

УДК 533.924, 673, 621

Создание прочного микрорельефа на поверхности стали–45 с помощью микроплазменных разрядов

В. А. Иванов, М. Е. Коньжев, А. А. Дорофеюк, Т. И. Камолова,
Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева, И. А. Хренникова

Проведены экспериментальные исследования сильного локального взаимодействия микроплазменных разрядов с образцами из стали–45 при возбуждении импульсных электрических токов в разрядах с амплитудами от 100 до 600 А. При этом на поверхности образцов формируется сплошной переплавленный слой, который характеризуется сильно измененными микрогеометрическими, физическими и триботехническими свойствами металла. Определены режимы возбуждения микроплазменных разрядов, в результате воздействия которых на поверхности образцов создается развитый микрорельеф. Его прочностные свойства существенно превосходят соответствующие характеристики стальных образцов после стандартной термической закалки.

PACS: 81.05.-t

Ключевые слова: плазма, разряд, поверхность, сталь, рельеф, прочность.

Введение

В настоящее время для промышленной обработки металлических изделий различного назначения применяются лучевые, пучковые, термомеханические и плазменные методы [1].

Такие источники концентрированной энергии, как плазма, лазеры, пучки заряженных частиц, можно эффективно применять лишь для отдельных видов обработки металлических изделий с простыми геометрическими формами в виде плоскости или цилиндра. В [2] предложен универсальный плазменный метод обработки металлов и сплавов, основанный на новых принципах возбуждения импульсных микроплазменных разрядов (МПР), способных упрочнять металлические изделия со сложной формой поверхности.

В данной работе новый метод возбуждения микроплазменных разрядов использовался для эффективной модификации поверхности образцов

из стали–45, широко применяемой в узлах трения машин и механизмов. В отличие от ранее рассмотренного метода МПР [3, 4], в настоящей работе изучался его усовершенствованный вариант, позволяющий проводить микроплазменную обработку металлических изделий при постоянных значениях амплитуды электрического тока в разрядах, получать стабильные результаты и значительно сокращать время обработки образцов.

Основные задачи данной работы состояли в следующем:

- исследовать возможность применения усовершенствованного микроплазменного метода для формирования прочного микрорельефа на поверхности стали–45;
- изучить свойства микрорельефа, образующегося на поверхности образцов из стали–45 в результате возбуждения микроплазменных разрядов;
- исследовать металлофизические и триботехнические характеристики образцов в результате их взаимодействия с импульсными микроплазменными разрядами прямоугольной формы при различных постоянных значениях амплитуды электрического тока в разрядах, а именно 100, 200, 400, 650 А;
- исследовать влияние предварительной термической обработки на формирование диэлектрической оксидной пленки на поверхности образцов из стали–45;
- исследовать влияние различных режимов микроплазменной обработки на формирование прочного микрорельефа на поверхности образцов из стали–45.

Иванов Вячеслав Алексеевич, заведующий отделом¹.
Коньжев Михаил Евгеньевич, научный сотрудник¹.
Дорофеюк Анна Александровна, научный сотрудник¹.
Камолова Татьяна Ивановна, научный сотрудник¹.
Куксенова Лидия Ивановна, зав. лабораторией².
Лаптева Валерия Григорьевна, ст. научный сотрудник².
Хренникова Ирина Александровна, научный сотрудник².
¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru
²Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.
Россия, 101990, Москва, Харитоньевский пер., 4.

Статья поступила в редакцию 28 октября 2014 г.

© Иванов В. А., Коньжев М. Е., Дорофеюк А. А., Камолова Т. И., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Хренникова И. А., 2014

Метод микроплазменной обработки поверхности металлов

Возбуждение импульсных МПР на поверхности металлов и измерение характеристик плазмы проводили в ИОФ РАН на установке «Сфера» (рис. 1). Установка состоит из сферической вакуумной камеры диаметром 50 см, оборудованной плазменным инжектором, системой обеспечения вакуумных условий (форвакуумный насос, вакуумная магистраль, вакуумметр и другие необходимые устройства), системой крепления и перемещения металлических образцов, системой диагностики плазменных и электрических параметров разрядов. Остаточное давление воздуха в вакуумной камере поддерживается на уровне 0,01—0,05 Торр.

