

Ионно-кластерная полировка поверхности материалов до субнанометрового уровня шероховатости

И.В. Николаев, Н.Г. Коробейщиков, М.А. Роевко
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2
e-mail: i.nikolaev@nsu.ru

Проведено исследование влияния ускоренного ионно-кластерного пучка аргона на морфологию поверхностей оптического стекла и нержавеющей стали. Изучены зависимости спектральной плотности мощности шероховатости от пространственной частоты и среднеквадратичной шероховатости от дозы облучения. Среднеквадратичная шероховатость нержавеющей стали уменьшается в 5,5 раза, а оптического стекла – в 4,5 раза. Показана возможность получения материалов с субнанометровой шероховатостью поверхности. Дальнейшее понижение шероховатости нержавеющей стали ограничивается микрогранульной анизотропной структурой обрабатываемого материала.

Cluster ion smoothing of materials surface to subnanometer level of roughness. I.V. Nikolaev, N.G. Korobeishchikov, M.A. Roenko. The influence of accelerated argon gas cluster ion beam on the surface morphology of optical glass and stainless steel is investigated. The spatial frequency dependence of the power spectral density of roughness and the dose dependence of the root-mean-square roughness are studied. The root-mean-square roughness of stainless steel is reduced by 5.5 times and the optical glass by 4.5 times. The possibility of obtaining materials having subnanometric surface roughness is shown. Further reducing the roughness of stainless steel is limited by the microgranular anisotropic structure of the material being processed.

На сегодняшний день все больше оборудования применяют для различных приложений на субнаноразмерном уровне, что, в свою очередь, требует материалов новые характеристики, не соответствующие их исходным свойствам. Одной из важнейших характеристик материала является шероховатость его поверхности. Предполагается, что благодаря новейшим технологиям будут получены «атомарно гладкие» поверхности без нарушения структуры и физико-химического загрязнения обрабатываемого материала. Одним из перспективных способов полировки является обработка поверхности с помощью ионно-кластерных пучков, сформированных из сверхзвуковых газовых струй. Загрязнение обрабатываемой поверхности полностью исключается за счёт использования высокого вакуума и неактивного газа, например, аргона. За счёт взаимодействия примерно одинакового количества частиц кластера и мишени происходит так называемое боковое распыление материала, что позволяет сглаживать поверхность различных материалов [1,2].

Работа выполнялась на оборудовании, подробное описание которого приведено в [3]. В данной работе использовался ионно-кластерный пучок, сформированный из сверхзвуковой струи аргона [4], со средним размером кластеров 1200 атомов/кластер при энергии 22 кэВ. В качестве мишеней использовались образцы из нержавеющей стали с исходной зеркальной поверхностью и ополитованного оптического стекла. Морфология поверхности до и после обработки изучалась с помощью атомно-силового микроскопа NtegraPrimaHD. На рис. 1 приведены 3D изображения поверхности нержавеющей стали с исходной зеркальной поверхностью. Размер области сканирования составлял 20×20 мкм, максимальная доза облучения – $2,1 \cdot 10^{17}$ ион/см². Средняя шероховатость поверхности R_q определялась по четырем точкам измерения. Наблюдается заметное (более чем в 2 раза) сглаживание неровностей поверхности на каждом этапе обработки.

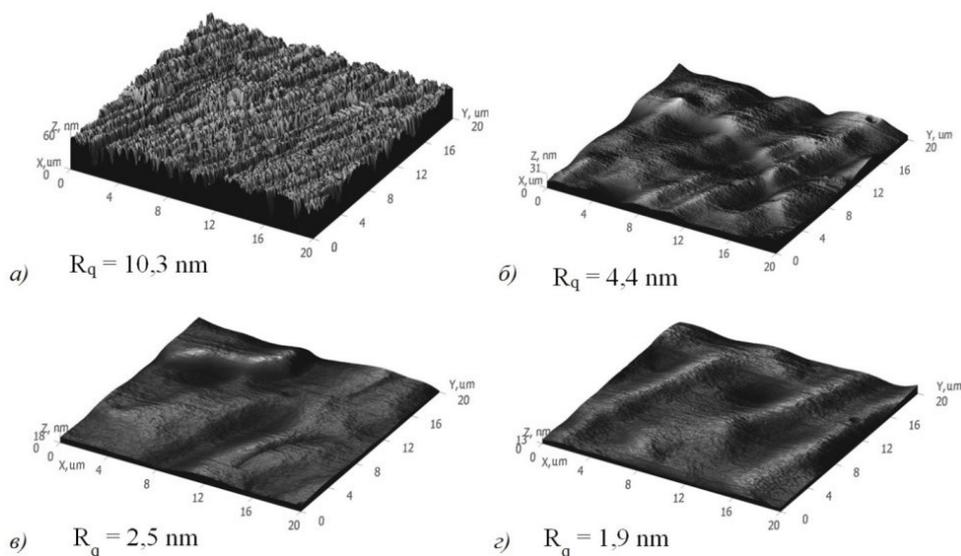


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности образца нержавеющей стали: а) исходный, б) 1-ая обработка, в) 2-ая обработка, г) 3-я обработка.

