

В.Л.Плюта, А.М.Нестеренко, С.В.Бобырь

**ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ СПЛАВЫ:
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

Показано, что повышение абразивной и ударно – абразивной износостойкости марганцовистых сталей и сплавов возможно путем формирования оптимальной структуры для данных разновидностей износа, экономного легирования и применения рациональных режимов ДТО.

Изложение основных материалов исследования. В связи с условиями эксплуатации многие детали и изделия должны обладать высокой стойкостью против износа. Износ материалов проявляется в постепенном уменьшении их объема в результате поверхностного разрушения, состоящего из большого количества микроскопических актов разрушения [2]. Он представляет собой исключительно сложный процесс, сопровождающийся как чисто механическими (упругими и пластическими деформациями и разрушениями), так и физико – химическими явлениями, вызывающими окисление, коррозию, растрескивание, усталость, водородную хрупкость и конечное макроскопическое разрушение металла [1,2]. В связи со сложностью и многофакторностью сопутствующих процессов износостойкость одного и того же материала при разных видах износа может быть разной, что затрудняет их классификацию. В этом плане весьма приемлемой является классификация, предложенная Б.И.Костецким [2], по которой различают 5 основных видов износа: 1) износ схватыванием I рода; 2) износ схватыванием II рода (тепловой износ); 3) окислительный износ; 4) абразивный износ; 5) осповидный (питтинговый) износ. При этом подразумевается, что в каждом случае один из перечисленных видов износа является ведущим и определяющим стойкость изделия (детали), хотя при этом ему могут сопутствовать и другие виды.

В случае абразивного износа поверхностное разрушение материалов определяется, в наибольшей мере, механическим воздействием абразивных частиц (или тел) в зоне контакта поверхности материалов с абразивами. Физическая модель нормального абразивного изнашивания материалов, при котором, в отличие от патологического (объемного), эти процессы локализованы в тонких поверхностных слоях, включает следующие основные позиции [3]:

1. В тончайших поверхностных слоях (10 – 100нм) происходит интенсивная и, чаще всего, направленная пластическая деформация, обуславливающая ориентированное перераспределение дефектов кристаллической решетки и в целом структурных составляющих материала относительно направления воздействия абразива в зоне его контакта с поверхностью материала

2. В подслое (порядка сотен микрон) возникает волновой процесс распространения упругих деформаций.

По сравнению с внутренними слоями материала, поверхностные слои характеризуются низкой стабильностью структуры вследствие действия упруго – пластических напряжений, возникающих на трущихся поверхностях в результате протекания полиморфных превращений и химико – термических процессов [4]. Характер поведения поверхностных областей материалов при трибомеханическом нагружении определяется более легкой активацией источников дислокаций, их большей начальной подвижностью и, в результате, меньшим сопротивлением деформации [5]. Наблюдающееся при такого рода нагружении увеличение плотности дислокаций в поверхностном слое материалов сопровождается упорядочением дислокационной структуры. На монокристалле железа было обнаружено, что такого рода упорядочение приводит к формированию в подповерхностном слое ячеистой дислокационной субструктуры, типичной для материалов, которые подвергались усталостным нагружениям. При увеличении количества циклов нагружения подобная субструктура проявляется и в более удаленных от поверхности слоях материала. Границы ячеек, насыщаясь дислокациями, становятся концентраторами напряжений и инициируют зарождение микротрещин, их трансформацию в макротрещины, а также последующее отслаивание частичек износа [5]. Из этого следует, что главной причиной поверхностного разрушения материалов при абразивном износе являются усталостные явления.

Необходимо отметить, что отслаивающиеся частички износа имеют, как правило, структуру, отличающуюся от основного металла. Как показано в [6], в диапазоне нормального изнашивания особый характер протекания пластической деформации, при котором концентрация дефектов кристаллической решетки достигает насыщения, повышает физико – химическую активность металла поверхности, его взаимодействие с окружающей средой и приводит к образованию на поверхности, контактирующей с абразивом, вторичных структур. Из этого получаем, что в результате коренных изменений в поверхностных слоях изнашиваемых материалов образуется новая фаза (вторичная структура), которая и становится объектом поверхностного разрушения. Следовательно, поверхностная прочность материала зависит от свойств новых фаз – вторичных структур, образующихся из исходного материала путем его структурной перестройки и взаимодействия со внешней средой. Б.И.Костецким с соавторами установлено [2], что в основе этих процессов лежит универсальное явление структурной приспособляемости материалов при трении. Сущность этого явления состоит в том, что при его реализации имеет место масштабный скачок – все взаимодействия трущихся твердых тел локализуются в тонком поверхностном объекте – вторичных структурах, имеющих высокопрочное ультрадисперсное строение.

