

Ф. В. НОВИКОВ (д-р техн. наук, проф.) fokusnic1@rambler.ru

В. Г. ШКУРУПИЙ (канд. техн. наук, доц.) kaftech@hneu.edu.ua

Харьковский национальный экономический университет, г. Харьков, Украина

СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ ПОСЛЕ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Введение и постановка задачи

Развитию научных исследований, связанных с обеспечением требуемых параметров макро- и микрогеометрии поверхности, состояния поверхностного слоя деталей из меди и алюминия с оптическими свойствами поверхностей, в настоящее время уделяется все большее внимание. Это связано с необходимостью решения важных научно-технических и практических задач по технологическому обеспечению поверхностей лазерных зеркал высокой отражательной способности при длине волны 10,6 мкм и поверхностей деталей летательных аппаратов и ракет с низкой поглощательной способностью в интервале длин волн от 0,2 до 2,5 мкм.

Как известно, состояние поверхностей после механической обработки характеризуется структурными изменениями, наличием окислов, адсорбированных слоев газов, остатков веществ рабочей среды от предыдущей обработки. Наиболее чувствительной к этим изменениям является работа выхода электронов, которую оценивают контактной разностью потенциалов (КРП) [2]. Установлено, что чем выше эта величина, тем выше отражательная способность обработанной поверхности [1]. Максимальные значения контактной разности потенциалов достигаются при абразивной обработке (полировании и доводке), лезвийной обработке (точении с применением сверхтвердых материалов, в том числе природных алмазов), поверхностно-пластическом деформировании [1].

Кроме методов механической обработки для обеспечения высокой отражательной способности можно использовать электрохимическое или химическое полирование, которые в силу специфики процесса создают поверхностные слои с благоприятной тонкой структурой, которая обеспечивает максимальные значения контактной разности потенциалов.

Для оценки шероховатости поверхности деталей с оптическими свойствами используют критерий шероховатости поверхности F [3, 4]. По определению критерий шероховатости поверхности F равен отношению площади гладкой к площади шероховатой поверхности [3]. Связь критерия шероховатости поверхности F с оптическими характеристиками (коэффициентами поглощения A_2 и излучения $\varepsilon_{ш}$) можно описать, используя известную формулу [3]:

$$\varepsilon_{ш} = \frac{\varepsilon_2}{1 - (1 - A_2) \cdot (1 - F)},$$

где $\varepsilon_{ш}$ - коэффициент излучения шероховатой поверхности; ε_2 - коэффициент излучения гладкой поверхности; A_2 - коэффициент поглощения гладкой поверхности.

В настоящее время к традиционным методам получения высокой отражательной способности лазерных зеркал из различных материалов (медь, алюминий и его сплавы, молибден и др.) относится обработка резанием, как лезвийная - точение резцами из природных алмазов, так и обработка свободными абразивами - полирование (доводка) с применением смоляных полировальников и технологических сред, содержащих алмазные микропорошки. Цель работы – разработка рекомендаций по сглаживанию поверхностного слоя при абразивном полировании.

Основное содержание работы

В работе [1] получена аналитическая зависимость для определения отношения высотных параметров шероховатости R_a/R_{\max} от относительной длины профиля шероховатости l_0 и угла при вершине абразивного зерна γ :

$$\frac{R_a}{R_{\max}} = \frac{1 - \frac{1}{l_0}}{1 - \sin\gamma} \cdot \left[1 - 0,5 \cdot \frac{1 - \frac{1}{l_0}}{1 - \sin\gamma} \right], \quad (1)$$

где l_0 – относительная длина профиля шероховатости;

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости;

R_{\max} – максимальное значение высотного параметра шероховатости;

γ – половина угла при вершине абразивного зерна.

