

Шкурупий В.Г., Новиков Ф.В.
ХНЭУ им. Семена Кузнеця, г. Харьков, Украина

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ С ОПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Введение

Эффективным направлением повышения отражательной и снижения поглощательной способностей поверхностей деталей с оптическими характеристиками является уменьшение шероховатости поверхностей за счет применения прогрессивного метода абразивной обработки – абразивного полирования [1]. К группе деталей, для которых очень важно технологическое обеспечение высокой отражательной (малой поглощательной) способности, относятся зеркала лазерных установок. Эти зеркала изготавливают из меди и ее сплавов, молибдена, бериллиевых и других сплавов. Зеркала могут быть плоскими, сферическими, вогнутыми и достигать размеров 1000 мм и более. В работе [2] экспериментально установлено влияние различных методов механической и физико-технической обработки на формирование параметров шероховатости, физико-химического состояния и оптических характеристик обрабатываемых поверхностей, показана тесная связь между этими параметрами. Доказана эффективность применения абразивного полирования, обеспечивающего образование неровностей на обрабатываемых поверхностях менее 1 мкм, что открывает широкие перспективы создания оптических поверхностей деталей с высокой отражательной (малой поглощательной) способностью. Поэтому актуальна задача технологического обеспечения параметров качества (шероховатости и физико-химического состояния) поверхностей деталей при абразивном полировании с целью улучшения их оптических характеристик.

Основная часть

На характер формирования поверхностного слоя обработанных деталей в процессе полирования существенное влияние оказывает размер абразивных зерен. Уменьшение значений высотных параметров шероховатости поверхности R_a и R_{max} происходит с уменьшением зернистости абразива (рис. 1 [3]).

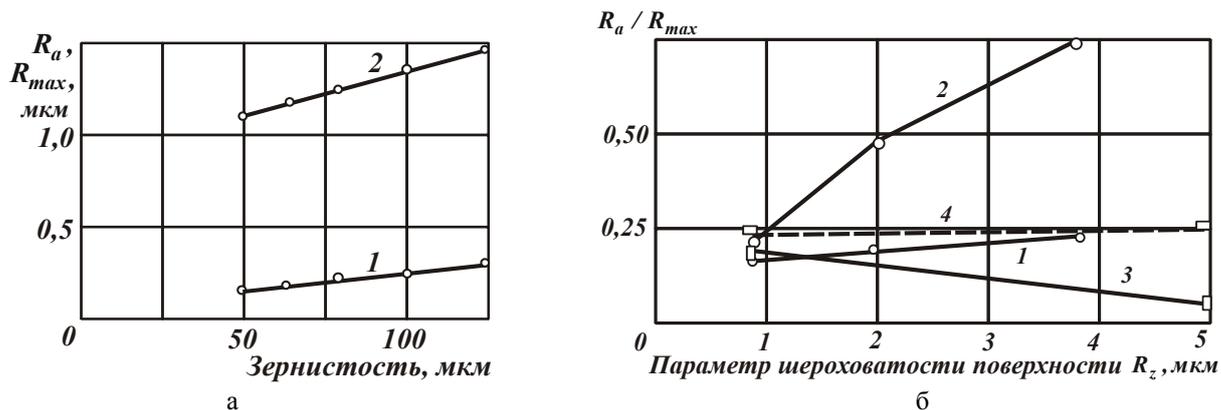


Рис. 1. Влияние зернистости абразива на R_a (1) и R_{max} (2) при полировании образца из стали 30ХГСА (а) и изменение R_a / R_{max} при полировании образцов из стали 30ХГСА (1 и 2) и титанового сплава ВТ4 (3 и 4) (б):
давление 40 МПа; скорость резания 35 м/мин; время обработки 20 с:

а – до обработки: $R_a=0,68$ мкм; $R_{max}=3,64$ мкм;

б – зернистость абразива - АСО 50/40; 2 и 4 - до обработки; 1 и 3 – после обработки

Как следует из рис. 1,б, интенсивность изменения R_{max} не соответствует интенсивности изменения значений R_a . С уменьшением зернистости абразива значения R_{max} увеличиваются относительно R_a . В то же время, увеличение зернистости абразива для одной и той же исходной поверхности (до обработки) увеличивает отношение R_a / R_{max} (после обработки).

При абразивном полировании образцов из различных материалов (с разной исходной шероховатостью поверхностей) с увеличением значений высотных параметров шероховатости до обработки отношение R_a / R_{max} уменьшается (при равных значениях зернистости абразива, давления и времени обработки). Анализ графиков, приведенных на рис. 1, позволяет обосновать выбор зернистости абразива для этапов полирования поверхностей деталей. Зернистость абразива должна отвечать значением высотных параметров шероховатости поверхностей до обработки. Исходя из этого, предложена следующая последовательность циклов технологии обработки поверхностей с малыми значениями параметров шероховатости. Первый цикл обработки необходимо производить алмазными микропорошками зернистостью 5/3 с применением поверхностно-активного вещества поливинилового спирта, который способствует увеличению скорости съема материала к величине съема, как и в случае применения абразива большей зернистости, что уменьшает длительность протекания цикла обработки. Второй цикл необходимо производить с использованием алмазных микропорошков зернистостью 3/2 с анало-

гичными условиями обработки, что и в первом цикле. На третьем цикле обработки рекомендуется использовать алмазные микропорошки зернистостью 1/0 с условиями обработки первого и третьего циклов. В итоге такой технологический процесс сокращает время обработки и затраты дорогостоящих алмазных микропорошков большей зернистости. При этом высотный параметр шероховатости поверхности уменьшается до 0,025 мкм.

