4. *Greenberg B.A., Ivanov M.A., Rybin V.V., et al.* The problem of intermixing of metals possessing no mutual solubility upon explosion welding // Materials Characterization. 2013. V.75. P. 51–62.

БЛАГОДАРНОСТИ:

Работа выполнена при финансовой поддержке УрО РАН (проекты № 12-2-006-УТ, 12-У-2-1011) и проекта фундаментальных исследований № 12-2-2-007-АРКТИКА.

Электронно-микроскопические исследования проведены в Центре коллективного пользования электронной микроскопии УрО РАН.

Поступила в редакцию 10 апреля 2013 г.

Greenberg B.A., Ivanov M.A., Plotnikov A.V. INTERFACE UPON EXPLOSION WELDING: FLYING AWAY OF PARTICLES, LOCAL MELTING, INTERMIXING

The fragmentation upon explosion welding is believed to be analogue to fragmentation upon explosion studied by Mott. The flying away of particles is remarkably similar to flying away of fragments upon explosion, but of another scale. The flying away of fragments upon explosion occurs in open space, as opposed to flying away of particles upon welding which occurs in close space between plates.

Key words: explosion welding; fragmentation; melting; intermixing; mutual solubility; colloidal solution.

УДК 620.186.4

МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ МЕХАНИЗМОВ ИЗНАШИВАНИЯ, ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С НИЗКОЙ ЭДУ

© Д.Н. Тагильцева, Н.А. Наркевич, И.А. Шулепов, И.В. Волошин

Ключевые слова: аустенит; микрорезание; пластическое оттеснение; трещиностойкость.

Исследованы структура и особенности разрушения поверхностей трения стали 110Г13 и покрытия, полученного электронно-лучевой наплавкой порошка азотистой стали 60Х24АГ16 при высоконагруженном абразивном изнашивании.

Наиболее перспективны для работы в условиях высоконагруженного абразивного воздействия (в горнодобывающей промышленности) материалы, имеющие аустенитную структуру с низкой энергией дефекта упаковки (ЭДУ) [1]. Повышенная износостойкость таких материалов отличается тем, что, не обладая высокой исходной твердостью, они упрочняются в процессе трения. Происходящие при этом локальные структурно-фазовые превращения приводят к изменению таких макрохарактеристик поверхностного слоя, как сопротивление сдвигу, коэффициент трения [2]. Исследование на разных масштабных уровнях механизмов изнашивания, а также деформации и разрушения поверхности трения дает наиболее полную картину о процессах, свидетельствующих о развитии релаксационных процессов в зонах контакта трущихся тел, предотвращающих разрушение (износ).

Цель работы – многоуровневое исследование механизмов изнашивания, деформации и разрушения поверхностного слоя при трении материалов с низкой ЭДУ при высоконагруженном абразивном воздействии.

Исследовали сталь 110Г13 и покрытие, наплавленное по электронно-лучевой технологии с использованием порошка азотистой стали 60Х24АГ16. Покрытие толщиной 2,5–3 мм наплавляли за несколько проходов на пластину из стали 65Г размерами 20×100×8 мм. Трибологические испытания проводили при комнатной температуре на установке High-temperature Tribometr с постоянной величиной пути трения, равной 75 м (6000 об.). В качестве контртела применяли шарик диаметром 3 мм из твердого сплава ВК6, скользящий со скоростью 3, 6 и 10 см/с по круговой траектории диаметром 4 мм, имитируя абразивное воздействие крупной твердой частицы. Усилие, с которым шарик прижимали к испытываемой поверхности, варьировали в диапазоне P = 1–10 Н. Топографию дорожек износа исследовали на лазерном профилометре Micro Measure 3D station. Структуру поверхностей трения исследовали на растровом электронном микроскопе Philips SEM-515 и оптическом микроскопе Axiovert 25CA. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3М при нагрузке 30 г с усреднением результатов измерений по 15 отпечаткам пирамиды Виккерса.

