

УДК 621.9.048

**С.В. Панин^{1,2}, М.А. Полтаранин^{1,2}, Ю.И. Почивалов¹,
Б.Б. Овечкин², В.Е. Панин^{1,2}**

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск)

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет

ИЗНАШИВАНИЕ СТАЛИ 110Г13 С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ. СООБЩЕНИЕ 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ*

Аннотация. Исследованы закономерности модификации структуры и изменения сопротивления изнашиванию при трении в условиях граничной смазки стали 110Г13 в состоянии поставки и после обработки ударным ультразвуком. Проведен анализ деформационного рельефа, формирующегося на боковой поверхности образцов при сжатии и трибонагружении, и показана идентичность в закономерностях его развития. На основании полученных данных обсуждаются причины выявленного изменения сопротивления изнашиванию.

Ключевые слова: поверхностный слой, сталь 110Г13, ультразвуковая поверхностная обработка.

THE EFFECT OF NANOSTRUCTURING SURFACE LAYER IN TRIBOCONTACT UNDER WEARING OF 110MN13 STEEL SUBJECTED TO ULTRASONIC SURFACE STRAINING

Abstract. Regularities of structure modification and changing wear resistance under boundary lubrication friction of 110Mn13 steel in as supplied condition and after impact ultrasonic treatment were studied. The strain induced relief to form on lateral face of specimens under study at compression and triboloading were examined and similarity in regularities of its formation was shown.

Keywords: surface layer, 110Mn13 steel, ultrasonic surface straining.

Высокомарганцовистая сталь 110Г13 является одной из наиболее известных упрочняемых в процессе эксплуатации сталей, которая нашла широкое применение в различного рода установках для дробления горных пород, в строительно-дорожном оборудовании, в механизмах по подготовке шихты в металлургическом и литейном производствах [1].

Упрочнение рабочих поверхностей деталей, изготовленных из стали 110Г13, в процессе взаимодействия с изнашивающей средой обуславливает значительное повышение износостойкости и срока службы таких деталей, особенно, если рабочие нагрузки являются ударными. Так, например, в рабочих слоях бронефутеровок шаровых мельниц, изготовленных из нестабильной аустенитной стали, в процессе эксплуатации на глубине до 2,0 – 3,5 мм образуется структура мартенсита деформации с твердостью HRC 50 – 60 при сохранении аустенитной структуры в основном сечении отливок. Прочный приповерхностный слой обеспечивает высокую износостойкость при контактном взаимодействии, в результате чего долговечность бронеплит увеличивается более чем в два раза [2].

Однако не при всех условиях эксплуатации сталь 110Г13 проявляет способность к упрочнению. Помимо невысокой стойкости в условиях абразивного изнаши-

вания, эта сталь не является износостойкой при нагреве в интервале температур 400 – 800 °С. Например, в условиях ускоренного процесса производства цемента применяемые футеровки и перегородки мельниц из стали 110Г13 при температуре эксплуатации 180 – 450 °С быстро выходят из строя. Данные, представленные в работах [2 – 4], также показывают, что сталь Гадфильда даже в условиях экстремально больших пластических деформаций и высоких температур, имеющих место при трении и сдвиге, сохраняет аустенитную структуру. Следовательно, высокая износостойкость стали 110Г13 не связана с возникновением в ее структуре мартенсита деформации или карбидных фаз. Говоря об упрочнении стали Гадфильда, необходимо отметить роль углерода. Его влияние на упрочнение обусловлено не только искажениями кристаллической решетки, вносимыми атомами внедрения и взаимодействием последних с дислокациями, но и с характером распределения углерода в аустените [2, 5]. При трении стали в ее поверхностном слое возрастает температура, вследствие чего атомы углерода перемещаются на место дефектов кристаллического строения решетки аустенита. Это может сопровождаться образованием микронзон с повышенным содержанием углерода, образованием комплекса Mn – C (что обуславливает рост микронапряжений в решетке) и, как следствие, повышением твердости. Приведенные выше данные об особенностях трения стали 110Г13, тем не менее, не раскрывают причин столь высоких

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ОЭМПУ РАН № 12.3, проекта г/б исследований СО РАН № III.23.1.3.

