под слоем шихты на основе плавленного боратного флюса П-066, содержащего карбид бора, получены износостойкие боридные покрытия. Исследована износостойкость полученных покрытий. Путем планирования эксперимента получен оптимальный состав шихты. Предложен технологический процесс упрочнения плоских ножей путем ТВЧ-борирования. Проведены производственные испытания упрочненных ножей.

Ключевые слова: ТВЧ-нагрев, бор, карбид бора, износостойкость, плоские ножи.

Введение

Для повышения физико-механических свойств деталей с целью увеличения их срока службы применяются методы химико-термической обработки. Одним из таких методов является борирование, который представляет собой насыщение деталей бором.

Процесс осуществляется воздействием на стальные поверхности температурой и веществами, химически реагирующими

с материалом детали [1]. При этом на поверхности детали образуются различные покрытия в виде карбидов, нитридов, карбонитридов, обладающие высокой твердостью и, как следствие, высокой износостойкостью.

При борировании на поверхности стальной детали удается получить протяженные слои с высокими физико-механическими свойствами. Однако большинство процессов борирования длительны, энергоемки

и трудно встраиваются в технологические процессы.

Интенсификация нанесения покрытия бором может осуществляться кратковременным высокоскоростным нагревом токами высокой частоты (ТВЧ-нагрев) до температуры 1050—1150 °С [2].

Продолжительность такого процесса может составлять до 110—120 с получением протяженных слоев металла с повышенной твердостью. Такой метод, учитывая его технические данные, может применяться для упрочнения поверхности плоских ножей, используемых для скашивания трав и измельчения соломы.

Для разработки технологии упрочнения скоростным борированием требуется исследовать структуры и свойства покрытия.

Целью работы является исследование состава, структуры и износостойкости покрытий, полученных скоростным борированием.

Объект исследования

В качестве объекта исследования были выбраны плоские ножи 125×25 мм, применяемые в косилке КРН-2.1, и ножи 168×60 мм, применяемые в соломоизмельчителе зернового комбайна. Ножи изготавливаются из стали 65Г по ГОСТ 14959—2016.

Технология изготовления ножей заключается в вырубке из полосы или листа стали заготовки требуемого размера, высверливании отверстия для крепления, фрезеровании фаски в заданный размер и термообработки. Как правило, для закалки изготовители используют ТВЧ с последующим отпуском. При такой технологии твердость режущей части составляет 40—50 HRC. Для повышения износостойкости предложено увеличить твердость рабочей части ножа с 40—50 до 60 HRC за счет ТВЧ-борирования.

Методика исследования

Исследование структуры боридных покрытий и износостойкости производилось на образцах, вырезанных из упрочненных ножей, изготовленных из стали 65Г.

Для оценки износостойкости покрытий на рабочих органах машин достаточными являются лабораторные испытания с воспроизведением условий изнашивания.

Наиболее приемлемой с этих позиций является установка ВИМ ЛТДП. Она позволяет обеспечить ускоренные сравнительные испытания образцов и получить достоверные данные за счет обеспечения стабильной нагрузки контакта за сравнительно короткое время (при практическом применении устройства затраты времени на испытание одного образца составили около 5 минут). Использование абразивных лент обеспечивает стабильность характеристик процесса изнашивания образца за счет неизменных структуры и величины зерна рабочего тела, постоянства нагрузки в зоне контакта и скорости взаимодействия образца и инструмента. Применение абразивных лент различной зернистости позволяет реализовать широкий спектр задач определения сравнительной износостойкости материалов.

Схема и внешний вид прибора представлены на рис. 1. Технические характеристики установки приведены в табл. 1.

Устройство работает следующим образом:

Испытуемый образец зажимается винтом в держателе 3 и подводится рычагом с противовесом 4 к абразивной ленте 2. Включают электродвигатель на выбранных оборотах. Ротор с осью 1 приводит во вращение абразивную ленту, которая контактирует с образцом, в результате чего происходит износ материала. Через промежуток времени, достаточный для получения нужного износа образца (обычно

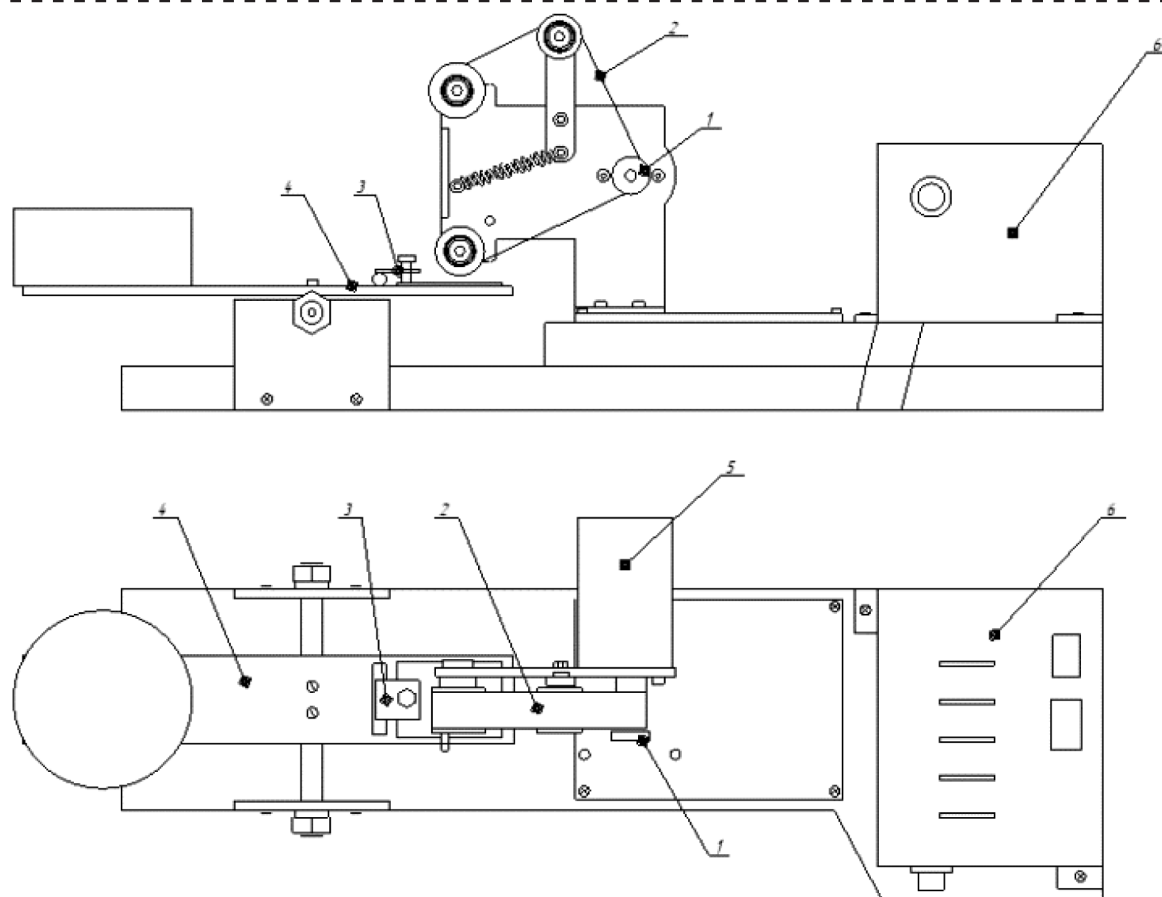


Рис. 1. Схема установки ВИМ ЛТДП для сравнительных испытаний образцов на абразивную износостойкость: 1 — ротор с осью; 2 — абразивная лента; 3 — держатель образца; 4 — рычаг; 5 — электродвигатель; 6 — блок управления

1. Технические характеристики установки для испытания на износ

Инструмент	Абразивная лента P60-P80
Сила прижатия, Н	17,417
Частота вращения круга, с ⁻¹	$2,293 \cdot 10^3$
Линейная скорость, м/с	1,8
Время испытания, мин	5

3—5 минут), выключают электродвигатель. Образец демонтируют и проводят измерение его веса на электронных весах. Износ образца определяют сравнением его текущего веса с весом до испытания.