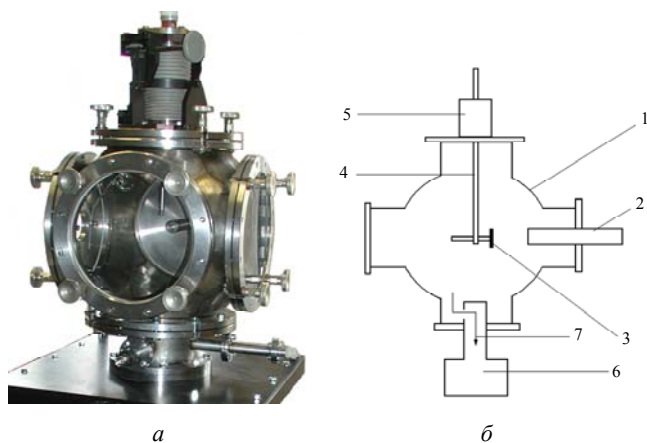


Рис. 1. Экспериментальная установка «Сфера»: а — фотография внешнего вида установки, б — схема размещения плазменного инжектора и образца в установке: 1 — вакуумная камера, 2 — плазменный инжектор, 3 — образец на держателе, 4 — шток вакуумного манипулятора, 5 — вакуумный манипулятор, 6 — вакуумный насос, 7 — движение потока откачиваемого воздуха из камеры в форвакуумный насос

Плазменный инжектор коаксиального типа с водяным охлаждением создает импульсный поток плазмы в результате импульсного высоковольтного электрического разряда, возникающего на поверхности диэлектрика. В качестве плазмообразующего диэлектрического материала в инжекторе используется полиметилметакрилат.

Измерения, выполненные плазменными зондами, показали, что основным ионным компонентом плазмы являются ионы водорода (90—80 %) и ионы углерода (10—20 %), а доля более тяжелых ионов составляет менее 1 %. Основные характеристики импульсного потока водородно-углеродной плазмы: величина электронной концентрации в центре вакуумной камеры достигает $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$; максимальная плотность плазмы в области размещения образцов $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$; характерная длительность спадающего во времени импульсного потока

плазмы составляет около 20 мкс. Электронная температура плазмы находится в интервале значений 1—10 эВ: вблизи переднего фронта импульса плазмы в течение первых 5 мкс температура электронов близка к значению 10 эВ, вблизи заднего фронта импульса плазмы в течение последних 5 мкс температура электронов составляет уже около 1 эВ. На расстоянии около 3 см от торца плазменного инжектора, где размещаются исследуемые образцы стали-45, величина плотности плазмы находится в интервале значений от $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ до $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

В экспериментах использовали образцы из стали-45 с массовым составом: железо 98,71—98,14 %, кремний 0,17—0,37 %, марганец 0,7—1 %, углерод 0,42—0,49 % (ГОСТ 1050-88). Образцы из стали-45 имели форму параллелепипеда с размерами 4×4×12 мм и подвергались стандартной механической обработке методами фрезерования, шлифования и полирования (исходный контрольный образец 01-45). Остальные образцы после стандартной механической обработки подвергались термической обработке для формирования на поверхности образцов диэлектрической оксидной пленки. Для этого образцы нагревались при температуре $T_{отж} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере воздуха в течение 60 минут (контрольный образец после термической обработки 02-45).

После термического отжига исследуемые образцы подвергались воздействию микроплазменных разрядов при следующих условиях: импульсное электрическое напряжение на образцах — 400 В, длительность импульсов электрического тока разрядов 20 мс, амплитуда электрического тока микроплазменных разрядов $i = 100 \text{ А}$ (образец 03-45), $i = 200 \text{ А}$ (образец 04-45), $i = 400 \text{ А}$ (образец 05-45) и $i = 650 \text{ А}$ (образец 06-45). Все образцы подвергались воздействию 10 импульсных разрядов ($N = 10$). Для образца 03-45 в связи с замедлением процесса формирования микрорельефа при $i = 100 \text{ А}$ электрическое напряжение на образце после 3 импульсов было повышено на 10 %, а именно до -450 В, и далее это значение поддерживалась в течение следующих 7 импульсов обработки.

В описанных выше условиях взаимодействие потока плазмы с образцом приводило к тому, что на его поверхности происходило возбуждение микроплазменных разрядов с вероятностью, близкой к 100 %. Делитель напряжения, встроенный в электрическую цепь питания МПР, позволял измерять падение напряжения на металлическом образце в течение импульса. Ток в микроплазменных разрядах регулировался внешним балластным резистором, величина которого могла изменяться от 4 до 0,5 Ом, что давало возможность изменять ток

в разрядах от 100 до 800 А. Ток измерялся калиброванным датчиком Холла, который был встроен в основной блок электрического питания микроплазменных разрядов.

При подаче на образец импульса отрицательного электрического напряжения длительностью 20 мс и амплитудой 400 В, передний фронт импульса напряжения опережал на несколько микросекунд фронт импульса плазмы и, соответственно, момент возбуждения микроплазменного разряда. Это давало возможность измерять электрическое напряжение на образце до возбуждения микроплазменного разряда, изменение напряжения в момент возбуждения и в течение всего времени существования разряда. Также регистрировались осциллограммы электрического тока существования микроплазменного разряда, проходящего через образец в течение 20 мс.

