

Волков С.Ю., Колокольцев В.М., Потапов М.Г., Чернов В.П.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДВОЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА (СИНТЕЗ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ): УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ «СОСТАВ — СТРУКТУРА — СВОЙСТВО» (часть 1)

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния легирования на абразивную износостойкость двойных сплавов на основе железа с элементами C, Si, Mn, Cr, Nb, В. Установлены закономерности изменения износостойкости в зависимости от химического состава и структурного состояния сплавов. Построены ряды легирующих элементов по их влиянию на износостойкость железа для низко-, средне- и высоколегированных сплавов. Показано, что в области твердых растворов износостойкость увеличивается с ростом концентрации легирующего элемента до предела растворимости, а в гетерофазных структурах является аддитивной величиной, определяемой типом матрицы и свойствами структурных составляющих.

Ключевые слова: двойные сплавы железа, абразивная износостойкость, диаграммы состояния, твердые растворы, интерметаллиды, прочность, твердость

Введение

Основная задача современного литейного металловедения – создание сплавов с заданными свойствами. Теоретической основой выбора таких сплавов продолжают оставаться экспериментально построенные диаграммы состояния и диаграммы состав-свойство [1, 2]. Диаграмма состояния в наиболее общей и надежной форме отражает характер взаимодействия компонентов, фазовый состав и структуру сплавов в равновесных и квазиравновесных условиях [2].

Оборудование современной техники зачастую работает в необычных условиях: высокие и низкие температуры и давления, ударные нагрузки, абразивное изнашивание. Этими условиями и определяется сложный комплекс требований к свойствам новых сплавов, зачастую взаимоисключающих [3].

Разработка новых сплавов на заданные свойства связана со знанием характера влияния добавок на свойства основы и базируется на связи состава сплава с его положением на диаграмме состояния [4]. Если для основных механических и литейных свойств известны зависимости типа «состав – свойство», то для ряда важных специальных свойств, в частности абразивной износостойкости, данных недостаточно [3,5].

Цель работы – установление закономерностей влияния легирования на износостойкость двойных сплавов на основе железа и разработка методов прогнозирования их свойств на основе диаграмм состояния.

Методика исследований

Исследовали износостойкость бинарных сплавов на основе железа с C, Si, Mn, Cr, Nb, В. Экспериментальные сплавы для изучения износостойкости, структуры и свойств двухкомпонентных систем на основе железа получали в индукционной ИСТ-002 в алуновом тиглях методом сплавления технически

чистых металлов в литейной лаборатории ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Для этого использовали:

- карбонильное рафинированное железо марки Р20 по ГОСТ 13610-79;
- кремний технический марки Кр0 по ГОСТ 2169-2014;
- марганец электролитический марки МР0 по ГОСТ 6008-90;
- ниобий металлический марки НБШО по ГОСТ 16100-2014;
- бор кристаллический фирмы «Borax Francais» (Франция).

Науглероживание сплавов проводили электродным графитом марки ЭГ-0.

Сплавы заливали в сухие песчано-глинистые формы (ПГФ) при температуре на 50°C выше температуры ликвидус. Теоретическую температуру ликвидус и солидус рассчитывали, используя теорию аддитивности [6, 7]. Содержание вторых компонентов в сплаве выбирали таким образом, чтобы охватить наиболее важные структурные области диаграммы состояния, а также с учетом их концентраций в реальных сплавах [6].

Испытания металлов и сплавов на износостойкость проводили по ГОСТ Р 23.208-2016 «Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закреплённые абразивные частицы».

Определение показателей механических свойств проводили также с использованием стандартных методик: испытание на растяжение – по ГОСТ 1497-2014, на ударный изгиб – по ГОСТ 9454-2014, твёрдость по Бринеллю – по ГОСТ 9012-2014 на приборе 21009ТБ, твёрдость по Роквеллу – по ГОСТ 9013-2014 на приборе ТР5006.

Предел прочности определяли по ГОСТ 1497-84. Образцы испытывали на универсальной испытательной машине «ИР-5082-10» с программным комплексом «MAXTest», записью диаграммы «нагрузка-удлинение».

Комплекс металлографических исследований был

выполнен в ЦКП НИИ Нано-сталей при ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова». Для микроанализа из образца по стандартной методике на линии пробоподготовки фирмы Vueschler были приготовлены микрошлифы с использованием запрессовки образцов в смолу «Transoptic» на автоматическом прессе Simplimet 1000. Для выявления микроструктуры поверхность шлифа подвергалась травлению в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом.

