

PACS numbers: 06.60.Vz, 62.20.Qr, 68.35.Ct, 81.15.Cd, 81.20.Vj, 81.40.Pq, 81.65.Ps

Триботехнические свойства азотистых марганцевых сталей в условиях трения качения при добавлении в зону контакта порошков $(\text{GaSe})_x\text{In}_{1-x}$

А. А. Балицкий, В. А. Колесников*, О. Б. Вус**

Львовский национальный университет им. Ивана Франко,
ул. Драгоманова, 50,
79005 Львов, Украина

*Краснодонский факультет инженерии и менеджмента
Восточноукраинского национального университета им. В. Даля,
ул. Первоконная, 52,
94400 Краснодон, Луганская область, Украина

**Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины,
ул. Научная, 5,
79601 Львов, Украина

Исследована износостойкость высокоазотистых марганцевых сталей в паре со сталью 1.0503 в условиях сухого трения качения (с 15% проскальзываем) при добавлении в контакт слоистых порошковых материалов из сплавов $(\text{GaSe})_{0,75}\text{In}_{0,25}$, $(\text{GaSe})_{0,25}\text{In}_{0,75}$. Выявлено, что в эвтектическом сплаве $(\text{GaSe})_{0,25}\text{In}_{0,75}$ в процессе трения происходят фазовые превращения с образованием на поверхности трения новых металлосодержащих оксидных фаз. Добавление в зону контакта трибосопряжения порошков сплавов $(\text{GaSe})_x\text{In}_{1-x}$ позволяет значительно снизить интенсивность износа стальных поверхностей за счет образования защитной пленки.

Досліджено зносостійкість високоазотних марганевих криць у парі з крицею 1.0503 в умовах сухого тертя кочення (з 15% проковзуванням) при додаванні в контакт шаруватих порошкових матеріалів зі стопів $(\text{GaSe})_{0,75}\text{In}_{0,25}$, $(\text{GaSe})_{0,25}\text{In}_{0,75}$. Виявлено, що в евтектичному стопі $(\text{GaSe})_{0,25}\text{In}_{0,75}$ в процесі тертя відбуваються фазові перетворення з утворенням на поверхні тертя нових металовмісних оксидних фаз. Додавання в зону контакту трибоспряження порошків стопів $(\text{GaSe})_x\text{In}_{1-x}$ дозволяє значно знизити інтенсивність зношування крицевих поверхонь за рахунок утворення захисної плівки.

Wear resistance of high-nitrogen manganese steels together with 1.0503 steel at dry friction (with 15% slippage) with addition of the layered powder

materials (of $(\text{GaSe})_{0.75}\text{In}_{0.25}$ and $(\text{GaSe})_{0.25}\text{In}_{0.75}$ alloys) to the contact is investigated. As revealed, the phase transformations with formation of metal-containing oxide phases take place in eutectic $(\text{GaSe})_{0.25}\text{In}_{0.75}$ alloy during friction. Additions of the powdered $(\text{GaSe})_x\text{In}_{1-x}$ alloys to the contact and tribojunction makes possible to decrease sufficiently the wear intensity of steel surfaces due to formation of the protective film.

Ключевые слова: износостойкость, порошки слоистых сплавов, высокоазотистые стали, защитные пленки.

(Получено 21 мая 2009 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Новые конструкционные и функциональные материалы должны обладать одновременно комплексом эксплуатационных свойств (высокими физико-механическими свойствами, трещиностойкостью, коррозионной стойкостью, износостойкостью, хорошей обрабатываемостью и свариваемостью). Проведенные ранее исследования позволили установить, что высокоазотистые марганцевые стали обладают высокой водородостойкостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью [1–5]. Однако систематические данные об их триботехнических свойствах практически отсутствуют, особенно в связи с перспективой применения наноструктурных смазочных материалов [6]. Детали современных конструкций и устройств изнашиваются значительно меньше, если трение осуществляется не по ювеноально гладким поверхностям, а по поверхностям, на которых имеется слой смазки. Это может быть граничное или жидкостное трение. Однако применение смазочных жидкостей накладывает определенные сложности при создании машин и механизмов, так как необходимо предусмотреть гидросистему (состоящую из целого комплекса дополнительных устройств: фильтров, насосов, клапанов, труб), которая должна обеспечивать бесперебойную подачу смазочной жидкости. В процессе эксплуатации, в результате протекания необратимых процессов старения, свойства масел и смазок существенно изменяются, в том числе и с выделением водорода. Поэтому перспективным является применение новых смазочных материалов, способных успешно адаптироваться к возникающим условиям в трибосистеме.

