

ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА НАПЛАВОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ГИДРОАБРАЗИВНОМУ ИЗНОСУ

Гринь А. Г., Трембач Б. А., Трембач И. А.

Рассмотрено влияние отдельных групп факторов на различные виды разупрочнения. Исходя из влияния вида разупрочнения определены требования, которыми должен обладать наплавленный металл. Выяснено, что на стойкость наплавленного металла к гидроабразивному износу большое влияние имеет несущая среда; при этом несущая среда оказывает влияние как на тепловой режим в местах контакта поверхности и абразива, так и на коррозию поверхности износа. Разработана схема выбора комплекса свойств наплавочного материала в зависимости от условий эксплуатации. Для условий гидроабразивного износа следует рекомендовать мартенситные стали повышенной теплостойкости, обладающие высокими эксплуатационными свойствами и содержащие 3...5%Cr, а также другие упрочняющие фазы (карбонитриды, карбобориды, бориды и интерметаллиды).

Розглянуто вплив окремих груп факторів на різні види знеміцнення. Виходячи з впливу виду знеміцнення визначені вимоги, якими повинен володіти наплавлений метал. З'ясовано, що на стійкість наплавленого металу до гідроабразивного зносу великий вплив має середовище, яке несе абразивні частинки; при цьому середовище, яке несе абразивні частинки, впливає як на тепловий режим в місцях контакту поверхні з абразивом, так і на корозію поверхні зносу. Розроблено схему вибору комплексу властивостей наплавочного матеріалу в залежності від умов експлуатації. Для умов гідроабразивного зносу слід рекомендувати мартенситні сталі підвищеної теплостійкості, що мають підвищеними експлуатаційними властивостями і містять 3...5% Cr, а також інші зміцнюючі фази (карбонітриди, карбобориди, бориди та інтерметаліди).

The influence of individual factors on different types of weakening is considered. Based on the influence of weakening certain requirements, which are required for weld metal are defined. It is found that the carrier environment have big influence the weld metal resistance to hydroabrasive wear; while the carrier medium is on the thermal regime at the contact surface and the abrasive, and the corrosion surface wear. A scheme of selection of properties for surfacing material depending on operating conditions is developed. For the conditions of hydroabrasive wear martensitic steel with increased heat resistance should be advised, with high performance properties and comprising 3...5% Cr, as well as other reinforcing phases (carbonitrides, carboboridy, borides and intermetallic compounds).

Гринь А. Г.

канд. техн. наук, доц. каф. ОиТСП
ДГМА

Трембач Б. А.

sp@dgma.donetsk.ua
аспирант ДГМА, инж.-констр.
ПАО«НКМЗ»

Трембач И. А.

инж.-технол. ПАО«НКМЗ»

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;
ПАО«НКМЗ» – Публичное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск.

УДК 621.791.92

Гринь А. Г., Трембач Б. А., Трембач И. А.

ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА НАПЛАВОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ГИДРОАБРАЗИВНОМУ ИЗНОСУ

Горнообогатительные комбинаты (ГОКи) ежегодно расходуют тысячи тонн металла на изготовление запасных частей для замены быстроизнашивающихся деталей: рабочих органов дробильных механизмов, грязевых насосов, транспортирующих установок, рабочих органов промывочных и других машин. Их конкурентоспособность во многом зависит от технологических перерывов или аварийных остановок на плановый и аварийный ремонт, определяющих производительность и надежность используемого оборудования. Период работы оборудования зависит от ресурса всех деталей, входящих в него, но в первую очередь от деталей, подвергающихся интенсивному износу, что обуславливает короткий период эксплуатации. Таким образом, повышение срока эксплуатации быстро изнашиваемых деталей представляет большой интерес.

Применение износостойких наплавов для упрочнения рабочих поверхностей деталей, подвергаемых гидроабразивному износу, является одним из эффективных способов повышения срока их службы. Проблема выбора оптимального наплавочного материала, который бы обеспечил оптимальное повышение износостойкости при обеспечении минимальной стоимости, для конкретных условий гидроабразивного износа, является сложной и актуальной задачей. Поэтому большой интерес представляет разработка экономно легированных износостойких наплавочных материалов.

Целью данной статьи является выявление основных физико-химических свойств и микроструктуры наплавочного материала с учетом влияния на них основных разупрочняющих факторов в условиях гидроабразивного изнашивания, а также определение оптимальной системы легирования и соответствующей структуры.