При моделировании процесса полирования необходимо учитывать скорость и траекторию движения частиц, их размеры и зернистость, механические свойства материала детали. Модель абразивного инструмента при полировании может быть представлена в виде структурной схемы, показанной на рис. 2. Абразивное полирование в зависимости от характера применяемых абразивных рабочих сред и технологических жидкостей представляет собой механохимический процесс сглаживания поверхностного слоя путем пластического деформирования микронеровностей, съема окислов с обрабатываемой поверхности.

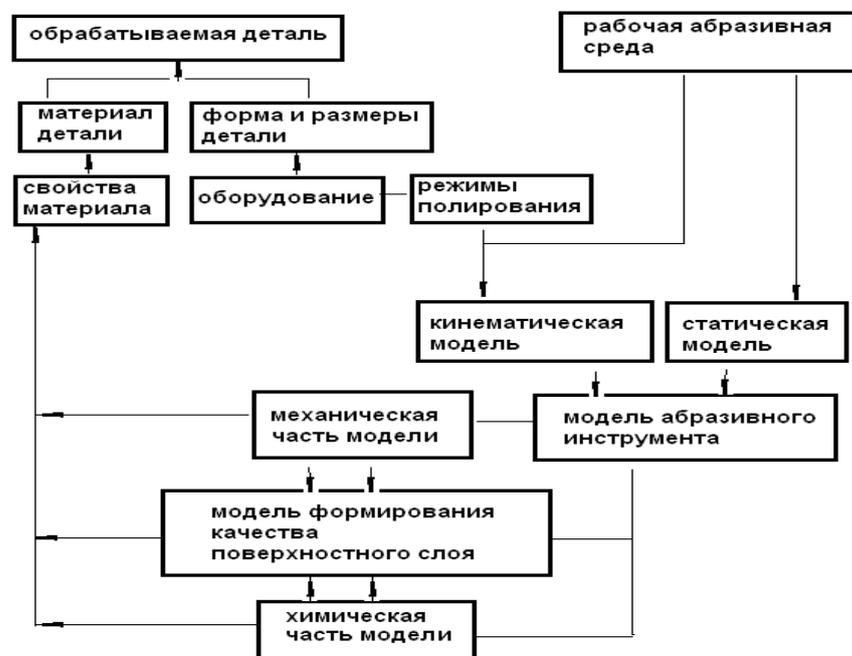


Рис. 2. Структурная схема формирования физико-химического состояния поверхностного слоя при обработке свободным абразивом

Процесс полирования сопровождается последовательным нанесением на поверхность обрабатываемых деталей большого числа царапин и следов пластического деформирования при их взаимном наложении и пересечении. Технологическая жидкость обеспечивает удаление продуктов износа (частиц металла и абразивных частиц) с поверхности обрабатываемой детали и способствует ее охлаждению. Интенсивность обработки зависит от динамических параметров, определяемых режимами полирования, продолжительностью полирования, характеристиками и размерами частиц абразива, характеристиками механических свойств материала детали.

Режущий инструмент формируется непосредственно в процессе обработки как абразивная среда с особыми свойствами и определенными внутренними связями. Сложная геометрическая форма зерен и их режущей части является одной из важнейших характеристик абразивного инструмента.

Параметры режущего профиля абразивной гранулы (скопления абразивных зерен) определяется величиной и расположением абразивных зерен. При единичном взаимодействии абразивной гранулы с поверхностью детали через сечение неровностей обрабатываемой поверхности, перпендикулярное направлению относительного движения гранулы, проходит несколько слоев определенной толщины. Элементарные режущие профили случайным образом накладываются друг на друга, а на поверхности детали копируется их огибающая, представляющая собой эффективный режущий профиль гранулы. Профиль шероховатости поверхности детали в поперечном сечении абразивных царапин копирует эффективный режущий профиль гранулы и зависит от глубины внедрения зерен h_{max} , исходной шероховатости поверхности детали и от параметров распределения вершин абразивных зерен по высоте. Абразивный инструмент в первую очередь будет контактировать с выступами исходной шероховатости поверхности, при этом постепенно округляя выступы. В процессе полирования высотные параметры профиля исходной шероховатости поверхности уменьшаются, а шаговые параметры изменяются незначительно. Если прекратить процесс полирования через 30 с после начала полирования, то при исходной шероховатости после шлифования сохранится часть исходного микрорельефа, при этом шероховатость поверхности детали будет состоять из сглаженных выступов.

Опорная поверхность обработанной детали на уровнях 10, 20, 30, 40 % значительно увеличится по сравнению с исходной, а впадины микрорельефа останутся без изменений. Продолжение процесса полирования приведет к полному удалению выступов исходной шероховатости. Отношение высотных параметров R_a / R_{max} при этом уменьшится. Это свидетельствует о возникновении большого количества царапин на полированной поверхности, что связано с наличием укрупненной фракции в поставляемых промышленностью абразивных порошках. В дальнейшем процесс полирования стабилизируется. Характерный для процесса полирования рельеф

еф будет постоянно воспроизводиться, его параметры не будут изменяться с течением времени, а будут определяться режимами обработки и зернистостью применяемого абразива.

В процессе полирования формируется физико-химическое состояние поверхностного слоя, определяемое процессами в граничном слое (рис. 3). Свободные электроны при нарушении кристаллической решетки в граничном слое выходят на поверхность и образуют так называемый двойной электрический слой, который и определяет свойства (проводимость) верхнего граничного слоя. Причем, наличие двойного электрического слоя определяет и процессы окисления на поверхности металла, т.е. образование пленок неметаллической проводимости, от которых и зависят свойства верхнего граничного слоя металлической поверхности. Они могут быть значительно больше по толщине, чем высота шероховатости обрабатываемой поверхности.