Развитие водородной энергетики, космической и глубоководной техники вызывает необходимость применения принципиально новых смазочных материалов. В глубоком вакууме открытые поверхности тел «обезгаживаются» (в том числе и обезводородиваются), а смазка и другие временные покрытия испаряются. При этом коэффициент трения между поверхностями может значительно возра-

тять и происходить их холодное сваривание [7–10]. Следовательно, материалы, применяемые в таких условиях должны обладать высоким сопротивлением к схватыванию. Учитывая, что вакуум обнажает трущиеся поверхности, такие материалы должны иметь высокую степень адгезионной составляющей. Выявленная аномально высокая способность высокоазотистых марганцевых сталей в условиях «масленного голодания» удерживать на своей поверхности слой из остатков смазочного материала имеет решающее значение [2]. Известно, что при попадании графита между трущимися поверхностями уменьшается интенсивность износа. Во многом это объясняется слоистой структурой графита. Однако применение графита в качестве чистой смазки — сложная процедура из-за больших его потерь и недолговечности смазывающего действия этого материала, в связи с чем, возникает необходимость периодически пополнять графитом трибосопряжение. Графит также не может применяться в качестве смазочного материала в вакууме (порядка 10^{-6} Па), потому что его смазывающая способность зависит от адсорбированной влаги, которая в вакууме полностью удаляется. Смазывающая способность графита зависит также от присутствия окисной пленки на поверхности. Слоистый дисульфид молибдена также не устойчив в вакууме. Ранее в качестве сухой смазки предлагались следующие диселениды: CrSe_2 , MoSe_2 , WSe_2 , VSe_2 , NbSe_2 , TaSe_2 , TiSe_2 , ZrSe_2 , HfSe_2 , ReSe_2 , ThSe_2 и USe_2 . Селениды MoSe_2 , WSe_2 , NbSe_2 уже успешно применяют в качестве ингредиентов самосмазывающих материалов, предназначенных для работы на трущихся деталях в ультравысоком вакууме [11].

В качестве перспективных смазочных материалов в газообразном водороде можно рассматривать соединения типа $A^{\text{III}}B^{\text{VI}}$, имеющие слоистую структуру (в частности GaSe , InSe , GaTe) и способность интеркаляции.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Химический состав и свойства исследуемых сталей приведены в таблице. Сталь P900 характеризуется аустенитной микроструктурой (рис. 1, а).

Трибологические испытания проводили на стационарной лабораторной установке СМТ-1 (2070). Скорость скольжения нижнего ролика составляла 1480 об/мин, а верхнего — 1240 об/мин (проскальзывание составляло 15%). Нижний ролик (диаметр 42 мм), изготовлен из стали 1.0503 (аналог стали 45 (Ст. 45), Ск 45 (DIN), 1045 (ASTM)) (60 HRC). А верхний ролик — из высокоазотистой стали P900 (Krupp Co) (аналог стали 12X18AG18Ш) твердостью 55 HRC. Линейная скорость верхнего ролика составляла 2,27 м/с, а нижнего — 3,08 м/с.

Химический состав исследуемых сталей.

№ п/п	Марка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	N
1	P900	0,08	0,38	19,0	17,8	1,18	0,13	0,12	0,58
2	1.0503*	0,42–0,5	0,17–0,37	—	0,25	0,25	—	—	—

*S до 0,04%, P — до 0,035, Cu до — 0,25, As — до 0,08%.

Ширина роликов составляла 10 мм. Потери массы образцов определяли взвешиваем на аналитических весах RADWAG WAA 160 с точностью 0,0001 г. Структуру сталей исследовали металлографическим, рентгеновским и электронно-микроскопическим методами анализа. Структурно-фазовый анализ проводили на установке ДРОН-3 (CuK_α -излучение).

Исходные монокристаллы GaSe и сплавы на их основе выращивали методом Бриджмена. Перед подачей в трибосопряжение порошков сплавов на основе $A^{\text{III}}B^{\text{VI}}$ поверхность роликов тщательно протирали в планетарной мельнице, а потом согласно схеме (представленной на рис. 1, б) подавали в трибосопряжение.