Для получения боридных покрытий использовали специальную шихту, состоящую из карбида бора и флюса П-0,66.

Для определения оптимального состава шихты было проведено планирование эксперимента. В качестве факторов планирования были выбраны содержание флюса П-0,66 в борирующей смеси, время выдержки при оптимальной температуре борирувания (1100—1250 °С). В качестве целевой функции была выбрана толщина боридного покрытия. Шихта размешивается в клее и наносится на металлическую поверхность образца, который помещается в кольцевой индуктор установки СВЧ-40АВ.

Результаты и их обсуждение

Для определения оптимального содержания флюса в борирующей смеси и вре-

мени выдержки было выполнено планирование эксперимента. На рис. 2 представлена поверхность отклика функции толщины покрытия на поле факторов содержания флюса П-0,66 и времени выдержки образца при оптимальной температуре ТВЧ-нагрева.

Как следует из рис. 2, поверхность отклика функции h (толщина покрытия) зависит от содержания флюса и времени выдержки и имеет сложный седловидный профиль. Показано, что если увеличивать время выдержки, то можно получать толщину покрытия до 600 мкм. Вместе с тем, с точки зрения технологичности процесса скоростного ТВЧ-борирования, оптимальные параметры по толщине покрытия должны составлять 300–400 мкм, при этом количество флюса П-0,66 в составе борирующей смеси нужно принимать равным от 11 до 16% (мас.), а время выдержки от 70 до 125 с.

Для выяснения характеристик и структуры полученных слоев были изучены микрофотографии шлифов (рис. 3).

Из приведенной структуры видно, что она отличается от классических боридных иглообразных двухфазных слоев. На поверхности заготовок формируется более стойкая, предпочтительная в условиях тяжелого абразивного, знакопеременного и ударного износа пластичная боридная эвтектика. В покрытии наблюдается выраженный рост дендритов, микротвердость покрытия достигает 1100–1250 HV , толщина слоя — до 200 мкм. Исследование распределения микротвердости полученных подслоев по глубине показало наличие в них, как правило, двух зон — более твердого поверхностного слоя и менее твердого слоя, лежащего под ним.

Были выполнены сравнительные износные испытания образцов из стали 65Г, упрочненных ТВЧ-борированием. Для

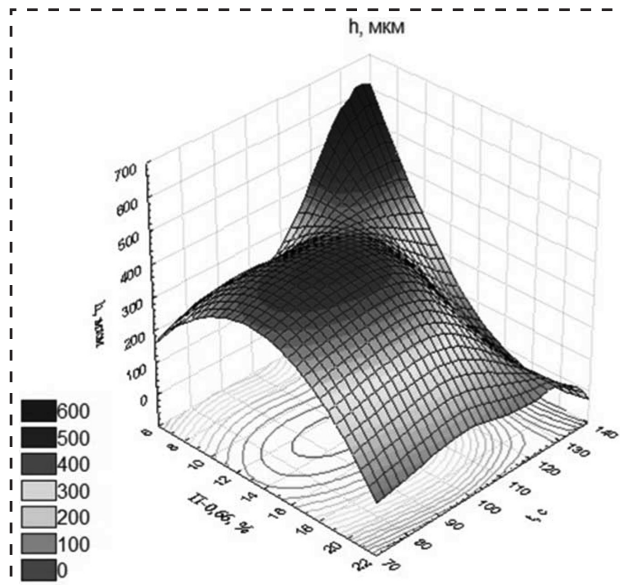


Рис. 2. Поверхность отклика целевой функции толщины покрытия на поле факторов содержания флюса П-0,66 и времени выдержки образца при оптимальной температуре ТВЧ-нагрева

сравнения были подготовлены образцы, закаленные в печи. Поверхностная твердость образцов и результаты износных испытаний приведены в табл. 2.

Проведенные испытания на износостойкость показали значительное увеличение относительной износостойкости образцов, упрочненных ТВЧ-борированием, по сравнению с закаленными образцами. Это можно объяснить наличием износо-

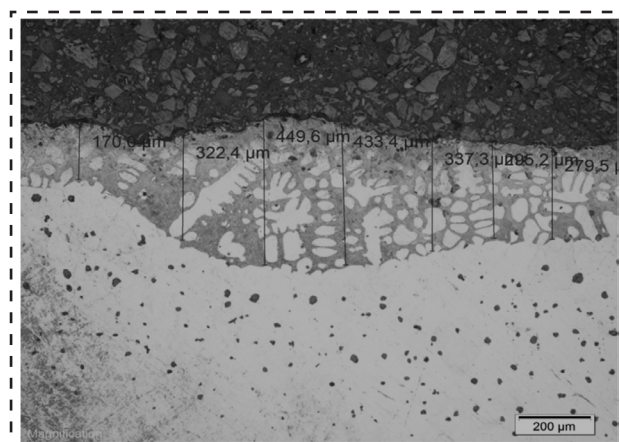


Рис. 3. Микроструктуры образца с борированием, $\times 100$ раз

2. Результаты испытания образцов на износостойкость

№ п/п	Технология упрочнения	Поверхностная твердость	Износ после испытаний	Относительная износостойкость
1	ЗАКАЛКА	52,5	0,0125	1
2	ТВЧ-БОРИРОВАНИЕ	62,0	0,0064	2,5

3. Результаты испытания ножей

Вид и номер ножа	Твердость рабочей зоны, HRC	Масса нового ножа, г	Масса после наработки 8,1 га, г	Потеря массы после наработки 8,1 га, г	Масса после наработки 33,1 га, г	Потеря массы после наработки 33,1 га, г
Короткий нож КРН-2.1						
Упр. № 4	52—56	224,0	223,3	0,7	223,0	1,0
Упр. № 25	55—60	221,5	220,6	0,9	219,6	1,9
Серийный № 5	61—63	210,5	209,2	1,3	208,5	2,0
Серийный № 6	59—62	211,5	210,4	1,1	209,7	1,8

стойких боридных слоев на образцах, упрочненных ТВЧ-борированием.

Были проведены производственные испытания упрочненных ножей во Владимирской МИС. Работа проводилась при скашивании естественных трав косилкой КРН-2.1, на которую устанавливались ножи, упрочненные ТВЧ-борированием, и ножи, полученные заводом-изготовителем, которые были упрочнены закалкой токами высокой частоты.

Перед испытанием ножи взвешивались на электронных весах, измерялась твердость в зоне износа. После наработки косилки на 8,1 га и до окончания испытаний при наработке 30,1 га проводилось взвешивание ножей. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Данные, полученные при испытании ножей в условиях реальной эксплуатации, подтверждают эффективность метода ТВЧ-борирования.

Выводы

1. Выполненные исследования позволили обосновать структуру покрытий, полученных ТВЧ-борированием, которая

состоит из боридных составляющих с высокой микротвердостью.

2. Предложена методика и установка для ускоренных испытаний покрытий на износостойкость с использованием абразивной ленты.

3. Приведены лабораторные испытания на износостойкость, которые показали повышение износостойкости образцов, полученных ТВЧ-борированием, в 2,5 раза по сравнению с закалкой ТВЧ. Результаты лабораторных исследований были подтверждены производственными испытаниями в условиях Владимирской МИС.