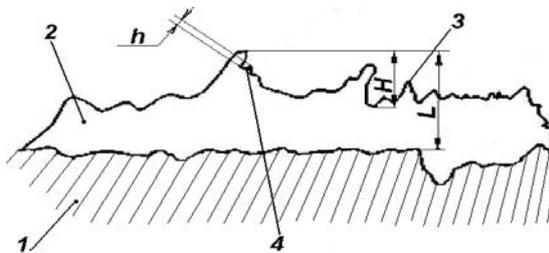


Рис. 3. Параметры граничного слоя металлической поверхности:

1 – деталь; 2 – неметаллическая пленка; 3 – микронеровность; 4 – субмикронеровность; h и H – высоты микронеровности и субмикронеровности; L – средняя толщина неметаллической пленки

Следует отметить, что образование двойного электрического слоя на металлической поверхности определяет степень нарушения в кристаллической решетке металла и может являться мерой его дефектности. Эти изменения на поверхности можно количественно оценить с помощью измерения работы выхода электрона, которая определяет величину работы по перемещению электронов на поверхности металла.

При установлении взаимосвязей в качестве геометрических параметров в работе приняты: отношение параметров шероховатости поверхности R_a / R_{max} и критерий шероховатости F [2], а в качестве параметров физико-химического состояния поверхности: структура, фазовое состояние, химический состав фаз и толщина неметаллической пленки. Интегральными параметрами рассогласования выбраны: для геометрических характеристик – критерий шероховатости F , а для физико-химических – величина работы выхода электрона ϕ .

Рассмотрим граничный поверхностный слой. Критерий шероховатости определяет отношение площади гладкой замыкающей части впадины к площади шероховатой части впадины $F = F_r / F_w$. Он учитывает не только высоту шероховатости и высоту субмикронеровности, но и форму впадин (выступов) шероховатости [4]:

$$F = [1 + 1,25\pi^2 \cdot n^2 \cdot R_a^2]^{-1} \times \left(1 - \frac{R_a}{2H_{i_{min}}}\right), \quad (1)$$

где R_a – среднее арифметическое отклонений профиля шероховатости поверхности, мкм; n – число шагов неровностей по отношению к отсеченному шагу, 1/мкм; $H_{i_{min}}$ – отклонение ординаты по наибольшей впадине профиля шероховатости поверхности, мкм.

На практике этот критерий определяется из профилограмм и электронных снимков. Анализ значений критерия шероховатости на поверхностях деталей после различной обработки показал, что при высоте шероховатости $R_z \leq 100$ нм его величина практически равна единице. Поэтому его можно использовать как интегральный параметр при определении высоты шероховатости не менее 100 нм.

При уменьшении высоты шероховатости менее 100 нм интегральным параметром рассогласования принята величина – работа выхода электронов (РВЭ), которая на практике измеряется через величину контактной разности потенциалов (КРП). Исследования показали, что величина РВЭ может оценивать любое изменение физико-химического состояния в результате обработки поверхности. Для наноабразивной обработки разработаны технологические среды на основе ультрадисперсных абразивов оксида алюминия (УДА), которые получают газодисперсным синтезом (ГДС), суть которого заключается в синтезе УДА в зоне горения ламинарного двухфазного факела газозвесей металлических порошков в кислородосодержащем газе. При этом полностью реализуются возможности системы металл-кислород и достигаются высокие температуры, необходимые для синтеза оксидов металлов за счет тепловыделения от собственных химических реакций.

Частицы УДА имеют сферическую форму диаметром около 100 нм. Сглаживающий эффект, который оказывает абразивная суспензия с наличием сферического абразива, позволяет уменьшить резание-царапание поверхности и обеспечить эффект микровыкатывания с высотой шероховатости поверхности 5–3 нм.

Для технологических систем нанолезвийной обработки разработаны специальные средства технологического оснащения. Для таких систем траектории движения резца должны соответствовать расчетной траектории с точностью до 10^{-5} нанометров. Точность вращения шпинделя или стола с обрабатываемой деталью должна быть того же порядка. Для обработки следует применять алмазные резцы с прямолинейной режущей кромкой (фасеткой). Процесс обработки фасеточным резцом состоит из двух составляющих – резания и выглаживания. При перемещении вдоль обрабатываемой поверхности при подаче, намного меньшей, чем длина l фасетки ($S < 1$), фасетка многократно проходит по обрабатываемой поверхности, либо подрезая, либо приминая неровности, возникающие в процессе резания. Совмещение этих двух процессов позволяет получить поверхность с

$R_z \leq 100$ нм. Высота шероховатости поверхности при обработке таким резцом определяется, кроме качества резца, также положением фасетки инструмента относительно направления подачи.

Главной проблемой, которую необходимо решить при построении особо точных станков, является устранение как внешней вибрации, идущей на станок через фундамент, так и внутренней вибрации, возникающей от работы узлов и систем самого станка. Особенностью конструкции таких станков является применение аэроэластических опор и инерционных приводов, которые позволяют решать проблему устранения внешней и внутренней вибрации. Комплект оборудования строится по агрегатно-модульному принципу с уровнем унификации узлов и деталей до 80 %. Оборудование, входящее в комплект, может изготавливаться как с ЧПУ, так и с ручным управлением. Базовым станком в указанном комплекте оборудования является сверхточный станок МК 6521Ф3.04 с ЧПУ для обработки наружных и внутренних поверхностей тел вращения, а также сферических и асферических поверхностей, имеющий следующие параметры обработки:

Наибольший диаметр заготовки, мм	300
Наибольшая длина заготовки, мм	200
Дискретность обработки перемещений по осям X и Z, нм	10
Шероховатость обрабатываемой поверхности R_z , нм	10 - 5

Станок сконструирован следующим образом. На станине Т-образной формы установлены два суппорта. Один перемещается по оси X (инструментальный суппорт), другой - по оси Z (суппорт шпиндельного узла). Т-образное расположение суппортов позволяет уменьшить высоту расположения оси шпинделя над станиной, более равномерно распределить нагрузки на суппорты, перемещающиеся по осям X и Z, увеличить жесткость несущей системы станка. Т-образная станина установлена на пневматических опорах.