Для получения двумерных изображений поверхности использован Profilometr Dektak 6M (Stylus Profiler), а для получения трехмерных изображений поверхности — NanoScope IVa (Veeco) (Technical

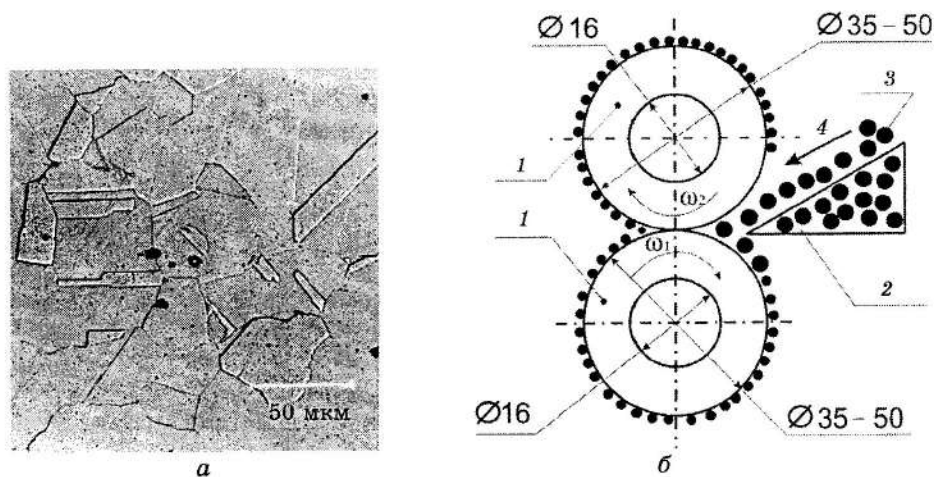


Рис. 1. Исходная микроструктура аустенитной высокоазотистой стали P900 (а) и схема проведения испытаний, размеры изготовленных из нее образцов: 1 — ролик; 2 — устройство для равномерной подачи порошков сплавов соединений типа $A^{\text{III}}B^{\text{VI}}$; 3 — твердый смазочный материал (порошки соединений типа $A^{\text{III}}B^{\text{VI}}$); 4 — направление подачи твердой смазки (б).

Manufactures Corporation).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проведены в условиях сухого трения. Интенсивность износа при нагрузке 25 кг составила для стали Р900 0,1656 грамм на 1000 метров пути (г/1000 м.п.), для стали 1.0503 — 0,1973 г/1000 м.п. (коэффициент трения 0,96). После введения порошка $(\text{GaSe})_{0,75}\text{In}_{0,25}$ коэффициент трения снизился до 0,4, а интенсивность износа составила для стали Р900 0,05799 г/1000 м.п., а для стали 1.0503 — 0,00328 г/1000 м.п. Результаты второго эксперимента: сталь Р900 — 0,006579 г/1000 м.п., сталь 1.0503 — 0,006579 г/1000 м.п. Длительность испытаний составляла 3 мин. После подачи в трибосопряжение порошков сплавов $(\text{GaSe})_x\text{In}_{1-x}$ резко снижалась интенсивность изнашивания исследуемых сталей с образованием на их поверхности характерной пленки.

Пленка в первую очередь появилась и удерживалась на аустенитной марганцевой стали Р900. Внешний вид пленки на аустенитной марганцевой стали и на стали 1.0503 отличается (рис. 2), что подтверждается результатами исследования их фазового состава. На поверхности роликов из стали Р900 образовывалась сплошная пленка темно-фиолетового матового оттенка, а на стали 1.0503 она имела черный цвет. После 20 мин испытаний (для стали Р900 это 2490 метров пути) пленка, образовавшаяся на поверхности полностью «адаптировалась» на поверхности, а на стали 1.0503 (4830 м.п.) пленка отслоилась (появились вздутия и пузыри), на торцевой

