

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, НАНЕСЁННЫХ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

В.А. Федоров, Е.Ю. Татаркин, М.Н. Сейдуров

В работе приведены результаты экспериментальных исследований и теоретическое обоснование по определению механизма формирования микропрофиля поверхности покрытий из бронзы при лезвийной обработке с предварительным и последующим поверхностным пластическим деформированием, а также при магнитно-абразивном полировании.

Ключевые слова: плазменное напыление, поверхностное пластическое деформирование, магнитно-абразивное полирование, шероховатость поверхности.

Одним из наиболее производительных и экономичных способов повышения износостойкости поверхностного слоя деталей, работающих в парах трения, является напыление порошковой алюминиево-железистой бронзы на поверхность стальных деталей плазменным способом.

В процессе напыления на поверхности изделия формируется рельеф с высотой микронеровностей $R_a = 25...50$ мкм, а требуемое значение этого параметра для цилиндрических поверхностей трения валов и осей обычно не более $R_a = 0,1...0,4$ мкм. Следовательно, без финишной механической обработки такие детали не могут быть введены в эксплуатацию.

Получить требуемую шероховатость поверхности при обработке лезвийным инструментом удаётся не всегда. Покрытие представляет собой чешуйчатую, гетерогенную структуру, состоящую из вязких поликристаллов бронзы, содержащую окислы и поры размером $2...10$ мкм. В процессе резания происходит отделение частиц и их агрегатов с обработанной поверхности, что не позволяет достичь её шероховатости менее $R_a = 0,6...1,0$ мкм. Шлифование неэффективно по причине быстрого заполнения пор абразивного инструмента отделяемыми мелкодисперсными вязкими частицами и, как следствие, почти полного прекращения процесса резания.

Перспективным является применение методов поверхностного пластического деформирования до лезвийной обработки с целью улучшения условий резания, а также после неё для создания поверхностного износостойкого налёпа и уменьшения шероховатости, которую также можно снижать методами полирования незакреплёнными

абразивами в качестве альтернативы шлифованию [1].

Рассмотрим явления, происходящие при взаимодействии режущего элемента лезвийного инструмента и напылённого слоя для различных условий обработки с позиций классических представлений о резании металлов.

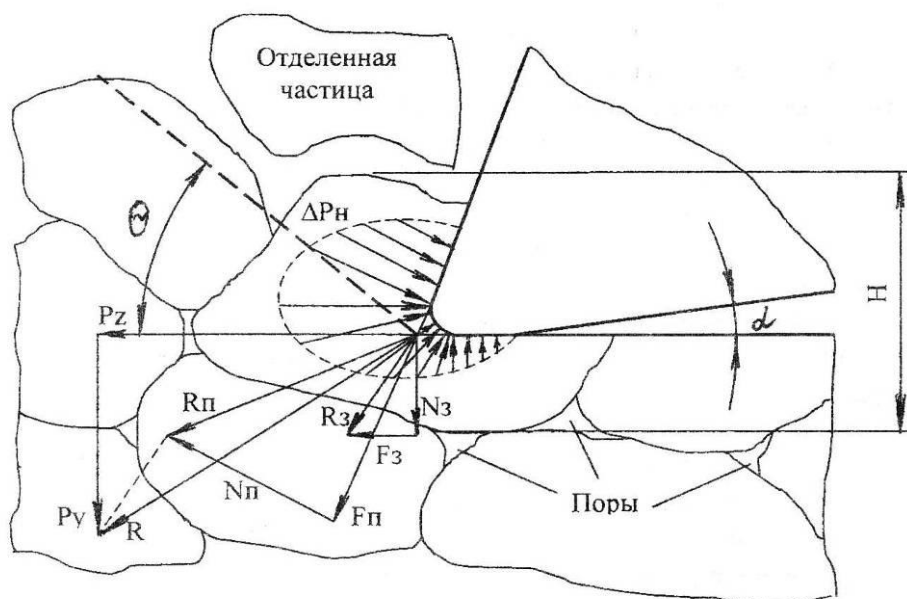
Основными особенностями покрытий, нанесённых плазменным способом с использованием порошка ПГ-19М-01 являются пониженная прочность $\sigma_B = 50...80$ МПа и повышенная твердость НВ 180...200 по сравнению с идентичной по химическому составу алюминиево-железистой бронзой БрАЖ 9-4 ($\sigma_B = 400...500$ МПа и НВ 100...120). Покрытие состоит из отдельных кристаллических частиц с размерами $3...5$ мкм, удерживаемых силами когезионных связей. Пористость напылённого слоя составляет $3...4$ %.