триботехнических свойств, поэтому эта сталь является привлекательным объектом для исследования. Кроме того, считаем необходимым процитировать работы, посвященные исследованиям закономерностей изнашивания стали 110Г13 в различных научных школах, в частности, в СФТИ¹, ИФПМ СО РАН², СибГИУ³, [6] и др.

В настоящей работе была поставлена задача исследовать закономерности модификации структуры и изменения сопротивления изнашиванию при трении в условиях граничной смазки образцов стали 110Г13 в состоянии поставки и после обработки ударным ультразвуком (УУО). Ранее отмечалось, что воздействие упругих колебаний индентора ультразвуковой частоты идентично таковому, возникающему в процессе трибосопряжения [7]. Поэтому представляло интерес проследить за кинетикой процесса изнашивания образцов обоих типов.

Материал и методика исследований

Ультразвуковую обработку образцов проводили при частоте 26 кГц. Амплитуда колебаний составляла 15 мкм. Деформирующий инструмент diam. 2 мм прижимался к поверхности обрабатываемой пластины со статической нагрузкой примерно 100 Н [8]. Глубину поверхностного слоя, упрочненного в результате ультразвуковой обработки, оценивали путем измерения микротвердости в поперечном сечении образца на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на пирамидку Виккерса 100 г. Дефектную субструктуру стали 110Г13 до и после ультразвуковой обработки исследовали с использованием оптических микроскопов Neophot 2 и Axiomvert 25 CA. Изображения получали на оптическом интерференционном профилометре белого света New View 6200.

Триботехнические испытания по схеме вал – колодка в условиях граничной смазки проводили на образцах в форме параллелепипеда размером 7×7×10 мм на машине трения СМТ-1. Нагрузку на пару образцов, закрепленных в держателе, подбирали опытным путем и она составила около 500 Н при скорости вращения вала 150 об/мин. Диаметр контртела, изготовленного из стали ШХ15, составлял 62 мм. Длительность испытаний при подобранном режиме нагружения составляла 60 мин. Интенсивность изнашивания оценивали через каждые 5 мин нагружения путем измерения площади дорожки трения, проводившегося с помощью оптичес-

кого микроскопа «Carl Zeiss Stemi 2000-C» и дальнейшего расчета с использованием программы Rhinoceros v. 3.0.

Результаты исследований и их обсуждение

Структурные исследования (металлография). Исследование структуры проводили на боковой грани образцов; при этом фотографирование выполняли после механической шлифовки грани и дальнейшего травления в плавиковой кислоте. Было замечено, что образцы хорошо сопротивляются кислотному воздействию, однако образец после УУО протравился значительно хуже, чем образец в исходном состоянии, что свидетельствует в пользу произошедших в нем структурных изменений. В то же время проведенный анализ микрофотографий шлифов боковой грани образцов стали 110Г13 в исходном состоянии и после УУО не выявил существенных визуально наблюдаемых изменений в структуре до и после проведенной обработки. Также можно констатировать отсутствие в образце после УУО следов возникновения микротрещин.

Испытания на статическое сжатие. С целью физического моделирования сжимающего воздействия контртела на образцы были проведены испытания на сжатие, в ходе которого выполняли ступенчатое нагружение образцов обоих типов контртелом (без его вращения) с шагом 50 кг до достижения максимальной нагрузки 500 кг. Время нагружения составляло 1 мин, после чего образцы разгружали и проводили фотографирование их боковой поверхности.