Список литературы

1. Шитов А.Н., Веденеев А.А. Влияние различных факторов на изнашивание рабочих органов почвообрабатывающих машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2002. № 7. С. 21—23.
2. Сидоров С.А. Технический уровень и ресурс рабочих органов сельхозмашин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1998. № 3. С. 29—33.
3. Ляхович Л.С. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник. М.: Металлургия, 1981. 424 с.
4. Антонцев Н.М., Гритчин В.В., Толкачев М.Н. Борирование с использованием ТВЧ-нагрева // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 121. С. 166—172.
5. Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Ишков А.В., Трохин А.Ю. Упрочнение ножей соломозмельчителя комбайнов ООО «КЗ «Ростсельмаш» нанесением покрытий на основе бора. Инновационные технологии и рено-

- вации в машиностроении. Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. 04—05 февраля 2019 г. Москва, Московский государственный областной университет, 2019. С. 100—105.
6. Ишков А.В., Кривочуров Н.Т., Мишустин Н.М., Иванайский В.В., Максимов А.А. Износостойкие боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники // Вестник АГАУ. 2010. Т. 71. № 9. С. 71—75.
 7. Иванайский В.В., Шанчуров С.М., Ишков А.В. и др. Тепловая модель индукционной наплавки. Алдамджаровские чтения: материалы Междунар. научн.-практ. конф. Костанай: Изд-во КСТУ им. акад. З. Алдамжар, 2011. С. 105—109.
 8. Мишустин Н.М., Иванайский В.В., Ишков А.В. Скоростное борирование сталей 65Г и 50ХГА. Современные проблемы машиностроения: Сб. докладов V-ой Междунар. научн.-тех. конф. Томск: Издательство ТПУ, 2010. С. 250—254.
 9. Ишков А.В., Мишустин Н.М., Иванайский В.В. Структура и свойства износостойких слоев, полученных на стали 65Г высокоскоростным борированием // Горизонты образования: электронный научный журнал. 2010. Вып. 12. Режим доступа: <http://www.edu.secna.ru/main/review/>
 10. Taisure M., Junjio, Toshifumi K., Shintaro M. et al. Some properties of boronized layers on steels with direct diode laser // Vacuum. 2008. 83. No 1. P. 185—189.
 11. Мишустин Н.М., Ишков А.В., Иванайский В.В., Кривочуров Н.Т. Образование боридных покрытий на структурированных сталях при ТВЧ-нагреве. Матер. XXII Междунар. инновац.-ориент. конф. молодых ученых и студентов (26—29 октября) 2010 г. М.: Микмус, 2010. 30 с.
 12. Аулов В.Ф., Ишков А.В., Иванайский В.В., Кривочуров Н.Т., Лялякин В.П. Влияние легирования бором на структуру сварочных швов для стали 65Г // Сварочное производство. 2018. № 5. С. 38—42.

РУКОВОДСТВО АВТОРУ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ*

Автор (или коллектив авторов) осознает, что несет первоначальную ответственность за новизну и достоверность результатов научного исследования, что предполагает соблюдение следующих принципов:

- Авторы статьи должны предоставлять достоверные результаты проведенных исследований. Заведомо ошибочные или сфальсифицированные утверждения неприемлемы.
- Авторы должны гарантировать, что результаты исследования, изложенные в предоставленной рукописи, полностью оригинальны. Заимствованные фрагменты или утверждения должны быть оформлены с обязательным указанием автора и первоисточника. Чрезмерные заимствования, а также плагиат в любых формах, включая неоформленные цитаты, перефразирование или присвоение прав на результаты чужих исследований, неэтичны и неприемлемы.
- Необходимо признавать вклад всех лиц, так или иначе повлиявших на ход исследования, в частности, в статье должны быть представлены ссылки на работы, которые имели значение при проведении исследования.
- Авторы не должны предоставлять в журнал рукопись, которая была отправлена в другой журнал и находится на рассмотрении, а также статью, уже опубликованную в другом журнале.
- Соавторами статьи должны быть указаны все лица, внесшие существенный вклад в проведение исследования. Среди соавторов недопустимо указывать лиц, не участвовавших в исследовании.
- Если автор обнаружит существенные ошибки или неточности в статье на этапе ее рассмотрения или после ее опубликования, он должен как можно скорее уведомить об этом редакцию журнала.

* Из Кодекса этики научных публикаций

Влияние масштабного фактора на модуль упругости, определяемый инструментальным индентированием

В.М. МАТЮНИН*, д-р техн. наук, проф., А.Ю. МАРЧЕНКОВ, канд. техн. наук, доц., П.В. ВОЛКОВ, канд. техн. наук, доц., М.А. КАРИМБЕКОВ, д-р техн. наук, доц., А.А. ПАНЬКИНА, студент

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация

*E-mail: MatiuninVM@mpei.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-6-37-45

Статья поступила в редакцию 21.12.2022

Принята после доработки 25.01.2023

Принята к публикации 08.02.2023

Исследовано влияние масштабного фактора на модуль упругости, определяемый инструментальным индентированием в упругой и упругопластической областях диаграмм вдавливания. Установлено значительное повышение модуля упругости при переходе на микро- и наноуровни индентирования. Изложены причины влияния масштабного фактора на модуль упругости, определяемый инструментальным индентированием.

Ключевые слова: модуль упругости, инструментальное индентирование, масштабный фактор.

Введение

В существующем зарубежном ГОСТ ИСО 14577—1:2002, адаптированном в РФ как ГОСТ Р 8.748—2011, изложена методика определения модуля упругости при индентировании E_{IT} по диаграмме вдавливания пирамиды в координатах «нагрузка F —глубина индентирования h ». Аналогичная методика определения E_{IT} при вдавливании шара изложена в российском ГОСТ Р 56232—2014. В обеих методиках используется одна и та же формула для расчета E_{IT}

$$E_{IT} = \frac{E_r E_i (1 - \nu_s^2)}{E_i - E_r (1 - \nu_i^2)}, \quad (1)$$

где ν_s и ν_i — коэффициенты Пуассона испытуемого материала и материала индентора соответственно; E_i — модуль упругости материала индентора; E_r — приведенный модуль упругости.

В формуле (1) основным параметром является приведенный модуль упругости E_r , обратная величина которого равна

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i},$$

где E_s — модуль упругости испытуемого материала.

Следует отметить, что, согласно указанным ГОСТ, E_r рассчитывается в упругопластической области диаграммы вдавливания по формуле

$$E_r = \frac{S}{2} \sqrt{\frac{\pi}{A_p}}, \quad (2)$$

где S — контактная жесткость (тангенс угла наклона касательной в верхней точке линии разгрузки диаграммы вдавливания (рис. 1); A_p — площадь поперечного сечения контактной поверхности между индентором и испытуемым образцом.

Расчеты A_p при вдавливании пирамиды и шара выполняются по формулам

$A_p = 24,5 h_c^2$ — для пирамиды Виккерса;

$A_p = 23,96 h_c^2$ — для пирамиды Берковича;

$A_p = \pi a_c^2$ — для шара,

где h_c — рассчитанная глубина контакта индентора; a_c — радиус поперечного сечения шара на расстоянии h_c от вершины.

Из геометрических соотношений следует, что

$$a_c = \sqrt{(D - h_c)h_c},$$

где D — диаметр шара.