В соответствии с [1, 2] наплавочные материалы классифицируют по характеру легирования и сочетания основных свойств после термообработки, по количеству упрочняющей фазы в стали и по уровню теплостойкости на следующие группы сталей:

- 1) с отсутствием упрочняющей фазы обладающие низкой теплостойкостью и имеющих аустенитную (стабильную форму) или мартенситную структуры, либо их сочетание;
- 2) с низким содержанием упрочняющей фазы (до 5%) и обладающие пониженной теплостойкостью;
- 3) со средним содержанием упрочняющей фазы (10...35%), имеющие мартенситную и аустенитно-мартенситную структуру и обладающие высокой теплостойкостью;
- 4) со значительным содержанием упрочняющей фазы (50...80%) и повышенной теплостойкостью.

Выбор наплавочного материала зависит от условий эксплуатации, определяющих вид износа. Поэтому при выборе наплавочного металла необходимо проводить тщательный анализ условий эксплуатации.

Гидроабразивный износ (ГАИ) обусловлен взаимодействием твердых минеральных частиц, которые перемещаются в потоке жидкости, с рабочей поверхности детали механизма или инструмента. Процесс гидродинамического износа находится под влиянием ряда внешних и внутренних факторов. По данным [3–6] эти факторы условно можно разделить на 3 группы:

- условия удара – угол атаки, скорость соударения частиц;

– характеристики несущей среды и частиц смеси – размера частиц, формы частиц, твердости частиц, вида частиц, вида несущей среды, химической активности среды количество частиц и распределение в потоке несущей среды;

– характеристики изнашиваемого материала – физико-механических характеристик и микроструктуры.

По своей природе процессы разупрочнения условно подразделяются на следующие виды [7]: механическое, тепловое и химическое. Рассмотрим влияние факторов гидроабразивного износа на виды разупрочнения.

Механическое разупрочнение происходит в результате деформации материала, приводящей к появлению и раскрытию микротрещин, к снижению сопротивляемости материала хрупкому разрушению, к появлению внутренних напряжений. Таким образом, в результате механического разупрочнения создаются условия образованию следующих видов разрушения поверхностного слоя [6, 7]:

1. Микрорезание – происходит при однократном приложении силы, осуществляемое твердым телом, имеющим большую твердость по сравнению с разрушаемым материалом.

2. Отрыв – происходит в результате хрупкого разрушения (отколов).

3. Усталостное разрушение материала – осуществляется в результате циклического нагружения микрообъемов поверхностного слоя и протекает при номинальных напряжениях ниже предела текучести.

4. Полидеформационный процесс разрушения – происходит в результате многократного деформирования материала, вызывающего остаточные искажения решетки. При этом постоянная потеря пластичности приводит к хрупкому состоянию, а также к росту напряжений.

При взаимодействии абразивных частиц с металлом рабочей поверхности эффект процесса зависит от механических свойств взаимодействующих материалов, радиуса контактной поверхности, нормальной нагрузки (величины давлений) и степени подвижности частицы в абразивной массе. В зависимости от уровня напряжений и частоты их повторений на поверхности материала могут протекать процессы разрушения вязкого, хрупкого или квазихрупкого характера. При малых удельных нагрузках, когда абразивные частицы слабо закреплены и могут перекатываться по поверхности, только малая часть их совершает микрорезание и пластическую деформацию металла [8], т.е. степень пластической деформации определяется уровнем напряжений, возникающих в контактной паре.

По данным [9] при ГАИ разрушение тонких слоев пластичных металлов происходит одновременно по двум схемам: постоянного во времени отделения очень малых частиц металла, соизмеримых с глубиной внедрения абразивных частиц в изнашиваемую поверхность (царапина, передеформирование), и периодического отделения более значительных по толщине микрослоев металла в пределах наиболее наклепанного слоя (малоцикловая усталость). При этом первоначальным актом всех видов разрушения поверхности металла является внедрение в него абразивной частицы. Механические свойства породы имеют существенное влияние на процесс износа рабочей поверхности инструмента и деталей механизмов.

Практический интерес представляет оценка влияния различных свойств наплавочных материалов на интенсивность ГАИ.

По данным Хрущёва М.М. и Бабичева М.А. на величину абразивного износа влияет величина отношения твердости абразивных частиц H_a к твердости изнашиваемой поверхности детали H_d (при отношении выше 5,5 повышение твердости материала не сопровождается увеличением износа). По данным [4] эта закономерность проявляется и при ГАИ, для которого критическое соотношение между твердостью частицы смеси (абразивных частиц) и твердостью детали составляет $H_{da} / H_d \approx 4$.