Анализ состояния проблемы. Из проведенного анализа можно заключить, что материалы, предназначенные для эксплуатации в условиях абразивного износа, наряду с механическими характеристиками, сочетающимися показателями высокой прочности и твердости, должны обладать также и высокой устойчивостью против окисления и коррозии, препятствующей образованию вторичных структур при поверхностном разрушении.

Согласно [1] высокая износостойкость материалов может обеспечиваться двумя путями:

- упрочнением поверхностного слоя изделий (деталей) при помощи цементации, азотирования, цианирования, поверхностной закалки, диффузионного, электролитического или электродугового покрытия поверхности износостойкими материалами и т.п.;
- использованием сталей и сплавов, которые сами по своему составу и структуре обладают повышенной стойкостью против износа.

В настоящей работе будет рассматриваться вторая группа износостойких материалов. Изложенные выше основные положения однозначно подтверждаются практическими разработками. Для изделий и деталей, эксплуатирующихся в условиях абразивного износа, используются, в основном, 2 группы сталей и сплавов.

1. Высокохромистые стали и чугуны (X12, X12M, 30–40X13, X12Ф1, X12МФ, ИЧХ30НМ, ИЧ300Х28Н2, ИЧ280Х12М), сочетание высокой износостойкости и коррозионной стойкости в которых достигается благодаря наличию в их структуре высокотвердых хромистых карбидов типа Me_3C , $Me_{23}C_6$, Me_7C_3 и коррозионностойкой (из-за высокой доли замещения атомов железа атомами хрома в ОЦК – решетке феррита) ферритной матрицы. Вследствие повышенной хрупкости карбидных фаз перечисленные стали и чугуны используются, в основном, для изготовления износостойких изделий и деталей, не подвергающихся при эксплуатации сильным ударным воздействиям и толчкам.

2. Высокомарганцовистые стали и сплавы (110Г13Л, 110Г13Х2БРЛ, 110Г13ФТЛ, 130Г14ХМФАЛ, 120Г10ФЛ – ГОСТ 977, 80ГСЛ – ТУ 24–1–12–182–75, 75Г2 – ТУУ 322–233–235–95) используются для износостойких изделий и деталей, успешно эксплуатирующихся помимо прочих разновидностей износа, и при ударно – абразивном воздействии.

Воздействие ударно – абразивного износа испытывает широкая гамма деталей металлургического оборудования из перечисленных выше сталей и сплавов, в том числе и хромистых (последние – с определенными ограничениями ввиду их пониженной устойчивости против ударных воздействий при износе), предназначенного для измельчения и компактирования железорудного сырья, шихтовочных материалов доменного и сталеплавильного производства, а также других сырьевых и шихтовочных материалов. Так, для изготовления футеровок шаровых мельниц, испытывающих при эксплуатации ударно – абразивное воздействие от мелющих ша-

ров и потока частиц железорудного сырья, в настоящее время применяют стали марок 80ГСЛ, 110Г13Л (сталь Гадфильда), а также профильный прокат из стали марки 75Г2. Химические составы этих сталей, регламентируемые требованиями соответствующей указанной выше нормативной документации, приведены в табл.1.

Таблица 1. Химический состав износостойких марганцовистых сталей.

Марка стали	Массовая доля элементов, %*						
	С	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
				не более			
80ГСЛ	0,80–	1,00–	0,80–	0,05	0,05	0,50	0,50
	1,10	1,50	1,20	0,04	0,04	0,30	0,30
75Г2	0,65–	1,20–	0,17–	0,05	0,12	1,00	1,00
	0,75	1,80	0,37				
110Г13Л	0,90–	11,5–	0,80–				
	1,40	15,0	1,00				

*Примечание. Содержание меди в каждой из сталей – не более 0,30%.

Сталь перлитного класса 80ГСЛ относится к числу относительно недорогих экономнолегированных сталей. Однако достигаемые в этой стали показатели твердости (241 – 302НВ) и прочностных свойств являются, в целом, недостаточными для обеспечения высокой ударно – абразивной износостойкости футеровок.

Прокатанный профиль из стали 75Г2, применяемый для этой же цели, имеет те же недостатки, что и отливки из стали 80ГСЛ – пониженные показатели твердости и износостойкости, поскольку в нем в ходе охлаждения после прокатки формируется перлитная структура.