Для расчета h_c необходимо провести касательную из верхней точки линии разгрузки диаграммы вдавливания до точки пересечения с осью h , по которой определяется еще один геометрический параметр h_r (см. рис. 1). Располагая значениями $h_{\max}$ при максимальной нагрузке $F_{\max}$ и h_r , можно рассчитать h_c [1]:

$$h_c = h_{\max} - 0,75(h_{\max} - h_r).$$

Таким образом, определив E_r по формуле (2), можно рассчитать E_{IT} по формуле (1), если известны ν_s , ν_i , E_i . Обычно значения ν_i и E_i известны, а значения ν_s для

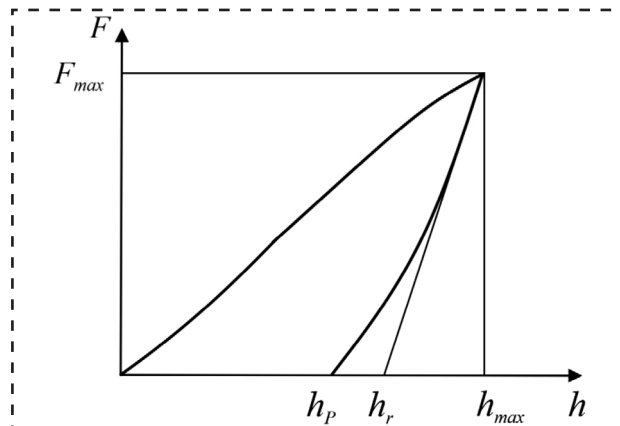


Рис. 1. Схема диаграммы вдавливания индентора «нагрузка F —глубина индентирования h »:

максимальная нагрузка вдавливания $F_{\max}$; $h_{\max}$ — глубина индентирования при нагрузке $F_{\max}$; h_p — остаточная глубина индентирования; h_r — точка пересечения касательной из верхней точки линии разгрузки диаграммы с осью h

многих металлических конструкционных материалов различаются мало. Так, например, для сталей различных классов и марок $\nu_s = 0,28—0,3$.

Следует заметить, что в рассматриваемых ГОСТ Р 8.748—2011 и ГОСТ Р 56232—2014 не сказано, насколько могут различаться значения E_{IT} и модуля упругости E_M , определенного растяжением образца с использованием экстензометра. И только лишь в ГОСТ Р 8.748—2011 в одном из примечаний отмечено, что для некоторых материалов имеется корреляция между E_{IT} и табличным модулем упругости E_M . Кроме того, ничего не сказано о влиянии масштабного фактора на определяемые значения E_r и E_{IT} , если используются различные нагрузки вдавливания и различные диаметры шаров. Известно, что эти параметры значительно влияют на определяемые значения твердости в разных масштабных диапазонах индентирования [2—6].

В связи с вышеизложенным, в настоящей работе была поставлена цель — исследовать влияние масштабного факто-

ра на модуль упругости, определенный инструментальным индентированием, и установить его различие или сходство с модулем упругости, определенным растяжением образцов.

Материалы, приборы и методики испытаний

Для экспериментов были выбраны образцовые стальные плитки с практически одинаковой твердостью по Виккерсу и Бринеллю: 211HV10/10 и 210HB2,5/187,5/10. Плитки имели гомогенную бейнитную мелкодисперсную структуру. Испытания индентированием проводились на универсальной испытательной машине *Instron* 5982, оборудованной для инструментального индентирования с регистрацией диаграмм вдавливания, автоматизированном приборе МЭИ-ТА и приборе *Nanoscan-3D*. Использование указанных машины и приборов позволяло выполнять инструментальное индентирование в макро-, мезо-, микро- и нанодиапазонах. При глубинах индентирования менее 6 мкм выполнялась процедура проверки функции площади наконечника (индентора) по третьему методу, рекомендованному ГОСТ 8.904—2015 (ИСО 14577—2:2015). Согласно этому методу использовалась эталонная мера твердости с известными значениями твердости H_{IT} . Если повторяемость показаний твердомера и погрешность определения H_{IT} соответствовали требованиям стандарта, то можно было выполнять индентирование в заданном диапазоне.

Разграничение диапазонов индентирования соответствовало шкале ГОСТ Р 8.748—2011, а также шкале авторов настоящей статьи [6], в которую еще был включен мезодиапазон индентирования. При вдавливании пирамиды нагрузки изменялись в диапазоне от 5 мН (0,51 Г)

и до 98,1 Н (10 кг). При инструментальном индентировании сферическими инденторами в упругопластической области их диаметры D составляли от 0,27 до 10 мм. При этом для каждого сферического индентора отношение F/D^2 равнялось 294 Н/мм² (30 кг/мм²). Все сферические инденторы были изготовлены из стали ШХ15. Для стального индентора принимали $E_i = 210915$ Н/мм² (21500 кг/мм²), $\nu_i = 0,3$. Для каждого индентора и для каждой заданной нагрузки регистрировалось не менее пяти диаграмм вдавливания.

По диаграммам вдавливания кроме модуля упругости при индентировании E_{IT} были определены значения твердости при индентировании пирамиды H_{IT} (ГОСТ Р 8.748—2011) и твердости индентирования по Бринеллю HB_{IT} (ГОСТ Р 56232—2014) при вдавливании сферических инденторов с различным D .

Согласно этим ГОСТ, значения твердости H_{IT} и HB_{IT} рассчитывалась по следующим формулам:

для пирамиды Виккерса

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{24,5h_c^2};$$

для пирамиды Берковича

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{23,96h_c^2};$$

для шара

$$HB_{IT} = F_{\max}/(\pi Dh_c).$$

Результаты испытаний и их анализ

На рис. 2 представлены примеры зарегистрированных диаграмм вдавливания пирамиды в стальную образцовую плитку 211HV10/10 под нагрузками 50 мН и 500 мН. Диаграммы получены при вдавливании пирамиды Берковича на приборе *Nanoscan-3D* с учетом упругой податливо-

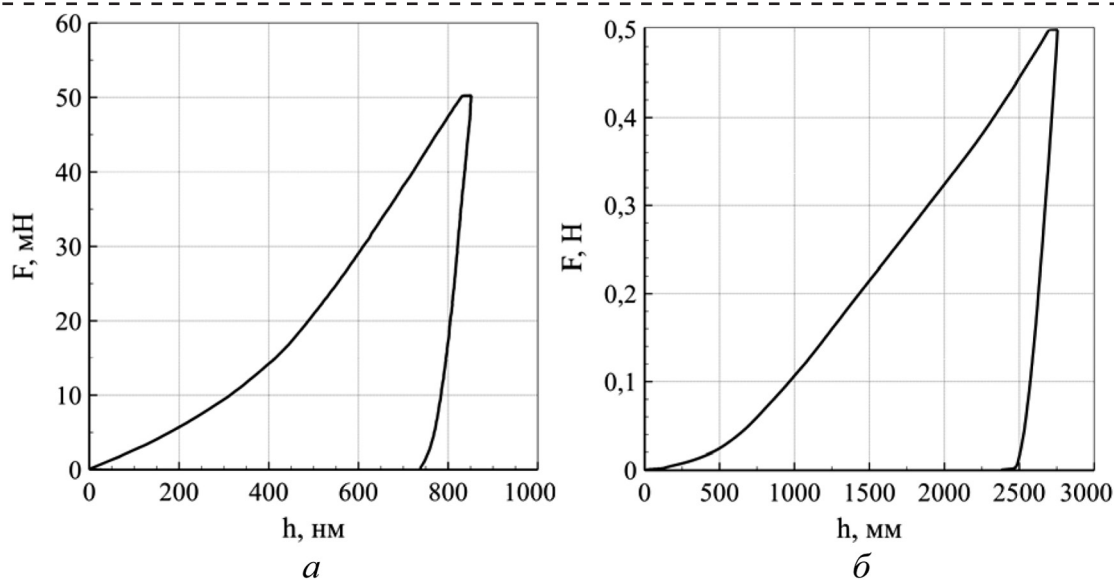


Рис. 2. Диаграммы вдавливания пирамиды, полученные в микродиапазоне при $F_{\max} = 50$ мН (а) и при $F_{\max} = 500$ мН (б). Материал — стальная образцовая плитка 211HV10/10

сти прибора. При максимальной нагрузке 50 мН индентирование выполнялось в переходной зоне от микро- к нанодиапазону.

При максимальной нагрузке 5 мН перемещение индентора составляло 150 нм, а индентирование выполнялось в нанодиапазоне. Однако при такой нагрузке для испытуемой образцовой плитки на линиях нагрузки и разгрузки диаграммы вдавливания появлялась волнистость, что не позволяло достоверно определить E_{IT} и H_{IT} .