Однако этот показатель не учитывает огромное многообразие условий ГАИ, поэтому отношение твёрдостей абразива и металла имеет лишь ориентировочное значение, поскольку процесс изнашивания характеризуется огромным многообразием условий.

Большое влияние на стойкость против абразивного износа, а значит и ГАИ оказывает микротвердость упрочняющей фазы (карбидов, боридов и карбоборидов) и абразивных частиц. По данным работы [1], при микротвердости частиц упрочняющей фазы большей соответствующего значения абразивной частицы. Так, введение бора, повышая твердость карбидной фазы и основы сплава, может существенно повышать износостойкость.

В работе [4] для приближенной оценки износостойкости при ГАИ использовался критерий $W_{кр}$, одновременно учитывающий твердость и хрупкость (пластичность) материалов:

$$W_{кр} = HV_{30} a_n / \sqrt{\rho_m P}$$

где HV_{30} – твердость по Виккеру;

a_n – ударная вязкость (образцы без надреза);

ρ – плотность наплавленного материала;

P – наибольшее усилие разрушения призматических образцов при определении ударной вязкости.

Такой критерий учитывает большое количество факторов, поэтому в большей степени может быть пригоден для оценки износостойкости разрабатываемых материалов.

Испытания, проведенные в работе [4], засвидетельствовали, что Cr-Mn наплавки с нестабильными аустенитом слабо сопротивляются ГАИ, в то время как наплавки с мартенситной структурой обладают примерно в 2 раза более высокой износостойкостью. Данную закономерность подтверждают и более ранние публикации, в которых высоколегированные стали, имеющие аустенитную структуру (110Г13, 1Х18Н9Т) показали низкую износостойкость [10].

В условиях абразивного изнашивания стойкость металла определяется как количеством и строением карбидной фазы, так и состоянием основы. Наличие карбидов в мартенситной матрице приводит к повышению устойчивости в условиях абразивного износа частицами. Твердость и количество карбидов вносит значительный вклад в износостойкость металла [11].

Таким образом, при ГАИ наплавленный металл изнашиваемой поверхности должен иметь твердые составляющие (карбиды, карбобориды, интерметаллиды) внедренные в твердую матрицу (мартенситной либо ледебуритной структурой) для сопротивления процессам микрорезания и полидеформационного разрушений, и обладать достаточными пластическими свойствами для сопротивления отрыву и усталостному разрушению.

Тепловое разупрочнение. В процессе взаимодействия абразивных тел с поверхностью детали работа упругой деформации в местах каждого единичного контакта полностью переходит в теплоту, вызывая на фактической площади контакта (в слое толщиной несколько микрометров) мгновенные скачки температуры. [9]. Нагрев приводит к снижению прочности и твердости, что в конечном итоге приводит к интенсификации абразивного изнашивания [7, 12], т.е. происходит тепловое разупрочнение.

На температуры в месте контакта также оказывает влияние несущая абразивные частицы среда (зачастую вода с примесями), а именно ее температура и теплопроводность, что в ряде случаев может существенно изменить износостойкость сталей, сплавов и упрочняющих покрытий. При ГАИ хотя контактная температура в локальных объемах может достигать значительных величин, теплота быстро отводится в холодные объемы металла и изнашиваемую среду в соответствии с их теплопроводностью [7].

При больших энергиях ударов или скоростях и усилий трения абразива о поверхность изнашивания тепловое разупрочнение будет также связано со структурными и фазовыми изменениями материала (самоотпуска закаленной стали, выделения мягких структурных составляющих) [7]. Поэтому одним из средств повышения износостойкости может служить выбор теплостойких материалов, у которых при рабочих температурных режимах не изме-

няются микроструктура и механические свойства. Таким образом, представляет интерес исследование тепловых (энергетических) режимов взаимодействия абразивных частиц с изнашиваемой поверхностью в каждом конкретном случае.

При достаточном уровне теплостойкости материала изнашиваемой поверхности решающую роль в разрушении твердых тел будут играть пластические деформации, всегда предшествующие разрушению, т.е. сопротивление механическому разупрочнению. Пластическая деформация увеличивает физико-химическую активность поверхностных слоев, от которой зависит строение и свойства граничных слоев, протекание явлений физической и химической адсорбции [8], что усиливает действие еще одного вида разупрочнения – химического.

