

УДК 621.77.016:62178.06

DOI: 10.30987/article_5d9dc9b88e23f5.96382622

В.А. Логвин, к.т.н., **И.В. Терешко**, к.физ-мат.н.
(ГУВПО «Белорусско-Российский университет»
212000, Республика Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43),

С.А. Шептунов, д.т.н.
(Институт конструкторско-технологической информатики РАН,
127055, Российская Федерация, г. Москва, а/я 24)

E-mail: logvinvladim@yandex.ru; ship@ikti.org.ru; iter41@mail.ru

Упрочнение конструкционных сталей воздействием тлеющего разряда

Представлены результаты исследований изменений микротвёрдости конструкционных сталей 18ХГТ, ШХ15, 38ХМЮ после обработки в тлеющем разряде. Установлено, что на образцах всех исследуемых сталей наблюдается изменение микротвёрдости в течение всего периода исследований с различными осцилляциями. Степенью воздействия тлеющего разряда можно управлять и соответственно обеспечить её такой, чтобы не происходило значительных осцилляций по изменению внутренней структуры системы, обеспечивая более управляемое целенаправленное изменение физико-механических свойств.

Ключевые слова: плазма; тлеющий разряд; микротвёрдость; автоматизированная технологическая среда; вакуумные установки.

V.A. Logvin, Can. Sc. Tech., **I.V. Tereshko**, Can. Sc. Phys-Math.
(SIHVE "Belorussian-Russian University", 43, Mir Avenue, Mogilyov, Republic Belarus, 212000)

S.A. Sheptunov, Dr. Sc. Tech.
(Institute of Design-technological Informatics, RAS, m/b 24, Moscow, Russian Federation, 127055)

Structural steel strengthening by glow discharge impact

The investigation results in micro-hardness changes of 18HGT, ShH15, 38HMU structural steels after processing in a glow discharge are presented. It is defined that in all steel samples under analysis one observes micro-hardness changes during the whole research period with different oscillations. The degree of a glow discharge impact can be controlled and, ensured, accordingly, as such that no substantial oscillations could take place regarding changes in the inner structure of the system providing a more controlled purposeful change of physical and stress-strain properties.

Keywords: plasma; glow discharge; micro-hardness; automated technological environment; vacuum plants.

Введение

Управление физико-механическими свойствами конструкционных сталей для решения задач стоящих перед современным машиностроением является актуальной проблемой. Эффективное решение вышеуказанной проблемы осуществляется по различным направлениям для современного производства: создаются новые материалы с необходимыми физико-механическими свойствами; разрабатываются способы их обработки, адаптирован-

ные под автоматизированные технологии; применяются эффективные смазочные материалы; разрабатываются технологии по формированию высокопрочных покрытий и т.д.

Прогнозирование необходимой надёжности технических систем при постоянном повышении скоростей, давлений, рабочих температур становится всё актуальнее. Рабочий ресурс входящих в техническую систему деталей должен быть уравновешен и сбалансирован, исходя из тех нагрузок и условий, при которых они эксплуатируются. При этом выход из



стройка технической системы очень часто связан с недопустимо быстрым достижением предельного износа или поломкой одной, или нескольких деталей системы. Это, в первую очередь, связано с образованием в поверхностных слоях материалов деталей технических систем микродефектов, приводящих к макроразрушениям.

В связи с этим необходимо разрабатывать новые способы, обеспечивающие формирование в поверхностных слоях на рабочих поверхностях деталей, заданные физико-механические свойства отличающиеся: экологической безопасностью; минимальным изменением геометрических размеров и формы; внедрением контролируемых количеств легирующей примеси; чистотой условий при реализации процессов, исключающих загрязнение образцов нежелательными примесями; простотой управления процессом; высокой воспроизводимостью получаемых структур; экономичностью.

Повышение поверхностных эксплуатационных характеристик материалов достигается использованием механических, термических, деформационно-термических, химико-термических и физических способов упрочнения и легирования. При использовании этих способов не всегда обеспечивается достаточно хорошая адгезия покрытий с основой, равномерность и однородность химического состава и структуры в поверхностном слое и упрочнение происходит не только на поверхности, но и в неконтролируемом объёме материала рабочего поверхностного слоя деталей.

