

## МЕХАНИЧЕСКОЕ, ХИМИЧЕСКОЕ И РАДИАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ПОЛИРОВКИ

Классен Н.В.<sup>1)</sup>, Кобелев Н.П.<sup>1)</sup>, Колыванов Е.Л.<sup>1)</sup>, Кедров В.В.<sup>1)</sup>, Шмыгько И.М.<sup>1)</sup>,  
Клубович В.В.<sup>2)</sup> Кулак М.М.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт физики твердого тела РАН, Черногловка, Россия,  
[klassen@issp.ac.ru](mailto:klassen@issp.ac.ru)

<sup>2)</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

Устойчивость поверхностей оптических элементов по отношению к механическим, химическим, радиационным и прочим внешним воздействиям имеет важное значение для обширного набора приборов и устройств: солнечных батарей, систем оптоволоконной связи, технологических лазеров, автомобильной, авиационной и спутниковой оптики, астрономических телескопов, пирометров и других устройств оптического контроля высокотемпературных установок и т.д. С другой стороны, развитие исследований по нанотехнологиям дало новый импульс изучению физики и химии поверхностей, т.к. приповерхностные области играют решающую роль в формировании свойств наноструктур.

Деформационная полировка твердых тел, различные модификации которой разрабатываются в ИФТТ РАН более тридцати лет, создает специфическую морфологию и атомарную структуру приповерхностных областей, как давая качественно новую информацию о происходящих там процессах, так и позволяя в широких пределах управлять характеристиками обрабатываемых изделий [1–4]. Среди практически важных результатов деформационной полировки можно назвать механическое упрочнение поверхности оптических элементов из щелочно – галоидных кристаллов и алюминия, многократное снижение гигроскопичности щелочно – галоидных кристаллов, существенное увеличение сопротивления металлических зеркал высокотемпературному окислению, многократное замедление почернения поверхности полированного серебра, возрастание коэффициента оптического отражения алюминиевых зеркал [2–4].

Прецизионная профилометрия оптических поверхностей показывает, что их микрошероховатость после деформационной полировки на порядок ниже по сравнению с микрошероховатостью тех же материалов после стандартной абразивной полировки [4]. Структурные исследования приповерхностных слоев оптических элементов после деформационной полировки приводят к заключению, что главная причина перечисленных выше улучшений – формирование в них наномасштабной структуры. Главный фактор деформационной полировки – сжимающие напряжения, прикладываемые к поверхности обрабатываемым инструментом. Для минимизации упругой энергии обрабатываемая поверхность должна принять форму поверхности инструмента, т.е. стать его репликой. Для этого в сильно ограниченных приповерхностных областях, примыкающих к пятнам контакта, должен происходить наномасштабный массоперенос, что и приводит к формированию зеренной наноструктуры и сжимающих напряжений, действующих параллельно поверхности.

Многие перечисленные выше особенности поверхностей, прошедших деформационную полировку, можно объяснить подобным формированием наноструктуры и сжимающих напряжений. Морфологическая гладкость с поверхностными ступеньками не выше нескольких нанометров значительно снижает вероятность адсорбции чужеродных молекул из внешней среды по сравнению с поверхностями, имеющими ступеньки на порядок выше. Сжимающие напряжения, в свою очередь, значительно снижают концентрацию микротрещин и других нарушений сплошности поверхности, которые также могут работать центрами адсорбции загрязнений. Значительное уменьшение количества адсорбированных чужеродных молекул должно, в свою очередь, приводить к заметному снижению

скорости химических реакций поверхности с внешней средой, т.е. к ее химической пассивации. Наглядным примером является радикальная разница в ухудшении профиля поверхности зеркал из нержавеющей стали, прошедших стандартную абразивную обработку и деформационную полировку за счет образования оксидного слоя при повышенной температуре (рис. 1). Скорость наращивания оксидов после деформационной полировки на порядок ниже, чем после абразивной. Наномасштабы зеренной структуры существенно снижают пластичность приповерхностного слоя, приводя к его механическому упрочнению.

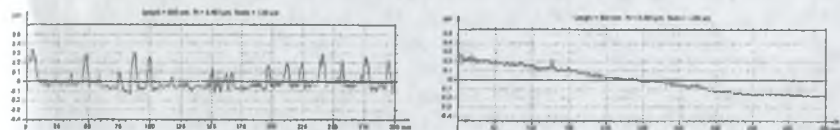


Рис. 1. Профилограммы поверхности зеркал из нержавеющей стали после выдержки в низком вакууме при  $700^{\circ}\text{C}$  в течение 4 час. Слева – зеркало, отполированное абразивным порошком. Справа – зеркало, прошедшее деформационную полировку

Наноструктурирование поверхности значительно улучшает стабильность ее оптических и механических характеристик по отношению к радиационным воздействиям. С одной стороны, это обусловлено тем, что «протравливание» межзеренных границ, происходящее в результате радиационного распыления, не ухудшает оптической гладкости из-за того, что расстояние между этими границами – намного меньше длины волны света [5]. С другой стороны, структурные дефекты, возникающие под действием радиации, имеют возможность быстро аннигилировать посредством диффузионного выхода на границы зерен, расположенные в нанометровой близости от любой точки материала.