Основное влияние на формирование поверхностного слоя полированных деталей оказывают количество активных абразивных зерен на единице площади и глубины их резания-царапания или пластического деформирования, которые в свою очередь зависят от размеров, формы и природы абразивного материала, а также от материала полировальника и детали, контактирующих с абразивными зёрнами. Для установления количества активных абразивных зерен, фактического контакта для перекатывающихся и закрепленных зерен на единицу площади (мм^2), глубины их внедрения, проведены исследования на специальном полировальном стенде конструкции ХНЭУ. Оценку количества абразивных частиц производили с помощью микроскопа МИС-11 и микроинтерферометра МИИ-4. Давление измеряли в пределах $(0,1 - 1,0) \cdot 10^2$ кПа. При экспериментальных исследованиях использовали образцы, изготовленные из сплава 36НХТЮ (HRC 50).

Абразивный состав наносился на полировальник шириной 1 мм от центра. Образец подводили к полировальнику, а затем полировальный круг поворачивали вручную на 15° . С помощью микроскопов и микроинтерферометра исследовали полученные поверхности. Для оценки следов обработки исходили из следующих предположений. В обработке участвуют закрепленные в полировальник и перекатывающиеся зёрна.

При давлении $(0,1 - 0,3) \cdot 10^2$ кПа на обрабатываемой поверхности образуются в основном следы от перекатывающихся зерен. Количество активных абразивных зерен находится в пределах 120 – 130 штук на площади 1 мм^2 . Глубина их внедрения составляет 2 – 3 мкм при ширине отпечатка 3 – 4 мкм. Характер обработанной поверхности при увеличении давления полировальника до $(0,4 - 0,5) \cdot 10^2$ кПа можно объяснить изменением характера работы абразивных зерен. Количество активных абразивных зерен не изменяется и находится в пределах 120 – 130 на площади 1 мм^2 . Однако при этом наблюдается примерно одинаковое количество перекатывающихся и закрепленных зерен. Глубина их внедрения в поверхность металла находится в пределах 3 – 4 мкм при ширине следов отпечатков 4 – 5 мкм.

С увеличением давления (более $0,5 \cdot 10^2$ кПа) на обработанной поверхности характерны следы закрепленных зерен, хотя количество активных зерен уменьшается и находится в пределах 90 зерен на площади 1 мм^2 . Однако большинство отпечатков и следов, характерных для работы активных зерен, находится в глубине их внедрения 3 - 4 мкм при ширине отдельных отпечатков и следов 4 – 5 мкм. В отдельных случаях на обработанных поверхностях следы и отпечатки, характерные для работы закрепленных зерен, приводят к появлению грубых царапин (рис. 4), а также случаев столкновения абразивных зерен друг с другом.

Зная число активных абразивных перекатывающихся и закрепленных зерен на единицу площади (в 1 мм^2), можно определить фактический контакт абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью. Площадь контакта одного перекатывающегося зерна можно рассматривать площадью сегмента: $S_n = \pi \cdot R(2h + a)$.

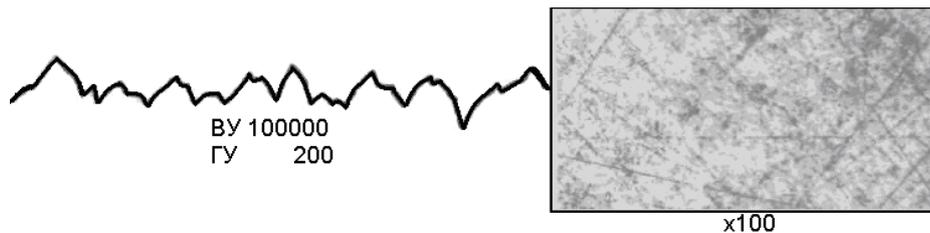


Рис. 4. Профиль и фотография поверхности образца из сплава марки АМг6 после полирования

Используя схему внедрения зерна в металл, определяется площадь следа закрепленного зерна [5]:

$$S_3 = \frac{h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{4}}{\cos \alpha} \cdot l \quad (2)$$

Если известно количество активных перекатывающихся и закрепленных зерен, участвующих в формировании поверхности полированных деталей, то можно определить площадь контакта между зернами и обрабатываемой поверхностью. Тогда общая площадь перекатывающихся зерен на единицу площади: $S_{on} = S_n \cdot n \cdot k$, где S_n – площадь следа одного перекатывающегося зерна; n – количество перекатывающихся зерен на единицу площади; k – коэффициент разрушения зерен в процессе обработки. Общая площадь контакта для закрепленных зерен на единицу площади $S_{oz} = S_z \cdot n \cdot k$, где S_z – площадь следа одного закрепленного зерна; n – количество закрепленных зерен на единицу площади; k – коэффициент разрушения зерен в процессе обработки. Зная площадь контакта для закрепленных и перекатывающихся зерен, можно определить общую площадь контакта между абразивными зернами и обрабатываемой поверхностью (на единицу площади): $S_o = S_{oz} + S_{on}$.