В результате многократно повторяющегося скольжения контртела по круговой траектории формируется дорожка трения (трек) с упрочненным поверхностным слоем. Толщина упрочненного слоя под треком после испытаний со скоростью скольжения шарика 10 см/с и нагрузкой 10 Н в стали 110Г13 в 2 раза больше, чем в азотистом аустените наплавленного покрытия (рис. 1а, б.)

Существенно отличаются и металлографические структуры деформированных трением слоев исследуемых материалов (рис. 1в, г). Для азотистого покрытия, содержащего в структуре карбиды хрома Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$, характерно изменение формы зерен в направлении скольжения шарика из ВК6, в то время как в стали 110Г13 наблюдается слой материала толщиной ≈20 мкм с повышенной травимостью.

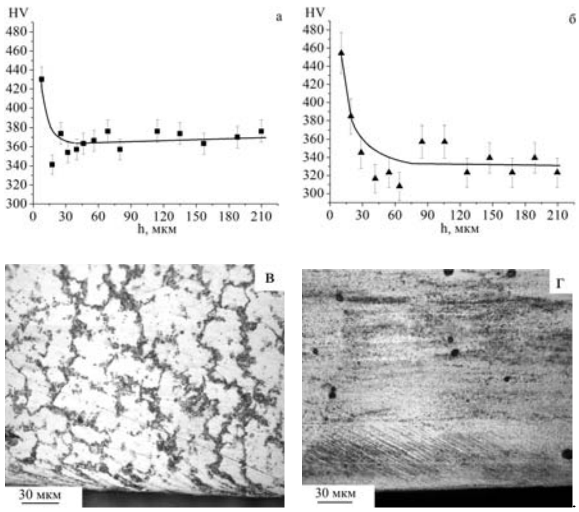

Рис. 1. Распределение микротвердости – а, б и структура – в, г под треками на покрытии, наплавленном порошком стали 60Х24АГ16 – а, в и стали 110Г13 – б, г

Наряду со способностью к упрочнению при деформировании (изнашивании) преимущество имеет тот материал, который демонстрирует наилучшую релаксационную способность, зависящую от величины и скорости приложения нагрузки. При изменении нагрузки в интервале 1–10 Н и скорости скольжения 3 см/с пластические сдвиги в поверхности трения наплавленного азотистого покрытия локализуются на микромасштабном уровне и релаксируют, благодаря структурно-фазовым трансформациям, фрагментированию и разрушению поверхности трения по адгезионному механизму и микрорезанию (рис. 2).

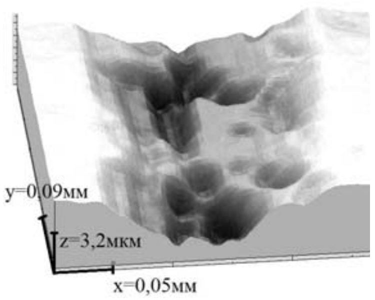

Рис. 2. Фрагмент поверхности трения азотистого покрытия, наплавленного порошком стали 60Х24АГ16, после испытаний с нагрузкой 1 Н при скорости скольжения шарика ВК6 3 см/с

При сочетании повышенной нагрузки с повышенной скоростью скольжения начинают действовать механизмы релаксации напряжений мезоуровня, при которых происходит интенсивное деформирование поверхностного слоя и его сдвиг относительно нижележащих слоев, которые не подвергаются фрикционным нагрузкам.

Пластическое оттеснение материала покрытия на мезомасштабном уровне начинает проявляться, когда локальные внутризеренные структурно-фазовые превращения не способны релаксировать сдвиговые напряжения в силу их действия с повышенной скоростью 6 и 10 см/с (рис. 3а). В стали 110Г13 подобный мезорельеф не наблюдается (рис. 3б).