Для выявления качественных и количественных характеристик структуры использовался оптический микроскоп Meiji Techno с применением системы компьютерного анализа изображений «ТЕХОМЕТ Pro E 1245-03». Микроструктура при увеличениях более 1000 раз исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6490 LV во вторичных электронах.

Неметаллические включения изучали по ГОСТ 1778-2014 метод Л.

Границы зерен выявляли травлением в растворах соляной и азотной кислот, соляной и пикриновой кислот в воде, электролитическим травлением в 50%-м растворе азотной кислоты. Применяли также реактивы, предусмотренные ГОСТ 5639-2014.

Размер зерна определяли методом сравнения с эталонными шкалами, приведёнными в приложении к ГОСТ 5639-2014 [15, 16].

Микротвердость определяли на твердомере BuchlerMikromet в соответствии с ГОСТ 9450-60 ме-

тодом вдавливания алмазной пирамидки с углом между противоположными гранями 136° при нагрузке 1 кг и длительности нагружения 15 с.

Количественный анализ проводили методами, изложенными в работах [15, 16].

Результаты исследований. Влияние легирования на износостойкость двойных сплавов железа представлено на рис. 1 и в табл. 1.

Сплавы железо-углерод. Изучали сплавы с содержанием углерода до 4,2%. Резкое повышение износостойкости наблюдается в интервале содержаний углерода 0,13–2,82%. Это связано с увеличением доли карбидов железа. Раздвоение кривой износостойкости после увеличения содержания углерода свыше 2,82% на восходящую (1) и нисходящую (2) ветви (рис. 1, а) объясняется тем, что в первом случае весь углерод связан в карбиды (структура белого чугуна), во втором – выделяется свободный графит (см. табл. 1). Изменение структуры при увеличении содержания углерода происходит следующим образом: до 0,8% С – ферритно-перлитная и перлитная; 0,8-2,1% С – перлитно-цементитная; 2,06-2,82-4,2% С – кривая 1 – перлитно-ледебуритная, кривая 2 – перлитоледебурито-графитовая.

Сопоставляя значения $K_{и}$, HRA, σ_b можно отметить, что в сплавах системы Fe-C износостойкость тем выше, чем выше прочностные характеристики. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее известным влиянием углерода на износостойкость чугунов и сталей [3, 20].

