

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРМКО-ЖЕЛЕЗА В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМПРЕССИОННОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

В.В. Асташинский¹, И.Н. Румянцева²

¹Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4,
220080 Минск, Беларусь, astashynski@bsu.by

²Физико-технический институт НАН Беларуси, ул. академика Купровича 10,
220141 Минск, Беларусь

Современные технологии обработки используемых в промышленности материалов, такие как плазменная модификация поверхностей, открывают дорогу для инновационных проектов, которые обеспечивают широкомасштабное использование достижений науки в реальном секторе экономики. Эффективного решения задачи модификации свойств можно добиться воздействием на поверхности концентрированными потоками энергии, такими как компрессионные плазменные потоки. В проведенных ранее исследованиях установлено, что воздействие сверхзвуковыми компрессионными плазменными потоками на образцы приводит к плавлению их поверхности и формированию слоев, образующихся при быстрой кристаллизации из расплава, в результате чего их структура и состав претерпевают существенные изменения по сравнению с материалом до обработки /1-2/. Подобная модификация сопровождается протеканием совокупности сложных плазмодинамических и теплофизических процессов, таких как формирование ударно-сжатого плазменного слоя у поверхности мишени, нагрев, плавление и испарение обрабатываемого материала, разлет пароплазменного облака, формирование ударной волны, закалка из жидкого и осаждение из газообразного состояния и др. /3-4/. С целью выделения из этих явлений тех процессов, которые непосредственно связаны с термокинетическим воздействием плазменного потока, были проведены исследования структурно-фазовых изменений в армко-железе в результате воздействия компрессионными потоками, плазмообразующим веществом которых являлся водород /5/. В этом случае происходит внедрение водорода в приповерхностный слой образцов на глубину не превышающую 0,5 мкм. Поэтому обработку в таком режиме можно рассматривать только как термическое воздействие плазменного потока на приповерхностные слои толщиной более 1 мкм. Известно, что основные эксплуатационные характеристики деталей и узлов различных механизмов определяются в основном поверхностными свойствами, поэтому с целью определения перспективности практического использования подобной обработки было

проведено изучение механических свойств поверхностей, таких как твердость и коэффициент трения.

Обработку образцов компрессионными плазменными потоками осуществляли с помощью газоразрядного магнитоплазменного компрессора (МПК) компактной геометрии в Институте физики НАН Беларуси. Энергия конденсаторной батареи ускорителя составляет 9,6 кДж, что обеспечивает длительность разряда 100 мкс. Плотность мощности потока — $1,8 \cdot 10^5$ Вт/см². МПК работал в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанная вакуумная камера заполнялась рабочим газом (водородом) до давления 400 Па.

Измерение микротвердости проводили на приборе ПМТ-3, а исследования фрикционных характеристик — на трибометре ТАУ-1М. Твердость определяли при нагрузках 0,5-2,0 Н с последующим переводом значений в систему «СИ». Относительная погрешность измерения твердости не превышала 13 %. Трибологические испытания проводились в условиях сухого трения. Инденторы были выполнены в виде гладкого пальца с радиусом закругления 0,5 мм из твердого сплава ВК8 (состав: 92 % WC, 8 % Co, твердость 87,5 HRC). Измерения осуществлялись при нагрузке 1,0 Н. В начальный период трения, соответствующий приработке индентора и образца, погрешность в определении коэффициента трения не превышала 20 %.

Результаты измерения твердости образцов при различных нагрузках, обработанных плазменным потоком водорода (рис. 1) согласуются с данными о структуре модифицированного слоя, сформированного в результате такого воздействия [5]. Как показывают данные измерений при нагрузке 0,5 Н, происходит увеличение значения микротвердости с $3,5 \pm 0,2$ ГПа до $5,2 \pm 0,6$ ГПа в случае однократного воздействия. Спустя несколько месяцев после воздействия водород покидает поверхностные слои, что сказывается также и на твердости поверхности, уменьшающейся до $4,0 \pm 0,5$ ГПа. В слоях толщиной, превышающей 3 мкм (данные измерений при нагрузке 1,0 Н), твердость практически не меняется и составляет: $3,6 \pm 0,2$ ГПа — непосредственно после обработки; $3,2 \pm 0,2$ ГПа — спустя несколько месяцев после обработки. Твердость необработанного материала при нагрузке 1,0 Н — $2,5 \pm 0,2$ ГПа.

Данные трибологических испытаний (рис. 2) согласуются с результатами измерения микротвердости и показывают уменьшение коэффициента трения поверхностных слоев обработанных водородной плазмой образцов более чем в два раза по сравнению с исходными до значения 0,15. С увеличением пройденного индентором пути коэффициент трения увеличивается до значения 0,25, после чего остается неизменным в пределах погрешности измерений. Спустя несколько месяцев после

воздействия коэффициент трения поверхностной области снижается до значения 0,08 и остается ниже коэффициента трения поверхности непосредственно после обработки вплоть до значения 0,25. Коэффициент трения более глубоких слоев, так же как и их твердость, остается неизменным.