Достаточно широко применяемая для отливки футеровок шаровых мельниц сталь Гадфильда, характеризуется высокими показателями механических свойств (табл.2).

Таблица 2. Механические свойства и значения твердости отливок сечением 30 мм из стали 110Г13Л [23].

Марка стали	σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	Ψ , %	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²	НВ, кГ/мм ²
110Г13Л	360–	654–	34,0–	34,0–	260–	186–
	380	830	43,0	53,0	350	230

Обладая высоким комплексом механических свойств, ударной вязкости при удовлетворительной твердости, сталь Гадфильда, достаточно дорогая по стоимости из-за повышенного содержания марганца, не всегда удовлетворяет условиям эксплуатации, особенно в случае интенсивного массивованного воздействия частиц абразива. Определяемые в ГОСТ 977 износостойкие марганцовистые стали марок 110Г13Х2БРЛ, 110Г13ФТЛ,

130Г14ХМФАЛ, 120Г10ФЛ содержат большое количество дорогостоящих легирующих элементов, поэтому, как и для стали Гадфильда 110Г13Л, весьма актуальной является проблема их замены менее легированными сталями (сплавами) сплавами с высоким уровнем абразивной и ударно – абразивной износостойкости.

И.Н.Богачевым с сотрудниками в 60–х годах прошлого века был установлен факт чрезвычайно высокой износостойкости марганцовистых метастабильных сталей аустенитного класса при кавитационном изнашивании [7]. Этим была определена [7,8] новая область использования метастабильного аустенита для повышения сопротивления поверхности материалов контактному динамическому нагружению, которое реализуется при механических видах изнашивания, в частности, при абразивном износе. В дальнейшем, в 80–90–х годах усилиями многих исследователей были созданы марганцевые стали и сплавы с чрезвычайно высоким комплексом механических свойств и показателями износостойкости, которые обеспечивались особой составляющей их структуры – метастабильным аустенитом [9,10].

Увеличение износостойкости сталей со структурой метастабильного аустенита нашло достаточное обоснование с позиций энергетической теории в работе В.С.Попова с сотрудниками [11]. Основные положения этой теории хорошо согласуются с описанными выше последовательными стадиями трансформации структуры металла контактной поверхности в результате абразивного воздействия. Действительно, такого рода трансформация структуры контактной поверхности изнашиваемой детали (образца) осуществляется в результате передачи ей (ему) энергии от частиц абразива или от абразивного тела. Разрушение начинается в тот момент, когда в локальном объеме контактной поверхности происходит поглощение энергии предельной величины, определяемой силами связи в изнашиваемом металле и энергоемкостью происходящих в нем фазово–структурных превращений. Превращение $\gamma \rightarrow \alpha$ по мартенситному механизму, осуществляющееся при контактно–поверхностном слое при изнашивании, не требует очень больших затрат энергии, оно играет существенную роль в повышении износостойкости сплавов. Образование мартенсита деформации приводит к появлению внутренних напряжений сжатия в контактно – поверхностном объеме металла, охваченном мартенситным превращением. На их релаксацию расходуется дополнительная энергия абразивного взаимодействия, в результате чего снижается общий расход энергии на образование в контактно–поверхностном слое стали ячеистой дислокационной субструктуры с грубыми границами, а также на последующее развитие микро – и макротрещин, вызывающих разрушение металла. Это и служит причиной повышения износостойкости стали.

Принцип дисперсионно – композиционного упрочнения износостойких сталей и сплавов был сформулирован и развит в работах А.А.Жукова и Г.И.Сильмана [12,13]. Показан существенный вклад дисперсионно –

зернистых (гетерофазных) структурных композиций в повышение износостойкости сталей и сплавов, что фактически служит одним из наглядных примеров реализации принципа Шарпи. С точки зрения энергетического подхода в этом случае можно считать, что энергия абразивного взаимодействия в контактно – поверхностном слое изнашиваемого материала дополнительно аккумулируется на многочисленных границах раздела дисперсная частица / матрица. В результате этого последовательные стадии трансформации субструктуры в контактно – поверхностном слое, вызывающие разрушение металла, во времени существенно тормозятся, что и обеспечивает наблюдаемое повышение его износостойкости.