При взаимодействии импульсного потока плазмы инжектора с металлическими образцами на их поверхности возбуждались МПР. Эти разряды инициировались в местах разрыва диэлектрической оксидной пленки на поверхности образцов или на границе оксидной пленки и открытой поверхности металла. Инициирование микроплазменных разрядов происходило в результате возникновения разности потенциалов между внешней поверхностью оксидной пленки и металлом, величина которой была достаточно высока (~200 В), для того чтобы на краю тонкой пленки возникало электрическое поле с напряженностью до 2 МВ/см [5]. Это сильное локальное электрическое поле вызывало электрический пробой по поверхности диэлектрической пленки с образованием плотной плазмы, в результате чего происходило возбуждение электрического тока МПР и его локализация на поверхности образцов.

В местах локализации тока и выделения энергии, т. е. в местах возникновения микроплазменных разрядов на поверхности образца происходило плавление металла в области с характерным размером от 0,1 до 20 мкм, над которой плотная плазма создавала давление более 100 атмосфер [6]. При этом поверхность расплава деформировалась и приобретала форму кратера. Вследствие движения микроплазменных разрядов по поверхности образца и сверхбыстрого остывания расплавленного металла (за счет теплопроводности и отвода тепла вглубь металла) форма расплавленной поверхности в виде кратера сохранялась после смещения микроплазменного разряда. Многократное воздействие микроплазменных разрядов (достаточно 10 импульсов) формировало на поверхности образца из стали–45 сплошной переплавленный слой в виде перекрывающихся кратеров, т. е. микрорельеф, обладающий повышенными прочностными характеристиками.

Величина падения напряжения на образце на стадии протекания электрического тока через образец составляла 30—50 В, что в 2—2,5 раза превосходило величину стандартного падения напряжения в разряде вакуумной дуги (15—20 В) при той же величине электрического тока [7].

Фотография свечения в видимом диапазоне длин волн внешнего потока плазмы, создаваемого плазменным инжектором, представлена на рис. 2.



Рис. 2. Фотография свечения плазменного потока инжектора: справа — выходное сопло плазменного инжектора диаметром 30 мм

Характерная осциллограммы импульсов ионного тока насыщения плазмы вблизи образцов и электрического тока в плазменном инжекторе представлены на рис. 3.

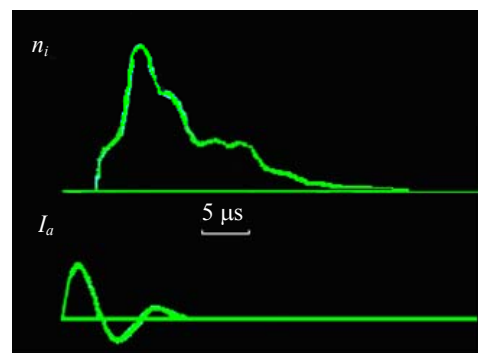


Рис. 3. Осциллограммы импульсов ионного тока насыщения плазмы n_i и электрического тока I_a в плазменном инжекторе: $n_{i \max} = 5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $I_{a \max} = 1,5 \text{ кА}$

Как уже было сказано, инициирование микроплазменных разрядов на поверхности образца проводилось при начальном электрическом отрицательном напряжении на образце –400 В. При этом при взаимодействии внешнего потока плазмы с образцом на его поверхности возникали микроплазменные разряды (рис. 4), которые представляли собой яркие локализованные светящиеся плазменные образования с характерными размерами от 1 до 100 мкм и с высокой плотностью плазмы, движущейся с большой скоростью (до 500 м/с) по поверхности образцов [8].

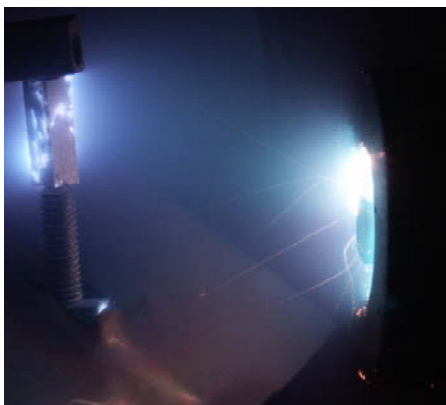
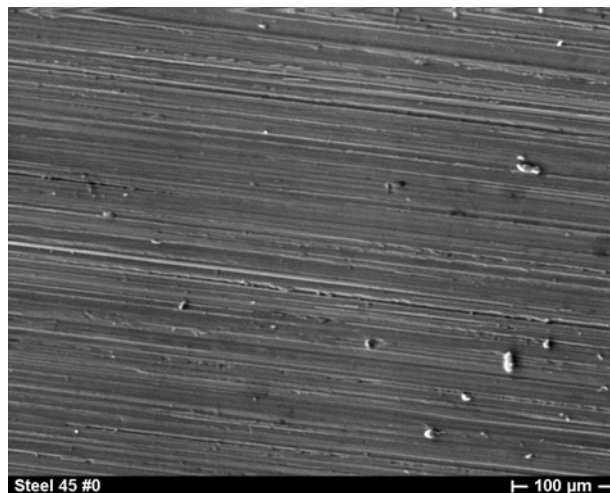