Электронно-микроскопические исследования поверхностей трения свидетельствуют о том, что в стали 110Г13 повышение скорости деформирования приводит к интенсивному растрескиванию изнашиваемой поверхности с образованием крупных очагов усталостного разрушения (рис. 3г). Для азотистого покрытия, содержащего в структуре до 5 % об. карбидов хрома, характерно сохранение при трении с максимальными скоростью 10 см/с и нагрузкой 10 Н следов вязкого разрушения с выкрашиванием карбидных частиц Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$ (рис. 3в). Сталь 110Г13 обладает низкой теплопроводностью λ = 8,6–9,5 Вт/м·К [3]. Из [4] следует, что коэффициент теплопроводности стали с аустенитной структурой 12Х18АГ18 λ = 10 Вт/м·К. Полагаем, что эта величина несущественно отличается для исследуемого азотистого покрытия, во всяком случае, она не меньше, т. к. карбиды хрома, присутствующие в структуре азотистого покрытия, обладают теплопроводностью 13–18 Вт/м·К [5]. Из-за низкой теплопроводности исследуемые материалы испытывают при изнашивании фрикционный нагрев и окисление. В большей степени образованию окисной пленки подвержена сталь 110Г13, что является одним из факторов интенсивного разрушения поверхности трения.

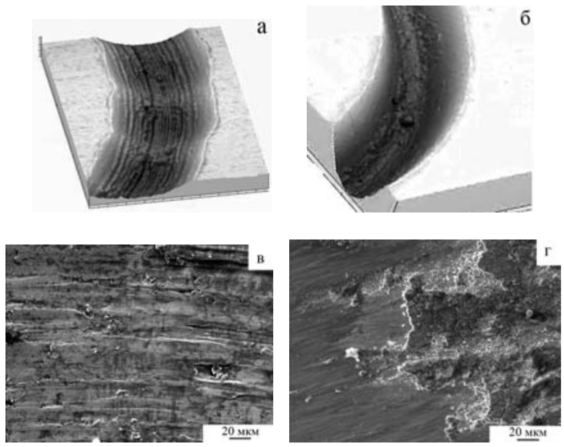

Рис. 3. Топографические картины поверхностей трения и электронно-микроскопические изображения структур поверхности трения покрытия, наплавленного порошком стали 60Х24АГ16, – а, в и стали 110Г13 – б, г, испытанных с нагрузкой 10 Н и скорости скольжения 10 см/с

Наличие низкого коэффициента трения и малого сопротивления активного поверхностного слоя сдвигу в направлении действия силы трения у азотистых аустенитных сталей было отмечено в работах [2, 6, 7], в которых указанные трибологические свойства связывают с развитием в азотистом аустените планарного скольжения и с сокращением числа действующих систем скольжения в азотистом аустените. На наш взгляд, природа такого поведения азотистого аустенита в условиях фрикционного нагружения заключается в способности структуры релаксировать внешние механические напряжения локальными структурно-фазовыми превращениями, в частности превращением аустенита в ε-мартенсит. Уменьшение коэффициента трения и сопротивления сдвигу при высоких удельных нагрузках свидетельствует об изменении механизма деформации поверхностного слоя покрытия при фрикционном нагружении от двойникования и скольжения до локальных фазовых превращений с образованием пластин гексагонального ε-мартенсита высокой дисперсности (рис. 4).

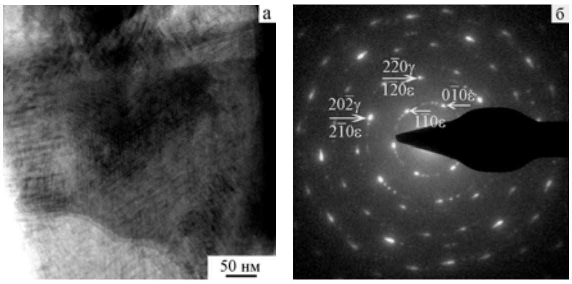

Рис. 4. Структура продукта износа азотистого покрытия – а и электронограмма – б. Ось зоны аустенита $[111]_А \| [111]_{ДД} \| [001]_ε$

Вероятно, фазовые превращения в поверхностном слое азотистого покрытия активно развиваются лишь при достаточно высоких удельных нагрузках.

Сопоставление экспериментальных данных, полученных при исследовании механизмов изнашивания и разрушения поверхностей трения материалов с аустенитной структурой и низкой ЭДУ на разных масштабных уровнях, выявило следующее.