При вдавливании сферических инденторов была возможность зарегистрировать диаграммы вдавливания только в мезо- и макродиапазонах на приборе МЭИ-ТА и машине Instron 5982 при сравнительно больших нагрузках. На рис. 3 представлены примеры таких диаграмм вдавливания сферических инденторов диаметром 1 мм и 10 мм для стальной образцовой плитки 210HB2,5/187,5/10. Для каждого индентора максимальная нагрузка вдавливания выбиралась из соотношения $F/D^2 = 294$ Н/мм² (30 кг/мм²). Обе диаграммы получены при индентировании в макродиапазоне на машине Instron 5982

и представлены в первоначальном виде без учета упругой податливости.

В табл. 1 представлены результаты определения E_r , E_{IT} , H_{IT} по диаграммам вдавливания пирамиды, а в табл. 2 — результаты определения E_r , E_{IT} , E_M , HB_{IT} по диаграммам вдавливания сферических инденторов. Модуль упругости E_M , представленный в табл. 2, был определен по формуле (3) (см. далее в статье). Как уже отмечалось выше, нагрузка вдавливания для каждого сферического индентора выбиралась из условия $F/D^2 = \text{const}$. При таком условии выдерживаются примерно одинаковые значения средней контактной деформации для каждого индентора, а это позволяет обоснованно выявить влияние масштабного фактора на определяемые значения E_{IT} и HB_{IT} [6].

Анализ полученных результатов, представленных в табл. 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы. Прежде всего, следует отметить значительное различие значений E_r , E_{IT} и H_{IT} , определенных вдавливанием пирамиды под разными нагрузками. С увеличением нагрузки вдавлива-

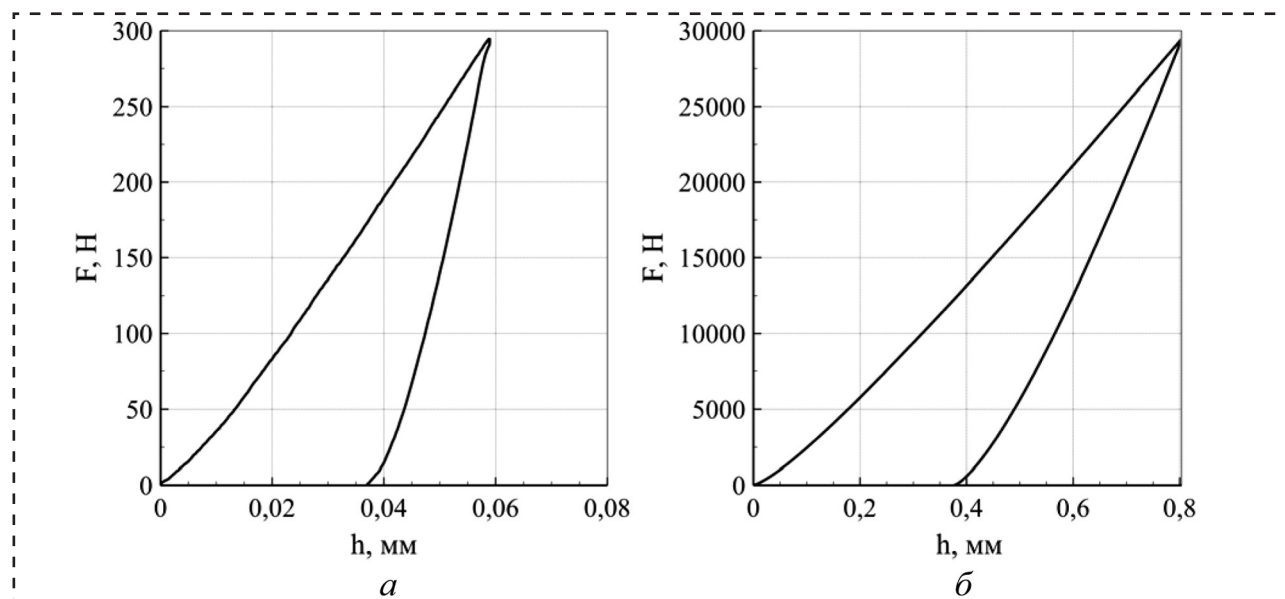


Рис. 3. Диаграммы вдавливания сферических инденторов диаметром D : 1 мм (а), 10 мм (б). Материал — стальная образцовая плитка 210HB2,5/187,5/10

1. Результаты определения E_r , E_{IT} и H_{IT} при вдавливании пирамиды под разными нагрузками F_{max} . Материал — стальная образцовая плитка с твердостью 211HV10/10

F		E_r , Н/мм ²	E_{IT} , Н/мм ²	H_{IT} , Н/мм ²
Н	кг			
0,05	0,0051	196 328	215 604	3610
0,5	0,051	182 182	197 132	3414
2,0	0,204	162 728	172 607	2708
10,0	1,02	156 273	164 671	2394
100	10,2	137 987	142 274	2217

2. Результаты определения E_r , E_{IT} , E_M и HB_{IT} по диаграммам вдавливания сферических инденторов с разным D . Материал — стальная образцовая плитка с твердостью 210HB2,5/187,5/10

D , мм	F		E_r , Н/мм ²	E_{IT} , Н/мм ²	E_M , Н/мм ²	HB_{IT} , Н/мм ²
	Н	кг				
0,27	21,45	2,187	137 889	309 496	328 125	3051
1,0	294	30	122 968	238 206	226 032	2345
2,5	1 839	187,5	108 234	184 683	212 073	2246
5,0	7 351	750	91 969	138 694	197 544	2158
10	29 430	3000	89 860	133 495	189 068	2119

ния все эти характеристики уменьшаются. Такие же различия E_r , E_{IT} и HB_{IT} наблюдаются и при вдавливании сферических инденторов с разным D . С увеличением D при $F/D^2 = \text{const}$ эти характеристики стали также уменьшаются. Если сравнивать зна-

чения E_{IT} со справочным модулем упругости стали E_s , определенным растяжением образца с использованием экстензометра, то в макро- и мезодиапазонах индентирования E_{IT} получается заниженным. Однако при переходе в микродиапазон инденти-

рования значения E_{IT} увеличиваются и постепенно приближаются к табличному значению E_s .

Что касается снижения значений твердости при увеличении нагрузки вдавливания и диаметра индентора D (при $F/D^2 = \text{const}$), то основная причина этого явления заключается во влиянии масштабного фактора, о чем уже ранее тоже сообщалось [6]. Исходя из этого, можно предположить, что и значения E_r и E_{IT} также снижаются под влиянием масштабного фактора. Однако по мнению авторов настоящей статьи, снижение E_r и E_{IT} происходит не только под влиянием масштабного фактора. Еще одна причина заключается во влиянии пластической деформации на процесс разгрузки индентора, поскольку эти характеристики определяются в области упругопластического индентирования. При выводе формулы (2) было принято допущение, состоящее в том, что начальная стадия процесса разгрузки пластического отпечатка является упругой и определяется законом Гука [7, 8]. Вместе с тем наиболее обоснованно можно определить модуль упругости материала E_s по начальному упругому участку диаграммы вдавливания шара, который описывается известным уравнением Г. Герца [9].

Для экспериментального подтверждения этого вывода определение E_s было выполнено по упругому участку диаграммы вдавливания шара. В этом случае формулу для расчета E_s можно получить из того же уравнения Г. Герца

$$E_s = \frac{1 - \nu_s^2}{\frac{4R^{0,5}\alpha_0^{3/2}}{3F} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}},$$

где α_0 — упругое сближение.