Обработка фотографий позволила установить фактическую площадь контакта абразивных зерен, которая составляет 10 – 15 % номинальной площади. С увеличением давления величина фактического контакта по площади увеличивается. Таким образом, основное влияние на формирование поверхностного слоя оказывают давление полировальника на обрабатываемую поверхность, форма и размер абразивного зерна. В процессе обработки форма и размеры зерна изменяются. С увеличением размера абразивного зерна съём материала возрастает. Шероховатость полированной поверхности зависит от размера зерна. Появление грубых царапин на обрабатываемой поверхности свидетельствует о столкновении абразивных зерен. Сила прижатия полировальника распределяется на суммарную площадь контакта перекатывающихся и закрепленных зерен с обрабатываемой поверхностью. Если площадь контакта перекатывающихся зерен превалирует над площадью контакта закрепленными зернами, то это способствует сглаживанию поверхностного слоя обрабатываемой поверхности.

Экспериментальный и теоретический методы моделирования полирования свободным абразивом позволяют сочетать достаточно точное экспериментальное описание конкретных операций обработки с глубоким пониманием процессов при высокой степени абстракции (теоретическое моделирование). При разработке моделей необходимо учитывать противоречивость в достижении поставленных целей. Так, повышение производительности обработки требует ужесточения режимов обработки, а повышение качества – их смягчение.

Профиль установившейся шероховатости поверхности не зависит от исходной шероховатости шлифованной поверхности, а определяется лишь технологическими параметрами процесса. Дальнейшего улучшения шероховатости поверхности детали можно достичь изменением режимов обработки или заменой абразивной среды на более мелкозернистую среду. Такой замене предшествует тщательная очистка обработанного поверхностного слоя от остатков предшествующей рабочей среды.

Проведенные исследования позволили рекомендовать для использования технологические среды на основе ультрадисперсных абразивов оксида алюминия, которые получают газодисперсным синтезом. Такой абразивный порошок характеризуют: минимальная величина фракции (около 0,01 мкм); равномерность фракции (от 0,07 до 1,04 мкм); сферическая форма абразива; наличие окиси алюминия (Al_2O_3) до 99,9 %.

При экспериментальных исследованиях процесса абразивного полирования использовали неабразивную составляющую в виде дистиллированной воды (на одну часть абразива – четыре части дистиллированной воды). Для достижения сверх гладких поверхностей, по мнению авторов, необходимо обеспечить метрологическое обеспечение контроля качества обработки (проблемы возникают при оценке нано размерных неровностей на обработанной поверхности); выбор соответствующей технологической среды; разработку системы управления процессом формирования поверхностного слоя детали.

Процесс полирования зависит от фактической площади контакта абразивных частиц с поверхностью детали. Фактическая площадь касания абразивных частиц гранулы и поверхности обрабатываемой детали зависит от распределения неровностей по высоте, механических характеристик контактирующих тел, величин сил, действующих на эти тела, и напряженного состояния в зоне контакта. Площадь фактического контакта определяется физико-механическими свойствами более мягкого тела и геометрией поверхности более твердого материала (абразива). Влияние шероховатости поверхности на площадь фактического контакта сказывается существенно – в основном, в начальный период обработки.

Геометрическую форму профиля режущей части зерен описывают треугольником, треугольником с радиусом округления при вершине, трапецией и параболой [1, 4, 6]. Абразивные зерна не имеют постоянных радиусов округления вершин [4]. Форма профиля зерна представляется также в виде эллипсоида, или в виде окружности и набора нескольких окружностей. При изучении под микроскопом на выступах зерен можно выделять микро рельеф и субмикрорельеф, которые обусловлены кристаллическим строением зерен абразива.

В работе [6] установлено, что форму абразивной царапины, образованной одним зерном, можно аппроксимировать функцией вида: $b_i = n \cdot a_i^m$, где b , a – ширина и глубина царапины. Отношение b/a незначительно зависит от размеров зерен ($b_i = 3,8 \cdot a_i$) и является стабильным для данного процесса обработки.

Для поверхности абразивных гранул статическую модель можно описать следующим образом: рабочий слой гранулы – это слой, расположенный между наружной поверхностью гранулы и условной поверхностью связки. Распределение зерен в абразивной грануле определяется законом нормального распределения. В процессе полирования происходит износ абразивных зерен в виде частичного скалывания и их разрушения. В условиях многократного ударного взаимодействия абразивной гранулы с другими гранулами и поверхностью детали разрушившиеся зерна удаляются из места условной связки и одновременно обнажаются новые зерна, имитируя явление «самозатачивания», которое характерно для жесткой связки. Это необходимо учитывать при построении кинематической модели инструмента. Изменяя режимы обработки, можно значительно влиять на

показатели обработки. Определяя количественно параметры единичного взаимодействия, можно оценить количество таких взаимодействий в единицу времени на единице площади обрабатываемой поверхности.

В работе [7] сделан вывод о том, что при сглаживании поверхностного слоя детали время цикла последующего процесса полирования уменьшается 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 зависит от исходного состояния поверхности детали до обработки. Учитывая, что зависимости высотных параметров шероховатости поверхности при полировании от времени обработки стабилизируются в пределах первой минуты обработки [7], сглаживание поверхностного слоя следует осуществлять поэтапно, снижая зернистость абразива. Так, 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, а на третьем этапе обработку производить суспензией с нано порошком Al_2O_3 , полученным, например, термическим или другими методами [8]. При термическом методе происходит выгорание мелкой фракции, закрепление узлов в основной фракции, а также сгорания примесей, содержащихся в порошках.

Уникальными свойствами обладают абразивные порошки, полученные газодисперсным синтезом. Они отличаются и имеют следующие преимущества перед изготовленными промышленностью и полученными другими методами овализации: минимальной величиной размеров зерен во фракции (около 0,01 мкм); равномерностью фракции (от 0,07 до 1,04 мкм); сферической формой абразива; наличием окиси алюминия (Al_2O_3) до 99,9 %. Технология получения данных абразивов позволяет изготавливать их из отходов. Наличие укрупненной фракции приводит к царапанию обрабатываемой поверхности, а измельчение - к шаржированию. Было изучено влияние зернистости абразива и продолжительности предварительной обработки на значения высотных параметров шероховатости поверхности для образцов из стали 30ХГСА и титанового сплава ВТ-4 (рис. 5).