Образец в исходном состоянии. Проведен анализ оптических изображений боковой грани образца без обработки. Обнаружено, что уже при нагрузке 100 кг в приповерхностном слое фиксируются признаки формирования деформационного рельефа. Дальнейшее увеличение нагрузки до 150 кг приводит к образованию области с выраженным зерненным деформационным рельефом на глубине до 200 – 300 мкм. Повышение нагрузки до 500 кг обусловило увеличение размера такой области, а толщина слоя, в котором рельеф был четко выражен, может быть оценена в 700 мкм.

Анализ боковой грани образца после снятия сжимающей нагрузки был также проведен при большем и меньшем увеличениях. Изображения, снятые на боковой грани образца с помощью оптического микроскопа Axiomvert 25 CA и оптического профилометра New View, приведены на рис. 1, а – в. Анализ оптических профилотрамм показывает, что в результате вдавливания на боковой поверхности формируется слой деформированного материала, толщину которого можно оценить в 700 – 800 мкм (рис. 1, а, б), в то время как «высота» относительно исходной недеформированной поверхности составляет порядка 50 – 60 мкм.

Образец после ультразвуковой ударной обработки. Также проанализированы оптические изображе-

¹ Ламбакахар О.О. Закономерности формирования микроструктуры и природа деформационного упрочнения высокоуглеродистого железо-марганцевого и железо-никелевого аустенита. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Томск, 1975. 20 с.

² Колубаев Е.А. Деформирование поверхностных слоев при трении и факторы, влияющие на трибологические свойства металлов. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Томск, 2005. 20 с.

³ Алешина Е.А. Исследования структуры и фазового состава поверхностного слоя стали Гадфильда после испытаний на трение. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Новокузнецк, 2007. 20 с.

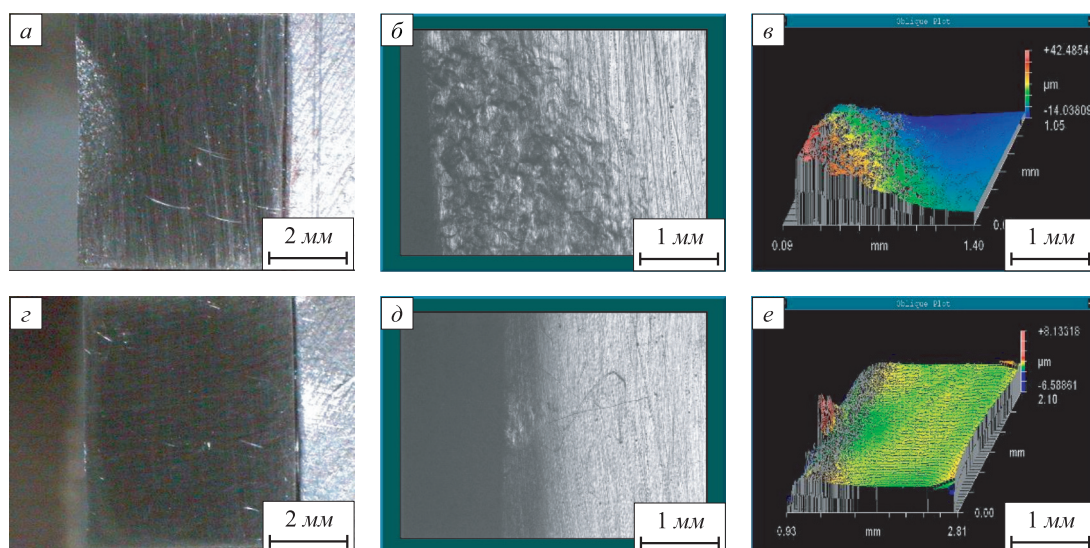


Рис. 1. Изображения боковой поверхности образца в исходном состоянии ($a - e$) и подвергнутого УУО ($z - e$) после нагружения сжатием: a – оптическая микроскопия; b и e – оптический снимок и 3D-профиль, полученные на профилометре NewView; размер изображения: $a - 14\,000 \times 7000$ мкм; $b - 1400 \times 1000$ мкм