Для стальной плитки с твердостью 210HB2,5/187,5/10 оказалось возможным получить достаточно четкие и продолжи-

тельные начальные упругие участки диаграмм вдавливания только для инденторов с $R > 10$ мм. Подтверждением упругого индентирования являлось совпадение линий нагружения и разгрузки и возвращение линии разгрузки диаграммы вдавливания в начало координат после полного снятия нагрузки. В связи с этим были использованы инденторы диаметром $D = 10, 15$ и 30 мм. Различие в D давало возможность дополнительно выявить и влияние масштабного фактора на определяемые значения E_r и E_{IT} . На рис. 4 показан упругий участок диаграммы вдавливания сферического индентора диаметром 15 мм для образцовой стальной плитки с твердостью 210HB2,5/187,5/10. Эта диаграмма зарегистрирована на машине *Instron 5982* в первоначальном виде без учета упругой податливости. Видно, что практически совпадают линии нагрузки и разгрузки диаграммы, а линия разгрузки возвращается в начало координат. В расчетах упругая податливость машины оценивалась по методике, предложенной авторами настоящей статьи [10]. Зная формулу для учета упругой податливости, можно было рассчитать

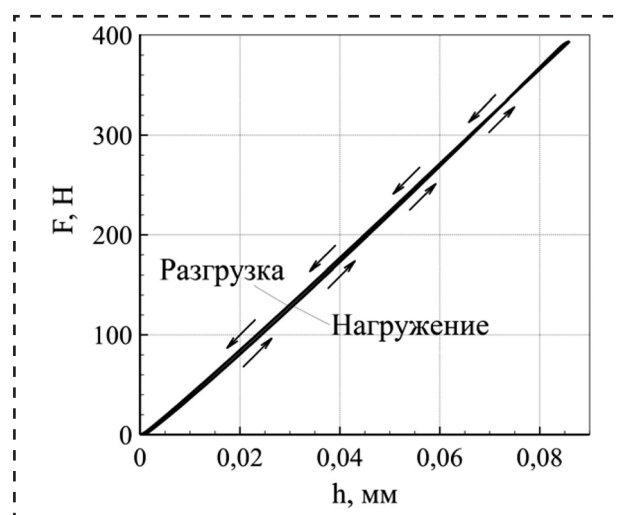


Рис. 4. Упругий участок диаграммы вдавливания сферического индентора диаметром $D = 15$ мм. Материал — стальная образцовая плитка с твердостью 210HB2,5/187,5/10

упругое сближение α_0 для любой заданной нагрузки на диаграмме вдавливания.

В табл. 3 представлены значения E_s , определенные по начальным упругим участкам диаграмм вдавливания инденторов разного диаметра по методике, предложенной авторами статьи [11].

Известна и другая методика определения модуля упругости E_M в упругопластической области индентирования [12, 13]. Эта методика также основана на зависимости Г. Герца, но с поправкой на влияние пластической деформации. Для расчета E_M достаточно знать $h_{\max}$ и остаточную глубину h_p (см. рис. 1) после полного снятия нагрузки. А формула для расчета E_M имеет следующий вид

$$E_M = \frac{1 - \nu_s^2}{\frac{4(h_{\max} - h_p)\sqrt{R(h_{\max} + h_p)}}{3F} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}}. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет определить E_M и при малых D , что дает возможность установить влияние масштабного фактора в более широком диапазоне D . В табл. 2 приведены значения E_M , рассчитанные по формуле (3), для всех использованных в экспериментах D при $F/D^2 = \text{const}$. Как следует из табл. 2, с уменьшением D также наблюдается повышение определяемых значений E_M за счет влияния масштабного фактора.

О влиянии масштабного фактора на определяемые характеристики твердости материалов известно давно. Например,

в работах [2—6] не только исследовано влияние масштабного фактора на характеристики твердости, но и изложены причины такого влияния. Среди основных причин названы металлургические, технологические, механические, физические, инструментальные. Металлургические причины состоят в степени неоднородности микроструктуры, размеров зерен, структурных составляющих испытуемого материала. К технологическим причинам следует отнести чистоту поверхности испытуемого материала и наличие наклепа, полученного от механической обработки. Механические причины заключаются в характере напряженно-деформированного состояния материала под отпечатком, увеличении скорости деформации при постоянной скорости деформирования для малых отпечатков. Физические причины состоят в повышении энергии поверхностного слоя при уменьшении размеров отпечатков, изменении механизма пластической деформации, влиянии границ и стыков зерен, а также в возможном отсутствии дислокаций при соизмеримости размеров отпечатков с междислокационными расстояниями. Инструментальные причины зависят от отклонений формы и радиуса сферического индентора, а также скругления вершины пирамиды от требуемых геометрических параметров, вибраций индентора, точности измерений нагрузки и геометрических параметров отпечатка (особенно на микро- и наноуровнях индентирования). Некоторые из перечис-

3. Значения E_s , определенные по начальным упругим участкам диаграмм вдавливания сферических инденторов разного диаметра D . Материал — стальная образцовая плитка с твердостью 210HB2,5/187,5/10

D , мм	R , мм	F		$\alpha_y = \alpha_0$, мм	E_s , Н/мм ²
		Н	кг		
30	15	392,4	40	0,0082	166 612
15	7,5	98,1	10	0,004	178 405
10	5	49,05	5	0,00275	204 519

ленных причин можно отнести и к модулю упругости при индентировании. По нашему мнению, основным масштабным параметром, влияющим на модуль упругости при индентировании, является величина деформируемого объема материала под отпечатком, которая многократно уменьшается при переходе в микро- и особенно в нанодиапазоны индентирования. В этих диапазонах могут изменяться напряженно-деформированное состояние, температурно-скоростные характеристики и другие условия локального нагружения материала.

Как отмечалось выше, уже были предприняты попытки установить корреляционные связи E_s с E_{IT} и другими характеристиками инструментального индентирования. Причем поиск таких связей выполнялся на микроуровне индентирования, при котором, как было установлено нами, значения E_{IT} увеличиваются под влиянием масштабного фактора и становятся соизмеримыми со значениями E_s . Так в работе [14] была представлена графическая связь между E_{IT} и E_s , однако коэффициент корреляции не приведен, а судя по разбросу экспериментальных точек, этот коэффициент невелик, и воспользоваться этой связью можно только для приближенной оценки E_s . А в работе [15] представлена графическая связь отношения работы упругой деформации к общей работе при инструментальном индентировании с отношением твердости $HV0,1$ к E_s для различных материалов. Здесь также наблюдается большой разброс экспериментальных точек и, как отмечают авторы этой работы, корреляция сопоставляемых отношений невелика.

Выводы

При определении модуля упругости при индентировании E_{IT} в упругопластической

области индентирования на его значения влияют масштабный фактор и наличие пластической деформации. Масштабный фактор проявляется в увеличении E_{IT} при уменьшении F и D , а влияние пластической деформации приводит к снижению E_{IT} . Однако при упругопластическом индентировании в микродиапазоне, несмотря на наличие пластической деформации, влияние масштабного фактора, повышающее E_{IT} , превосходит влияние пластической деформации, понижающее E_{IT} . Поэтому значения E_{IT} , определенные в микродиапазоне, приближаются к справочным значениям E_s . Если модуль упругости E_s определять в упругой области инструментального индентирования сферическим индентором, то в этом случае на E_s влияет только масштабный фактор, также проявляющийся в снижении E_s при увеличении D .

Аналогичное влияние масштабный фактор оказывает и на значения твердости, определяемые инструментальным индентированием в разных масштабных диапазонах. Известно, что влияние масштабного фактора на механические характеристики материалов, определяемые индентированием, обусловлено различными причинами, включая металлургические, структурные, технологические, физические, механические, геометрические, инструментальные. Некоторые из этих причин можно отнести и к объяснению влияния масштабного фактора на модуль упругости, определяемый инструментальным индентированием. Вместе с тем, в каждом диапазоне инструментального индентирования первостепенные причины влияния масштабного фактора могут различаться. Однако во всех диапазонах основным масштабным параметром, от которого зависят причины влияния масштабного фактора, является деформированный объем мате-

риала под отпечатком. Этот объем многократно уменьшается при переходе от макро- к микро- и особенно к наноиндентированию, что приводит к повышению локальности деформирования материала, энергии поверхностного слоя, изменению напряженно-деформированного состояния, скорости деформации и других условий нагружения материала.

Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00590, <https://rscf.ru/project/22-19-00590>.

Список литературы

1. Oliver W.G., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // Materials Research. 2004. V. 19. No 1. P. 3—20.
2. Atkinson M.J. Phenomenology of the size effect in hardness tests with a blunt pyramidal indenter // Journal of Materials Science. 1998. V. 33. P. 2937—2947.
3. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230 с.
4. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием. М.: МГУ, 2004. 98 с.
5. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. 312 с.
6. Матюнин В.М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 288 с.
7. Булычев С.И., Алехин В.П., Шоршоров М.Х., Терновский А.П., Шнырев Г.Д. Определение модуля Юнга по диаграммам вдавливания индентора // Заводская лаборатория. 1975. Т. 4. № 11. С. 1137—1140.
8. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытания материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
9. Hertz H. Uber die Berurung fester elastischer Korper // Journal für die reine angewandte Mathematik. 1881. Bd. 92. P. 156—171.
10. Матюнин В.М., Марченков А.Ю., Абусаиф Н., Стасенко Н.А. Оценка упругой податливости твердомера при кинетическом индентировании материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. № 4. С. 57—63.
11. Matyunin V.M., Marchenkov A.Yu., Abusaif N., Goryachkina M.V., Rodyakina R.V., Karimbekov M.A., Zhgut D.A. Evaluation of Young's modulus of construction materials by instrumented indentation using a ball indenter // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Том 87. № 8. С. 64—68.
12. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 244 с.
13. Матлин М.М., Мозгунова А.И., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А. Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 2018. 246 с.
14. Behncke H.-H. Bestimmung der Universalhärte und anderer Kennwerte an dünnen Schichten, insbesondere Hartstoffschichten // HTM Journal of Heat Treatment and Materials. 1993. V. 48. No 5. P. 304—311.
15. Heermant C., Dengel D. Klassische Werkstoffkennwerte abschätzen // Materials Testing. 1996. V. 38. No 9. P. 374—378.

ООО «Наука и технологии»

Учредитель журнала ООО «Наука и технологии».

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по печати.

Свидетельство о регистрации № 017187 от 16 февраля 1998 г.

Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в ООО «Сид».

Сдано в набор 14.03.23. Подписано в печать 10.05.23.

Формат 60×88 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 5,86. Уч.-изд. л. ?,?. Тираж 55 экз. «Свободная цена».

Отпечатано в ООО «Сид».

Журнал «Прокатное производство»

Уважаемые коллеги! Авторы и читатели! Металлурги, прокатчики и все специалисты, работающие в прокатном производстве страны!

От имени редколлегии поздравляю с выходом нового журнала «Прокатное производство» (приложение к журналу «Технология металлов»). Теперь у прокатчиков вновь есть свой журнал, в котором можно опубликовать свои исследования, ознакомиться с новыми достижениями в отрасли, направлениями научных исследований институтов, результатами работы и внедрения новых технологий на металлургических предприятиях.

С января 1998 года по декабрь 2019 года в России выходил журнал «Производство проката», занимавший заметное место среди металлургических научно-технических журналов. За 21 год работы было выпущено более 250 номеров журнала, более 2000 статей. Хочу выразить благодарность и признательность всем, кто создал этот журнал: издательству «Наука и технологии», редакционной коллегии, авторам и, конечно, читателям и подписчикам. Большинство статей до сих не теряют своей актуальности и востребованности у читателей.

После 3-летнего перерыва журнал выходит под новым названием «Прокатное производство». Выпуску первого номера предшествовала кропотливая работа издательства, редколлегии журнала «Технология металлов», связанная с государственной регистрацией и организацией издательской и редакционной работы, привлечением авторов. В первом полугодии 2023 года журнал выходит на 24 страницах один раз в квартал. Далее предполагается довести журнал до ежемесячной периодичности с востребованным объемом. Это, уважаемые авторы, будет зависеть в первую очередь от вас и членов редколлегии. Как и прежде, в журнале будет представлена самая широкая тематика в области прокатки и других процессов обработки металлов давлением. Это и теоретические вопросы обработки металлов давлением, и разработка новых технологических решений в производстве всех видов деформированной металлической продукции, в первую очередь массового производства, таких как горячекатаный и холоднокатаный лист, сортовой прокат, трубы сварные и бесшовные. Также в приоритете сохранятся вопросы формирования свойств проката как в производственном потоке, так и на специальных агрегатах, включая нанесение покрытий, отделку и упаковку продукции. Считаем, что заметную часть могут составить работы по конструированию новых деформационных процессов и механического оборудования. Важная часть остается за вопросами экономики и организации производственных процессов и стратегии их развития. Приветствуется математическое моделирование различных направлений от простых статистических подходов до обучающихся нейросетевых программ, от аналитических решений линейных уравнений до 3D-моделирования.

Редколлегия надеется на активную позицию всех авторов: инженерный и руководящий состав современных металлургических и машиностроительных предприятий, преподавательский и аспирантский корпус вузов соответствующих специальностей, научных сотрудников. Желаем всем творческих успехов в области исследования и совершенствования прокатного производства!

*Главный редактор журнала «Прокатное производство»,
приложения к журналу «Технология металлов»,
доктор технических наук Юсупов В.С.*

ПАМЯТКА АВТОРУ

ООО «Наука и технологии» принимает к рассмотрению оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, отвечающие профилю и тематике журнала для публикации.

1. Статью в электронном виде следует направить на электронную почту издательства **admin@nait.ru** с указанием названия журнала в двух форматах: DOC и PDF. После конвертирования файла в формат PDF убедитесь, что формулы и рисунки отображаются правильно.

2. Один экземпляр статьи, напечатанный на лазерном принтере на одной стороне стандартного листа формата А4, необходимо направить на адрес редакции: 105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60. Статья должна быть подписана всеми авторами.

Статью необходимо сопроводить следующими оригиналами документов: лицензионным договором, подписанным всеми авторами (лицензионный договор должен быть распечатан на одном листе с оборотом), и актом к нему (см. сайт <http://www.nait.ru/autors/index.php>); актом экспертизы (для граждан РФ); справкой с результатами проверки на отсутствие плагиата; сведениями об авторах.

3. Объем статьи не должен превышать 15 страниц текста (до 25 с. для обзоров) и 6—8 рис.

Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Части статьи располагают в следующей последовательности:

- а) индекс УДК;
- б) название статьи;
- в) инициалы и фамилии всех авторов, ученые степени и звания всех авторов. Звездочкой (*) следует отметить автора, уполномоченного работать с редакцией, и привести его контактные данные: e-mail, телефон;
- г) место работы каждого автора (полное название организации, город, индекс, страна). Для учета в системе РИНЦ указывать достоверное место работы автора (точное название организации, совпадающее с названием, зарегистрированным на сайте <http://elibrary.ru>);
- д) краткая аннотация (не более 5—7 строк) с перечислением ключевых слов;
- е) вводная часть с обоснованием актуальности и изложением цели работы (не более 1 страницы);
- ж) основной текст, который при необходимости следует разделять на разделы и подразделы (методика эксперимента, экспериментальные результаты, их обсуждение);
- з) выводы, в которых по мере возможности должно быть указано практическое применение результатов;
- и) список литературы;
- к) список подписуемых подписей, таблицы, рисунки (в такой последовательности). Все включают в общую нумерацию страниц статьи.

Материалы пунктов б—д необходимо представить и на **английском языке**.

4. Набирать текст необходимо в **MS Word**, используя стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**, размер 14, через **полтора** интервала. Поля со всех сторон 25 мм. В числах с десятичными дробями целое число отделяют от дроби запятой, а не точкой.