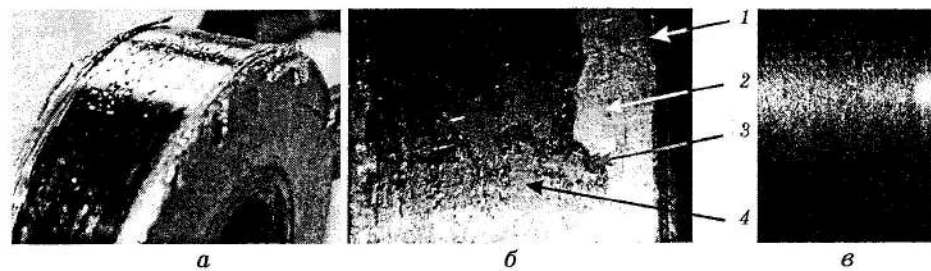


Рис. 2. Поверхность стали 1.0503 после 20 мин непрерывных испытаний (образовалась черная пленка, вздутия, заусенцы по краю ролика) (а); поверхность стали 1.0503: 1 — край ролика; 2 — поверхность ролика после исчезновения пленки; 3 — 1-й тип пленки, образовавшейся в процессе трения с введением в зону контакта порошка $(\text{GaSe})_{0,75}\text{In}_{0,25}$; 4 — 2-й тип пленки, образовавшейся в процессе трения с введением в зону контакта порошка $(\text{GaSe})_{0,25}\text{In}_{0,75}$ (б), $\times 18$; сплошная матовая пленка на поверхности стали Р900 (в), $\times 12$.

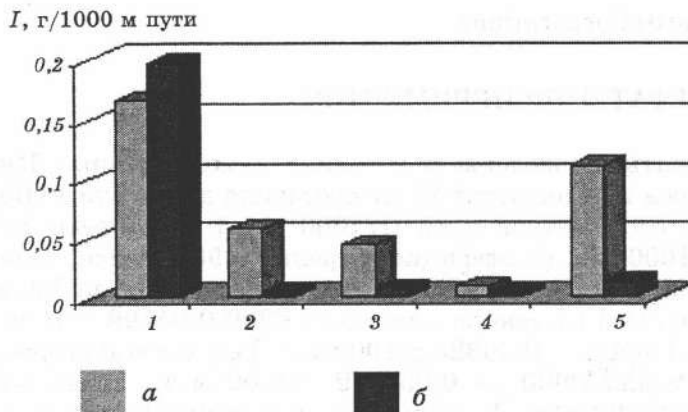


Рис. 3. Сравнительный износ сталей при следующих условиях проведения эксперимента: 1 — сухое трение; 2 — после введения в зону трения порошка GaSe; 3 — после введения в зону трения порошка $(\text{GaSe})_{0.75}\text{In}_{0.25}$; 4 — после введения в зону трения порошка $(\text{GaSe})_{0.25}\text{In}_{0.75}$; 5 — после введения в зону трения порошка графита (а — P900, б — 1.0503).

поверхности появились заусенцы.

При добавлении графита в эту же пару трения коэффициент трения составлял 0,45, т.е. был больше, чем при трении с порошком $(\text{GaSe})_{0.75}\text{In}_{0.25}$.

После подачи в трибосопряжение порошка $(\text{GaSe})_{0.25}\text{In}_{0.75}$ износ стали P900 составил 0,009129 г/1000 м.п., а стали 1.0503 соответственно 0,0039124 г/1000 м.п. (результаты экспериментов по потере массы обобщены на рис. 3).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Износ сталей в условиях сухого трения показал их высокую износостойкость по сравнению с обычными сталями (рис. 3). Это объясняется тем, что, во-первых, данные материалы, обладают высокими физико-механическими свойствами [1, 2]. Природа марганцевого аустенита позволяет этим сталям в условиях сухого трения иметь высокую несущую способность по сравнению с обычными материалами. В качестве примера можно привести их использование для производства колес железнодорожного транспорта [2].

Однако существенно изменять их эксплуатационные свойства можно путем проведения термической обработки и сложных технологических циклов (которые включают в себя длительную ковку, прокатку, грубую обкатку, холодную растяжку, исследование механических характеристик).