Для обеспечения износо- и коррозионной стойкости достаточно проведения изменений физико-механических свойств в поверхностных слоях материала на величину максимально допустимого износа. Очень редко разрушение деталей происходит из глубины объёма материала и поэтому не требует её упрочнения или перестройки. Необходимость обеспечения заданной равномерности структуры и свойств поверхностных слоев поспособствовало развитию способов ионно-плазменной обработки, применение которых становится более целесообразным и экономически сопоставимым по сравнению с традиционными технологиями.

Относительно новым направлением ионно-плазменной обработки является обработка в тлеющем разряде в контролируемых технологических средах путем воздействия ускоренных ионов на твердые тела, при этом оно отличается широкой универсальностью использования для упрочнения поверхностных слоёв кристаллических материалов [1 – 5]. Поверхностный слой материалов, попадая под действие плазмы тлеющего разряда, претерпевает

равномерное и относительно однородное структурное преобразование, что и обуславливает изменение его свойств. Использование воздействия тлеющего разряда позволяет формировать новые структурно-фазовые состояния с высокой плотностью дефектов, которые меняют физико-механические и химические свойства поверхностного слоя определяющие служебные характеристики конструкционных материалов.

Главной задачей данной работы является исследование изменений микротвёрдости на различных поверхностях образцов из конструкционных сталей после воздействия плазмы тлеющего разряда для изучения закономерностей самоорганизационных процессов [6 – 8], протекающих в этих материалах путём инициирования внутренних сил за счёт слабого внешнего воздействия. Это обеспечивает условия для разработки новых способов, технологий и автоматизированных устройств для создания автоматизированной технологической среды по упрочнению деталей из конструкционных сталей различной формы и размеров.

Методика исследования

Для проведения исследований изготавливались образцы толщиной 10 мм из сталей 18ХГТ, ШХ15, 38ХМЮ. Для измерения микротвёрдости H_{μ} использовали микротвердомер ПМТЗ при нагрузке 1,0 Н. Замеры микротвёрдости проводили перед обработкой и после обработки каждую неделю в течение шести недель. При этом измерение микротвёрдости проводили как на облученной поверхности, так и на поверхности, обращённой к катоду. Обработку образцов проводили в вакуумной камере в атмосфере остаточных газов воздуха при давлении 1,6 Па при напряжении в разряде 1,9 кВ с различным временем выдержки 30, 45, 60 мин, что обеспечивает введение в образцы различной дозы облучения $1,25 \cdot 10^{16}$, $1,88 \cdot 10^{16}$ и $2,5 \cdot 10^{16}$ ион/см² соответственно. Температуру образцов измеряли сразу после обработки, и она не превышала 323...333 °К, что подтверждает невозможность каких-либо изменений структуры, вызываемых тепловым воздействием.

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментально установлено, что типы и параметры формирующейся структуры в обрабатываемых плазмой тлеющего разряда материалах зависят от исходной, уже сформированной предварительной обработкой дефектной структуры. Поэтому перед проведением исследований на всех образцах измеряли микротвёрдость с двух сторон, как подлежащую



обработке плазмой тлеющего разряда, так и тыльную, обращенную и контактирующую с катодом.

На рис. 1 представлены результаты изменений микротвёрдости в ходе проводимых исследований образцов из стали 38ХМЮ. Как видно из графических зависимостей основные изменения и, соответственно, процессы перестройки системы протекают в первые две недели. В зависимости от вводимой дозы облучения наблюдается характерная зависимость, в результате которой резко уменьшается микротвёрдость при малой дозе облучения и резко увеличивается при большой на облученной поверхности, а на необлученной поверхности выявлена тенденция к увеличению микротвёрдости.

При средней дозе облучения по истечении двух недель как на облученной поверхности, так и на не облученной поверхности наблюдается характерное увеличение микротвёрдости. В последующие четыре недели, как видно из графика (см. рис. 1) система стремится к равновесию, и к концу исследуемого периода

микротвёрдость на всех образцах, получивших разную дозу облучения, практически выравнивается с небольшим расхождением, но отличающимся от исходного первоначального необлученного состояния в сторону увеличения. При этом следует отметить, что образцы, получившие среднюю дозу облучения отмечают стабильный прирост микротвёрдости, и величина этой дозы для данной стали может считаться оптимальной, так как не приводит к резким пульсациям микротвёрдости на двух исследуемых поверхностях. Так же можно утверждать, что и процессы перестройки проходят в этом случае относительно равномерно без резких скачков во всем объеме образцов.