На рис. 2 показаны зависимости среднеквадратичной шероховатости R_q поверхности нержавеющей стали от дозы облучения при различном размере области сканирования. Видно, что на всех масштабах наблюдается значительное понижение шероховатости поверхности. На масштабе 10×10 мкм минимальная шероховатость достигает 0,6 нм.

Более полную статистическую информацию о шероховатости поверхности даёт функция спектральной плотности мощности (powerspectraldensity – PSD), описывающая распределение высот в зависимости от пространственной частоты, учитывая при этом латеральные величины шероховатости. Под пространственной частотой ν понимается величина, обратная расстоянию между точками измерения на профиле поверхности.

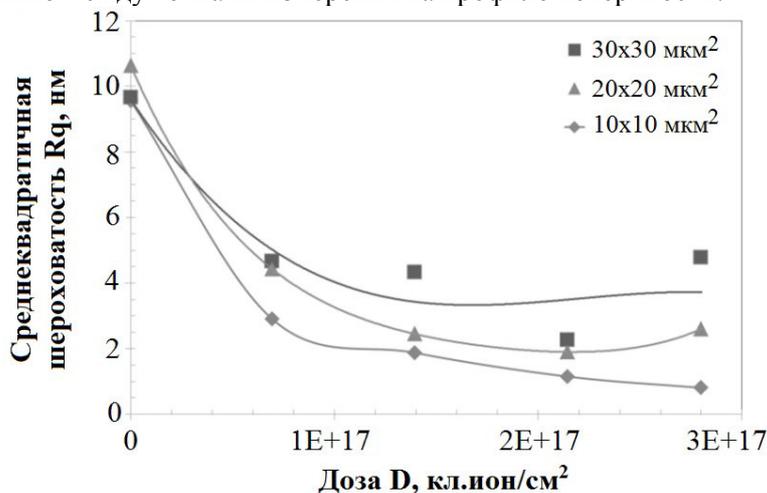


Рис. 2. Зависимости среднеквадратичной шероховатости R_q нержавеющей стали от дозы облучения D .

Спектральная плотность мощности включает в себя информацию о перепадах высот и расстоянии между различными точками профиля поверхности. На рис. 3 приведены PSD функции для нержавеющей стали до и после обработки. Острые пики на исходной кривой указывают на периодически повторяющиеся значения высот профиля поверхности относительно среднего значения.

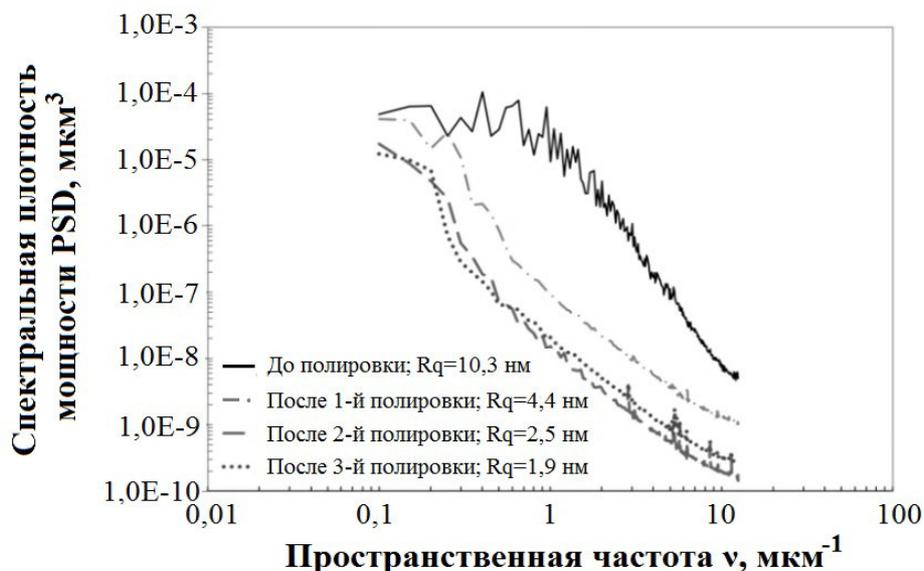


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности мощности нержавеющей стали от пространственной частоты.

Данные пики соответствуют периодическим бороздам от предшествующей механической шлифовки образца. После обработки наблюдается снижение шероховатости на всех пространственных частотах: в среднечастотной области ($\nu \sim 1 \text{ мкм}^{-1}$) – на 3 порядка, в высокочастотной ($\nu \sim 10 \text{ мкм}^{-1}$) – на 2 порядка, в низкочастотной ($\nu \sim 0,1 \text{ мкм}^{-1}$) – менее чем на 1 порядок. Также была проведена обработка плоской пластины из оптического стекла диаметром 25 мм и толщиной 10 мм. На рис. 4 показаны 2D АСМ-изображения рельефа поверхности оптического стекла до и после полировки. После обработки полный перепад высот снизился с 25 нм до 7,5 нм.