Взаимосвязь критерия шероховатости поверхности F с отношением высотных параметров шероховатости поверхности R_a/R_{\max} имеет следующий вид:

$$F \approx 1 - \frac{R_a}{R_{\max}}. \quad (2)$$

Из приведенных зависимостей следует, что оптические характеристики поверхностей определяются не просто параметрами шероховатости R_a , R_{\max} а их отношением R_a/R_{\max} , которое может изменяться в довольно широких пределах: 0...0,29. Это указывает на возможность значительного улучшения оптических характеристик обработанных поверхностей и соответственно эксплуатационных свойств ответственных деталей, рассматривая как критерий оценки шероховатости относительную длину профиля l_0 и отношение среднеарифметического отклонения профиля к максимальному значению высотного параметра шероховатости поверхности R_a/R_{\max} . Как показано выше, критерии l_0 , R_a/R_{\max} и шероховатости поверхности F аналитически связаны между собой. Так, с уменьшением R_a/R_{\max} критерий шероховатости F увеличивается, а l_0 уменьшается. Соответственно коэффициенты излучения $\varepsilon_{\text{и}}$ и поглощения $A_{\text{и}}$ обработанной поверхности уменьшаются, а коэффициент отражения света $\rho_{\text{и}}$ увеличивается. С целью повышения отражательной способности поверхности необходимо уменьшать отношение R_a/R_{\max} и относительную длину профиля l_0 , а значения критерия шероховатости поверхности F увеличивать.

Нами изучен механизм образования поверхности с высокой отражательной способностью обработкой резанием на зеркалах из меди и алюминиевых сплавов. Было исследовано изменение параметров и оптических характеристик поверхностей после точения природным алмазом и алмазного полирования, которые имели максимальные значения критерия шероховатости поверхности.

После алмазного точения зеркал из алюминиевого сплава АМг3 отражательная способность ($\lambda = 10,6$ мкм) имела значения 96,6%, а после алмазного полирования - 92,6%. При этом значение коэффициента поглощения составило 0,1 и 0,20 соответственно.

Повышению отражательной способности поверхностей, обработанных точением алмазным инструментом, способствует благоприятное сочетание физико-химических свойств природного алмаза и обрабатываемых поверхностей, снижение интенсивности воздействия химически активных веществ, что приводит к уменьшению различного рода

неоднородностей в двойном электрическом слое поверхности и уменьшает величину работы выхода электронов. На поверхности алюминиевого образца величина КРП составляет 1050-1100 мВ, а после полирования с применением алмазных микропорошков - около 880 - 900 мВ.

При абразивном полировании обрабатываемая поверхность адсорбирует химически активные вещества, содержащиеся в технологических фазах, и кислород воздуха, что оказывает влияние на развитие химико-механических явлений, сопровождающих пластическое деформирование микровыступов поверхности. Процесс адсорбции интенсифицируется при механическом снятии пленок окислов с поверхности, что обеспечивается относительным изменением контакта полировальника и обрабатываемой поверхности.

При сопоставлении снимков поверхностей образцов из сплава АМгЗ после точения алмазным инструментом и абразивного полирования обнаружены значительные различия. На полированных поверхностях, кроме следов абразивных зерен, имеется большое количество мелких точек «ряби», которые отсутствуют на поверхности, обработанной точением. Наличие «ряби» видимо является результатом взаимодействия органических компонентов полирующих составов, абразивных зерен и обрабатываемой поверхности. На поверхности, обработанной точением, могут наблюдаться следы резца глубиной 0,1-0,2 мкм и шириной 60 мкм, склоны гладкие, почти отсутствуют неровности, соизмеримые с длинами волн падающего излучения.

Значительные различия состояния поверхностей после точения и полирования подтверждаются и рентгенографическими исследованиями.

После абразивного полирования поверхность деформирована в меньшей степени, чем после алмазного точения. Однако химическая активность алюминия на воздухе, неабразивные составляющие рабочей среды, а также шаржирование поверхности абразивом образуют субструктуру в виде конгломерата окислов металла, осколков абразивных зерен, соединений щелочных металлов.