При воздействии лезвийного инструмента на материал покрытия протекают одновременно следующие процессы:

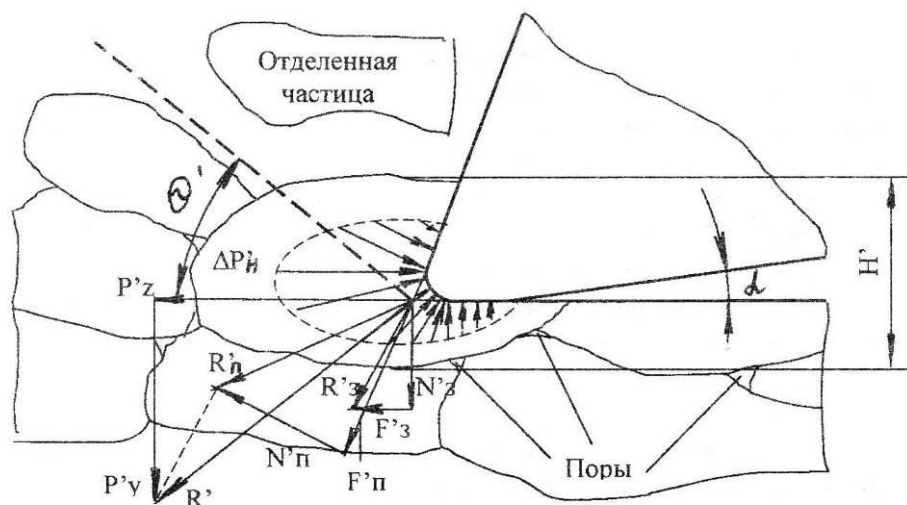
- резание;
- отделение частиц;
- отделение остатков срезанных частиц с обработанной поверхности.

Это происходит в результате силовых взаимодействий, вызывающих интенсивные пластические деформации элементов покрытия в зоне резания вследствие меньшей прочности когезионного соединения, чем у поликристаллической частицы покрытия. Наличие неупорядоченно расположенных пор, представляющих собой концентраторы напряжений, вносит дополнительную дестабилизацию в процесс образования поверхности. Происходящие явления представлены схемой (рисунок 1). Векторы сил условно

перенесены с передней и задней поверхностей инструмента на линию их пересечения.



а)



б)

Рисунок 1 – Схема сил и напряжений, возникающих в процессе резания бронзового покрытия, напылённого плазменным способом: а) без предварительной деформации, б) после предварительного поверхностного деформирования

Основными факторами, способствующими вырыванию напылённой частицы при обработке резанием являются:

- тангенциальная составляющая P_z реакции R на силу резания при деформации отдельного зерна, вызывающая возникновение напряжений сдвига вдоль поверхности когезионного соединения зёрен;

- напряжения на поверхности деформируемого зерна, возникающие в результате

воздействия режущего лезвия, тем больше, чем интенсивнее деформация. Некоторое критическое значение напряжений может вызвать сдвиг в областях когезионного соединения с прилегающими зёрнами.

Компенсируют экстрагирующее воздействие на частицу составляющая реакции P_y и прочность когезионных связей зерна.

Хаотичное расположение пор и напылённых частиц разнообразных форм и раз-

меров, многообразие взаимодействующих факторов крайне затрудняет математическое моделирование процесса.

В то же время, можно сформулировать особенности, определяющие условия отрыва зерна при обработке. Режимы напыления порошков сплавов обычно таковы, что при ударе о заготовку частица «расплющивается» и в таком виде происходит её кристаллизация. Размер зерна в радиальном направлении меньше, чем в тангенциальном.