ния боковой грани образца после УУО. Проведенные исследования не выявили каких-либо фиксируемых микроскопически существенных изменений рельефа поверхности при повышении нагрузки вплоть до 500 кг. Изображения, снятые с помощью оптического микроскопа и профилометра New View на боковой грани образца, приведены на рис. 1, $z - e$. Единственным выявленным изменением рельефа поверхности стало образование небольшого по площади «заматия», материал в котором выступал относительно окружающего на высоту порядка 8 мкм (рис. 1, d, e). Его местоположение соответствует месту приложения к образцу сжимающей нагрузки.

Микротвердость образцов. Микротвердость измеряли на боковой грани образцов. График распределения микротвердости по поперечному сечению по мере удаления от поверхности представлен на рис. 2. Как видно, микротвердость около поверхности образца, обработанного ультразвуком (кривая 2), возрастает в 2,5 раза по сравнению с микротвердостью образца в исходном состоянии (кривая 1) и постепенно убывает по мере удаления от поверхности. Глубина модифицированного слоя при этом составляет около 500 – 600 мкм. Микротвердость, измеренная в слое деформированного материала (образовавшегося при сжатии образца (кривая 3)), сопоставима с микротвердостью образца, подвергнутого УУО, что в определенной степени свидетельствует об идентичности происходящих при этом изменений структуры.

Триботехнические испытания. С целью подбора режима трибонагружения проводили испытания образцов в исходном состоянии с возрастающей нагрузкой от 10 до 150 кг с шагом 10 кг через каждые 5 мин испытаний. Обнаружено, что в диапазоне нагрузок от 30 до 120 кг происходит устойчивый износ образцов. При

нагрузках, превышающих 130 кг, фиксируются признаки катастрофического изнашивания. Предварительные триботехнические испытания были проведены при постоянной нагрузке 70 кг. Показано, что стадия приработки заканчивается при времени испытаний 15 мин. При этом было замечено, что после 20 мин нагружения начинается термически индуцированная деструкция смазочной среды (индустриального масла И-20), что интенсифицирует изнашивание образца. Можно предположить, что при этом изменяется характер изнашивания на окислительный, о чем свидетельствуют как повышение момента трения, так и появление характерного скрипа при взаимодействии контртела с образцом.

Характерным явлением при испытаниях с переменной и постоянной (70 кг) нагрузкой явилось то, что при «выгорании» масла, т.е. при переходе испытания из режима граничной смазки в режим окислительного и абразивного изнашивания наблюдалась осцилляция

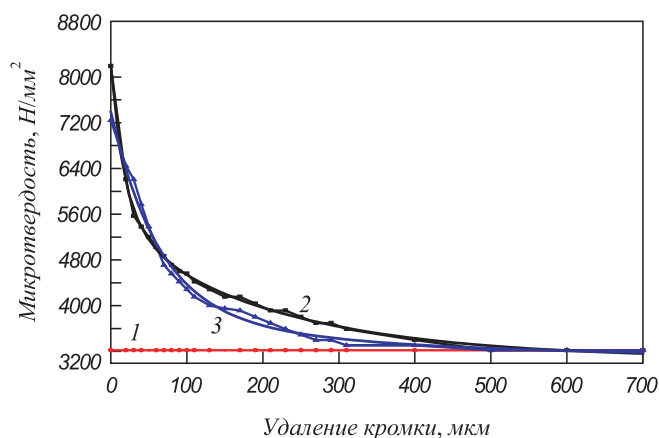


Рис. 2. Распределение микротвердости на образцах: 1 – исходном; 2 – обработанном ультразвуком; 3 – подвергнутом сжатию

момента силы трения (либо просто снижение вследствие нагрева). Это подтверждается тем, что после снятия нагрузки и охлаждения образца и контртела момент силы трения повышался до начального значения. Таким образом, при подборе параметров трибоиспытаний были выбраны следующие: нагрузка 50 кг, скорость вращения 150 об/мин, время испытаний 60 мин. Результаты, описанные далее, были получены при этих параметрах трибонагружения.