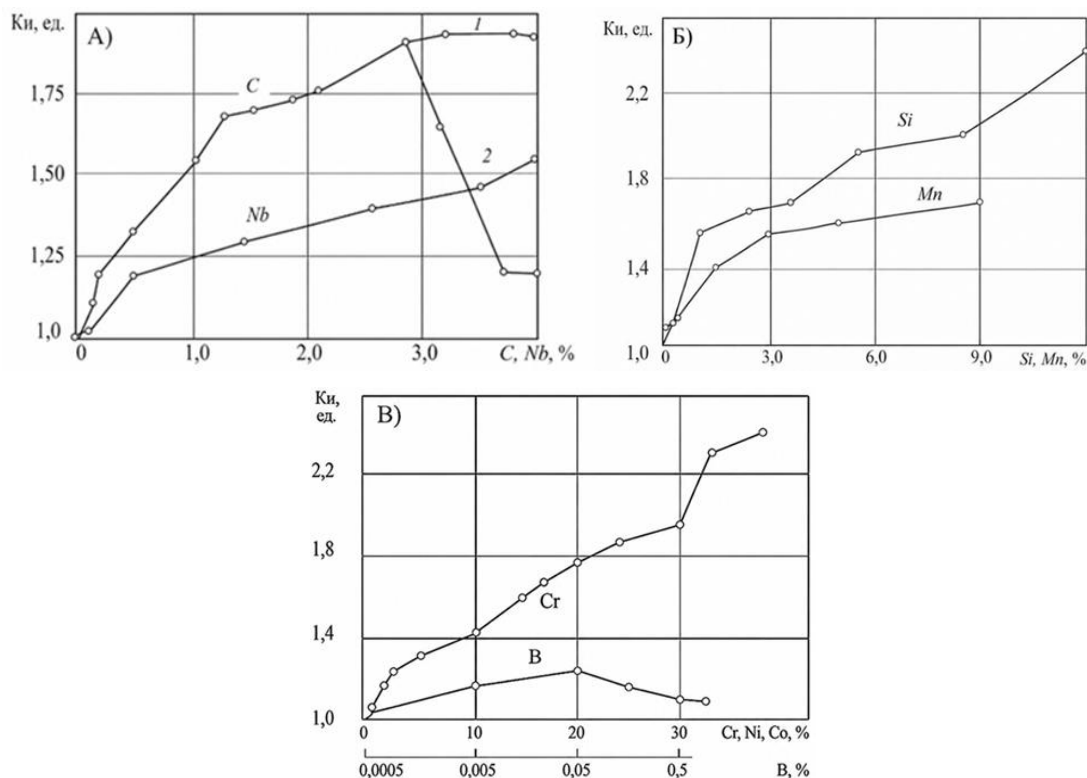


Рис. 1. Влияние легирования на свойства исследованных сплавов

Таблица 1

Свойства двойных сплавов железо-элемент

№ п/п	Сплав	Содержание элемента, %	K _н , ед.	HRA, ед.	HB, ед.	σ _в , МПа
Сплавы железо-углерод						
1	Fe-C	0,13	1,12	40	128	340
2	Fe-C	0,49	1,33	56	179	540
3	Fe-C	1,02	1,55	65	285	620
4	Fe-C	1,54	1,71	70	363	660
5	Fe-C	2,06	1,77	72	415	700
6	Fe-C	2,82	1,92	74	477	—
7	Fe-C	3,15	1,64	68	330	—
8	Fe-C	4,21	1,21	56	183	250
Сплавы железо-ниобий						
9	Fe-Nb	0,5	1,20	43	131	320
10	Fe-Nb	1,5	1,30	49	149	345
11	Fe-Nb	2,6	1,38	57	192	—
12	Fe-Nb	4,0	1,56	64	255	410
Сплавы железо-кремний						
13	Fe-Si	0,48	1,20	42	130	360
14	Fe-Si	2,43	1,65	58	197	440
15	Fe-Si	5,57	1,90	68	321	400
16	Fe-Si	8,4	2,01	72	400	—
17	Fe-Si	12,53	2,45	77	410	—
Сплавы железо-марганец						
18	Fe-Mn	1,59	1,25	43	140	345
19	Fe-Mn	4,49	1,61	60	217	400
20	Fe-Mn	9,28	1,70	63	255	480
21	Fe-Mn	12,75	1,92	70	352	545
22	Fe-Mn	15,32	1,93	68	321	500
Сплавы железо-хром						
23	Fe-Cr	5,12	1,41	42	131	400
24	Fe-Cr	13,50	1,60	45	137	425
25	Fe-Cr	24,90	1,70	50	149	440
26	Fe-Cr	38,70	2,40	60	229	495
Сплавы железо-бор						
27	Fe-B	0,0005	1,03	39	120	300
28	Fe-B	0,005	1,18	42	126	325
29	Fe-B	0,05	1,24	45	136	350
30	Fe-B	0,5	1,14	45	136	300
31	Fe-B	0,6	1,12	46	136	290

Сплавы железо-ниобий. Ниобий образует с α-Fe ограниченные твердые растворы. Критерий растворимости ниобия в α-Fe составляет 1,6 ат. % или 2,63 мас.

% [7]. При содержании ниобия до 2,6% повышение K_н связано с увеличением легированности твердого раствора. При более высоких концентрациях наблюдаются включения ε-фазы (Fe₂Nb), что также способствует повышению K_н (см. рис. 1, а, табл. 1). Таким образом, положительное влияние ниобия на износостойкость двойных сплавов Fe-Nb в изученном интервале концентраций связано как с увеличением легирования твердого раствора, так и с образованием интерметаллида Fe₂Nb [8,9].