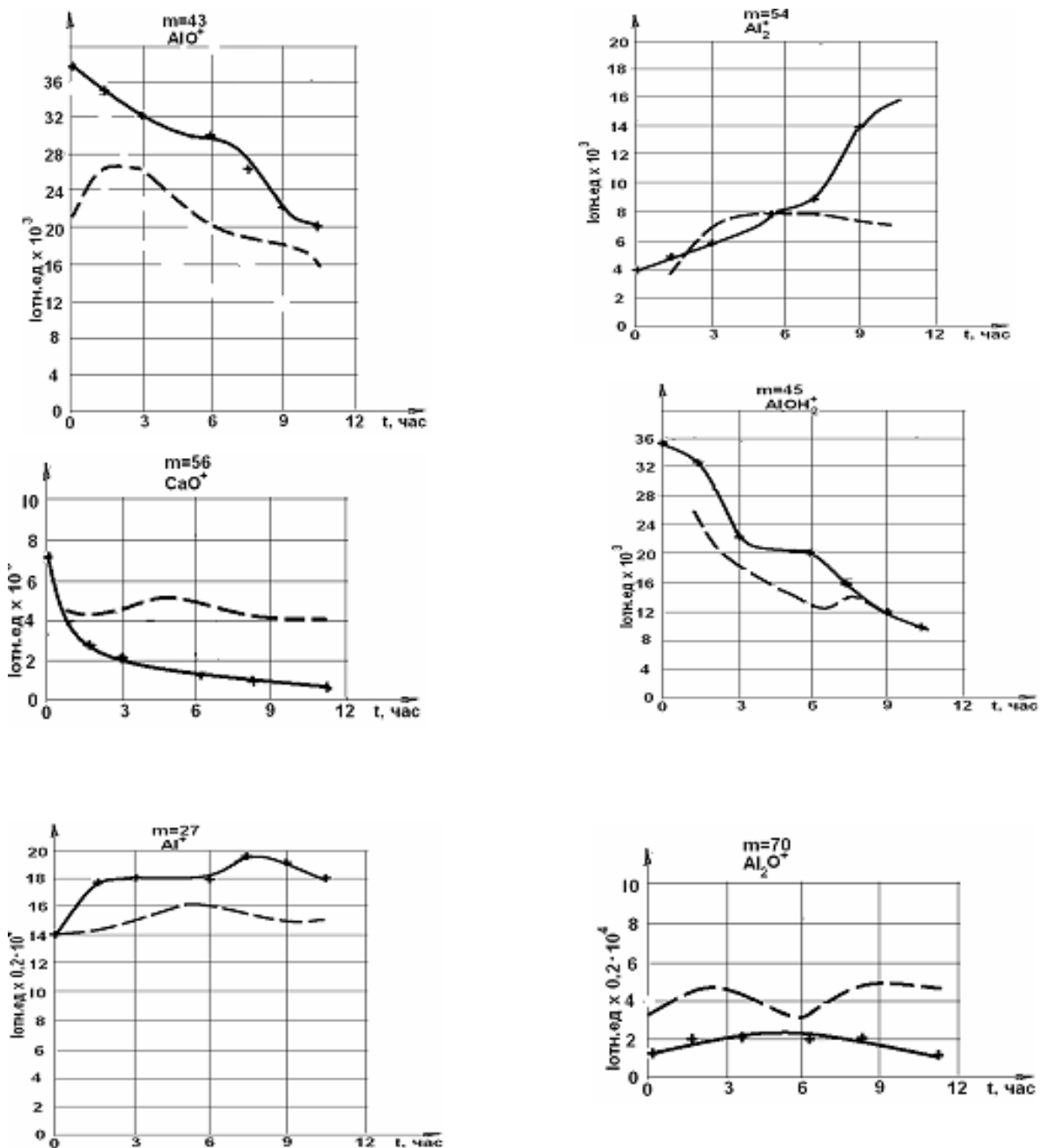


Рис. 1. Зависимость тока вторичных ионов Al^+ , Al_2^+ , Al_2O^+ , $AlOH_2^+$, CaO^+ от времени бомбардировки поверхности после различных видов обработки: - - - механическое полирование; -x- алмазное точение.

После алмазного точения поверхность деформирована в большей степени, химический состав ее также неоднороден. Однако в виду отсутствия шаржирования поверхности, а также меньшей степени ее окисления субструктура поверхности имеет меньше дефектов и, тем самым, нарушения в двойном электрическом слое минимальны, работа выхода электрона минимальна.

Для определения гетерогенных веществ и других примесей, не относящихся к основному материалу, а образующихся в процессе обработки поверхности, применили масс- и оже-спектроскопию (рис. 1).

Результаты таких исследований также подтверждают значительные различия в составе поверхностных слоев после точения и полирования. Установлено, что в том и другом

случаях поверхности образцов покрыты сложной пленкой химических соединений, состав которой зависит от способа и условий обработки.