Испытания образцов в исходном состоянии (без шлифовки поверхности после электроискровой резки). С целью оценки влияния шероховатости исходной поверхности были испытаны образцы, поверхность которых после электроискровой резки не подвергали механической шлифовке. На рис. 3, а – г приведены оптические изображения дорожек трения образцов после различного времени испытаний. Видно, что за первые

5 мин образовалось два едва различимых пятна контакта общей площадью около $7,4 \text{ мм}^2$ (рис. 3, б). Дальнейшее нагружение привело к разрастанию этих пятен в глубь образца: их суммарная площадь после 30 мин испытаний составила примерно $14,8 \text{ мм}^2$ (рис. 3, в). После 60 мин испытаний на образцах образовалась практически сплошная дорожка трения, площадь которой составила приблизительно $22,5 \text{ мм}^2$ (рис. 3, г). При этом скорость изнашивания составила $0,247 \text{ мм}^2/\text{мин}$, износостойкость – $4,04 \text{ мин}/\text{мм}^2$.

Испытания образцов в исходном состоянии, подвергнутых шлифованию поверхности после резки. Соответствующие оптические изображения приведены на рис. 3, д – з. Видно, что за первые 5 мин трения сформировалась выраженная дорожка трения площадью $16,2 \text{ мм}^2$ (рис. 3, е); характер изнашивания можно назвать адгезионным. При дальнейшем нагружении пло-