Рис. 4. Фотография микроплазменных разрядов на образце (слева) при воздействии плазменного потока инжектора (справа). Диаметр выходного сопла инжектора 30 мм

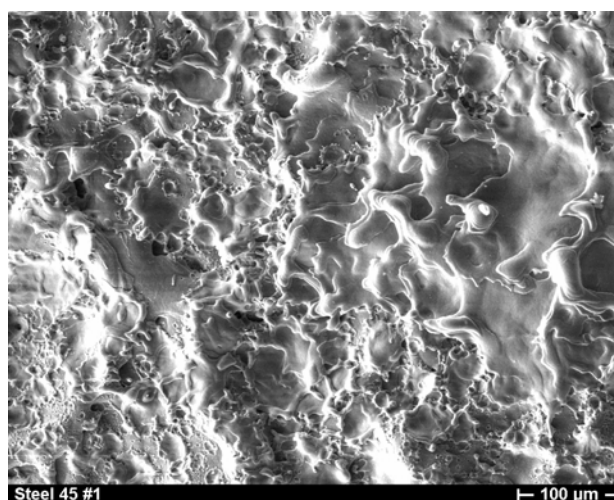
В местах локализации микроплазменных разрядов возникали микрократеры. В результате воздействия 10 импульсов МПР на поверхности образца из стали-45 формировался сплошной переплавленный слой в виде перекрывающихся кратеров, т. е. микрорельеф с характерными размерами выступов от 1 до 20 мкм (рис. 5).

Исследуемые режимы микроплазменной обработки образцов из стали-45

Изучалось влияние предварительной механической обработки образцов из стали-45, а также величины импульсного электрического тока возбуждаемых микроплазменных разрядов на формирование прочного микрорельефа на поверхности образцов. В частности, исследовались металлофизические и триботехнические характеристики образцов из стали-45 в результате их взаимодействия с импульсными микроплазменными разрядами прямоугольной формы при различных постоянных значениях амплитуды электрического тока в разрядах, конкретно 100, 200, 400, и 650 А. Результаты исследований представлены в таблице.



а



б

Рис. 5. Фотография фрагмента поверхности размером 550×550 мкм образца из стали-45, полученная в растровом электронном микроскопе: а — после механической и термической обработки образца; б — после механической, термической и микроплазменной обработки 10 импульсами микроплазменных разрядов при токе 200 А и длительности импульсов 20 мс

Таблица

Режимы обработки исследуемых образцов из стали-45

№ образца	Размеры образца	Время отжига t , мин	Температура отжига, °C	Режим микроплазменной обработки			
				i , А	τ , мс	N	U , В
01-45	4×4×12 мм ³	Без отжига		Без обработки плазмой			
02-45		60	400	100	20	10	450
03-45				200			400
04-45				400			400
05-45				650			400
06-45							

Методы исследования поверхности образцов из стали–45

Изучение металлофизических и триботехнических свойств поверхности металлических образцов, обработанных МПР, выполнялись на специализированных стендах с помощью аппаратуры и методов, разработанных в ИМАШ РАН.

Микрорельеф поверхности образцов оценивался на профилографе–профилометре (модель 201). Запись профилограмм производилась при вертикальном увеличении $\times 1000$ и горизонтальном увеличении $\times 200$. С помощью профилограмм измерялись максимальные значения высоты микрорельефа R_{max} и величины механического износа образцов при триботехнических испытаниях.

Микротвердость образцов измерялась на приборе ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76) при нагрузке на индентор 100 гс (время выдержки 15 с). Проводились 10 измерений диагонали отпечатков индентора, нанесенных на одну из граней каждого образца. По значениям диагонали отпечатков оценивалась их глубина и величина микротвердости.

Триботехнические испытания исследуемых образцов проводились в лабораторных условиях на восьмипозиционной машине трения с возвратно-поступательным движением сопряженных образцов [9]. Средняя скорость относительного скольжения образцов составляла 0,19 м/с. Максимальная нагрузка на образцы составляла 1250 Н. В качестве смазочного материала применяли Литол-24 (ГОСТ 21150-87).