Из рис. 5 следует, что интенсивность изменения R_{max} не соответствует интенсивности изменения значений R_a . С увеличением зернистости абразива значения R_{max} увеличиваются. При увеличении времени обработки интенсивность изменения R_{max} резко увеличивается, что можно объяснить дроблением зерен в процессе обработки, следовательно, процесс обработки необходимо прекращать до появления интенсивного разрушения зерен. Так как с уменьшением размеров зерен (при неизменной силе прижатия полировальника) контактное давление возрастает и, соответственно, глубина царапания единичным дробленным зерном должна быть больше, т.е. R_{max} увеличивается при сохранении эффекта сглаживания. Возрастающему контактного давления способствует одновременное соударение множества абразивных зерен, увеличивающих энергию движения дробленого зерна. Из графика видно, что отношение R_a / R_{max} в начальный период полирования (до 90 с) уменьшается незначительно, а при увеличении длительности обработки свыше 90 с значение этого отношения уменьшается и составляет 0,087. Значение отношения высотных параметров в зависимости от зернистости абразива ленты изменяется незначительно, однако при полировании алмазными пастами малой зернистости (АСМ 2/1) значения этого отношения резко снижаются.

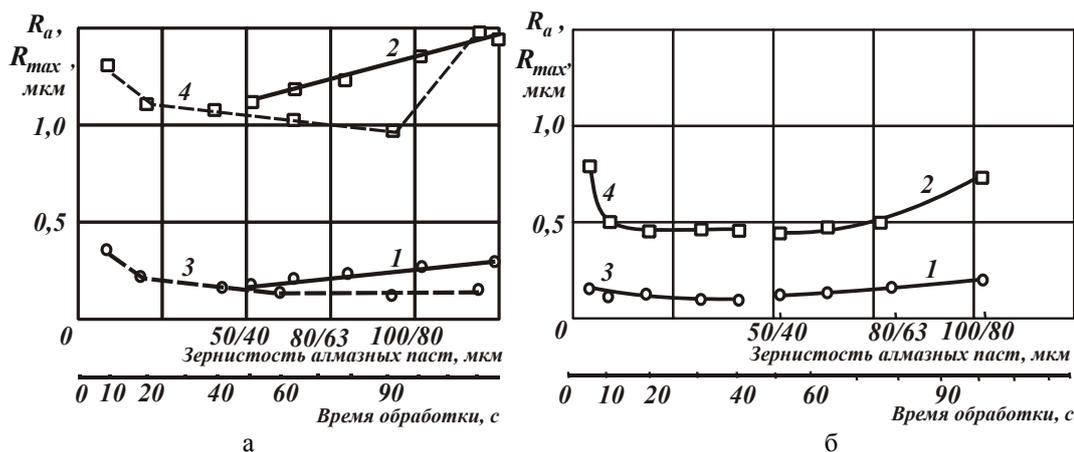


Рис. 5. Влияние зернистости алмазных паст (1 и 2) и продолжительности обработки (3 и 4) на интенсивность изменения значений высотных параметров шероховатости поверхности R_a и R_{max} при абразивном полировании образцов из стали 30ХГСА (а) и титанового сплава ВТ-4 (б): давление 40 МПа; окружная скорость 30 м/с; 1 и 3 – параметр шероховатости поверхности R_a ; 2 и 4 – параметр шероховатости поверхности R_{max} ; время обработки 20с для 1 и 2; зернистость абразива для 3 и 4 – АСО 50/40

Дополнительно рассмотрено изменение значений высотных параметров шероховатости поверхности при обработке титанового сплава ВТ-4. Характер изменения зависимостей аналогичен предыдущему эксперименту. Следует обратить внимание на тот факт, что отношение высотных параметров шероховатости R_a / R_{max} изменяется незначительно и находится в пределах значений 0,15 – 0,17. На обработанной поверхности имеются

характерные следы от зерен крупной доли фракции. Большинство отпечатков и следов, характерных для работы активных зерен, находится на глубине их внедрения 3 – 4 мкм. Для большей зернистости глубина внедрения больше, что приводит к появлению грубых царапин ввиду их разрушения в процессе столкновения.

Одним из методов, позволяющих избежать шаржирования поверхности, а также уменьшить толщину оксидной пленки, является метод абразивного полирования по схеме, показанной на рис. 6.

При обработке использовали неабразивную составляющую в виде дистиллированной воды с концентрацией абразива (на одну часть абразива – четыре части дистиллированной воды). Добавки поверхностно-активных веществ в виде аэросила позволяют улучшить характеристики поверхности. В процессе такой обработки изломы в кристаллических зонах, расположенных между дефектами, становятся эластичными и могут разрушить идеальные связи между атомами. Минимальный участок излома может иметь размеры порядка размера атома.



Рис. 6. Схема полирования суспензией на основе ультрадисперсного порошка

При использовании алмазных лент и микропорошков, сочетание физико-химических свойств природного алмаза и материала обрабатываемой поверхности, а также снижение интенсивности действия химически активных веществ приводят к уменьшению количества различного характера неоднородностей. Необходимо отметить, что окисление поверхности при точении происходит в меньшей степени, чем при абразивном полировании [9]. При полировании поверхность адсорбирует химически активные вещества, содержащиеся в пастах, и кислород воздуха, которые влияют на развитие химико-механических явлений, сопровождающих пластическую деформацию микровыступов поверхности. Процесс адсорбции должен интенсифицироваться при механическом снятии пленок оксидов с поверхности, что обеспечивается относительным перемещением полировальника и обрабатываемой поверхности. Локальный активный контакт поверхностей полировальника и обрабатываемой поверхности обеспечивает срыв пленки оксидов, сопровождается адсорбцией химически активных веществ и последующим срывом. В результате множества локальных действий происходит уменьшение высот неровностей, что подтверждается сглаживанием профиля поверхности. Однако результаты эксперимента показывают, что на поверхности сглаживания при увеличении продолжительности обработки происходит увеличение параметра шероховатости поверхности R_{max} .