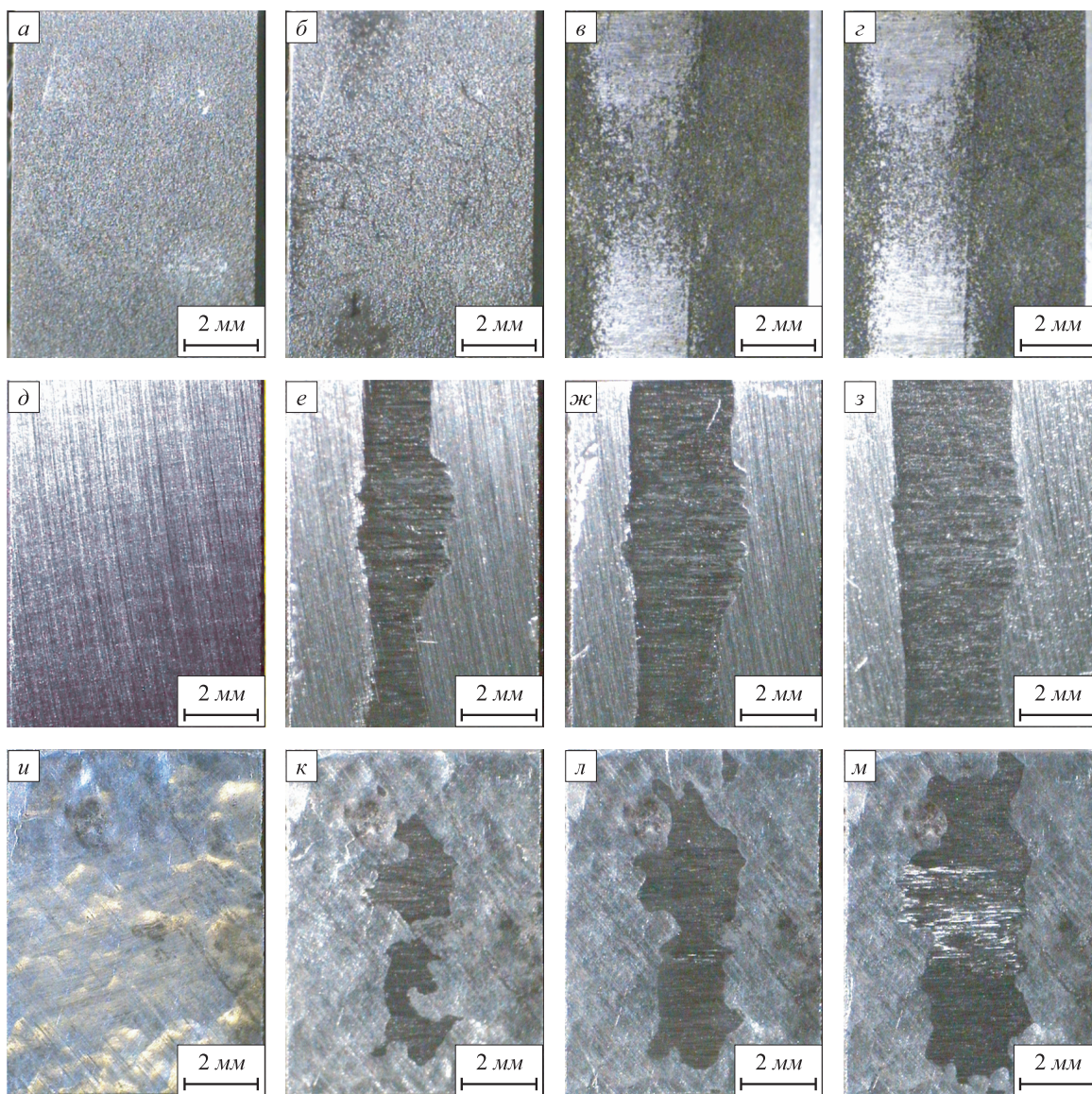


Рис. 3. Оптические изображения поверхностей трения образцов из стали 110Г13 в исходном состоянии без обработки поверхности после разрезания (а – г), после шлифования (д – з) и после ультразвуковой ударной обработки (и – м); а, д, и – перед началом испытаний, б, е, к – после 5 мин, в, ж, л – 30 мин и г, з, м – 60 мин испытаний

щадь дорожки трения постепенно увеличивалась: после 30 мин испытаний составила 26,3 мм² (рис. 3, ж), а после 60 мин – 30,5 мм² (рис. 3, з). Скорость изнашивания составила 0,149 мм²/мин, а износостойкость – 6,68 мин/мм².

Испытания образцов после ультразвуковой ударной обработки поверхности. Соответствующие микрофотографии приведены на рис. 3, и – м. Видно, что за первые 5 мин испытаний сформировались два незначительных по площади пятна трения общей площадью 8,4 мм² (рис. 3, к). При дальнейшем нагружении эти пятна разрастались и соединились, а их суммарная площадь после 30 мин испытаний составила 17,6 мм² (рис. 3, л). В процессе трения после 35 мин испытаний было замечено появление крупных царапин на поверхности трения, что свидетельствует о появлении абразивной компоненты в характере изнашивания (см. также рис. 3, м). Очевидно, это было вызвано попаданием в область триботехнического контакта частиц разрушенного и унесенного упрочненного УУО слоя и их воздействием в качестве незакрепленного абразива. При этом царапины достаточно большой глубины появились и на поверхности контртела из стали ШХ15. После 60 мин испытаний площадь дорожки трения составила 25,8 мм² (рис. 3, м). При этом скорость изнашивания равнялась 0,192 мм²/мин, а износостойкость 5,20 мин/мм².