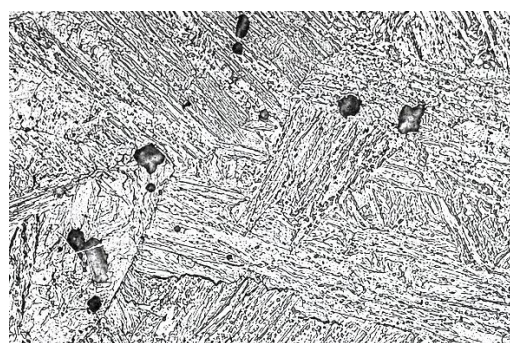
Сплавы железо-кремний. Кремний во всем изученном интервале концентраций (0,48–12,3%) существенно повышает износостойкость. Это связано с увеличением твердости сплавов за счет резкого искажения решетки α-Fe. Микротвердость феррита повышается с 1669 до 4178 МПа (см. рис. 1, б, табл. 1). Структура всех сплавов ферритная. В области концентраций кремния от 5,0 до 12,3% в сплавах присутствуют включения второй фазы Fe₃Si в виде темных выделений по границам зерен [9]. Увеличение ее количества вызывает хрупкость железа и снижает прочность. Однако износостойкость не снижается, что определяется высокой твердостью образцов.

Сплавы железо-марганец. Марганец имеет ГЦК-решетку, расширяет область существования γ-Fe. Легирование железа марганцем до 12,75% повышает износостойкость, твердость и прочность, что объясняется изменениями в структуре: от ферритной через неоднородную с видманштеттовым ферритом и аустенитом до мартенситно-аустенитной с некоторым количеством ε-фазы (рис. 2, 3, табл. 1) [13, 14].

В сплавах с содержанием марганца до 10,5% наблюдается протекание частичного мартенситного превращения. При этом мартенсит имеет неоднородное строение. На границах зерен и близлежащих к ним участках он имеет форму игл, линз и пластин. В центре зерен - мартенсит в виде пластин. В целом микроструктура состоит из марганцовистого мартенсита и аустенита. Дальнейшее легирование железа марганцем до 15,32% повышает устойчивость аустенита по отношению к образованию α-фазы и ее количество уменьшается. Соответственно этому снижаются прочность и твердость, а износостойкость остается на прежнем уровне [13, 14].



а



б

Рис. 2. Микроструктура Fe-Mn, ×500: а – 1,59% Mn; б – 4,49% Mn

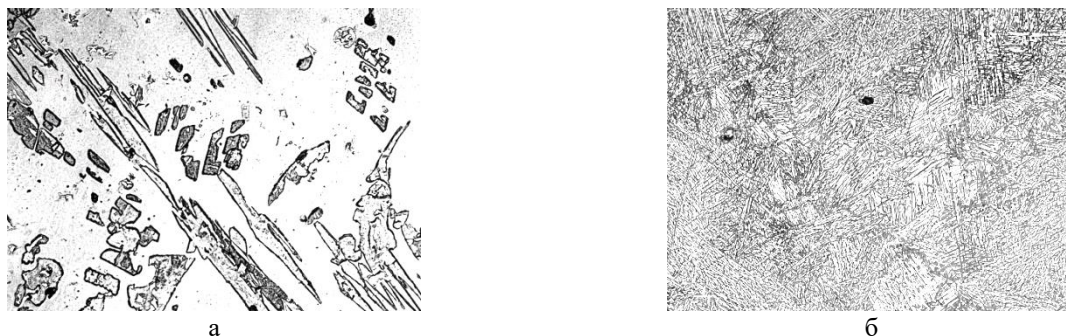


Рис. 3. Микроструктура Fe-Mn, $\times 500$: а – 9,28% Mn; б – 12,75% Mn

Сплавы железо-хром. Хром образует с α -Fe неограниченные твердые растворы, замыкает γ -область. Износостойкость непрерывно возрастает во всем интервале концентраций хрома до 38,7%. При содержании $\text{Cr} \geq 14,3\%$ начинает выделяться σ -фаза, а при $\text{Cr} \geq 25\%$ износостойкость резко возрастает (рис. 4, 5, табл. 1) [9]. Микроструктура сплавов представлена ферритом и кристаллами σ -фазы. Исключение составляют сплавы с содержанием $\text{Cr} < 14,3\%$. При дальнейшем увеличении концентраций хрома начинает выделяться σ -фаза. В сплавах с хромом в пределах 14,3–27,9% количество ее невелико, распределение неравномерное, форма – в виде пластин и длинных полос. Такая морфология σ -фазы связана, по-видимому, с локальным обогащением микрообъемов сплава хромом. Повышение износостойкости этих сплавов незначительное. При дальнейшем увеличении содержания хрома количество σ -фазы растет. Она более равномерно распределяется в ферритной матрице. Выделение σ -фазы происходит в виде крупных пластин неправильной формы, длинных полос и округ-

лых частиц. При этом у сплавов с содержанием хрома $> 25\%$ износостойкость резко возрастает.