Другая особенность состоит в том, что площадью контакта частиц с передней поверхностью резца определяется величина экстрагирующих моментов, сил и напряжений. Чем площадь контакта в опасном сечении больше, тем выше вероятность отрыва зерна при деформации. Таким образом, существует зависимость вероятности отрыва элемента покрытия при обработке, а следовательно, и увеличения шероховатости поверхности детали, от высоты H напылённой частицы. Величина этого параметра зависит от режимов плазменного напыления и размеров напыляемых частиц.

Применение поверхностно-пластического деформирования перед лезвийной обработкой приводит к следующим изменениям свойств обрабатываемого покрытия.

1. При деформации вязких зерен бронзы повышается их твёрдость, что приводит к увеличению нормальной силы на задней поверхности N_z . Уменьшение высоты отдельной частицы приводит к уменьшению силы P_z .

2. При пластическом деформировании происходит расширение поверхностного слоя покрытия. Расширению поверхностного слоя препятствуют связанные с ним подповерхностные слои. Возникающие в результате остаточные сжимающие напряжения, складываясь с растягивающими напряжениями от внешней нагрузки при резании, уменьшают их величину. Экстрагирующее воздействие на бронзовые частицы в зоне резания уменьшается.

Процесс формирования микрорельефа при магнитно-абразивном полировании, применяемом после воздействия лезвийным инструментом на пористое покрытие, значительно отличается от аналогичного процесса для сплошного материала. Эти особенности обуславливаются наличием естественных и образовавшихся при резании пор, частично или полностью завальцованных задней поверхностью резца в поверхностном слое по-

крытия глубиной не более 0,1 мм. При магнитно-абразивном полировании происходит постепенное уменьшение высоты профиля до тех пор, пока не начнут вскрываться поры, что приводит к её увеличению.

Таким образом, варьируя режимы полирования или его продолжительность, можно получать требуемую шероховатость и пористость поверхности покрытия.

Цель работы – изучить влияние технологических параметров процессов поверхностного пластического деформирования (ППД), точения и магнитно-абразивного полирования (МАП) на основные показатели качества деталей с бронзовыми покрытиями.

Эксперименты выполнялись на токарном станке модели 16K20Ф3. В процессе исследований применялся прямой проходной сборный токарный резец. Геометрия режущей пластины из сплава Т15К6: $\alpha = 8^\circ$, $\alpha_1 = 6^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\gamma_1 = 0^\circ$, $\phi = 60^\circ$, $\phi' = 30^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $f = 0,2$ мм. Инструмент для ППД – обкатник с закалённым шариком из стали ШХ15, HRCэ 60...65, $R = 9,5$ мм.

В качестве экспериментальных образцов использовали валики, изготовленные из стали 30. На них наносили покрытие плазменным напылением порошка ПГ-19М-01. Химический состав порошка ПГ-19М-01: Al – 8,5...10,5 %, Fe – до 4 %, Cu – остальное. Режимы напыления назначались по существующим рекомендациям для плазменных покрытий из бронз.

Исходные параметры образца: диаметр $d = 52$ мм, толщина покрытия $h = 2,5^{+0,3}$ мм, частота вращения шпинделя $n = 800$ мин⁻¹, шероховатость $R_a = 32$ мкм, волнистость $W_{max} = 100$ мкм, отклонение от круглости $\Delta g = 92$ мкм. Твёрдость по глубине напылённого слоя, не подвергавшегося механической обработке, распределена равномерно и составляет HRA 46...50.

Экспериментальные данные представлены в таблице 1.

Исследования влияния нормальной составляющей силы предварительного ППД – P_{yPd} и подачи S_{Pd} шарикового обкатника на отклонение от круглости обработанной поверхности, её шероховатость, волнистость, твёрдость и распределение твёрдости по глубине остаточного слоя показали, что после предварительного ППД твёрдость обкатанной поверхности повышается на 8...12 единиц по шкале HRA. Глубина пластически деформированного слоя достигает 1,0...1,3 мм.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