Химическое разупрочнение характеризуется образованием хрупких и непрочных продуктов взаимодействия изнашиваемого материала с внешней средой (газовой или водяной), чаще всего в результате окисления.

По данным работы [7] в условиях гидроабразивного изнашивания среда может оказывать сильное разупрочняющее действие на поверхностный слой детали и являться, в ряде случаев, основным фактором определяющим механизм разрушения контактирующей поверхности. Так, при мокром измельчении в мельнице [13] на долю коррозионного износа измельчающих тел и футеровок мельниц приходится 40–90% от общего износа металла. Коррозия осуществлялась за счет присутствующих в жидкой фазе пульпы кислорода, растворенного в газообразном состоянии, хлоридов, карбонатов и других веществ. Роль абразивных частиц при этом сводилась только к удалению образующихся продуктов коррозии, обнажению химически активной поверхности металла. При этом может происходить активное вымывание мягких составляющих сплава и обнажение карбидных зерен, т.е. осуществляется избирательное разрушение структурных элементов.

Кроме того, при деформации металла образуются клиновидной формы микротрещины вследствие дефектов кристаллической решетки и ряда других неоднородностей. Развитие таких трещин может быть ускорено адсорбцией из внешней среды (эффекта Ребиндера). Таким образом, при прочих равных условиях, среда облегчает процесс поверхностного разрушения и увеличивает интенсивность изнашивания [14, 15].

Проведенные ранее [16, 17] исследование внешнего вида изношенных башмаков (рис.1) и анализ процесса ГАИ рабочей поверхности башмака корытной мойки, показали, что неравномерный износ его поверхности вызван изменением давления абразивной массы, времени контакта с абразивной массой, коррозионном воздействии несущей среды.



Рис. 1. Вид изношенного башмака

Характеристикой материала может служить стойкость к коррозии при невысоких температурах в воде. Образование на поверхности металла защитной пленки повышает стойкость поверхностного слоя к механическому износу [16, 17].

Таким образом, коррозия может играть существенную роль при ГАИ. Поэтому наплавленный металл должен обладать достаточной коррозионной стойкостью. Повысить стойкость против коррозии можно введением элементов (Cr, Al, Si и др.), способствующих образованию на его поверхности прочной оксидной пленки.

На основе проведенного анализа была составлена структурная схема выбора наплавочного материала, позволяющая в первом приближении определить требуемые свойства, которыми должен обладать наплавочный материал (табл.1).

Таблица 1

Структурная схема выбора наплавочного материала при ГАИ

№ П/п	Вид разупрочнения	Параметр	Величина
1	Механическое	Отношение твердости металла (Нм) к твердости абразива (На)	$H_m \geq 4 \cdot H_a$
2		Величины микротвердости частиц упрочняющей фазы (МНу) относительно микротвердости абразива (МНа)	$M_{Nu} \geq M_{Na}$
3		Соотношение прочностных и пластических свойств металла [4]	$W_{kp} = HV_{30} a_n / \sqrt{\rho_m P}$
4	Тепловое	Теплостойкость материала, то есть способностью сохранять твердость при нагреве (ГНм)	$G_{Hm}(^{\circ}C) > H_a$
5	Химическое	Отношение твердости продуктов коррозии к твердости абразива	$M_{Hk} \geq M_{Ha}$

Из всего выше сказанного для условий ГАИ следует рекомендовать стали повышенной теплостойкости и обладающие высокими эксплуатационными свойствами (100X3M2ГФТР, 70X4M3Г2ФТР [18], 85X8Г4СФЮТЗР, 85X8Г4СФЮ [4], 16X4M2Г1НС [5], 4X5МФС и другие), которые содержат не меньше 3...5% хрома.

Таким образом, причиной недостаточной работоспособности оборудования являются тяжелые условия эксплуатации, когда материал подвергается комплексному воздействию: механическому (воздействию твердых абразивных частиц), тепловому и воздействию коррозионно-активных сред (несущей среды). Поэтому важно правильно выбирать материал с учетом специфики эксплуатации для каждого конкретного условия, а также разрабатывать новые материалы, сочетающие высокую коррозионную стойкость, тепловую прочность и износостойкость.