Изучали сплавы железа с содержанием бора от 0,0005 до 0,5%. Считается, что влияние бора на свойства железа подобно влиянию углерода, но в несколько раз более сильное [8]. Однако для износостойкости этого не наблюдается, хотя при увеличении содержания бора сопротивление изнашиванию возрастает, но менее существенно, чем при добавках углерода [12]. Микроструктура всех сплавов представляет собой феррит, в котором при содержании бора свыше 0,005% выделяются бориды железа Fe_2B . Это способствует увеличению общей твердости, микротвердости, прочности и износостойкости (до 0,05% В). При дальнейшем повышении содержания бора все свойства снижаются, что связано с охрупчивающим влиянием на ферритную матрицу выделяющихся в большом количестве боридов. Данные результаты относятся к объемно-легированным сплавам, а не к диффузионно-насыщенным.

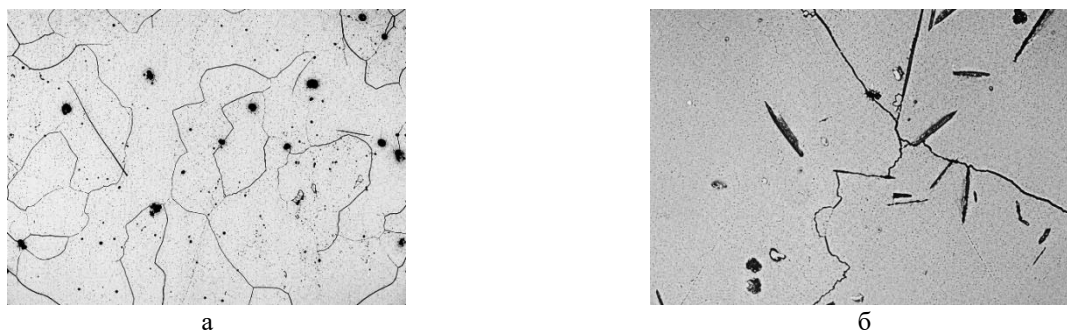


Рис. 4. Микроструктура Fe-Cr, $\times 500$: а – 0,5% Cr; б – 13,5% Cr

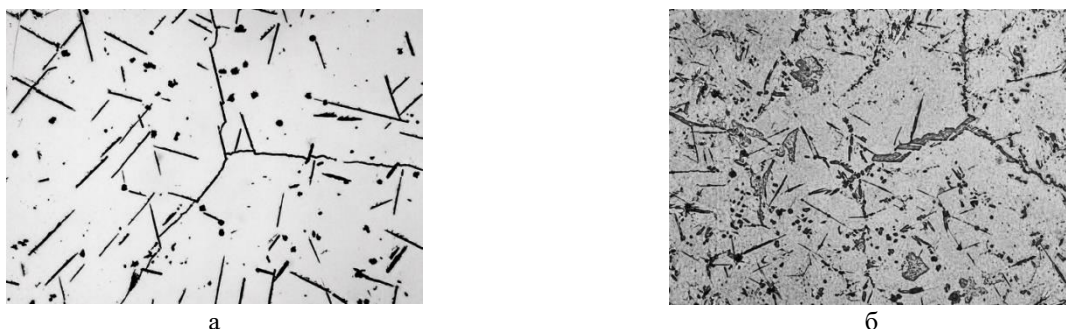


Рис. 5. Микроструктура Fe-Cr, $\times 500$: а – 24,9% Cr; б – 38,4% Cr

Сравнительное исследование двойных сплавов позволило построить следующие ряды износостойкости (по возрастанию) в группах сплавов:

- низколегированные сплавы (1,0% элемента): Mn (1,21) → Cr (1,22) → Nb (1,25) → Si (1,52) → C (1,56);
- среднелегированные сплавы (5,0% элемента): Cr (1,52) → Mn (1,60) → Si (1,83);
- высоколегированные сплавы (10% элемента): Cr (1,55) → Mn (1,80) → Si (2,18).