Планирование экспериментов					Параметры качества обработанной поверхности			
№ п/ п	Технологические методы	Варьируемые параметры	Значения параметров		R _a , мкм	W _{max} , мкм	Δg, мкм	HRA
			Уровень					
			Нижний	Верхний				
1	Предварительное ППД (ПФЭ 2 ²)	P _{ypd} , Н S _{pd} , мм/об	600 0,07	1400 0,195	0,32- 1,08	10-20	40-60	54-62
2	Точение с предварительным ППД (ПФЭ 2 ³)	P _{ypd} , Н S _{pd} , мм/об S, мм/об	600 0,07 0,07	1400 0,195 0,195	0,40- 1,20	4-12	10-20	48-53
3	ППД после точения (ПФЭ 2 ³)	P _{ypd} , Н P _{yd} , Н Ra ₀ , мкм	600 600 0,4	1400 1200 1,2	0,06- 0,24	12-20	12-20	54-62

Получены эмпирические модели:

$$R_a = 0,98 - 4 \cdot P_{ypd} \cdot 10^{-4} + 1,31 \cdot S_{pd}, \quad (1)$$

$$\Delta g = 371,87 \cdot P_{ypd}^{-0,36} \cdot S_{pd}^{-0,26}. \quad (2)$$

С увеличением силы P_{ypd} и подачи S_{pd}, в границах выбранных пределов варьирования, отклонение от круглости Δg снижается в 1,5...2 раза, а с увеличением P_{ypd} и уменьшением S_{pd} уменьшается шероховатость обработанной поверхности после предварительного ППД.

Исследование влияния процесса точения на качество поверхности деталей с покрытием после предварительного ППД проводилось на подготовленных образцах с обкатанной поверхностью.

Диаметр образца d = 52 мм, толщина покрытия h = 2,5-0,3 мм. Частота вращения шпинделя n = 800 мин⁻¹, глубина резания t = 0,2 мм.

Получены эмпирические модели:

$$R_a = 132,6 \cdot P_{ypd}^{-0,25} \cdot S^{1,51}, \quad (3)$$

$$W_{max} = 5,49 \cdot P_{ypd}^{0,26} \cdot S^{0,76}. \quad (4)$$

Варьирование подачи S в выбранном интервале позволяет добиться уменьшения максимальной волнистости и шероховатости поверхности в 3 раза. Особое значение имеет, очевидно, снижение на 30 % шероховатости поверхности обработанной точением после предварительного ППД при увеличении параметра P_{ypd} с 600 Н до 1400 Н. Это подтверждает влияние предварительного ППД не только на твёрдость поверхности и подповерхностных слоёв, но и на геометрические показатели качества поверхности при последующей обработке.

При исследовании влияния ППД после предварительного ППД и точения на качество поверхности покрытия детали диаметр *ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК 1/1-2012*

образца составлял d = 52 мм, толщина покрытия h = 2,3-0,3. Частота вращения шпинделя n = 800 мин⁻¹. Варьировались силовые P_{ypd}, P_{yd} и параметры исходной шероховатости.

Получены эмпирические модели:

$$R_a = 0,16 \cdot P_{ypd}^{0,58} \cdot P_{yd}^{-0,6} \cdot Ra_0^{0,73}, \quad (5)$$

$$\Delta g = 2,11 \cdot P_{ypd}^{0,91} \cdot P_{yd}^{-0,52}. \quad (6)$$

Твёрдость обкатанной поверхности на различных участках практически идентична твердости, полученной после предварительного ППД. Снижение радиальной составляющей силы предварительного ППД P_{ypd} в выбранном диапазоне позволяет уменьшить шероховатость в 1,5...1,8 раза. В среднем в 1,5 раза снижается шероховатость при увеличении радиальной составляющей силы ППД P_{yd} с 600 Н до 1200 Н, и в 4...6 раз по сравнению с исходной. Исходная шероховатость, полученная после токарной обработки, оказывает значительное влияние на шероховатость после обкатывания. После обработки поверхности с минимальной шероховатостью, микропрофиль в 2...3 раза ниже, чем при обработке поверхности с максимальной шероховатостью в выбранном интервале. Отклонение от круглости Δg в 2...2,3 раза меньше при нижнем уровне параметра P_{ypd} в отличие от обработки при верхнем его значении. В 1,4...1,6 раз снижается отклонение от круглости при увеличении параметра P_{yd} в пределах интервала варьирования.

Для исследования влияния длительности магнитно-абразивного полирования на шероховатость, волнистость, отклонение от круглости и твёрдость обработанной поверхности на каретке суппорта станка уста-

навливалось приспособление для магнитно-абразивной обработки, оснащённое призматическими индукторами, собранными из постоянных магнитов и полюсных наконечников [2, 3].