Принципы создания разнофункциональных сплавов и технологий деформационно – термической обработки (ДТО), учитывающих эффекты метастабильности и дисперсионно – композиционного упрочнения, обобщены в работах А.П.Чейляха [14,15]. Они предусматривают:

1. Создание и целенаправленное использование фазово – структурной метастабильности при испытаниях, ДТО и эксплуатации сталей и сплавов.
2. Управление кинетикой деформационно – фазовых превращений при испытаниях и эксплуатации сталей и сплавов.
3. Комплексное использование механизмов упрочнения и формирования специальных свойств материалов.
4. Комплексное легирование и взаимозаменяемость легирующих элементов при разработке новых метастабильных дисперсионно – упрочненных сталей и сплавов.

На основе этих принципов разработаны новые метастабильные марганецсодержащие сплавы нового поколения, в том числе с повышенной износостойкостью [16,17].

Результаты исследования. Необходимо отметить, что основной проблемой получения сталей и сплавов с метастабильным аустенитом является строгая регламентация химического состава и режимов ДТО, что не всегда осуществимо в условиях реального производства. Поэтому проводимые в последние годы исследования и разработки в области создания новых износостойких марганцовистых сталей и сплавов основываются на принципах зеренно–граничного, твердорастворного и дисперсно–композиционного упрочнения (т.е., в целом, комбинированного упрочнения) указанных материалов [18–20]. Достижимый при этом уровень абразивной (Ка) и ударно – абразивной (Ку–а) износостойкости марганцовистых сплавов в сравнении со сталью 110Г13Л приведен в табл.3. Для расширения базы сравнения в табл. 3 приведены также данные по износостойкости для сталей X12Ф1 и 75ХГСФ (последняя является аналогом стали 75Г2Ф [20]).

Из данных табл.3 следует, что структурные характеристики марганцовистых сплавов №1–3 не обеспечивают значительное повышение уровня износостойкости по сравнению со сталью 110Г13Л. Наиболее высоким

уровнем K_a и K_y –а характеризуется сталь X12Ф1. Однако, эта сталь содержит в своем составе такие дефицитные элементы, как хром и ванадий, что затрудняет ее широкое использование. Следовательно, в случае разработки вариантов более экономного легирования для повышения износостойкости сталей следует больше внимание уделить дисперсионно – композиционной составляющей их упрочнения.

Таблица 3. Достигнутые уровни относительной износостойкости сплавов (по данным [24 – 27]).

№ п/п	Марка сплава	K_a	K_y –а
1	120Г2С2Т	1,35	1,04
2	120Г10ФТЛ	1,48	1,40
3	130Г7ТЛ	2,10	–
4	220Х2Г4	2,80	0,60
5	X12Ф1	4,70	1,47
6	75ХГСФ	2,70	1,35

Известно [21–22], что в сплавах системы Fe–C–Mn в твердом состоянии в интервале концентрации углерода 2–2,5% и марганца 2–5% происходит превращение эвтектоидно – перитектоидного типа, обуславливающее формирование конечных структур с выражено дисперсными карбидами нескольких видов (Me_3C , $Me_{23}C_6$, Me_7C_3 и др.). Как указывалось выше, наличие большого количества дисперсных карбидных частиц является одним из факторов, способствующих дополнительной аккумуляции энергии, привносимой в контактно – поверхностный слой частицами (телами) износа, в результате чего достигается существенное торможение процессов структурной трансформации, вызывающей разрушение металла. Возможности эвтектоидно–перитектоидного превращения для получения высокодисперсной гетерофазной структуры с целью повышения износостойкости экономнолегированных марганцовистых сталей и сплавов до настоящего времени практически использовались.

Заключение. В связи с этим решение проблемных вопросов, связанных с установлением закономерностей фазово–структурных превращений и, в частности, эвтектоидно – перитектоидного превращения в сплавах системы Fe–C–Mn и в экономнолегированных марганцовистых сталях и сплавах, представляется актуальным. Решение этих проблемных вопросов позволит повысить абразивную и ударно – абразивную износостойкость марганцовистых сталей и сплавов путем формирования оптимальной структуры для данных разновидностей износа за счет экономного легирования и применения рациональных режимов ДТО.

1. *Меськин В.С.* Основы легирования стали. – М.: Металлургия, 1964. – 684с.
2. *Костецкий Б.И.* Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев: Техника, 1976. – 293с.