Обсуждение результатов исследования

Полученные данные демонстрируют принципиально разные механизмы повышения износостойкости в областях твёрдых растворов и гетерофазных структур. В области твёрдых растворов (Fe-Nb до 2,6%, Fe-Cr до ~14%, Fe-Si до ~5%) износостойкость растёт монотонно с увеличением концентрации легирующего элемента до предела его растворимости в α -Fe. Это объясняется классическим механизмом твёрдого раствора: искажение кристаллической решётки железа атомами легирующего элемента повышает сопротивление дислокационному скольжению, что проявляется в росте твёрдости, прочности и, как следствие, износостойкости [8, 9].

В гетерофазных структурах износостойкость приобретает аддитивный характер. Например, в сплавах Fe-C при содержании углерода >0,8% образование карбидов (цементита) создаёт жёсткий скелет, препятствующий выкрашиванию матрицы при абразивном воздействии [17]. При этом важную роль играет морфология второй фазы: в белом чугуна (см. рис. 1, кривая 1) карбиды образуют непрерывную ледебуритную сетку, обеспечивая высокую износостойкость ($K_n = 1,92$ при 2,82% C), тогда как в сером чугуна (кривая 2) выделение свободного графита в виде пластин разрушает целостность матрицы и снижает K_n до 1,64 при 3,15% C [20].

Аналогичная картина наблюдается в системе Fe-Cr: при Cr $\geq 25\%$ резкий рост износостойкости ($K_n = 2,40$ при 38,7% Cr) связан не просто с количеством σ -фазы, а с её морфологией – переходом от редких пластин к равномерно распределённым в ферритной матрице крупным частицам неправильной формы [9]. Это подтверждает, что для абразивной износостойкости критична не только твёрдость структурных составляющих, но и их способность удерживаться в матрице при сдвиговых деформациях [12, 18].

Построенные ряды износостойкости выявляют интересную закономерность: эффективность легирования зависит от уровня легирования. В низколегированной области наибольший эффект дают углерод и кремний, тогда как в высоколегированной – марганец и марганец. Хром, демонстрирующий умеренное влияние в низко- и среднелегированных сплавах, становится высокоэффективным при концентрациях >25% за счёт образования интерметаллидной σ -фазы.

Особого внимания заслуживает система Fe-B. Несмотря на распространённое мнение о «сверхвысокой» эффективности бора (аналогично углероду, но в десятки раз сильнее по влиянию на твёрдость), для

абразивной износостойкости этот эффект не реализуется. Максимальное значение $K_n = 1,24$ при 0,05% B значительно уступает показателям Fe-C ($K_n = 1,92$ при 2,82% C). Это объясняется ферритной природой матрицы в сплавах Fe-B и охрупчивающим действием избыточных боридов Fe₂B, которые, в отличие от карбидов в Fe-C, не образуют прочного скелета, а играют роль концентраторов напряжений [12].

Сплавы Fe-Mn представляют особый интерес благодаря протеканию мартенситного превращения. Повышение износостойкости до 12,75% Mn ($K_n = 1,92$) связано с формированием неоднородного мартенсита: игольчатого и пластинчатого на границах зерен, пластинчатого в центрах [13, 14]. Такая неоднородность структуры, сочетающая высокотвёрдый мартенсит с пластичным аустенитом, создаёт оптимальные условия для сопротивления абразивному изнашиванию. Однако при 15,32% Mn стабилизация аустенита приводит к уменьшению доли мартенсита, что снижает прочность и твёрдость, хотя износостойкость остаётся на уровне ($K_n = 1,93$). Это указывает на существование «плато» износостойкости в аустенитно-мартенситных структурах, где доминирующую роль играет не прочность, а способность материала к упрочнению при деформации [14].

Заключение

1. Влияние легирования на износостойкость имеет сложный характер, определяемый структурным состоянием сплава. В области твердых растворов износостойкость (K_n) возрастает с увеличением концентрации легирующего элемента до предела его растворимости (подтверждено для систем Fe-Nb, Fe-Si, Fe-Mn), тогда как в гетерофазных структурах она является аддитивной величиной, зависящей от типа матрицы и свойств структурных составляющих (Fe-C, Fe-Cr, Fe-B).

2. Установлены ряды эффективности легирующих элементов по возрастанию износостойкости железа, различающиеся для низко-, средне- и высоколегированных сплавов. Наиболее эффективным элементом в низколегированной области является углерод ($K_n = 1,56$ при 1,0% C), а в высоколегированной — кремний ($K_n = 2,18$ при 10% Si), что обусловлено различными механизмами упрочнения.