На рис. 2 представлены результаты изменений микротвёрдости в ходе проводимых исследований в течение всего периода исследований образцов из стали ШХ15. Как видно из представленных графических зависимостей основные изменения и соответственно синергетические процессы перестройки системы протекают в первые две недели.

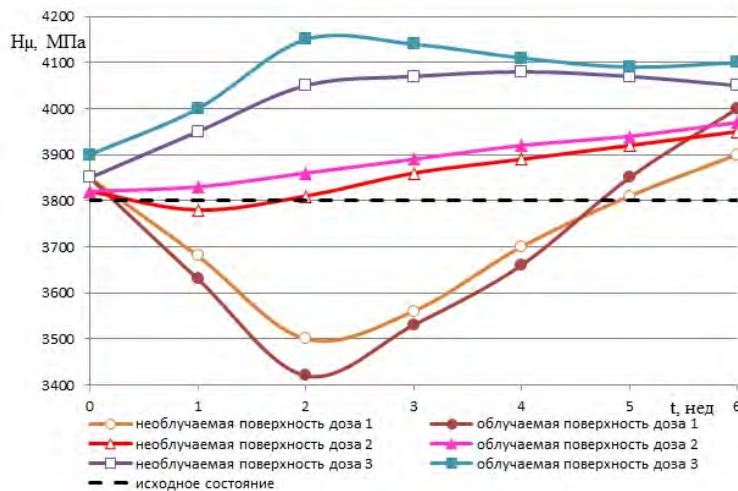


Рис. 1. Графические зависимости изменений микротвёрдости образцов из стали 38ХМЮ с различной дозой облучения на облученной и необлученной поверхности

В зависимости от дозы облучения наблюдается несколько иная зависимость – резко уменьшается микротвёрдость как на облученной, так и на необлученной поверхности. При этом чем больше доза облучения, тем больше уменьшение микротвёрдости на обеих поверхностях. В последующие четыре недели в результате исследований установлено, что микротвёрдость начинает расти.

Можно утверждать, что система демонстрирует стремление к равновесию, о чём свидетельствуют полученные графические зависимости и к концу исследуемого периода микротвёрдость на всех образцах, получивших разную дозу облучения, практически выравнивается с небольшим расхождением, но отличающимся от исходного первоначального

необлученного состояния в сторону увеличения, т.е. введенная энергия относительно равномерно распределилась по объёму образца, выполнив соответствующую работу.

На рис. 3 представлены результаты изменений микротвёрдости в течение периода времени, прошедшего после облучения, при исследовании образцов из стали 18ХГТ. Как видно из имеющихся графических зависимостей основные изменения микротвёрдости и соответственно процессы, происходящие внутри образцов по перестройке системы, протекают в первые две недели. Не зависимо от дозы наблюдается несколько иная, но также устойчивая зависимость, в результате которой резко увеличивается микротвёрдость как на облученной поверхности, так и на не-



облучённой поверхности. При этом для большой и малой доз увеличение микротвёрдости

более заметное, чем для средней.

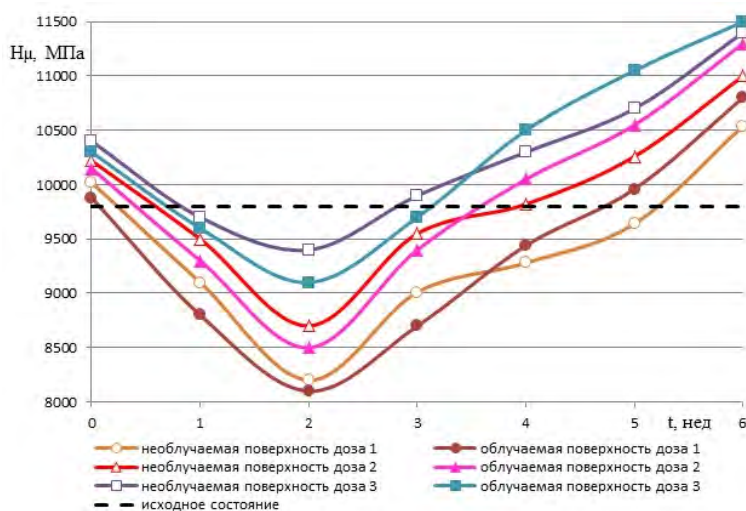


Рис. 2. Графические зависимости изменений микротвёрдости образцов из стали ШХ15 с различной дозой облучения и на облучённой и необлучённой поверхности

