

УДК 621.7.016.623
DOI: 10.12737/21421

М.Г. Шалыгин, к.т.н.
(Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7),
E-mail: migshalygin@yandex.ru

Наукоёмкая технология уменьшения водородного изнашивания рабочих поверхностей трения

Рассмотрены проблемы снижения водородного изнашивания стальных деталей, работающих в водородной среде и, в частности, в углеводородных жидкостях. Представлены свойства и некоторые параметры качества поверхности стали после термической обработки, высоковакуумного отжига и ионной имплантации. Проведен анализ образовавшихся свойств поверхности на концентрацию водорода в поверхностном слое и интенсивность водородного изнашивания.

Ключевые слова: термическая обработка; высоковакуумный отжиг; ионная имплантация; водородное изнашивание; качество поверхности.

M.G. Shalygin, Can.Eng.
(Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Avenue, Bryansk 241035)

High technology to reduce hydrogen wear of work surfaces of friction

This paper reports the problems considered regarding the hydrogen wear decrease in steel parts operating in hydrogen medium and, in particular, in hydrocarbon liquids. The comparative researches are carried out with samples after thermal treatment, high-vacuum annealing and ionic implantation and also after a combination of these methods. The structure of samples surface layer is investigated after a combined working and the values of micro-hardness of layers formed are given. The investigation of surface quality changes is carried out. The results of comparative abrasion tests of samples are presented. It is defined that after a combined working samples wear decreased. There are shown data on the hydrogen concentration in a surface layer of samples and the analysis of surface properties for hydrogen concentration and hydrogen wear intensity is carried out.

Keywords: thermal treatment; high vacuum annealing; ionic implantation; hydrogen wear; surface quality.

Проблема водородного изнашивания остро стоит в узлах трения, работающих в углеводородных средах. В настоящее время не существует универсальной технологии, позволяющей полностью исключить проникновение атомарного водорода из водородной среды в поверхностный слой металла.

Наибольшее распространение среди средств повышения водородной стойкости получило применение высокопрочных чугунов с графитосодержащей структурой. Графит сфероидальной формы имеет относительно небольшое отношение поверхности к объёму, что определяет наибольшую сплошность металлической основы.

Благодаря высокому содержанию углерода и сложной структуре кристаллической решетки такие чугуны обладают высокой износостойкостью в условиях водородного изнашивания. Однако во многих узлах, где чугун по своим механическим свойствам не может применяться, используют детали, изготовленные из сталей [1].

В частности, при производстве битумных шестеренных насосов из сталей различных марок изготавливают такие детали как шестерни, вставки и др. Одним из элементов, которые в большей степени подвержены водородному изнашиванию являются зубья шестерен [2]. В связи со сложным профилем зубьев их

поверхностное упрочнение носит весьма затруднительный характер. Это обусловлено тем, что качество поверхности зуба должно соответствовать требованиям нормативных документов.

Незначительные отклонения в профиле зуба или качестве его поверхности приводит к вибрациям и шумам при эксплуатации. Так, в частности, на некоторых промышленных предприятиях используются насосы, шестерни которых изготовлены из сталей марок 45, 40Х, 60Г.

Водородное изнашивание стальных шестерен, при перекачивании битумных мастик и эмульсий является основной причиной выхода из строя насосов и остановки линии подачи битума. Поэтому повышение водородной стойкости зубьев стальных шестерен, работающих в условиях водородной среды, без изменения качества поверхности и профиля зуба, имеет научно-практическое значение.

В настоящей работе представлены экспериментальные исследования повышения водородной стойкости стальных деталей совокупностью методов термической обработки, высоковакуумного отжига и ионной имплантации кремнием. Образцы изготовлены из стали 45 и закалены до фактической твердости 40,5...44,0 HRC. Ионная имплантация проводилась на установке «Везувий 3-М». Режимы высоковакуумного отжига и имплантации ионов кремния приведены в работе [3]. Порошкообразный кремний был получен лабораторным путем прокаливанием с магнием диоксида кремния.

Для исследования поверхностного слоя было проведено травление торца образца, подверженного ионной имплантации, 4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. На рис. 1 в поверхностном слое присутст-

вуют светлые полосы. Цвет полос неоднороден, на них встречаются тонкие включения более темного цвета. Полосы, большей частью, расположены параллельно относительно поверхности образца. При этом, чем ближе к поверхности образца, тем плотность данных полос возрастает. Это может говорить о присутствии в структуре стали слоев, насыщенных ионами кремния. Наибольшая глубина залегания полос 655...702 мкм. Ширина полос на наибольшей глубине залегания не превышает 47 мкм.