Диаграммы изнашивания всех исследованных образцов приведены на рис. 4. Видно, что для образцов в исходном состоянии со шлифованной поверхностью и образцов после УУО различимы два временных участка, характеризующихся разной интенсивностью изнашивания. Это, очевидно, связано с тем, что на отрезке времени 10 – 30 мин в сопротивление изнашиванию вовлечены лишь отдельные участки поверхности (пятна изнашивания); после 30 мин испытаний дорожка трения формируется вдоль всей ширины образца и начинается износ подповерхностных слоев. Снижение интенсивности изнашивания в образце без УУО может быть обусловлено тем, что площадь дорожки трения существенно увеличилась и удельное давление на образец снизилось. Однако основным фактором все же является деформационное упрочнение на поверхности трения (см. ниже результаты просвечивающей микроскопии), которое, ко всему прочему, не сопровождается абразивным изнашиванием, как в случае УУО. В случае

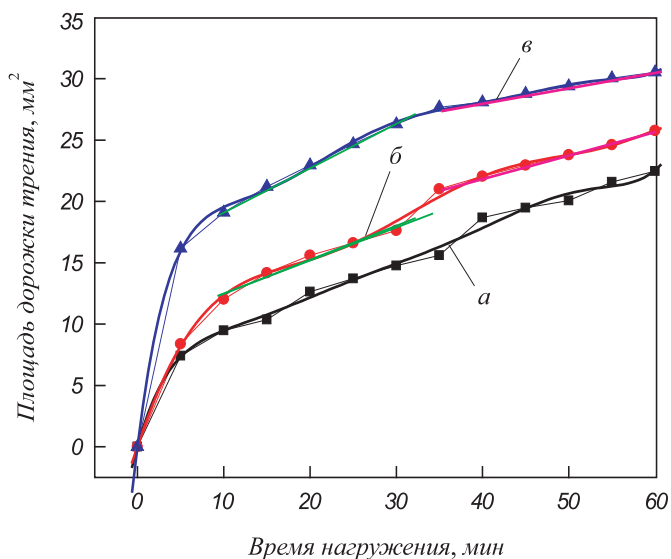


Рис. 4. Зависимость площади дорожки трения от времени нагружения:
а – образец в исходном состоянии, необработанная поверхность после резки; б – образец после УУО; в – образец в исходном состоянии, шлифованная поверхность после резки

нешлифованной поверхности возможно «легирование» приповерхностного слоя в процессе электроискровой резки, что изменяет состав, структуру и, соответственно, сопротивление изнашиванию при трении в условиях граничной смазки. Может быть, именно по этой причине в отличие от двух других типов образцов у него в течение всего времени испытаний интенсивность изнашивания не менялась (рис. 4, кривая а). Сводные данные о результатах триботехнических испытаний также приведены в таблице. Как видно, на отрезке времени 10 – 30 мин наибольшей износостойкостью характеризуются образцы без обработки поверхности после резки и образцы после УУО. На отрезке времени 35 – 60 мин более высоким сопротивлением изнашиванию обладают образцы в исходном состоянии после шлифовки поверхности.

Выводы. Показано, что воздействие ударным ультразвуком приводит к трехкратному повышению микротвердости поверхностного слоя, что сопровождается повышением износостойкости лишь на первой подстадии установившегося изнашивания. Последующее разрушение высокодефектного упрочненного УУО слоя изменяет характер изнашивания, добавляя в него абра-

Сводные данные об интенсивности изнашивания образцов на временном отрезке 10 – 30 / 35 – 60 мин

Поверхность	Скорость изнашивания, мм ² /мин	Износостойкость, мин/мм ²	Толщина унесенного слоя, мкм
Исходная после резки(а)	0,26	3,90	20,4
После УУО(б)	0,25/0,17	4,03/5,94	26,8/12,5
Исходная шлифованная (в)	0,38/0,10	2,64/9,62	37,6/27,9

живную составляющую. Выявлено существенное различие в характере развития деформации в приповерхностном слое образцов в исходном состоянии и после УУО при испытаниях на сжатие и в процессе триботехнических испытаний. На кривых изнашивания образцов до и после ультразвуковой обработки наблюдаются две стадии с изменяющейся скоростью изнашивания, причем на первой стадии более интенсивно изнашивается образец без обработки, а на второй – образец с модифицированным УУО приповерхностным слоем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 1. – М.: Металлургия, 1966. – 344 с.