Образец из стали–45 устанавливался на машине трения неподвижно, к нему прикладывалась нагрузка. Относительно изучаемого образца реверсивно передвигался контрообразец, который был изготовлен из стали 20 с цементацией, последующей закалкой и отпуском до твердости 60 HRC. Для определения сравнительной износостойкости материалов пары трения (образец–контрообразец) испытания проводились при ступенчато повышаемых давлениях 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7 МПа и т. д. в течение 30 минут при давлении 0,2 МПа и далее — в течение 1 часа — при каждом из последующих давлений до достижения предельно допустимых значений, при которых происходили задир пары или “катастрофический” износ. Эти процессы происходят тогда, когда наступает полный износ упрочненного микрорельефа, сформированного в результате микроплазменной обработки образцов. Перед каждым новым

испытанием проводилось смазывание рабочих поверхностей образцов Литолом-24. После окончания каждого цикла испытаний образец вынимался из держателя машины трения, промывался в растворителе и просушивался. Затем с помощью профилографа–профилометра производилась регистрация профилограммы рабочей поверхности образца.

Результаты исследований

В процессе микроплазменной обработки стальных образцов регистрировались осциллограммы импульсного электрического тока через образец $i(t)$ (рис. 6, а, в) и электрического потенциала $U(t)$ на образцах (рис. 6, б, г) при изменении длительности импульсов микроплазменных разрядов от 1 до 20 мс и при различных постоянных значениях амплитуды электрического тока в разрядах: 100, 200, 400, 650 А.

Установлено, что при протекании электрического тока МПР через образец его электрический потенциал изменялся от -400 В до -30 В (рис. 6, а, б). Это свидетельствует о том, что импульсное напряжение -400 В прикладывалось к образцу до того, как начиналось взаимодействие внешнего потока плазмы с металлом (рис. 6, в, г).

Наличие диэлектрической пленки на поверхности металла существенно облегчает возбуждение МПР на поверхности образцов [10]. Для определения влияния термического отжига на состояние поверхности образцов изучены профилограммы одной из граней образцов в исходном состоянии и после отжига при 400 °С в течение 60 мин. Установлено, что исходный образец из стали–45 (образец № 01-45) имел слабо выраженный микрорельеф, возникающий в результате предварительной механической обработки (фрезерования, шлифования и полирования) образцов. Измеренная на профилографе–профилометре высота микрорельефа исходных образцов составляла величину $R_{max} = 0,1$ мкм. После отжига шероховатость поверхности образцов ухудшается. Отжиг в течение $t = 60$ мин (образец № 02-45) изменяет микрорельеф поверхности, при этом шероховатость имеет характерную высоту $R_{max} = 0,6$ мкм, а волнистость остается такой же, как у образцов в исходном состоянии. Отжиг в течение 60 мин при температуре 400 °С приводит к снижению микротвердости образца на 7 % и повышению предельно допустимого давления на образец до 3 МПа.