Низкие коэффициенты трения (0,4) при применении порошка

$(\text{GaSe})_{0,25}\text{In}_{0,75}$ обусловлены характером связей атомов внутри и на границах слоев, в результате чего ослабляются силы Ван дер Ваальса и более легко расщепляется слоистая структура. Между атомами металла и Se существует прочная химическая связь, а между атомами Se эта связь слабая. Поэтому в направлении связей между атомами Se происходит сдвиг с небольшим трением, что обеспечивает высокие смазочные свойства. Уменьшение нагрузки с 25 до 10 кг сопровождается существенным снижением, как интенсивности изнашивания, так и значений коэффициентов трения (почти на порядок). Коэффициенты трения, полученные при испытании в атмосфере азота при 70°C и скорости скольжения 1,1 м/с при давлении $10,5 \text{ кг/см}^2$, составляют: MoSe_2 — 0,02; WSe_2 — 0,02; NbSe — 0,06; MoSe_2 — 0,03. Коэффициенты трения для сталей и чугунов при удельном давлении в аналогичных условиях составляют от 0,4–0,8, т. е. больше чем при смазывании $(\text{GaSe})_x\text{In}_{1-x}$.

На диаграмме состояния GaSe–In существует зона жидкого состояния ($L1 + L2$) сплавов, где две фазы не смешиваются друг с другом. Эта зона находится вблизи эвтектики. В многочисленных исследованиях было показано, что эвтектические сплавы обладают более высокой износостойкостью по сравнению с неэвтектическими сплавами. Сплав $(\text{GaSe})_{0,25}\text{In}_{0,75}$ является доэвтектическим. Были проведены испытания при добавлении в трибосопряжение и сплава $(\text{GaSe})_{0,75}\text{In}_{0,25}$, который является эвтектическим. Установлено, что он позволяет реализовать иные условия трения по сравнению с применением порошка сплава $(\text{GaSe})_{0,75}\text{In}_{0,25}$.

Поведение данных материалов в условиях трения объясняется особенностями кристаллического строения GaSe. Поскольку GaSe является слоистым соединением, наличие ван-дер-ваальсовской связи между слоями позволяют вводить в межслойное пространство посторонние атомы или молекулы. При добавлении порошка сплава $(\text{GaSe})_{0,25}\text{In}_{0,75}$ в трибосопряжение рентгеноструктурным анализом на поверхности трения обеих исследованных сталей зафиксировано появление новых фаз, образовавшихся в процессе трения (рис. 4). Сплав $(\text{GaSe})_{0,25}\text{In}_{0,75}$ в процессе трения претерпевает изменения как структурные (рис. 5, а–в), так и фазовые (образуются новые фазы). Отмечено, что присутствие кислорода окружающей атмосферы способствует образованию оксидов In_2O_3 и Ga_2O_3 . Новые линии, образовавшиеся после трения, свидетельствуют о сложных физико-химических и механических процессах (рис. 5, а), сопровождающих процесс трения с участием нового слоистого (рис. 5, б) присадочного материала и образования поверхностно-активных областей (размером около 30 нм), адсорбирующих кислород (рис. 5, в). Исходя из диаграммы состояний системы, можно утверждать, что такой характер фазовых взаимодействий вполне вероятен в указанном концентрационном интервале. Отметим, что расслоение