На поверхности образца, обработанной алмазным резцом, образуется в основном пленка окислов алюминия и магния небольшой толщины.

На поверхности образцов после полирования образуется более толстая, чем в первом случае, пленка сложного химического состава, в который помимо окислов алюминия и магния входят различные соединения объемных примесей материала образца (щелочных металлов, их окислов и др.).

Применение поверхностного пластического деформирования также, как и алмазного точения, обеспечивает образование поверхности с улучшенными физико-химическими параметрами. Однако ограничения в технологии обработки этого метода дают возможность эффективно применять его только на цилиндрических поверхностях.

В табл. 1 приведены некоторые параметры поверхностного слоя зеркал из меди Моб, которые подвергались обработке резанием. Данные таблицы показывают, что лезвийная обработка приводит к значительным пластическим деформациям поверхностных слоев металла.

Таблица 1. Параметры поверхности зеркал из меди Моб после лезвийной и абразивной обработок

Параметры поверхности	Лезвийная обработка		Абразивное полирование суспензией на основе алмазных микропорошков АСМ2/1
	Точение резцом твердого сплава	Точение алмазное	
Глубина дефектного слоя, мкм	400 ± 50	300 ± 50	5 ± 7
Полуширина дифракционной линии, $B \cdot 10^4$ рад.	168	160	10
Микротвердость, Па	1300 (P=0,99)	930 (P=0,99)	570 (P=0,98)
Критерий шероховатости, F	0,95	I	I
КРП, мВ	-	120	180
Отражательная способность, ρ_λ	95,9	99	99,2

Как видно из таблицы, точение твердым сплавом и алмазное точение приводят к значительному наклепу обрабатываемой поверхности. Полирование абразивной суспензией вносит в структуру поверхностных слоев значительно меньше изменений, распределяющихся в поверхностном слое толщиной до 60 мкм при обработке алмазным микропорошком АСМ 5/3 в течение 50 часов. Полирование алмазным микропорошком АСМ 2/1 снимает уровень структурных искажений и уменьшает глубину деформируемого слоя, делая более однородным распределение структурных искажений поверхностных слоев.

Уменьшение величины КРП при алмазном точении по сравнению с абразивным полированием связано с тем, что в результате деформации искажается структура материала поверхностного слоя, наличие которой подтверждено рентгеноструктурным анализом поверхности. Ухудшение субструктуры поверхности при полировании приводит к увеличению работы выхода электрона. Для уменьшения неоднородности и степени структурных искажений по поверхности и сечению образцов целесообразно после предварительной лезвийной обработки проводить термическую обработку (отжиг). Режимы термической обработки следует подбирать так, чтобы при рекристаллизации в поверхностном слое образовалась мелкозернистая структура (размер зерен 10 мкм).

В связи с тем, что шаржирование в процессе полирования алмазными зернами влияет на физико-химическое состояние обрабатываемого материала и тем самым уменьшает его отражательную способность, исследовали характер расположения шаржированных частиц и плотность их распределения на образце. Как показал металлографический анализ, плотность шаржированных частиц от участка к участку изменяется по разному (от 10^2 до 10^4 зерен на 1 мм^2), закономерностей в распределении шаржированных частиц не обнаружено. Шаржирование поверхности увеличивает неоднородность распределения микроискажений в локальных участках образцов.

Вокруг места внедрения алмазной частицы на первом этапе полирования материал деформируется более интенсивно, плотность рисок в несколько раз больше в этом районе, чем в среднем по поверхности. Послойный анализ поверхности показал, что частицы абразива распределяются в образце на глубину до 5 мкм. Размеры внедренных частиц составляют от 3 до 5 мкм.

При температурном воздействии (градиент температур по сечению образца до 50 К/мм) на шаржированную поверхность происходит вспучивание в местах внедрения шаржированных частиц.

Удаление поверхностного слоя толщиной 1-3 мкм электрополированием и последующее полирование поверхности привело к снижению плотности шаржированных частиц до $10^2 - 10^3$ зерен на 1 мм^2 .

Другим средством предотвращения шаржирования является применение для полирования зерен абразива овальной (округленной) формы. Предварительные результаты полирования округленными зернами алмазного абразива АСМ 2/1 показали не только снижение плотности шаржированных частиц, но и улучшение геометрических характеристик обработанной поверхности. Установлено, что шаржирование обрабатываемой поверхности алмазными зернами на первых стадиях обработки способствует повышению неоднородности распределения структурных искажений в поверхностных слоях.