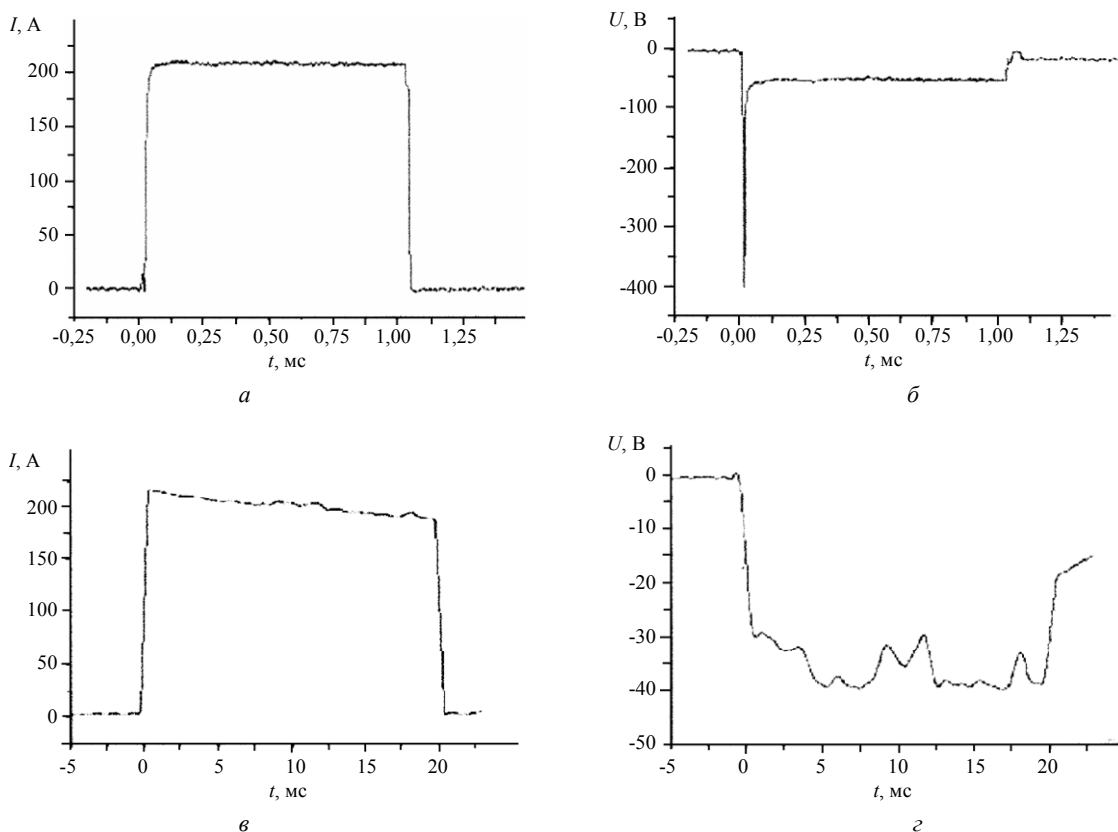


Рис. 6. Осциллограммы импульсов электрического тока (а, в) и падения напряжения на образце (б, г) при возбуждении МПР на стали–45, (а, б) соответствуют импульсам длительностью 1 мс (в, г) соответствуют импульсам длительностью 20 мс

Для определения влияния величины тока МПР на характер микрорельефа были сняты профилограммы всех граней образцов. Средние значения максимальной высоты микрорельефа R_{max} показаны на рис. 7.

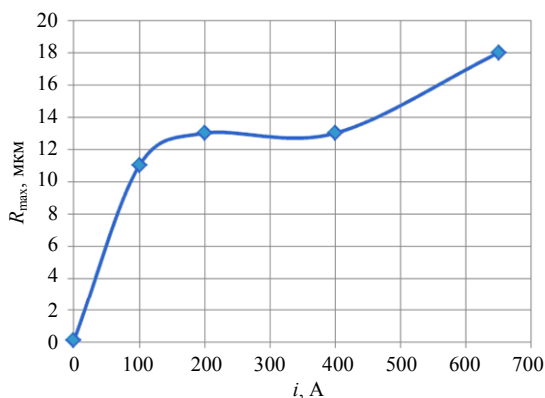


Рис. 7. Средние значения высоты микрорельефа образцов из стали–45, обработанных с помощью МПР, при различных значениях амплитуды импульсов электрического тока разрядов: 100, 200, 400, 650 А

Из графика рис. 7 видно, что увеличение тока МПР приводит к увеличению высоты шероховатости микрорельефа. Средние значения максимальной высоты микрорельефа на всех гранях четырех образцов находятся в пределах 11–18 мкм. Следует отметить, что при самом малом токе, рав-

ном 100 А, наблюдаются как меньшие величины высот неровностей, так и меньшая их плотность, т. е. большие расстояния между неровностями, чем при других значениях тока обработки. При токах 200 А и 400 А микрорельеф поверхностей всех граней практически одинаков, а при токе 650 А становится более неравномерным и достигает больших величин, чем при относительно низких значениях тока.

Результаты измерений микротвердости $HV_{0,1}$ микрорельефа на поверхности стальных образцов, обработанных МПР, при различных режимах, показаны рис. 8.

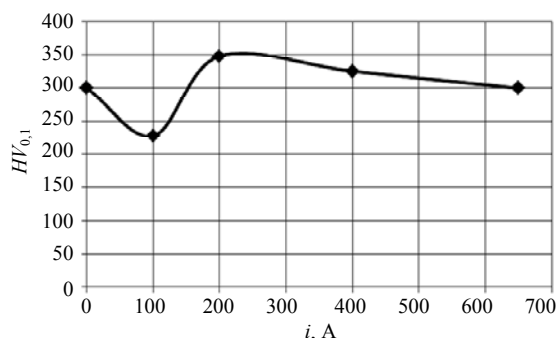


Рис. 8. Микротвердость микрорельефа на образцах из стали–45, обработанных микроплазменными разрядами с различными амплитудами импульсов электрического тока разрядов: 100, 200, 400, 650 А. Нагрузка на индентер составляла 100 гс

Исследование влияния величины тока МПР на микротвердость образцов показало, что при токе, равном 100 А, микротвердость снижается по сравнению с исходным состоянием на 30 %. Дальнейшее повышение тока МПР до 200 А и 400 А привело к повышению микротвердости, соответственно, на 16 % и 8,5 %. Повышение тока до 650 А привело к снижению микротвердости до уровня микротвердости в исходном состоянии.