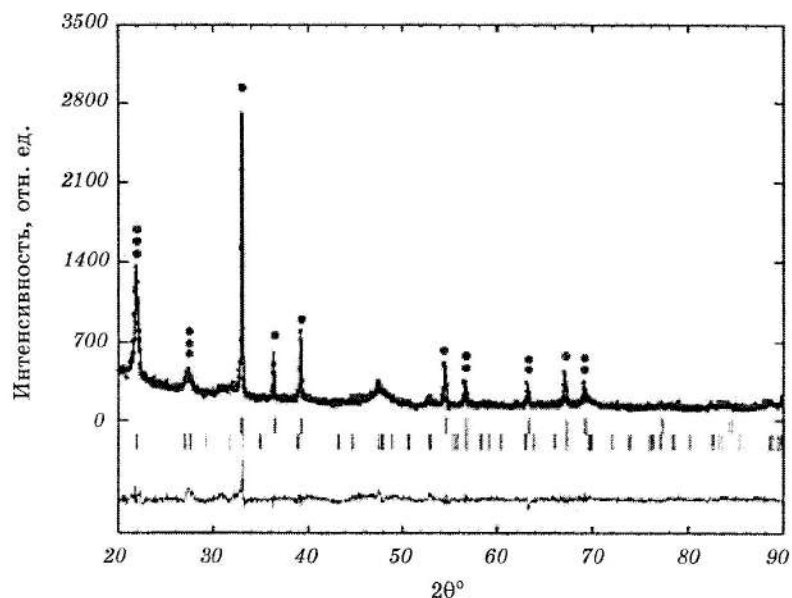


Рис. 4. Рентгенограмма материала, снятого после испытаний на трение с поверхности стали 1.0503. Экспериментальный (♦), расчетный (сплошная линия сверху) и разностный (внизу) профили рентгеновской дифракции сплава $(\text{GaSe})_{0,25}\text{In}_{0,75}$ (• — In, •• — GaSe, ••• — In_2O_3 , Ga_2O_3). Вертикальными линиями показаны позиции брэгговских отражений составных фаз: $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x$ (сверху) и $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}$ (внизу).

жидкостей происходит уже после достижения 50% содержания индия в присадочном сплаве.

Уточнение результатов методом Ритвельда свидетельствует о том, что фаза $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x$ (твердый раствор Ga в In) содержит примерно 40% масс. и представляет собой тетрагональную структуру (относится к пространственной группе $I4/mmm$). Периоды кристаллической решетки: $a = 3,24 \text{ \AA}$, $c = 4,94 \text{ \AA}$. Для сравнения чистый In ($I4/mmm$) обладает параметрами решетки: $a = 3,25 \text{ \AA}$, $c = 4,95 \text{ \AA}$.

Фаза $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}$ ($x > 0,2$) (структурный тип GaSe) имеет гексагональную структуру. Периоды кристаллической решетки: $a = 3,83 \text{ \AA}$, $c = 16,24 \text{ \AA}$. Для сравнения чистый GaSe: $a = 3,74 \text{ \AA}$, $c = 15,91 \text{ \AA}$; фаза $\text{Ga}_{0,8}\text{In}_{0,2}\text{Se}$: $a = 3,80 (1) \text{ \AA}$, $c = 16,12 \text{ \AA}$. Фактор расхождимости уточнения: $R_p = 7,82\%$.

Характерной чертой халькогенидов Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni является тенденция катионов и вакансий размещаться в октаэдрических пустотах. В результате этого в области гомогенности возникают многие соединения переменного состава. Образование и существование соединений переменного состава зависит от температуры. Если учитывать, что на поверхностях трения в трибосопряжении

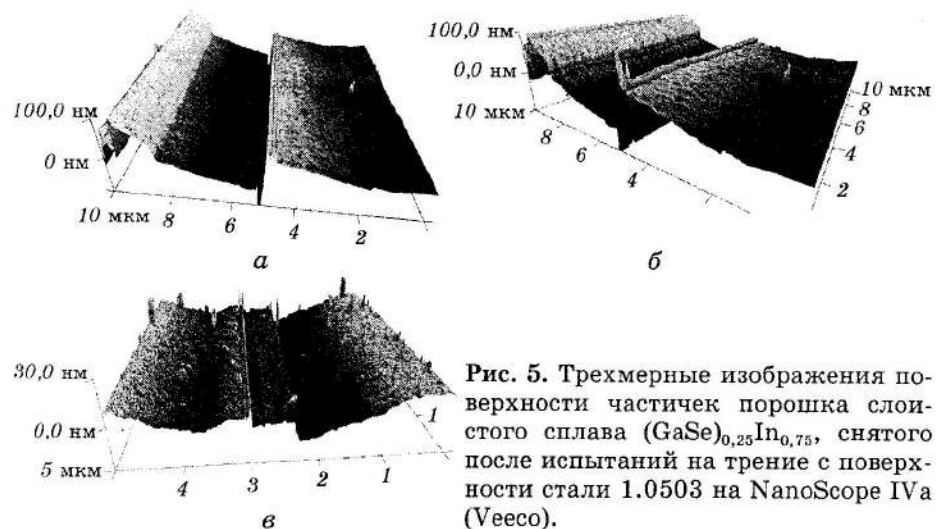


Рис. 5. Трехмерные изображения поверхности частиц порошка слоистого сплава $(\text{GaSe})_{0,25}\text{In}_{0,75}$, снятого после испытаний на трение с поверхности стали 1.0503 на NanoScope IVa (Veeco).

возникают повышенные температуры, то вместе с контактными давлениями, они способствуют образованию новых фаз.