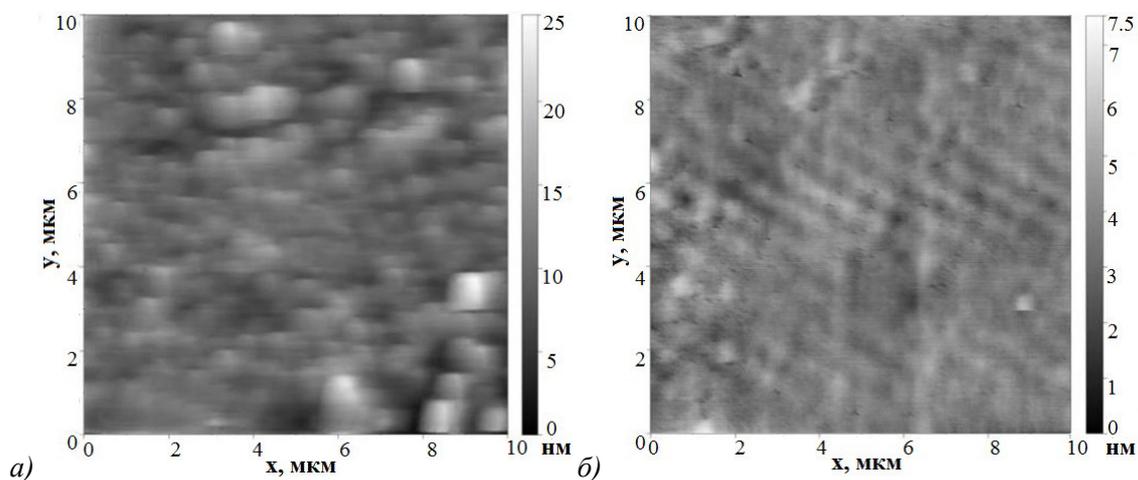


Рис. 4. АСМ-изображения поверхности оптического стекла: а) до обработки, б) после обработки.

PSD-функции и значения Rq для оптического стекла до и после обработки показаны на рис. 5. Сравнивая рис. 3 и рис. 5, можно отметить, что у стекла наблюдается снижение PSD-функции на 2 порядка уже после одной обработки, тогда как у стали PSD-функция снижается на 1 порядок после 2-3 обработок.

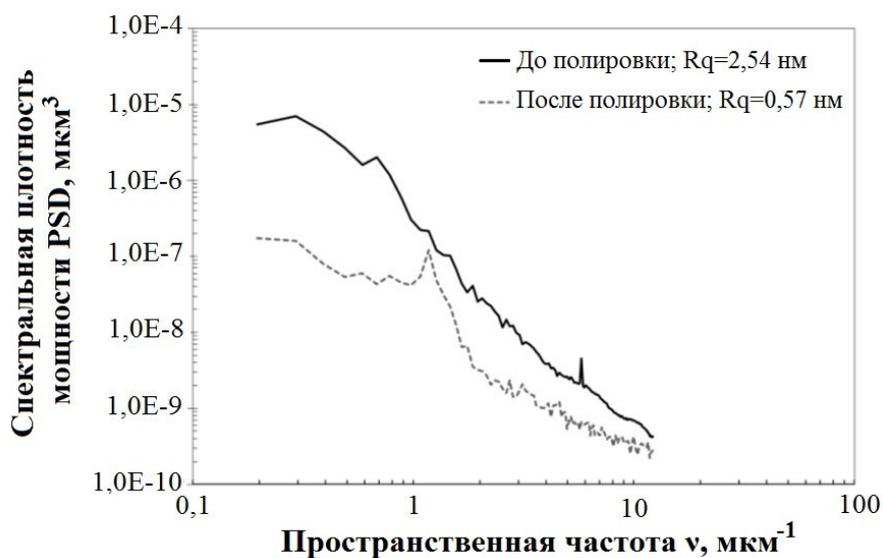


Рис. 5. Зависимость спектральной плотности мощности оптического стекла от пространственной частоты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № 11.1402.2017/4.6) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант №17-01-00512).

Литература

1. Yamada I. //Applied Surface Science, 2014. Vol. 310.P. 77–88.
2. Popok V.N.//Materials Science and Engineering: R,2011.Vol. 72, Issues 7-8.P. 137-157.
3. Korobeishchikov N.G., et al.//Vacuum, 2015. Vol.119, No.9. P.256-263.
4. Korobeishchikov N.G., et al.//AIP Conference Proceedings, 2014. Vol.1628. P.885-892.