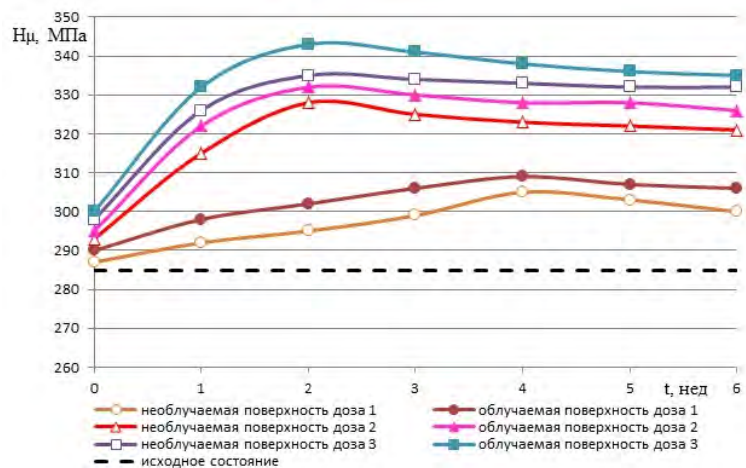


Рис. 3. Графические зависимости изменений микротвёрдости образцов из стали 18ХГТ с различной дозой облучения и на облучённой и необлучённой поверхности

В последующие четыре недели в результате исследований выявлено, что для образцов, получивших большую и малую дозы облучения наблюдается закономерность к снижению микротвёрдости, а для образцов, получивших среднюю дозу, тенденция к росту микротвёрдости сохраняется. При этом у всех систем наблюдается стремление к равновесию, о чём свидетельствуют полученные графические зависимости, и к концу исследуемого периода микротвёрдость на всех образцах, получивших различную дозу облучения, практически выравнивается с небольшим расхождением, но отличающимся от исходного первоначального необлучённого состояния в сторону увеличения.

При этом следует отметить, что образцы, получившие среднюю дозу облучения, отмечают стабильный прирост микротвёрдости, и величина этой дозы для данной стали может считаться оптимальной, так как не приводит к резким пульсациям микротвёрдости на двух

исследуемых поверхностях. Так же можно утверждать, что и процессы перестройки проходят в этом случае относительно равномерно без резких скачков и, соответственно, ниже вероятность образования зон в образцах с резким и очень высоким градиентом остаточных напряжений, вызванных скоплением в данном объёме дефектов.

В результате проведенных исследований на образцах, всех подлежащих обработке конструкционных сталей, выявлена закономерность, подтверждающая то, что после обработки плазмой тлеющего разряда в течение относительно длительного периода происходят внутренние процессы перестройки системы. Как правило, эти процессы сопровождаются изменением структуры.

Все исследуемые образцы имели значительную толщину 10 мм, и изменения микротвёрдости на не облучаемой стороне подтверждают наличие дальнего действующего эффекта,

проявляющегося в её увеличении вследствие увеличения числа дефектов в данном приповерхностном слое.

Введённая в результате ионной бомбардировки облучаемой поверхности энергия накапливается в виде потенциальной энергии дефектов структуры поверхностного слоя на облучаемой поверхности и затем затрачивается на выполнение работы по приведению систем к равновесию в имеющемся объёме, в чём и проявляется синергетический эффект.

Степенью воздействия тлеющего разряда и соответственно дозой облучения можно управлять, обеспечивая её такой, чтобы не происходило значительных осцилляций по изменению внутренней структуры системы. Это обеспечивает более управляемое целенаправленное изменение физико-механических свойств в поверхностном слое исследуемых конструкционных сталей в заданном направлении. Исходя из этого, можно сделать вывод о возможности автоматизации данных технологий и разработки автоматизированных устройств для создания автоматизированной технологической среды по упрочнению деталей из конструкционных сталей различной формы и размеров.

Выводы:

1. Кристаллические структуры, к которым относятся все исследуемые конструкционные стали, активно реагируют на воздействие тлеющего разряда, что приводит к изменению микротвёрдости на различных поверхностях и, соответственно, дефектной структуры. Эффект от воздействия определяется уже имеющейся плотностью наведенных дефектов предыдущими обработками и химическим составом стали. В связи с этим можно выделить сталь ШХ15, у которой наблюдается значительная осцилляция микротвёрдости как на облучаемой, так и на не облучаемой поверхности в исследуемом диапазоне доз облучения.