Благодаря тому, что при деформационной полировке относительные макроперемещения обрабатываемой поверхности и обрабатывающего пуансона не требуются, возможна обработка поверхностей любых геометрий, а не только сферических (что является существенным недостатком абразивной полировки). С другой стороны, процедура деформационной полировки, необходимым условием которой является пластический массоперенос материала в приповерхностном слое, требует адекватного сочетания обширного набора параметров – материала пуансона, величины давления, температуры, длительности обработки и т.д. В противном случае качество обработанной поверхности неизбежно снижается. При недостаточно высокой температуре или нагрузке, пластичность не будет достаточна для полного разглаживания неровностей. С другой стороны, завышенные величины этих параметров способны привести к сращиванию («свариванию») инструмента и детали [6]. Кроме того, при высоких температурах для подавляющего большинства оптических материалов требуется обрабатывать их в вакууме или инертной среде для того, чтобы избежать окисления. При этом сложность и стоимость оборудования существенно возрастают.

Один из способов решения подобных проблем – замена статического разглаживания поверхности динамическим, когда контакт обрабатывающего инструмента с определенным участком поверхности становится прерывистым, чтобы за время контакта диффузионное сращивание не успевало произойти. С другой стороны, быстрое увеличение локальной нагрузки во время контакта до уровня пластичности за время, меньшее, чем время распространения тепла, способно привести к локальному разогреву, достаточному для возникновения пластического массопереноса в пятне контакта. Кроме того, интенсивная локальная деформация может вызвать быструю генерацию неравновесных структурных дефектов, что, в свою очередь, способно привести к заметному снижению локальной сдвиговой устойчивости материала [7], так называемому «холодному плавлению». В та-

ком случае можно добиться пластификации обрабатываемой области без окисления поверхности и ее срачивания с пуансоном.

В настоящее время нами исследуются два варианта динамической деформационной полировки: подвод к обжимаемой детали ультразвуковых колебаний достаточно большой амплитуды [8] (что можно назвать деформационно – акустической полировкой) и замена статического пуансона на катящийся по поверхности и прижимаемый к ней инструмент в виде шарика или цилиндра (обработка обкаткой [9]). Обкатка привлекательна тем, что она не требует изготовления пуансона большой площади с точной геометрией. С другой стороны, при перемещающейся вдоль поверхности локальной нагрузке вдоль ее траектории возникают волнообразные колебания профиля, снижающие оптическое качество обработки. Поэтому требуется детальное изучение процесса образования профильных волн с тем, чтобы подбором параметров режима обработки (скорости перемещения шарика или валика, их диаметров и величины нагрузки на них) снизить амплитуду этих волн до допустимых пределов неровностей. Следует отметить, что упрочнение и пассивирование поверхности деформационной полировкой практически важно не только для оптических элементов, но и для многих других применений, где некоторая волнистость поверхности не является дефектом. К таковым можно, например, отнести антиобледенительную обработку металлических конструкций (летательные аппараты, морские суда, линии электропередач), антипригарную обработку предметов кухонного обихода, антикоррозионную обработку конструкций, работающих в агрессивных средах.

*Данная работа поддержана совместным грантом РФФИ и фонда фундаментальных исследований Беларуси.*

#### **Список литературы**

1. А.Д.Бронников, С.Н. Вальковский, А.В. Горбунов, Н.В. Классен, М.П. Кулаков «Проходные оптические элементы для технологических СО<sub>2</sub>-лазеров», Известия АН СССР. сер. физ., 1983, т. 47, в. 8, стр. 1527 – 1532.
2. Кириченко Л.Г., Классен Н.В., Махонин С.И., Мелентьев А.Г., Соيفер Я.М. «Упрочнение поверхностного слоя кристаллов КСl при пластической деформации», Кристаллография, 1991, т. 36, с. 1254 – 1259.
3. Н.В. Классен, С.И. Махонин, Ю.А. Осипьян «Способ срачивания и полировки оптических кристаллов» Патент РФ № 2135649, 1999 г.
4. Классен Н.В., Махонин С.И., Осипьян Ю.А., «Применение пластической деформации в производстве твердотельных оптических элементов», 1997, Материаловедение, № 2, стр. 47-52.
5. А.Ф. Бардаמיד, В.С. Войценья, К.Н. Вуколов, В.В. Кедров, Н.В. Классен, Д.В. Орлинский, «Моделирование поведения пленочных родиевых зеркал при бомбардировке атомами перезарядки в термоядерном реакторе». Вопросы атомной науки и техники, серия Термоядерный синтез, 2005, вып. 4, стр. 34 – 42.
6. A.V. Bazhenov, N.V. Klassen, S.Z. Shmurak, et.al. «Deformation welding of scintillating materials Scintillator and Phosphor Materials», Material Research Society Symposium Proceedings, 1994, v. 348, pp. 551 – 555.
7. A.V. Granato. «Interstitialcy Model for Condensed Matter States of Face-Centered Cubic Metals». Phys.Rev. Let. 1992, v.68, No 7, pp. 974-977.
8. Мышляев М.М., Кулак М.М. «Создание наноструктурного сверхпластичного состояния в сплавах на основе алюминия». Металлофизика, механика материалов. наноструктур и процессов деформирования т. 1, стр. 279-282, 2009. Издательство СГАУ. Самара, СГТУ
9. Папшев Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками М. Машиностроение. 1968. 132 с.