Контроль шероховатости обработанных поверхностей показал на возможность непосредственного извлечения информации о форме неровностей при ощупывании иглой профилометра-профилографа. Следует отметить, что критерий шероховатости поверхности F , полученный с использованием контактных приборов, частично отражает форму неровностей, сопоставимых с длинами волн падающего излучения (видимого диапазона), поскольку разрушение от воздействия иглы могут быть сравнимы с рассматриваемыми неровностями. Для неровностей поверхности, сравнимых с длинами волн собственного излучения, точность оценки повышается. Для большинства технологических операций окончательной обработки поверхностей форма неровностей, сопоставимых с длинами волн падающего излучения, частично определяется окислением поверхностного слоя в процессе обработки. Оценка формы таких неровностей контактными методами затруднена, что подтверждается результатами исследований топографии на оптических и электронных микроскопах [9].

Размеры зернистости абразива и подача полировальника оказывают значительное влияние на направленность следов обработки, формируя систематическую составляющую шероховатости с низкой частотой. Высокочастотные составляющие шероховатости поверхности можно отнести к разряду случайных, что подтверждает анализ профилограмм и фотографий (разных увеличений) отдельных участков поверхности. Значительное влияние на их формирование оказывает химическая активность пасты. В табл. 1 приведены результаты экспериментальных исследований, полученных при обработке поверхностей алюминиевого сплава марки АМг 4.

Таблица 1

Значения параметров R_a , R_a/R_{max} , F и контактной разности потенциалов (КРП) после абразивного полирования образцов из проката алюминиевого сплава АМг4

Метод обработки	R_a , мкм	R_a/R_{max}	F	КРП, мВ
Исходная поверхность (прокат)	0,35	0,104	0,896	890
Абразивное полирование (АСМ 2/1)	0,1	0,033	0,967	120

Снижение значения КРП для абразивного полирования можно объяснить наличием загрязнений, остатков рабочей среды, что требует введения дополнительных операций по очистке поверхностей после абразивного полирования. Для определения влияния зернистости абразивных составляющих паст на значения критерия шероховатости поверхности после полирования, обработке подвергали образцы из лент пружинного хромоникелевого сплава марки 36НХТЮ, нашедших применение для изготовления деталей с оптическими свойствами, работающих в условиях воздействия светового потока. Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Значение критерия шероховатости F обработанных поверхностей лент из сплава 36НХТЮ после полирования

Абразивная паста	АСМ 2/1	АСМ 1/0	Окись алюминия, МЗ	Окись хрома, МЗ	Электрокорунд, М7
F	0,93	0,91	0,89	0,89	0,88

Изучение профилограмм и фотографий поверхности различных увеличений показало [9], что для поверхностей, обработанных с применением алмазных паст АСМ 2/1, преобладают неровности более высокого порядка малости (0,01 – 0,1 мкм), а после полирования электрокорундом М7 преобладающие высоты неровностей находятся в пределах 0,1 – 1,0 мкм. Различия формирования поверхностного слоя, очевидно, определяется разницей геометрией зерен алмазных и абразивных микропорошков на уровне субмикрорельефа поверхностей граней и должно оказывать влияние на эффект процесса резания–царапания и развития локальных температур.

Для микрограней алмазных зерен более характерно микрорезание, а для электрокорунда – микросмятие с локализацией и увеличением затрачиваемой энергии (возникновение на полированных поверхностях кометообразных углублений). Локальное активное контактирование абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью эффективно, очевидно, до тех пор, пока геометрические размеры зерен не становятся сопоставимыми с частицами, отделившимися от обрабатываемого материала, что в дальнейшем приводит к потере эффекта полирования. При больших подачах полировальника на образцах наблюдались следы направленного царапания.

Уменьшение отношения высотных параметров шероховатости поверхности R_a/R_{max} (обусловленных различными методами обработки) приводит к увеличению критерия шероховатости поверхности F [9]. Отношение R_a/R_{max} может достигать достаточно малых значений (0,033 для абразивного полирования), соответственно отношение R_{max}/R_a принимает относительно большие значения – 30,3. Это согласуется с теоретическими результатами, в частности, приведенными в работе [9], согласно которым отношение R_a/R_{max} может изменяться в пределах 0 – 0,29. Относительно большие значения R_{max}/R_a при абразивном полировании можно объяснить формой кривой относительной опорной длины профиля поверхности. Значение R_{max} достаточно велико при относительном сглаживании неровностей.

Выводы

Работа посвящена решению задачи технологического обеспечения параметров качества (шероховатости и физико-химического состояния) обрабатываемых поверхностей деталей при абразивном полировании с целью улучшения их оптических характеристик. Установлено, что при предварительной обработке полированием необходимо контролировать значения критерия шероховатости поверхности, а при окончательной обработке – физико-химическое состояние поверхности (работу выхода электронов путем измерения контактной разности потенциалов) и дополнительно для контроля дефектов поверхности – отношения параметров шероховатости поверхности R_a/R_{max} , которое должно стремиться к единице. Сглаживание поверхностного слоя при абразивном полировании следует производить поэтапно путем снижения зернистости абразива. Причем, на каждом последующем этапе обработки поверхности полированием значение зернистости абразива следует принимать не больше предыдущего значения параметра шероховатости поверхности R_{max} (до полирования). Для практического использования рекомендована технологическая абразивная среда на основе ультрадисперсного абразива оксида алюминия, который получают газодисперсным синтезом с величиной фракции (около 0,01 мкм), равномерностью фракции (от 0,07 до 1,04 мкм) и сферической формой абразива, состоящего из 99,9 % Al_2O_3 .