Таким образом, особенность формирования поверхностного слоя медных зеркал абразивной обработкой, определяется, по-видимому, разной геометрией зерен алмазных и абразивных микропорошков на уровне субмикрорельефа поверхностей граней, от которой зависит эффективность процесса резания-царапания, развитие локальных температур и др. Для микрограней алмазных зерен более характерно микрорезание, а для электрокорунда - микросмятие с локализацией и увеличением затрачиваемой энергии (возникновение на полированной поверхности кометообразных углублений).

Локальное активное контактирование абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью эффективно, как нам кажется, до тех пор, пока геометрические размеры зерен не становятся соизмеримыми с отделившимися частицами обрабатываемого металла, что в последующем приводит к потере эффекта полирования.

Обеспечение высокой отражательной способности на зеркалах из молибдена обработкой резанием также, как на меди, связано с наличием дефектного слоя значительной глубины.

В работе [5] сделан вывод, что при сглаживании поверхностного слоя детали время цикла последующего процесса полирования будет уменьшаться интенсивнее, чем снижение высотных параметров исходной шероховатости до обработки; для каждой зернистости абразивного материала существует предел по стабилизации значений высотного параметра шероховатости поверхности, а это очень важно при назначении последовательности использования рабочих сред при сглаживании поверхностного слоя деталей. Этот предел будет зависеть от исходного состояния поверхности детали до обработки.

Учитывая, что зависимости высотных параметров шероховатости поверхности при полировании от времени обработки стабилизируются к первой минуте обработки [5, 6] сглаживание поверхностного слоя следует проводить поэтапно, снижая зернистость абразива. После шлифования необходимо выполнить абразивное полирование алмазной пастой АСМ 5/3 в течение 1 минуты. После тщательной очистки поверхности от остатков

рабочей среды следует применить обработку алмазной пастой АСМ 2/1 в течение 1 минуты и на третьем этапе обработку производить суспензией с нанопорошком Al_2O_3 .

Выводы

1. Технологическое обеспечение поверхности лазерных зеркал с высокой отражательной способностью при длине волна 10,6 мкм, поверхности деталей летательных аппаратов и ракет с низкой поглощательной способностью в интервале длин волн от 0,2 до 2,5 мкм связано, в первую очередь, с обеспечением максимальных значений контактной разности потенциалов (КРП).

2. Отношение высотных параметров шероховатости поверхности может быть использовано для контроля дефектов поверхности после применения финишных методов обработки.

3. Сглаживание поверхностного слоя следует проводить поэтапно, снижая зернистость абразива.

Список литературы

1. Шкурупій В. Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світло відбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / В.Г. Шкурупій . – Одеса, 2006. – 21 с.

2. Шкилько В. В. Экзоэмиссионный анализ поверхностного слоя реальных объектов / В.В. Шкилько, В.В. Борисов, Ю.Ф. Назаров // Поверхностный слой, точность, эксплуатационные свойства деталей машин и приборов: Материалы Всесоюзного научно-технического семинара. – М., 1986 – С. 41-43.

3. Агабабов С.Г. Влияние фактора шероховатости на радиационные свойства твердого тела со случайной шероховатостью / С.Г. Агабабов // Теплофизика высоких температур, 1976. – Т. 13, №2. – С. 314-318.

4. Гнусин Н.П. Шероховатость электроосажденных поверхностей / Н.П. Гнусин, Н.Я. Коварский. – М.: Изд-во "Наука", 1979. – 328 с.

5. Шкурупій В.Г. Сглаживание поверхностного слоя деталей из меди и алюминия при их абразивном полировании / В.Г. Шкурупій, Ю.Ф. Назаров. // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь: ПДТУ, 2010. – Вип. 12. – С. 281-285.

6. Шкурупій В.Г. Влияние отделочных методов обработки и свойств материалов на состояние поверхностного слоя деталей. Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. [Текст]: материалы V международной научно-технической конференции / редкол.: Е. И. Яцун [и др.]; Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2007. – С. 192-197.

Поступила в редколлегию 26.02.2013