Триботехническим испытаниям подвергались образцы из стали–45 в исходном состоянии (образец № 01-45), после отжига в течение 60 мин (образец № 02-45), а также после отжига и обработки 10 импульсами микроплазменных разрядов с различными величинами амплитуды тока от 100 до 650 А (образцы 03-45, 04-45, 05-45, 06-45). Результаты триботехнических испытаний образцов из стали–45 показаны на рис. 9 и рис. 10. Испытания показали, что образцы в исходном состоянии без отжига работоспособны только до давления, равного 1 МПа. После отжига в течение 60 мин и после обработки плазмой при токе $i = 100$ А образцы работоспособны при давлениях, не превышающих 3 МПа. При дальнейшем повышении нагрузки на образцы работа соответствующих пар трения сопровождалась задирами.

При увеличении тока МПР до $i = 200$ А предельно допустимое давление на сталь 45 повышается до 9 МПа, т. е. в три раза больше, чем при токе $i = 100$ А.

Лучшие триботехнические характеристики приповерхностного слоя образцов из стали–45 получены после их термического отжига в течение 60 мин и последующей обработки микроплазменными разрядами при токе разрядов $i = 400$ А. В этом случае (рис. 9) пара трения проработала с малыми интенсивностями изнашивания до давления $p = 23$ МПа, максимально возможного для машины трения. Это давление в 23 раза больше давления, до которого проработала сталь 45 в исходном состоянии, в 8 раз больше давления, до которого проработала сталь 45 после плазменной обработки при токе $i = 100$ А и не менее чем в 2 раза больше давления, до которого проработала сталь 45 после стандартного объемного термического закалывания до твердости 40–45 HRC [11].

При дальнейшем увеличении силы тока МПР от $i = 400$ А до $i = 650$ А предельно допустимое давление на образцы из стали–45 снижается в 1,8 раза от 23 до 13 МПа.

Значения интенсивности относительного износа не превышали $4,4 \times 10^{-9}$ при работе на вершинах микрорельефа и $0,7 \times 10^{-9}$ при работе на их основаниях (рис. 10), что практически совпадает с величинами I_h для образцов из стали–45, подвергнутых процессу стандартного объемного термического закалывания [11].

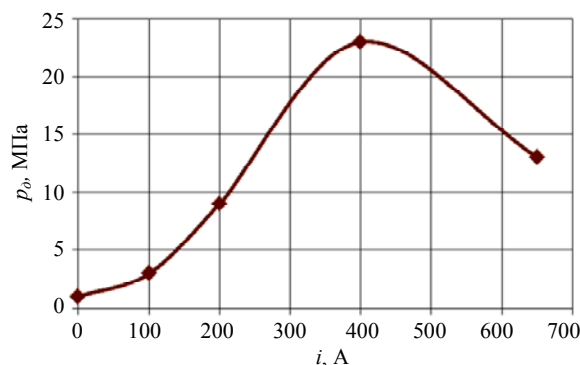


Рис. 9. Предельно допустимые давления на образцы из стали–45 при их обработке микроплазменными разрядами с амплитудами тока от 100 до 650 А

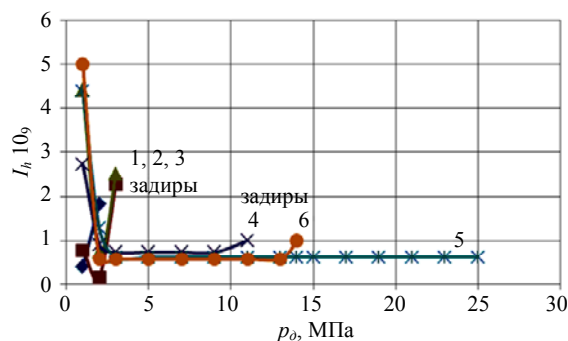


Рис. 10. Зависимости $I_h \times 10^9$ — интенсивности относительного износа стали–45: 1 — в исходном состоянии, 2 — после отжига, 3, 4, 5, 6 — после отжига и микроплазменного упрочнения соответственно при токах 100, 200, 400 и 650 А

Заключение

Исследован универсальный метод микроплазменной обработки металлов и сплавов, основанный на новом принципе возбуждения импульсных микроплазменных разрядов и способный упрочнять металлические изделия со сложной формой поверхности, применительно к образцам из конструкционной стали–45.

Установлено, что в вакууме при взаимодействии импульсного потока плотной плазмы с металлическими образцами с нанесенными диэлектрическими пленками на их поверхности возбуждаются микроплазменные разряды. В местах локализации этих разрядов происходит плавление приповерхностного слоя металла. В процессе движения микроплазменных разрядов по поверхности образцов в результате многократного повторения процессов локального плавления и остывания приповерхностного слоя металла на поверхности образцов формируется сплошной переплавленный слой, имеющий развитую структуру микрорельефа (шероховатость) с высотой микровыступов в интервале значений 11–18 мкм.