2. Клущанцев Б.В. Щековые дробилки. Сб. Оборудование для промышленности строительных материалов «Сер. П». – М.: ЦНИИТЭ строймаш, 1972. – 44 с.
3. Коршунов Л. Г. // ФММ. 1992. № 8. С. 3 – 21.
4. Коршунов Л.Г., Черненко Н.Л. // Трение и износ. 1984. Т. 5. № 1. С. 106 – 112.
5. Сильман Г.И. // Митом. 2006. № 1. С. 3 – 7.
6. Иванов Ю.Ф., Алешина Е.А., Колубаев Е.А. и др. // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 6. С. 83 – 90.
7. Колубаев Е.А., Колубаев А.В., Сизова О.В. и др. // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 4. С. 49 – 57.
8. Клименов В.А., Иванов Ю.Ф., Перевалова О.Б. и др. // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 1. С. 90 – 97.

© 2013 г. С.В. Панин, М.А. Полтаранин,
Ю.И. Почивалов, Б.Б. Овечкин, В.Е. Панин
Поступила 29 декабря 2012 г.

УДК 669.046:621.7.011

Т.Н. Плужникова, В.А. Федоров, С.А. Сидоров, А.В. Яковлев

Тамбовский государственный университет им. Г.Д. Державина

ВЛИЯНИЕ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА ДЕФОРМАЦИЮ АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ, ОБУСЛОВЛЕННУЮ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА*

Аннотация. Исследовано влияние агрессивных сред (растворов NACE и H_2SO_4) на ход зависимости $\sigma - \epsilon$ сплавов при деформации и одновременном пропускании импульсов электрического тока, сопровождающимся кратковременным сбросом механического напряжения. Установлены зависимости сброса механического напряжения в исследуемых материалах от плотности импульсного электрического тока. Исследовано структурно-морфологическое состояние поверхности сплавов после воздействия агрессивных сред различной концентрации.

Ключевые слова: деформация сплавов, аморфный металлический сплав, нанокристаллический металлический сплав, агрессивные среды, импульсный электрический ток, питтинговая коррозия.

THE INFLUENCE OF AGGRESSIVE MEDIA ON THE DEFORMATION OF AMORPHOUS AND NANOCRYSTALLINE ALLOYS FROM EXPOSURE TO PULSED ELECTRIC CURRENT

Abstract. The effect of aggressive media (solution NACE and H_2SO_4) on the dependence $\sigma - \epsilon$, obtained by simultaneous transmission of electric current pulses accompanied by short discharge stress is investigated. The dependence of stress relief in the materials on the density of the pulsed electric current is established. The structural and morphological state of the alloy surface after exposure to corrosive media with different concentrations is investigated.

Keywords: deformation of alloy, amorphous alloy, nanocrystalline alloy, aggressive media, to pulsed electric current, pitting corrosion.

Расширение спектра применения аморфных и нанокристаллических сплавов ставит задачи по исследованию структуры и свойств этих материалов после различного рода воздействий: это могут быть как стационарные, так и нестационарные тепловые поля, импульсные и статические электрические и магнитные поля, а также различные среды, ведущие к окислению и коррозии. Вследствие этого представляют интерес

исследования, связанные с совместным влиянием нескольких факторов на изменение свойств аморфных и нанокристаллических металлических сплавов.

Цель работы состоит в исследовании развития деформации аморфных и нанокристаллических металлических сплавов при воздействии импульсного электрического тока после выдержки в агрессивных средах.¹

Экспериментальным материалом служили аморфные металлические сплавы на основе кобальта

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (проект № 12-01-00638) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.» (проект № 14.В37.21.1161).

¹ Часть исследований выполнена на оборудовании ЦКП «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» Белгородского государственного национального исследовательского университета.