5. Для набора формул следует использовать редакторы формул **Math Equation** или **Math Type**. Формулы в тексте должны быть напечатаны без дополнительных интервалов между строками текста. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Знак корня (радикал) следует писать так, чтобы его горизонтальная черта полностью накрывала все подкоренное выражение. Русские и греческие буквы в формульном тексте набирают прямым шрифтом, латинские — курсивным, за исключением математических обозначений, а также обозначений химических элементов, которые набирают прямым шрифтом.

6. Все используемые буквенные обозначения и аббревиатуры должны быть расшифрованы. Размерность величин должна быть в системе СИ.

7. Элементы **списка литературы** должны содержать фамилии и инициалы авторов, полное название работы. Для книг указывается место издания, издательство, год издания и количество страниц. Для статей — полное название журнала или сборника, год, том, номер выпуска, страницы.

8. Графический материал нужно предоставить в форматах **jpeg** или **tiff** с разрешением не менее **300 dpi** только в черно-белом изображении. Рисунки должны быть четкими и не требовать перерисовки.

Каждый рисунок нужно распечатать на отдельной странице, указать его порядковый номер, авторов и название статьи.

Плата за публикацию статей с авторов, в том числе с аспирантов, не взимается.

ЛИЦЕНЗИОННЫЙ ДОГОВОР

о передаче исключительного права на использование произведения

г. Москва

«___» _____ 20__ г.

Автор(ы) _____, именуемый(е) в дальнейшем «Лицензиар», с одной стороны и ООО «Наука и технологии», в лице генерального директора Ковалевского М.А., действующего на основании Устава, именуемое в дальнейшем «Лицензиат», с другой стороны, а вместе именуемые «Стороны», заключили настоящий договор о нижеследующем:

1. Предмет договора

1.1. Лицензиар предоставляет Лицензиату безвозмездно право использования оригинального произведения в установленных настоящим договором пределах. Произведение должно быть проверено лицензиаром на плагиат.

1.2. Объектом авторских прав, право использования которого предоставляется по настоящему договору, является произведение _____

1.3. Лицензиар предоставляет Лицензиату право использовать произведение следующим образом:

1.3.1. воспроизведение произведения или отдельной его части на русском языке в любой материальной форме, в том числе на бумажном и электронном носителях в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или базах данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата;

1.3.2. распространение произведения или отдельной его части на любом носителе на русском языке по всему миру в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или базах данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата, путем продажи или иного отчуждения его оригинала или экземпляров;

1.3.3. доведение произведения или отдельной его части до всеобщего сведения таким образом, что любое лицо может получить доступ к произведению из любого места и в любое время по собственному выбору (доведение до всеобщего сведения, в том числе через всемирную компьютерную сеть Интернет);

1.3.4. право на перевод произведения на английский язык;

1.3.5. воспроизведение произведения или отдельной его части на английском языке в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или базах данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата;

1.3.6. распространение произведения или отдельной его части на любом носителе на английском языке по всему миру в виде отдельного произведения и/или в составе Журнала (лов), и/или базах данных Лицензиата и/или иных лиц по усмотрению Лицензиата, путем продажи или иного отчуждения его оригинала или экземпляров;

1.3.7. доведение произведения или отдельной его части на английском языке до всеобщего сведения таким образом, что любое лицо может получить доступ к произведению из любого места и в любое время по собственному выбору (доведение до всеобщего сведения, в том числе через всемирную компьютерную сеть Интернет);

1.3.8. сублицензирование (выдача разрешения) полученных прав по настоящему договору в целом или частичном виде для перевода, издания, распространения и доведения до всеобщего сведения на английском языке.

2. Права и обязанности Сторон

2.1. Лицензиат может использовать произведение только в пределах тех прав и теми способами, которые предусмотрены настоящим лицензионным договором;

2.2. В течение срока действия лицензионного договора Лицензиар обязан воздерживаться от каких-либо действий, способных затруднить осуществление Лицензиатом предоставленного ему права использования произведения в установленных настоящим договором пределах.

3. Срок действия договора

3.1 Срок действия настоящего договора составляет 5 (пять) лет.

3.2 В случае прекращения исключительного права лицензионный договор прекращается.

4. Ответственность по договору

4.1. За использование произведения способом, не предусмотренным настоящим договором, либо по прекращении действия договора, либо иным образом за пределами прав, предоставленных договором, Лицензиат несет ответственность за нарушение исключительного права на произведение, предусмотренную Гражданским Кодексом РФ и другими нормативно-правовыми актами.

4.2. Лицензиар гарантирует наличие у него предоставляемых по настоящему договору исключительных прав на произведение.

5. Заключительные положения

5.1. Настоящий договор вступает в силу с момента его подписания.

5.2. Настоящий договор составлен в двух аутентичных экземплярах, по одному для каждой стороны.

5.3. Во всем, что не предусмотрено настоящим договором, Стороны руководствуются действующим законодательством РФ.

5.4 Автор (ы) согласен (ны) на использование и хранение персональных данных в рамках настоящего договора.

6. Реквизиты и подписи Сторон

Лицензиар

Ф. _____

И. _____

О. _____

Пасп., серия _____ № _____

выдан _____

Адрес _____

_____/_____/_____

Лицензиат

ООО «Наука и технологии»

ИНН/КПП 7728161750/771901001

Юр. Адрес/Адрес доставки: 105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60

Тел./факс: (495)988-98-65; E-mail: admin@nait.ru, dv@nait.ru

р/сч 40702810806010000025 в Филиал Центральный банка

ВТБ (ПАО) г. Москва БИК 04452541

к/сч 30101810145250000411, ОГРН 102773952346

Генеральный директор _____/ Ковалевский М.А. /

Уважаемые читатели!

Продолжается подписка на ежемесячный производственный,
научно-технический и учебно-методический журнал

«Технология металлов»

на 2023 год

Журнал распространяется только по подписке

Подписная цена журнала на 2-е полугодие — **45 900** руб.

Стоимость одного номера журнала — **7650** руб., НДС не облагается

**Вы можете оформить подписку с любого номера журнала
до 25-го числа предподписного месяца**

- ➔ на сайте издательства **<http://www.nait.ru>** открыта электронная подписка на полнотекстную версию журнала с мая 2009 г.;
- ➔ **по безналичному расчету:** ООО «Наука и технологии» (ИНН 7728161750, КПП 771901001), р/с № 40702810806010000025, филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО) в г. Москве, БИК 044525411, к/с № 30101810145250000411.

В графе «Назначение платежа» укажите: «Подписка на журнал «Технология металлов» на (срок)». Укажите адрес, ИНН, название организации (или Ф.И.О. получателя), телефон.

Только при подписке в редакции или по безналичному расчету подписная цена журнала включает и стоимость пересылки.

- ➔ по каталогу периодических изданий «Урал-пресс» на сайте **www.ural-press.ru**;
- ➔ **по Объединенному каталогу**, подписной индекс **29077**, а также на сайтах **www.pressa-rf.ru** или **www.akc.ru**. В отделе продаж на сайте по e-mail: **podpiska@pressa-rf.ru** или по тел.: **8 (495) 631-62-54**.

Редакция журнала предоставляет вам возможность опубликовать свои материалы о новых научных и технических разработках и достижениях, а также об опыте организации производства.

Плата за публикацию статей с авторов, в том числе с аспирантов, не взимается.

*По вопросам формирования редакционного портфеля
обращайтесь по адресу: 105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60
Тел./факс: (499) 995-45-23, тел.: (499) 995-45-22;
e-mail: admin@nait.ru, prmi79@mail.ru*

*По всем вопросам подписки, распространения и размещения рекламных материалов
обращайтесь по адресу:*

*105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60
Тел./факс: (495) 223-09-10, (499) 995-45-23.
E-mail: market@nait.ru*