3. Выявлены критические концентрации, при которых происходит качественное изменение механизма изнашивания: для Fe-C — раздвоение кривой износостойкости при 2,82% C (образование свободного графита); для Fe-Cr — резкий рост K_n при Cr > 25% (массированное выделение σ -фазы); для Fe-B — максимум износостойкости при 0,05% B с последующим снижением из-за охрупчивания ферритной матрицы боридами.

Представленные в статье результаты создают теоретическую основу для целенаправленного синтеза многофазных износостойких литейных сплавов на основе железа с заданным комплексом свойств.

P.S. Во второй части будут представлены результаты исследований бинарных сплавов железо-элемент (Ni, Mo, V, Ti, Cu, Co, Al, W), а также полученные регрессионные зависимости.

Список источников

1. Гуляев Б.Б. Физико-химические основы синтеза сплавов. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 192 с.
2. Гуляев Б.Б. Синтез сплавов. М.: Металлургия, 1985. 160 с.
3. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Износостойкость сталей и сплавов. М.: Нефть и газ, 1994. 417 с.
4. Колокольцев В.М. Выбор легирующих элементов и комплексов для разработки составов литейных износостойких сталей // Совершенствование технологии и автоматизации сталеплавильных процессов: межвуз. сб. Магнитогорск: МГМИ им. Г.И. Носова, 1992. С. 27–36.
5. Сорокин Г.М. Вопросы методологии при исследовании изнашивания абразивом // Трение и износ. 1988. Т. 9, № 5. С. 779–786.
6. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. изд. / О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисов и др. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
7. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. М.: Металлургия, 1962. 1488 с.
8. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. М.: Металлургия, 1986. 312 с.
9. Колокольцев В.М. Исследование износостойкости бинарных сплавов железа // Трение и износ. 1995. Т. 16, № 4. С. 719–726.
10. Колокольцев В.М. Износостойкость двойных сплавов на основе железа // Литейное производство. 1996. № 4. С. 5–7.
11. Войнов Б.А. Сравнительное исследование литых износостойких сплавов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1989. № 10. С. 96–98.
12. Износостойкие сплавы для отливок дробильно-размольного оборудования / С.П. Дорошенко, В.А. Лютый, В.Я. Жук и др. М.: ЦНИИЭСТРОЙМАШ, 1978. 41 с.
13. Волюнова Т.Ф. Высокомарганцовистые стали и сплавы. М.: Металлургия, 1988. 343 с.
14. Малинов Л.С., Харланова Е.Я. Литые малоуглеродистые железомарганцевые стали с метастабильным аустенитом // Изв. вузов. Черная металлургия. 1989. № 10. С. 98–101.
15. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. 876 с.
16. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. Стереология металлических материалов. М.: Металлургия, 1976. 271 с.
17. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
18. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 251 с.
19. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 270 с.
20. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Металлургия, 1988. 256 с.

Сведения об авторах

Волков Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, ректор Кыргызско-Российского Славянского университета имени первого президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина (КРСУ), г. Бишкек, Республика Киргизия; доцент кафедры «Литейные процессы и материаловедение», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: evzhenin@mail.ru.

Колокольцев Валерий Михайлович – доктор технических наук, профессор, советник при ректорате, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: kwm@magtu.ru

Потапов Михаил Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные процессы и материаловедение», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: potapovmg@mail.ru

Чернов Виктор Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Литейные процессы и материаловедение», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: tchernov42@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EFFECT OF ALLOYING ON THE WEAR RESISTANCE OF BINARY IRON-BASED ALLOYS (CASTING ALLOYS SYNTHESIS): ESTABLISHMENT OF "COMPOSITION — STRUCTURE — PROPERTY" REGULARITIES (PART 1)

Volkov Sergey Yu. – Ph.D., Rector of the Kyrgyz-Russian Slavic University named after the First President of the Russian Federation B.N. Yeltsin (KRSU), Kyrgyz Republic, Bishkek; Associate Professor of the Department of "Foundry Processes and Materials Science", Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: evzhenin@mail.ru.

Kolokoltsev Valery M. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor to the Rectorate, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kwm@magtu.ru.

Potapov Mikhail G. – Ph.D., Associate Professor of the Department of "Foundry Processes and Materials Science", Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: potapovmg@mail.ru.