Перечень источников литературы: 1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с. 2. Шкурупій В.Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 “Технологія машинобудування” / В.Г. Шкурупій. – Одеса, 2006. – 21 с. 3. Новіков Ф. В. Основи обробки металевих виробів з оптичними властивостями : монографія / Ф. В. Новіков, В. Г. Шкурупій. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. – 388 с. 4. Агабабов С.Г. Влияние фактора шероховатости на радиационные свойства твердых тел (экспериментальная проверка) / С.Г. Агабабов // Теплофизика высоких температур. - 1970. - Т.8, № 4. - С.770-775. 5. Савельев А.С. Автоматизированная обработка крупногабаритных оптических деталей малым инструментом / А.С. Савельев, А.П. Богданов // Опτικο-механическая промышленность. – 1985. – №3. – С.40-43. 6. Агабабов С.Г. Влияние фактора шероховатости на радиационные свойства твердого тела со случайной шероховатостью / С.Г. Агабабов // Теплофизика высоких температур. - 1975. – Т.13, № 2. – С. 314-318. 7. Акишин А.И. Некоторые эффекты имитационного взаимодействия околоземной ионосферной плазмы с диэлектрическими материалами / А.И. Акишин, С.К. Гужова // Взаимодействие атомных частиц с твердым телом: Тезисы докладов IV Всесоюзной научной конференции. - Харьков, 1976 – С.188-191. 8. Бугер Н.Н. Оптический трактат о градации света / Н.Н. Бугер. - М.: АН СССР, 1952. –138 с. 9. Салтыков А.С. Стереометрическая металлография / А.С. Салтыков. М.: Металлургия, 1970. – 376 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ С ОПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Шкурупий В. Г., Новиков Ф.В.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований параметров шероховатости и физико-химического состояния поверхностей деталей с оптическими характеристиками при абразивном полировании. Определены условия существенного уменьшения шероховатости поверхности и соответственно повышения ее физико-химического состояния с целью улучшения оптических характеристик обрабатываемых деталей. Установлено, что сглаживание поверхностного слоя при абразивном полировании следует проводить поэтапно путем снижения зернистости абразива. Причем, на каждом последующем этапе обработки поверхности полированием значение зернистости абразива следует принимать не больше предыдущего значения параметра шероховатости поверхности R_{max} (до полирования). Для практического использования рекомендована технологическая абразивная среда на основе ультрадисперсного абразива оксида алюминия, который получают газодисперсным синтезом с величиной фракции (около 0,01 мкм), равномерностью фракции (от 0,07 до 1,04 мкм) и сферической формой абразива, состоящего из 99,9 % Al_2O_3 .

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ОБРОБЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ З ОПТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Шкурупій В. Г., Новіков Ф.В.

У роботі наведено результати експериментальних досліджень параметрів шорсткості та фізико-хімічного стану поверхонь деталей з оптичними характеристиками при абразивному поліруванні. Визначено умови суттєвого зменшення шорсткості поверхні й, відповідно, підвищення її фізико-хімічного стану з метою поліпшення оптичних характеристик оброблюваних деталей. Встановлено, що згладжування поверхневого шару при абразивному поліруванні слід проводити поетапно шляхом зниження зернистості абразиву. Причому, на кожному наступному етапі обробки поверхні поліруванням значення зернистості абразиву слід приймати не більше попереднього значення параметра шорсткості поверхні R_{max} (до полірування). Для практичного використання рекомендовано технологічне абразивне середовище на основі ультрадисперсного абразиву оксиду алюмінію, який отримують газодисперсного синтезом з величиною фракції (близько 0,01 мкм), рівномірністю фракції (від 0,07 до 1,04 мкм) і сферичною формою абразиву, що містить 99,9 % Al_2O_3 .

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF QUALITY PARAMETERS OF PROCESSED SURFACES OF PARTS WITH OPTICAL CHARACTERISTICS

Shkurupiy V. G., Novikov F.V.

The paper presents the results of experimental studies of the roughness parameters and the physical and chemical state of the surfaces of parts with optical characteristics during abrasive polishing. The conditions for a significant decrease in surface roughness and, correspondingly, an increase in its physico-chemical state with the purpose of improving the optical characteristics of the parts being processed are determined. It was found that smoothing of the surface layer during abrasive polishing should be carried out step by step by reducing the grain size of the abrasive. Moreover, at each subsequent stage of surface treatment by polishing, the grain size of the abrasive should be taken no more than the previous value of the roughness parameter of the surface R_{max} (before polishing). For practical use, it is recommended to use a technological abrasive medium based on ultradisperse alumina abrasive, which is obtained by gas-dispersion synthesis with a fraction value (about 0.01 μm), a uniformity of the fraction (from 0.07 to 1.04 μm) and a spherical abrasive form consisting of 99,9 % Al_2O_3 .

Ключевые слова: качество обрабатываемых поверхностей, шероховатость поверхности, оптические характеристики, абразивное полирование, зернистость абразива, контактная разность потенциалов.

Ключові слова: якість оброблюваних поверхонь, шорсткість поверхні, оптичні характеристики, абразивне полірування, зернистість абразиву, контактна різниця потенціалів.

Key words: quality of the surfaces to be treated, surface roughness, optical characteristics, abrasive polishing, grain size of abrasive, contact potential difference.

Дата подання статті до редакції 21 серпня 2017 р.