ВЫВОДЫ

1. В процессе гидроабразивного износа рабочие поверхности подвержены тепловому, химическому и механическому разупрочнению. Представляет интерес комплексное взаимодействие абразивных частиц с изнашиваемой поверхностью в каждом конкретном случае эксплуатации различного оборудования горнообогатительных комбинатов.

2. Исходя из широкого спектра гранулометрического и физико-механического состава минералов, возникает необходимость в проведении исследований влияния различных составляющих минералов на интенсивность изнашивания рабочих органов оборудования.

3. При выборе наплавочного материала, работающего в условиях гидроабразивного износа, необходимо учитывать комплекс факторов.

4. Разработана схема выбора комплекса свойств наплавочного материала в зависимости от условий эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов С. Н. Износостойкость наплавленного металла рабочих органов строительного дорожно-транспортного оборудования / С. Н. Попов // Автоматическая сварка. – 2000. – №8. – С.15–19.
2. Позняк Л. А. Штамповые стали / Л. А. Позняк, Ю. М. Скрынченко, С. И. Тишаев. – М.: Машиностроение, 1980. – 244 с.
3. Suchanek J. Erosive and hydroabrasive resistance of hardfacing materials / J. Suchanek, J. Smrkovsky, P. Bias // Wear. – 1999. – Apr. – Vol. 233–235. – P. 229–236.
4. Погодаев Л. И. Повышение долговечности грунтовых насосов / Л. И. Погодаев, С.Д. Донских [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://rosgorprom.com/images/_sb2011_pdf/Sb2011_33.pdf.
5. Investigation on wear by slurry abrasion of hardfaced low alloy steel / Sanjay G. Sapate, Jagdish Raut // AMAE Int.J. on Production and Industrial Engineering. – Vol.02. – No.01. – April 2012. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://content.yudu.com/Library/A246dv/InvestigationsonWear/resources/5.htm>.
6. Gahr K.-H. Microstructure and Wear of Materials, Elsevier, Amsterdam, 1987.
7. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при изнашивании / М. М. Тененбаум. – М.: Машиностроение. – 1966.
8. Войнов Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия / Б. А. Войнов. – М.: Машиностроение, 1980. – 120 с., ил.
9. Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин. – Запорожье.: Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2000. – 394 с.
10. Гомольская З. М. Износостойкость сталей в условиях гидроабразивного износа / З.М. Гомольская, В.М. Гутерман // Труды института ВНИИПТУУглемаи / Износостойкие материалы для деталей горных машин и технологические методы повышения срока их службы – Вып. II. – М.: Недра, 1966. – С. 3–33.
11. Heat and Thermochemical Treatment of Structural and Tool Steels / Aneta BARTKOWSKA, Mikołaj POPŁAWSKI, Damian PRZESTACKI // Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. – 2015. – Vol. 60(2). – [Электронный ресурс] – http://www.pimr.poznan.pl/biul/2015_2_BPP.pdf.
12. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
13. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. – М.: Недра, 1982.
14. Износ деталей сельскохозяйственных машин / М.М. Севернев, Г.П. Каплун, В.А. Короткевич, С.Н. Кот, П.Ф. Куреев, Н.Н. Подлекарев, И.А. Синявский. – Л.: Колос, 1972. – 288 с., с ил.
15. Попов С.Н. Анализ особенностей поверхностного взаимодействия пар трения в условиях сложно-напряженного контакта / С.Н. Попов, А.А. Грицкевич // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2016. – №2(38). – С. 196–201.
16. Гринь А.Г. Анализ условий эксплуатации башмаков корытной мойки / А. Г. Гринь, Б. А. Трембач, И. А. Трембач // Сварка и родственные технологии, перспективы развития. Материалы IV международной научно-технической конференции. 04-07 октября 2016г.: Под общ. ред. д-ра техн. наук Н.А. Макаренко. – Краматорск : ДГМА, 2016. – 140 с.
17. Гринь А.Г. Моделирование силового воздействия породы на башмак корытной мойки / А.Г. Гринь, Б.А. Трембач, И.А. Трембач // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2016. – №2(38). – С. 96–100.
18. Исследование и разработка наплавочных сплавов, стойких в условиях абразивного воздействия, на основе структурно-энергетического подхода [Электронный ресурс] / А. М. Фивейский. – Екатеринбург, 2004. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/issledovanie-i-razrabotka-naplavochnykh-splavov-stoikikh-v-usloviyakh-abrazivnogo-vozdeystviya#ixzz4NMTX4KW5>.