Chernov Viktor P. – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Foundry Processes and Materials Science", Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tchernov42@mail.ru.

Abstract. The results of study on the effect of alloying on the abrasive wear resistance of binary iron-based alloys containing C, Si, Mn, Cr, Nb, and B are presented. The regularities of wear resistance variation depending on the chemical composition and structural state of the alloys have been established. Series of alloying elements have been constructed according to their influence on the wear resistance of iron for low-, medium-, and high-alloyed alloys. It has been shown that in the region of solid solutions, wear resistance increases with increasing alloying element concentration up to the solubility limit, whereas in heterophase structures it is an additive quantity determined by the matrix type and the properties of the structural constituents.

Keywords: binary iron alloys, abrasive wear resistance, phase diagrams, solid solutions, intermetallics, strength, hardness.

References

1. Gulyaev B.B. Physical and Chemical Foundations of Alloy Synthesis. Leningrad: Leningrad University Publishing House, 1980. 192 p.
2. Gulyaev B.B. Synthesis of Alloys. Moscow: Metallurgiya, 1985. 160 p.
3. Vinogradov V.N., Sorokin G.M. Wear Resistance of Steels and Alloys. Moscow: Nedra, 1994. 417 p.
4. Kolokoltsev V.M. Selection of Alloying Elements and Complexes for Developing Compositions of Cast Wear-Resistant Steels // Improvement of Technology and Automation of Steelmaking Processes: Interuniversity Collection. Magnitogorsk: MGMI Publishing House, 1992. P. 27–36.
5. Sorokin G.M. Methodological Issues in the Study of Abrasive Wear // Trenie i Iznos. 1988. Vol. 9, No. 5. P. 779–786.
6. Bannykh O.A., Budberg P.B., Alisov S.P. et al. Phase Diagrams of Binary and Multicomponent Iron-Based Systems: Reference Edition. Moscow: Metallurgiya, 1986. 440 p.
7. Saunders N., Miodownik A.P. CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams): A Comprehensive Guide. Oxford: Pergamon, 1998. 479 p.
8. Goldshtein M.I., Litvinov V.S., Bronfin B.M. Metal Physics of High-Strength Alloys. Moscow: Metallurgiya, 1986. 312 p.
9. Bhadeshia H.K.D.H., Honeycombe R.W.K. Steels: Microstructure and Properties. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 504 p.
10. Kolokoltsev V.M. Investigation of Wear Resistance of Binary Iron Alloys // Trenie i Iznos. 1995. Vol. 16, No. 4. P. 719–726.
11. Kolokoltsev V.M. Wear Resistance of Binary Iron-Based Alloys // Liteynoye Proizvodstvo. 1996. No. 4. P. 5–7.
12. Zum Gahr K.-H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam: Elsevier, 1987. 560 p.
13. Volynova T.F. High-Manganese Steels and Alloys. Moscow: Metallurgiya, 1988. 343 p.
14. Grassel O., Kruger L., Frommeyer G., Meyer L.W. High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development — properties — application // International Journal of Plasticity. 2000. Vol. 16, Iss. 10–11. P. 1391–1409.
15. Saltykov S.A. Stereometric Metallography. Moscow: Metallurgiya, 1970. 376 p.
16. Russ J.C. The Image Processing Handbook. 6th ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 873 p.
17. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokolnikov M.G. Abrasive Wear. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990. 224 p.
18. Berns H., Fischer A. Martensitic stainless steels for abrasive and adhesive wear resistance // Wear. 1987. Vol. 114, Iss. 3. P. 337–351.
19. Tenenbaum M.M. Resistance to Abrasive Wear. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976. 270 p.
20. Tsylin I.I. White Wear-Resistant Cast Irons: Structure and Properties. Moscow: Metallurgiya, 1988. 256 p.

Ссылка на статью:

Влияние легирования на износостойкость двойных сплавов на основе железа (синтез литейных сплавов): установление закономерностей «состав – структура – свойство» (часть 1) / Волков С.Ю., Колокольцев В.М., Потапов М.Г., Чернов В.П. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 15–21. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-15-21](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-15-21)
Volkov S.Yu., Kolokoltsev V.M., Potapov M.G., Chernov V.P. Effect of alloying on the wear resistance of binary iron-based alloys (casting alloys synthesis): establishment of "composition – structure – property" regularities (part 1). *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 15–21. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-15-21](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-15-21)