Атом селена в изолированном состоянии имеет конфигурацию валентных электронов s^2p^4 , склонную к достройке за счет электронов других элементов, с которыми он реагирует, а также самого селена до стабильной d^5 -конфигурации s^2p^6 . Естественно, что возможна также потеря электронов атомом селена с передачей их атому металла.

Селениды d -переходных металлов — гетеродесмичные соединения; они характеризуются ковалентно-металлическим типом связи с наложением определенной доли ионной связи. Образование слоистой структуры в соединениях такого типа можно объяснить тем, что внутри отдельных слоев, образованных как атомами металла, так и неметалла возникают преимущественно сильно ковалентные связи, а связь между отдельными слоями осуществляется нелокализованными электронами. Прочность межслойной связи будет зависеть от степени делокализации электронов в кристаллической решетке соединения, что проявляется в степени «металличности» вещества.

В трибосопряжении может происходить избирательный переноса вещества и осуществляется режим структурной приспособляемости, в результате чего на поверхностях трения образуются такие структуры, которые способны поддерживать безызносный режим трения.

Введение данных компонентов в состав масла может повысить прочность масляной пленки и замедлить процесс ее деструкции в зоне трения. Активные компоненты и интеркалирование могут

формировать на поверхностях трения самовосстанавливаемую тонкую защитную пленку. Особенности строения слоистых структур на основе $A^{III}B^{VI}$ и изменение параметров кристаллической решетки фазы $Ga_{1-x}In_xSe$ свидетельствует о возможности изменения физического взаимодействия при более тесном сближении молекул на химическое. Между этими видами взаимодействий имеется количественное (по величине энергии связи) и качественное различие. Для физического взаимодействия энергия связи 0,05–0,1 эВ, а для химической адсорбции 1–8 эВ. Первый вид взаимодействия универсален, второй — избирательный. При физическом взаимодействии структура электронных оболочек не меняется, так же как не меняется характер распределения электронной плотности в твердом теле. При хемосорбции изменяются электронные оболочки адсорбированных атомов, и заметно изменяется электронная плотность в поверхностном слое твердого тела.

Следует отметить, что графитовые смазки имеют ограниченное применение из-за своей неспособности сохранять смазочные свойства в вакууме или во влажном воздухе из-за увеличения коэффициента трения при возрастающих нагрузках. Поэтому применение в качестве смазочного материала более устойчивых порошков на основе соединений $A^{III}B^{VI}$, имеющих слоистую структуру, открывает возможность усовершенствования существующих присадок.

5. ВЫВОДЫ

1. При добавлении порошков типа $(GaSe)_xIn_{1-x}$ в трибосопряжение рентгеноструктурным анализом на поверхности трения зафиксировано появление новых оксидных фаз, образованных в процессе трения.
2. Применение в качестве смазочного материала порошков типа $(GaSe)_xIn_{1-x}$ позволит формировать самовосстанавливающиеся пленки на поверхностях трения, способные минимизировать износ поверхностей. Такие защитные пленки обеспечивают значительное снижение износа.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. I. Balitskii, O. V. Machnenko, O. A. Balitskii et al., *Strength of Materials and Durability of Structural Elements of Nuclear Power Plants* (Ed. A. I. Balitskii). *Fracture Mechanics and Strength of Materials: Reference Book* (Ed. V. V. Panasyuk) (Kyiv: Akadempriodyka: 2005).
2. O. I. Balytskyi, V. O. Kolesnikov, and P. Kaviak, *Mater. Sci.*, **41**, No. 5: 624 (2005).
3. V. G. Gavrilyuk and H. Berns, *High Nitrogen Steels* (Berlin: Springer Verlag: 1999).