2. Микротвёрдость и соответственно наведенная плотность дислокаций максимальна в приповерхностных слоях, обращенных к потоку бомбардирующих ионов и убывает вглубь материала. Это подтверждается более значительным приростом величины микротвёрдости на облучаемой поверхности, чем на не облучаемой.

3. Степенью воздействия тлеющего разряда можно управлять и соответственно обеспечить её такой, чтобы не происходило значительных осцилляций по изменению внутренней структуры системы. Это обеспечивает более управляемое целенаправленное изменение физико-механических свойств в поверхностном слое исследуемых конструкционных сталей в заданном направлении.

4. Как уже разработанные, так и вновь разрабатываемые технологии с использованием воздействия тлеющего разряда легко поддаются автоматизации и реализации на автоматизированных устройствах, которые можно

использовать для создания автоматизированной технологической среды по упрочнению деталей из конструкционных сталей различной формы и размеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терешко, И.В., Логвин, В.А., Редько, В.П. Эффект дальнего действия и формирование нанокластеров в металлах при воздействии плазмы тлеющего разряда // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 1. – С. 59–70.
2. Терешко, И.В., Логвин, В.А., Редько, В.П. Изменение свойств материалов и необходимость автоматизации технологической среды плазменной обработки в тлеющем разряде // Качество. Инновации. Образование.– 2015. – № 5, том II. – С. 403–410.
3. Терешко, И.В., Логвин, В.А., Терешко, В.М., Шептунов, С.А. Модификация материалов в тлеющем разряде // Вестник Брянского Государственного технического ун-та. – 2016. – № 3. – С. 171–176.
4. Терешко, И.В., Логвин, В.А., Терешко, В.М., Редько, В.П., Шептунов, С.А. Упрочнение металлов и сплавов при низкоэнергетическом ионном воздействии, индуцирующем нелинейные процессы // Фундаментальные и прикладные проблемы машиностроения: сб. тр. VI Международной конференции «Конструкторско-технологическая информатика» / под ред. канд. соц. наук А.В. Морозовой. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – С. 21–29.
5. Логвин, В.А., Терешко, И.В., Шептунов, С.А. Изменение дислокационной структуры α -Fe в результате воздействия тлеющего разряда // Вестник Брянского государственного технического ун-та. – 2018. – № 3. – С. 47–56.
6. Лоскутов, А.Ю., Михайлов, А.С. Введение в синергетику. – М.: Наука, 1990. – 270 с.
7. Хакен, Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 404 с.
8. Николис, Г., Пригожин, И. Самоорганизация в неравновесных. – М.: Мир, 1977. – 512 с.

REFERENCES

1. Tereshko, I.V., Logvin, V.A., Redko, V.P. Long-range effect and formation of nano-clusters in metals at glow discharge plasma effect // *Bulletin of Belorussian-Russian University*. – 2013. – No.1. – pp. 59-70.
2. Tereshko, I.V., Logvin, V.A., Redko, V.P. Material properties changes and necessity in technological environment automation of plasma processing in glow discharge // *Quality. Innovations. Education*. – 2015. – No.5, Vol. II. – pp. 403-410.
3. Tereshko, I.V., Logvin, V.A., Tereshko, V.M., Sheptunov, S.A. Material modification in glow discharge // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – No.3. – pp. 171-176.
4. Tereshko, I.V., Logvin, V.A., Tereshko, V.M., Redko, V.P., Sheptunov, S.A. Metal and alloy strengthening at low-power ionic impact induced non-linear processes // *Fundamental and Applied Problems in Mechanical Engineering: Proceedings of the VIth Inter. Confv. "Design-technological Informatics"* / under the editorship of A.V. Morozova, Can. Sc. Sociol. – М.: "Spectrum" Publishing House, 2017. – pp. 21-29.
5. Logvin, V.A., Tereshko, I.V., Sheptunov, S.A. Change of α -Fe dislocation structure as a result of glow discharge impact // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2018. – No.3. – pp. 47-56.
6. Loskutov, A.Yu., Mikhailov, A.S. *Introduction in Synergetics*. – М.: Science, 1990. – pp. 270.
7. Haken, G. *Synergetics*. – М.: World, 1980. – pp. 270.
8. Nikolis, G., Prigozhin, I. *Self-organization in Non-equilibrium*. – М.: World, 1977. – pp. 512.

Рецензент д.т.н. А.А. Ситников