3. *Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И.* Механо – химические процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1972. – 170с.
4. *Любарский И.М., Палатник Л.С.* Металлофизика трения. – Серия «Успехи современного металловедения». – М.: Metallurgy, 1976. – 176с.
5. *Гарбар И.И.* Некоторые закономерности формирования структуры металла при трении // Трение и износ. – 1981. – 2. – № 6. – С.1076 – 1081.
6. *Аронов В.А., Бершадский Л.И., Костецкий Б.И.* Экспериментальное исследование физической модели нормального изнашивания металлов. // В кн.: Проблемы трения и изнашивания. – Киев: Техника, 1972. – Вып. 2. – С.83 – 89.
7. *Богачев И.Н., Миц Р.И.* Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов. – М. – Свердловск: Машгиз, 1959. – 111с.
8. *Богачев И.Н., Миц Р.И.* Повышение кавитационно–эрозионной стойкости деталей машин. – М.: Машиностроение, 1964. – 144с.
9. *Филитов М.А., Литвинов В.С., Немировский Ю.Р.* Стали с метастабильным аустенитом. – М.: Metallurgy, 1988. – 257с.
10. *Малинов Л.С.* Роль метастабильного аустенита у формуванні властивостей сталей та чавунів (огляд) // МОМ. – 1999. – № 1 – 2. – С. 40 – 41.
11. *Полов В.С., Брыков Н.Н., Дмитриченко Н.С.* Износостойкость прес–форм огнеупорного производства. – М.: Metallurgy, 1971. – 160с.
12. *Жуков А.А., Сильман Г.И., Фрольцов М.С.* Износостойкие отливки из комплексно – легированных белых чугунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 104с.
13. *Жуков А.А., Сильман Г.И.* Ванадиевые и некоторые другие легированные чугуны, отвечающие принципу Шарпи. // Чугунное литье. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 127 – 131.
14. *Чейлях А.П.* Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2003. – 212с.
15. *Чейлях А.П.* Создание и управление свойствами экономнолегиру–ванных метастабильных сплавов нового поколения. // Металл и литье Украины, 2005. – № 7 – 8. – С. 49 – 55.
16. *Чейлях А.П., Олейник И.М., Локшина Е.Б. и др.* // Металлы. – 2000. – №1. – с. 66 – 71.
17. *Малинов Л.С., Малинов В.Л.* Ударно – абразивная износостойкость марганцовистых сталей с пониженным содержанием марганца. // Metallurgical and metallurgical industry. – 1999. – № 6. – С. 39 – 42.
18. *Чейлях А.П.* Создание и управление свойствами экономнолегированных метастабильных сплавов нового поколения. // Металл и литье Украины, 2005. – №7–8. – С. 49–55.
19. *О влиянии фазовых превращений на износостойкость сплавов с метастабильным аустенитом / А.П.Чейлях, И.М.Олейник, Е.Б.Локшина и др.* // Металлы. – 2000. – №1. – С.66–71.
20. *Соколов О.Г., Кацов К.Б.* Железомарганцевые сплавы. – Киев: Наукова думка, 1982. – 212с.
21. *Сильман Г.И.* Сплавы системы Fe – С – Mn. Часть 4. – Особенности структурообразования в марганцевых и высокомарганцевых сталях // МиТОМ. – 2006. – № 1. – С. 3 – 7.
22. *Сильман Г.И.* Сплавы системы Fe–С–Mn. Часть 5. – Особенности структурообразования в высокомарганцевых чугунах // МиТОМ. – 2006. – № 3. – С.3–8.
23. *Марочник сталей и сплавов / В.Г.Сорокин, А.В.Волосникова, С.А.Вяткин и др.; Под общ. ред. Сорокина В.Г.* – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

24. Малинов Л.С., Малышева И.Е., Малинов В.Л. Использование эффекта самозакалки при нагружении, регулирование структуры и мартенситного превращения для повышения износостойкости экономнолегированных чугунов. // Металл и литье Украины. – 2001. – №10–11. – С.12–15.
25. Малинов Л.С., Солидор Н.А. Влияние термической обработки на структурные изменения и износостойкость высокоуглеродистых сталей, содержащих 7–10% Mn. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2006. – Вып.36. – Ч.2 – С.26–32.
26. В.Г. Ефременко. Развитие теоретических и технологических основ производства и упрочнения стальных мелющих шаров с целью повышения их качества и эксплуатационной долговечности. – Автореф. дисс. докт. техн. наук. – Мариуполь, 2005.
27. В.Г. Ефременко, Ф.К. Ткаченко, Г.Л. Еременко. Влияние фазового и структурного состояния сплавов на основе железа на износостойкость в условиях помола высокоабразивного материала // Вестник Приазовского гос. техн. университета. – Мариуполь: ПГТУ, 2003. – №13. – С.113–117.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. Г.В.Левченко