4. P. J. Uggowitzer, R. Magdowski, and M. O. Speidel, *La Metallurgia Italiana*, **86**, No. 6-7: 347 (1994).
5. M. O. Speidel, *From High-Nitrogen Steels (HNS) to High-Interstitial Alloys (HIA)* (Zürich: High Nitrogen Steels Hochschulverlag AG: 2003).
6. S. Bistac and A. Galliano, *Tribology Letters*, **18**, No. 1: 21 (2005).
7. J. Romu, J. Tervo, H. Hännien, and J. Liimatainen, *Wear Resistance of High Nitrogen Austenitic Stainless Steels Manufactured by Molten and Powder Metallurgy Routes. Proc. of the 3-rd International Conference 'High Nitrogen Steels—HNS 93'* (Kiev, Ukraine: 1993).
8. R. Büscher and A. Fischer, *Steel Grips*, **2**: 481 (2004).
9. N. Efros, L. Korshunov, B. Efros et al., *Steel Grips*, **2**: 391 (2004).
10. M. Diener, *Application of High Nitrogen Steels for Rail Wheels. Proc. of 2-nd Int. Conf. 'High Nitrogen Steels'* (Aachen, Germany: 1990).
11. D. Klammann, *Lubricants and Related Products. Synthesis, Properties, Applications: International Standards* (Verlag Chemie GmbH: 1984).

Reference

1. Balitskii, A.I., Machnenko, O.V., Balitskii, O.A.
Strength of materials and durability of structural elements of nuclear power plants
Fracture Mechanics and Strength of Materials: Reference Book.
(Ed. A. I. Balitskii), (Ed. V. V. Panasyuk) (Kyiv: Akadempriodyka: 2005).
2. Balyts'kyi, O.I., Kolesnikov, V.O., Kawiak, P.
Triboeengineering properties of austenitic manganese steels and cast irons under the conditions of sliding friction
(2005) *Materials Science*, 41 (5), pp. 624-630.
doi: 10.1007/s11003-006-0023-7

<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-33646387160&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=4f73bdf9754dfdac7256947d377c3271&sot=autdocs&sdt=autdocs&sl=17&s=AU-ID%288918120300%29&relpos=7&citeCnt=8&searchTerm=>
3. Gavriljuk, V.G., Berns, H. High Nitrogen Steels. (Berlin: Springer Verlag: 1999).
4. Uggowitzer, P.J., Magdowski, R., Speidel, M.O.
(1994) *La Metallurgia Italiana*, 86 (6-7), p. 347
5. Speidel, M.O. *From High-Nitrogen Steels (HNS) to High-Interstitial Alloys (HIA)*.
(Zurich: High Nitrogen Steels Hochschulverlag AG: 2003).
6. Bistac, S., Galliano, A. Nano and macro tribology of elastomers. (2005) *Tribology Letters*, 18 (1), pp. 21-25. doi: 10.1007/s11249-004-1701-y
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11249-004-1701-y>.
7. Romu, J., Tervo, J., Hannien, H., Liimatainen, J.
Wear resistance of high nitrogen austenitic stainless steels manufactured by molten and powder metallurgy routes
Proc. of the 3rd International Conference
'High Nitrogen Steels-HNS 93' (Kiev, Ukraine: 1993).
8. Boscher, R., Fischer, A. (2004) *Steel Grips*, 2, p. 481.
9. Efros, N., Korshunov, L., Efros, B. (2004) *Steel Grips*, 2, p. 391.
10. Diener, M. Application of high nitrogen steels for rail wheels. *Proc. of 2nd Int. Conf.*
'High Nitrogen Steels' (Aachen, Germany: 1990).
11. Klamann, D. *Lubricants Related Products, Synthesis, Properties, Applications: International Standards*. (Verlag Chemie GmbH: 1984).

Триботехнические свойства азотистых марганцевых сталей в условиях трения качения при добавлении в зону контакта порошков (GaSe) $[x]In[1-x]$ / А. А. Балицкий, В. А. Колесников, О. Б. Вус // Металлофизика и новейшие технологии. - 2010. - Т. 32, N 5. - С. 685-695.

Tribotechnical Properties of Nitrogen Manganese Steels under Rolling Friction at Addition of (GaSe) xIn_{1-x} Powders into Contact Zone. A.A. Balitskii, V.A. Kolesnikov, O.B. Vus - Metallofizika i noveishie tekhnologii, 2010. 32, 5, 685-695. DOI: 10.15407/mfint.

Tribotechnical properties of nitrogen manganese steels under rolling friction at addition of (GaSe) xIn_{1-x} powders into contact zone

<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-77957864676&origin=resultslist&sort=plf-f&cite=2-s2.0-33646387160&src=s&imp=t&sid=e93ef0727b6434275693864bc41409cf&sot=cite&sdt=a&sl=0&relpos=3&citeCnt=1&searchTerm=>