1. При трении с высокими удельными нагрузками для азотистого покрытия характерно пластическое оттеснение материала рабочей поверхности, а для стали 110Г13 – усталостный механизм изнашивания.

2. Развитию оттеснения в азотистом покрытии способствует образование гексагонального ε-мартенсита, в то время как в стали 110Г13 при трении скольжения по данным [8] фазовые превращения не идут.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Наркевич Н.А., Иванова Е.А., Тагильцева Д.Н.* Напряженно-деформированное состояние покрытия 60Х24АГ16, полученного электронно-лучевой наплавкой, и его фрикционное упрочнение // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 8. С. 26-31.
2. *Наркевич Н.А., Тагильцева Д.Н., Дураков В.Г., Шулепов И.А., Иванова Е.А.* Структура и износостойкость электронно-лучевых азотистых покрытий // Трение и износ. 2012. Т. 33. № 5. С. 512-520.
3. *Шмыков А.А.* Справочник термиста. М.: Машгиз, 1961. 392 с.
4. *Ригина Л.Г.* Исследование и разработка технологии ЭШП и ЭШПД хромомарганцевых сталей, легированных азотом: автореф. дис. … канд. тех. наук. М.: ЦНИИТмаш, 2005. 26 с.
5. *Бабичев А.П. и др.* Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
6. *Коршунов Л.Г., Гойхенберг Ю.Н., Черненко Н.Л.* Влияние прерывистого распада на трибологические свойства высокоазотистой хромомарганцевой аустенитной стали Г22Х18А0.80 // ФММ. 2000. Т. 90. № 2. С. 107-114.
7. *Коршунов Л.Г., Черненко Н.Л., Терещенко Н.А., Уваров А.И.* Влияние старения на трибологические и механические свойства азотсодержащей нержавеющей аустенитной стали // ФММ. 2005. Т. 99. № 1. С. 99-109.
8. *Филиппов М.А., Буров С.В., Легчило В.В., Антонов С.В., Мухаметярова Е.Н.* Использование критерия Б.Н. Хрущова для оценки абразивной стойкости со структурой метастабильного аустенита // Трение, износ и смазка. Т. 13. № 46. URL: http://www.tribo.ru. Загл. с экрана.

Поступила в редакцию 10 апреля 2013 г.

Tagiltseva D.N., Narkevich N.A., Shulepov I.A., Voloshin I.V. MULTILAYER APPROACH TO INVESTIGATION OF WEAR, DEFORMATION AND DESTRUCTION MECHANISMS OF WEAR SURFACE OF MATERIALS WITH LOW PACKING DEFECT ENERGY

Structure and specificity of wear surface destruction of steel 1,1C–13Mn and electron-beam nitrogen coating 0,6C–24Cr–1N–16Mn are investigated under high-load abrasive wearing.

Key words: austenite; micro-cutting; plastic edging; fracture strength.

УДК 669.245.26

РОЛЬ ПОКРЫТИЙ В ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© В.П. Безбородов

Ключевые слова: покрытие; напыление; оплавление; свойство; структура; прочность; трещина; разрушение; композиция.

Исследовано влияние структуры и свойств композиций с покрытиями на процессы их деформации и разрушения. Установлено влияние компонентов композиции – покрытия и основы на характер деформации и разрушения. Широкое применение покрытий из никелевых сплавов при восстановлении деталей машин и оборудования требует решения многих вопросов, в т. ч. связанных с определением прочностных свойств композиций. В реальных условиях эксплуатации многие детали машин и оборудования работают, как правило, при совместном нагружении покрытия и основы за счет одновременного действия различных видов нагрузок. Поэтому для предотвращения растрескивания покрытий и предупреждения преждевременного разрушения изделия необходимо знать и учитывать уровень предельных нагрузок, которые может выдержать композиция с покрытием.

Цель работы – исследовать влияние нанесенных покрытий на процессы деформации и разрушения композиций «покрытие – основа».

Методика исследования. Влияние деформации на свойства и структуру композиций изучалось с помощью диаграмм растяжения образцов, по характеру их