Выяснено, что термический отжиг образцов из стали–45 увеличивает предельно допустимое давление на образцы по сравнению с их исходным

состоянием в 3 раза от 1 до 3 МПа, и при этом практически не приводит к снижению их микротвердости.

Показано, что лучшие триботехнические характеристики (износостойкость и предельное давление при трении) приповерхностного слоя образцов из стали–45 с созданным микрорельефом, получены в результате их обработки микроплазменными разрядами с электрическим током 400 А. Созданный упрочнённый приповерхностный слой образцов характеризуется малыми значениями интенсивности относительного износа при трении в интервале прикладываемых давлений на образцы от 0,2 до 23 МПа. При этом, предельное давление на образцы из стали–45 превышает в 23 раза предельное давление на образцы в исходном состоянии, и в 2 раза превышает предельное давление на образцы из стали–45 после их стандартного объемного термического закалывания до твердости 40–45 HRC.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 13-08-01174-а).

Литература

1. Атаманов М. В., Васильев В. И., Зайцев В. В. и др. // Автомобильный транспорт. 1995. № 7. С. 31.
2. Иванов В. А. // Прикладная физика, 2001. № 2. С. 5.
3. Иванов В. А., Коньжев М. Е., Сатунин С. Н. и др. // Прикладная физика, 2008. № 6. С. 62.
4. Иванов В. А., Куксенова Л. И., Лантева В. Г. и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 3. С. 84.
5. Ivanov V. A., Sakharov A. S., and Konyzhev M. E. // Plasma Physics Reports. 2008. V. 34. No. 2. P. 150.
6. Зырянов П., Иванов В. А. / В сб. «Плазменные генераторы и процессы». Материалы III совещания международной рабочей группы «Физика низкотемпературной плазмы». Проблемная комиссия многостороннего сотрудничества социалистических стран. г. Минск: ИТМО АН БССР. 1988. С. 43.
7. Vacuum Arcs: Theory and Application (J. M. Lafferty, ed.) -New York: Wiley, 1980.
8. Ivanov V. A., Juttner B. and Zimin A. M. // Plasma Devices and Operations. 2002. V. 10. P. 109.
9. Куксенова Л. И., Лантева В. Г., Колмаков А. Г. и др. Методы испытаний на трение и износ. Справочник. — М.: Интермет Инжиниринг, 2001.
10. Иванов В. А., Коньжев М. Е., Сахаров А. С. // Прикладная физика, 2006. № 6. С. 114—121.
11. Куксенова Л. И., Герасимов С. А., Лантева В. Г. Износостойкость конструкционных материалов: учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.

Formation of a strong microrelief on the steel–45 surface by microplasma discharges

V. A. Ivanov¹, M. E. Konyzhev¹, A. A. Dorofeyuk¹, T. I. Kamolova¹,
L. I. Kuxsenova², V. G. Lapteva², and I. A. Khrennikova²

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

²A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Institute RAS
4 Khariton'evskii per., Moscow, 101990, Russia

Received October 28, 2014

The experimental investigations of interaction of microplasma discharges with the steel surface have been made. Pulse currents had amplitudes from 100 up to 600 A. A very strong microrelief has been formed on the steel surface.

PACS: 81.05.-t

Keywords: plasma, discharge, surface, steel, relief, strength.

References

1. M. V. Atamanov, V. I. Vasil'ev, V. V. Zaitsev, et al., *Avtomobil. Transp.*, No. 7, 31 (1995).
2. V. A. Ivanov, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 5 (2001).
3. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, S. N. Satunin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 62 (2008).
4. V. A. Ivanov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, et al., *Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mashin*, No. 3, 84 (2008).
5. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, and M. E. Konyzhev, *Plasma Physics Reports* **34**, 150 (2008).
6. P. Zimrot and V. A. Ivanov, in *Proc. III Symposium "Plasma Generators and Processes"* (Minsk. ITMO, 1988), p. 43 [in Russian].
7. *Vacuum Arcs: Theory and Application*. Ed. by J. M. Lafferty (New York: Wiley, 1980).
8. V. A. Ivanov, B. Juttner, and A. M. Zimin, *Plasma Devices and Operations* **10**, 109 (2002).
9. L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, A. G. Kolmakov, et al., *Methods of Testing on Friction and Attrition. Handbook* (Internet Inzhniring, Moscow, 2001) [in Russian].
10. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, A. S. Sakharov, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 114 (2006).
11. L. I. Kuksenova, S. A. Gerasimov, and V. G. Lapteva, *Wearing Capacity of Constructional Materials: (Bauman MG TU, Moscow, 2011)* [in Russian].