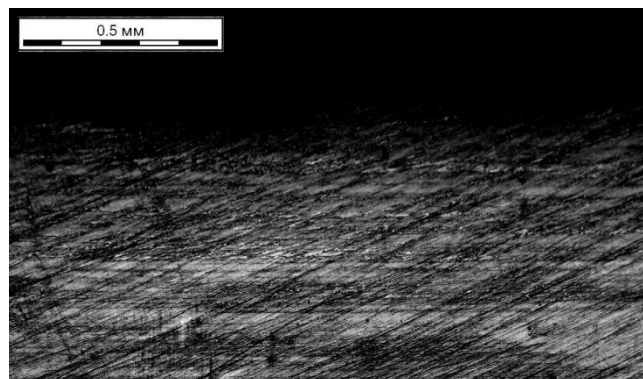


Рис. 1. Торце образца после ионной имплантации

Немаловажный интерес представляет исследование влияния таких полос на качество поверхностного слоя. В целом методика технологического обеспечения параметров качества поверхностного слоя приведена в работе [4]. Как известно, одной из основных характеристик качества поверхностного слоя является шероховатость. В этой связи были произведены измерения шероховатости поверхности до и после проведения технологических операций. В табл. 1 приведены параметры шероховатости образцов.

1. Параметры шероховатости образцов

Обработка	L_0 , мм	L_t , мм	R_a , мкм	R_z , мкм	R_{max} , мкм	R_p , мкм	R_v , мкм	S_m , мм
ТО	0,8	4,8	0,040	0,45	0,56	0,16	0,29	0,05
ТО+ высоковакуумный отжиг		4,8	0,040	0,81	1,59	0,38	0,43	0,04
ТО+ высоковакуумный отжиг + имплантирование ионов кремния		2,4	0,045	0,29	0,49	0,13	0,35	0,02
<i>Примечание.</i> L_0 – базовая длина; L_t – длина трассирования.								

В целом можно говорить о незначительном изменении качества поверхности. Параметр Ra изменился незначительно, при этом следует обратить внимание на уменьшение параметра Sm при проведении ионной имплантации в 2,5 раза по сравнению с термически обработанным образцом и в 2 раза по сравнению с образцом после высоковакуумного отжига. Такие результаты говорят о том, что при проведении данных технологических операций требуемое качество поверхностного слоя не ухудшается, следовательно, последующей механической обработки не потребуются.

Для исследования физико-механических свойств поверхностного слоя были проведены измерения микротвердости полос методом восстановленного отпечатка. Измерения проводили по методу Виккерса на приборе TMB 1000. Микротвердость полос при этом составила $H_{\square} = 56,76$, что приблизительно соответствует твердости по Роквеллу 50 HRC. При этом остальная структура материала имела микротвердость $H_{\square} = 45,37$, что приблизительно соответствует твердости по Роквеллу 44 HRC.

Для проверки эксплуатационных характеристик образцов были проведены испытания на износ. В качестве контртела был взят индентор из термически обработанной стали 45 с твердостью 44,7...44,9 HRC. Нагрузка составила 50 Н. В процессе испытаний измеряли износ по массе каждые 1000 м пути трения. Испытания проводились на машине трения в присутствии смазочного материала, в качестве которого выступало индустриальное масло И-40А. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2.

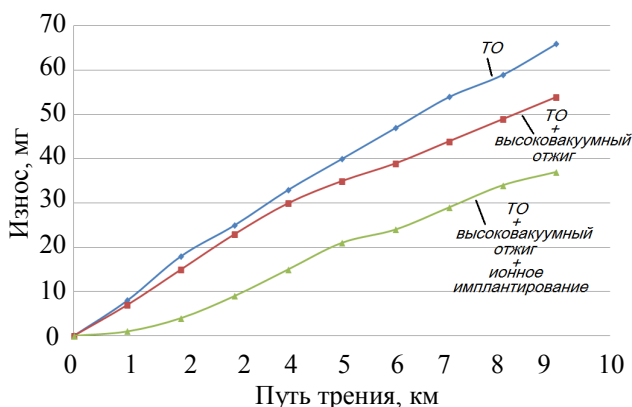


Рис. 2. Результаты сравнительных испытаний на износ

Из рисунка видно, что потеря массы образца после имплантирования ионов кремния почти в 1,8 раза меньше, чем у

образца после термической обработки и в 1,5 раза меньше, чем после высоковакуумного отжига. Следовательно, срок службы поверхностей трения деталей из сталей, которые насыщены ионами кремния, в условиях углеводородной среды, больше по сравнению с поверхностями деталей из сталей, используемыми в промышленности при перекачивании углеводородов.

Одной из причин эффективности совокупности предложенных технологических операций может являться то, что при высоковакуумном отжиге в поверхностном слое образца снижается количество биографического водорода. В то же время при ионной имплантации поверхностный слой насыщается ионами кремния, часть которых может образовать карбиды в поверхностном слое, что косвенно подтверждают полосы на рис. 1. Часть ионов может заполнить собой дефекты кристаллической решетки, такие как вакансии и дислокации, что может являться причиной уменьшения параметра шага шероховатости по средней линии Sm (см. табл. 1). Часть ионов может оседать в междоузлиях решетки, создавая твердый раствор внедрения.