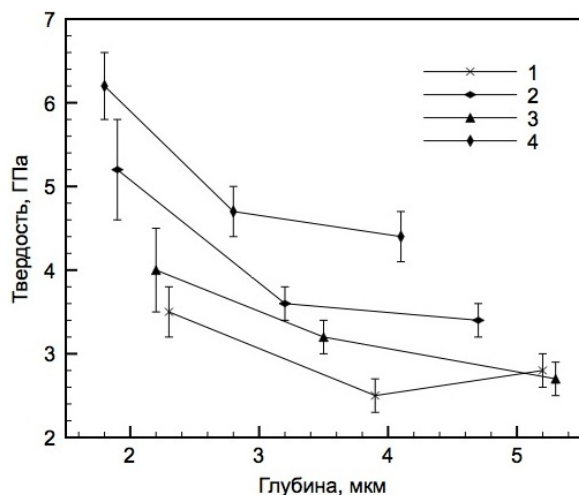


Рис. 1. Микротвердость поверхности железа

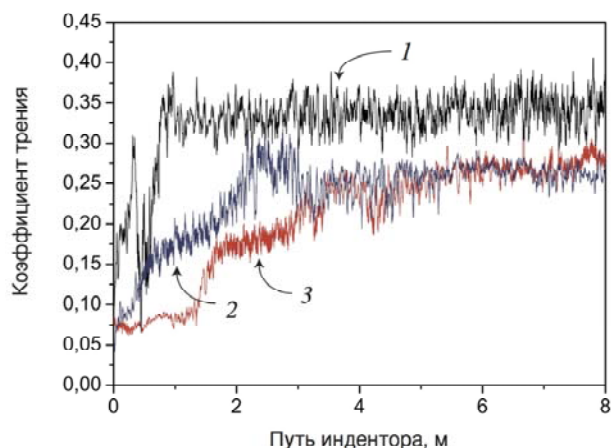


Рис. 2. Коэффициент трения поверхности железа

(1 — исх., 2 — 1 имп., 3 — 1 имп.*, 4 — 5 имп.)
*спустя несколько месяцев после обработки

Увеличение микротвердости и улучшение трибологических характеристик поверхности в результате термокинетического воздействия плазменного потока можно объяснить следующим образом. Анализ термокинетического воздействия компрессионного плазменного потока на образец, показывает, что в процессе плавления и кристаллизации на границе кристалл-расплав будет возникать существенный градиент температур. Представленные в /6/ результаты расчетов, проведенных для случая кристаллизации поверхности кремния, прошедшего аналогичную обработку компрессионным плазменным потоком, позволяют предположить, что и в случае кристаллизации железа в поверхностных слоях будут возникать термоупругие напряжения как сжатия, так и растяжения, причем диапазон изменения напряжений имеет порядок $\pm 10^9$ Па. Подобные термоупругие поля способствуют генерации дислокаций в приповерхностном слое.

Известно, что области сжатия и растяжения, связанные с дислокациями, притягивают атомы примесей, в результате чего движение дислокации затрудняется /7/. Таким образом, внедренный в поверхностные

слои водород препятствует движению дислокаций, что оказывает влияние на увеличение твердости. Когда водород покидает поверхность, дислокации становятся более подвижными и могут выйти на поверхность с образованием ямок травления /8/, подобных представленным в /5/. Одновременно с этим, увеличение подвижности дислокаций приведет к уменьшению твердости поверхности.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории физики плазменных ускорителей Института физики НАН Беларуси за обработку образцов компрессионными плазменными потоками.

Список литературы

1. **V.V. Uglov, V.M. Anishchik, V.V. Astashynski, et al.**, Surface and Coatings Technology, **180-181** (2004) 633-636.
2. **V.M. Anishchik, V.V. Uglov, V.V. Astashynski, et al.**, Vacuum, **70** (2-3) (2003) 269-274.
3. **В.М. Асташинский, Г.И. Баканович, Л.Я. Минько**, Физика плазмы, **10** (5) (1984) 1058-1063.
4. **V.V. Uglov, V.M. Anishchik, V.V. Astashynski, et al.**, Surface and Coatings Technology, **158-159** (2002) 272-275.
5. **В.В. Асташинский, И.Н. Румянцева**. Труды VII симпозиума Беларуси и Сербии по физике и диагностике лабораторной и астрофизической плазмы (ФДП-VII'2008): Минск, 22-26 сентября 2008 г., под ред. Архипенко В.И., Буракова В.С. и Чернявского А.Ф., Минск: Ковчег (2008) 196-199.
6. **В.В. Углов, В.М. Анищик, В.В. Асташинский и др.**, Радиационная физика твердого тела: труды 12-го международного совещания, Севастополь, Украина, 1 – 6 июля 2002 г., под ред. Бондаренко Г.Г. , Москва: изд. НИИ ПМТ (2002) 16-21.
7. Физическое металловедение: в 3 т. под ред.: Р.У. Кана и др., Москва: Металлургия, **т.3** (1968) 484 с.
8. **К. Сангвал**, Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение, Москва: Мир (1990) 285-322.