Образец, диаметром $d = 52$ мм, с толщиной покрытия $h = 2,2-0,3$ мм имел исходную шероховатость $R_a = 0,63$ мкм, волнистость $W_{max} = 25$ мкм, отклонение от круглости $\Delta g = 12$ мкм и твёрдость поверхности HRA 48...53, образовавшиеся в результате токарной обработки. Зернистость абразивного порошка составляла 180...320 мкм. Материал порошка – TiC+Fe. Зазор $\delta = 1$ мм. Частота вращения заготовки $n = 1000$ мин⁻¹. Подача $S = 0,2$ мм/об.

В процессе МАП в среде СОЖ периодически, через каждые 30 с, измерялись параметры поверхностного слоя. По результатам эксперимента были сделаны следующие наблюдения: твёрдость поверхности образца в процессе обработки практически не изменялась и оставалась в пределах HRA 48...53. Возрастание шероховатости на 30...50 %, по сравнению с минимальной (рисунок 2), после 2...3 мин обработки связано с тем, что после снятия основного профиля шероховатости начинают «открываться» поры, края которых были частично завальцованы пластической деформацией при токарной обработке. Получена шероховатость $R_a = 0,06...0,1$ мкм в течение 1...2 мин. МАП не снижает максимальную волнистость и отклонение от круглости детали после токарной обработки ($W_{max} = 10...12$ мкм и $\Delta g = 6...10$ мкм).

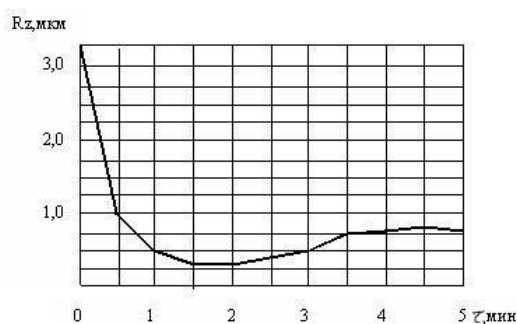


Рисунок 2 – Влияние длительности обработки на шероховатость поверхности покрытия

Таким образом, проведённые исследования позволили выявить особенности протекания процессов поверхностного пластического деформирования и магнитно-абразивного полирования, применяемых в качестве отделочной обработки, по сравнению с обработкой сплошных материалов.

Предварительное поверхностное пластическое деформирование перед точением вызывает увеличение твердости поверхностного слоя покрытия, глубиной 1,0...1,3 мм с HRA 48...53 до HRA 54...62. Шероховатость после токарной обработки снижается на 30 %, достигая $R_a = 0,4$ мкм, что доказывает влияние предварительного пластического деформирования на процесс формирования микрогеометрии поверхности при последующей обработке резанием.

Выводы

1. Применяемое после точения, поверхностное пластическое деформирование снижает шероховатость поверхности до $R_a = 0,06...0,24$ мкм. Твёрдость поверхности увеличивается с HRA 48...53 до HRA 54...62.
2. Применение метода магнитно-абразивного полирования после чистовой токарной обработки обеспечивает параметр шероховатости $R_a = 0,06...0,1$ мкм в течение 1...2 мин. Последующая обработка приводит к образованию пористой поверхности, что способствует удержанию смазки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров В.А. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин с плазменными бронзовыми покрытиями: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2002. – 18 с.
2. Патент на изобретение RU № 2098258. Устройство для магнитно-абразивной обработки / Татаркин Е.Ю., Ситников А.А., Марков А.М., Федоров В.А., Зайвий К.Ю. – Оpubл. в Б.И., 1997, № 34.
3. Федоров В.А. Классификация и разработка устройств с индукторами на постоянных магнитах для магнитно-абразивной обработки фасонных поверхностей / В.А. Федоров, А.М. Иконников, В.А. Столбов // Обработка металлов. – 2006. – № 2. – С. 7-9.

Федоров В.А., к.т.н., доцент,

E-mail: fvaqtu@mail.ru;

Татаркин Е.Ю., д.т.н., профессор,

Сейдуров М. Н., к.т.н., ст. преподаватель,

E-mail: seidurov@mail.ru;

ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»