Все это позволяет помешать интенсивному проникновению в поверхностный слой атомарного водорода, выделившегося из смазочного материала или углеводородной среды и, как следствие, уменьшить водородное охрупчивание и водородное изнашивание поверхностного слоя деталей.

Для проверки данной гипотезы было произведено измерение содержания водорода в образцах. Измерения проводились в потоке аргона на анализаторе водорода RHEN-602. Результаты измерений приведены в табл. 2.

2. Содержание водорода в образцах

Обработка	До испытаний, ppm	После испытаний, ppm
ТО	7,4	7,1
ТО+ высоковакуумный отжиг	6,3	7,3
ТО+ высоковакуумный отжиг + имплантирование ионов кремния	6,5	5,4

В результате измерений количества водорода установлено, что содержание биографического водорода в образцах после высоковакуумного отжига и ионной имплантации прак-

тически неизменно. Так, содержание водорода в этих образцах ниже, чем в образцах после термической обработки. Это говорит об эффективности метода высоковакуумного отжига для снижения концентрации биографического водорода в поверхностном слое.

В то же время согласно [1] после фрикционных испытаний при охлаждении образца наблюдается диффузионный процесс в сторону выравнивания концентрации водорода в поверхностном слое. Очевидно, что выравнивание концентрации водорода в поверхностном слое при проведенных авторами исследованиях происходит за счет биографического водорода.

Наряду с этим после испытаний на износ содержание водорода в образцах после ионной имплантации снизилось. В то же время в образцах после высоковакуумного отжига концентрация водорода увеличилась. Это может являться следствием того, что поверхностный слой насыщенный кремнием снижает диффузию водорода из смазывающего материала. Следовательно, можно прийти к заключению, что на повышение срока службы образцов, работающих в условиях углеводородной среды, биографический водород оказывает незначительное влияние по сравнению с водородом, выделившимся из среды.

Таким образом, установлено, что совокупность методов термической обработки, высоковакуумного отжига и ионной имплантации увеличивает износостойкость стальных деталей, снижает концентрацию водорода из смазывающего материала, при незначительном изменении качества поверхностного слоя.

Высоковокумный отжиг, как технологический метод уменьшения водородного изнашивания, эффективен для узлов сухого трения и малоэффективен при наличии водородной среды. В дальнейшем целесообразно рассмотреть влияние предложенной совокупности методов на субшероховатость поверхности.

В связи с тем, что субшероховатость поверхности коррелирует с зернистостью материала [5] и слабо коррелирует с видом механической обработки [6], такие исследования представляют интерес для определения

свойств образованных зерен и их влияния на свойства поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Защита** от водородного износа в узлах трения / Колл. авт.; под. ред. А.А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1980. – 135 с.
2. **Шалыгин, М.Г.** Водородное и абразивное изнашивание поверхностей деталей насосов при перекачивании углеводородов // *Строительные и дорожные машины.* – 2014. – № 4. – С. 27-30.
3. **Шалыгин, М.Г.** Формирование структуры в поверхностном слое деталей машин методами высоковакуумного отжига и ионной имплантации // *Научно-технические технологии в машиностроении.* – 2016. – № 7 (61). – С. 10–13.
4. **Суслов, А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
5. **Суслов, А.Г., Шалыгин, М.Г., Кузнецов, С.В.** Исследование поверхностей с различной механической обработкой на уровне субшероховатости // *Научно-технические технологии в машиностроении.* – 2015. – № 9(51). – С. 45–47.
6. **Суслов, А.Г., Порошин, В.В., Шалыгин, М.Г., Кузнецов, С.В.** Взаимосвязь нанонеровностей (субшероховатости поверхности деталей и зернистости материала) // *Научно-технические технологии в машиностроении.* – 2015. – № 11(53). – С. 3–7.

REFERENCES

1. *Hydrogen Wear Protection in Friction Units* / Group of authors; under the editorship of A.A. Polyakov – M.: Mechanical Engineering, 1980. – pp. 135.
2. Shalygin, M.G. Hydrogen wear and abrasion of surfaces in pump parts at hydrocarbon transfer // *Construction and Road Building Machines* – 2014. – № 4. – pp. 27-30.
3. Shalygin, M.G. Structure formation in surface layer of machinery by methods of high-vacuum annealing and ionic implantation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2016. – № 7 (61). – pp. 10–13.
4. Syslov, A.G. *Machinery Surface Layer Quality.* – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
5. Syslov, A.G., Shalygin, M.G., Kuznetsov, S.V. Investigation of surfaces with different machining at sub-roughness level // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2015. – № 9(51). – pp. 45–47.
6. Suslov, A.G., Poroshin, V.V., Shalygin, M.G., Kuznetsov, S.V. Correlation of nano-imperfections (sub-roughness of machinery surfaces and material grain) // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2015. – № 11(53). – pp. 3–7.

Рецензент д.т.н. А.Ю. Албагачиев