

Влияние распределения карбидной фазы на процесс износа композиционного покрытия WOKA PTA-6040 после плазменной порошковой наплавки

к.т.н. проф. Паркин А.А., к.т.н. доц. Жаткин С.С., Минаков Е.А.
Самарский государственный технический университет «СамГТУ»
8 (846) 332-42-27, laser@samgtu.ru, sergejat@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследований на абразивный износ покрытия WOKA PTA-6040, сформированного плазменной порошковой наплавкой при токах дуги 70А, 85А и 100А. Определены некоторые закономерности износа наплавленного материала, обусловленные особенностями распределения в нем карбидной фазы при различных токах плазменной дуги. Установлены изменения микроструктуры, элементного состава по высоте наплавленного слоя, а также процесс седиментации карбидов и показано их влияние на износостойкость наплавленного материала.

Ключевые слова: плазменная наплавка, износостойкость, микроструктура, микротвердость, рентгеноспектральный микроанализ, седиментация.

Введение

Современное машиностроительное производство невозможно без наукоемких физико-химических методов обработки материалов. Примеры успешного применения соответствующих технологий в машиностроении приведены в работе [1]. К их числу относятся и плазменная порошковая наплавка.

Для увеличения износостойкости буровых долот и других изделий широко используется нанесение специальных износостойких покрытий, в том числе и твердосплавных. К настоящему времени наиболее изучены методики плазменно-порошкового нанесения и свойства различных износостойких покрытий, включая Stellite. В работах [2-7] представлены результаты исследований структуры и свойств (в том числе и испытания на абразивный износ) Stellite 6, Stellite 12 и Stellite 190W, полученных в различных режимах плазменной наплавки. В меньшей степени изучены плазменно-наплавленные покрытия на основе композиционных твердосплавных материалов. Теоретический анализ износостойкости многокомпонентных и композиционных наплаваемых материалов осложняется отсутствием полных данных по их физико-механическим свойствам и, в частности, по их прочностным характеристикам.

В данной работе представлены результаты исследования по абразивному износу покрытия WOKA PTA-6040 после плазменно-порошковой наплавки при токах дуги 70А, 85А и 100А на образцы из стали 19ХГНМА.

В исследовании производилась наплавка композиционного порошкового материала WOKA PTA-6040, химический состав которого приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав WOKA PTA-6040

Наименование материала	Содержание, % по массе						
	Co	Ni	C	Cr	V	Si	WC
WOKA PTA-6040	2,2	30	3,5	1,5	0,45	0,6	60

Методики испытаний и исследований

Плазменная наплавка WOKA PTA-6040 проводилась на автоматической плазменной установке ARC-6 в защитном газе на торцевую поверхность цилиндрических заготовок из долотной стали 19ХНЗМА. Для наплавки применялся порошок с размером частиц 60 – 150 мкм.

Структура наплавленного материала исследовалась на оптическом микроскопе МИМ-8. Изучение микроструктуры и микроанализ зон наплавки проводились на аналитическом раст-

ровом электронном микроскопе JSM-6390A фирмы JEOL, измерение микротвердости осуществлялось по стандартной методике с использованием микротвердомера ПМТ-3.

Испытания на линейный износ проведены на установке Универсал-1А [4, 5] локально в четырех участках зоны наплавки (рисунок 1,а), что позволило определить влияние тепловложения на изменение условий формирования структуры и свойств наплавленного материала и, соответственно, износостойкости. Точка 1 (0°) (рисунок 1,а) соответствует началу наплавки, а точка 4 (330°) – концу наплавки. Высота наплавленного слоя после шлифовки в зоне трения составила 0,4 мм.

Контртело было изготовлено из стали 40Х (закалка до HRC 46-48) в виде трубки внешним диаметром 6 мм. Испытания проводились при нормальной нагрузке в 26 кгс, в течение 10 минут, с частотой вращения шпинделя 600 об/мин. При испытаниях использовалась алмазная паста марки АСМ-3/2-НОМГ. Площадь трения составляла $1,57 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$. Схема расположения зон трения показана на рисунке 1,б.

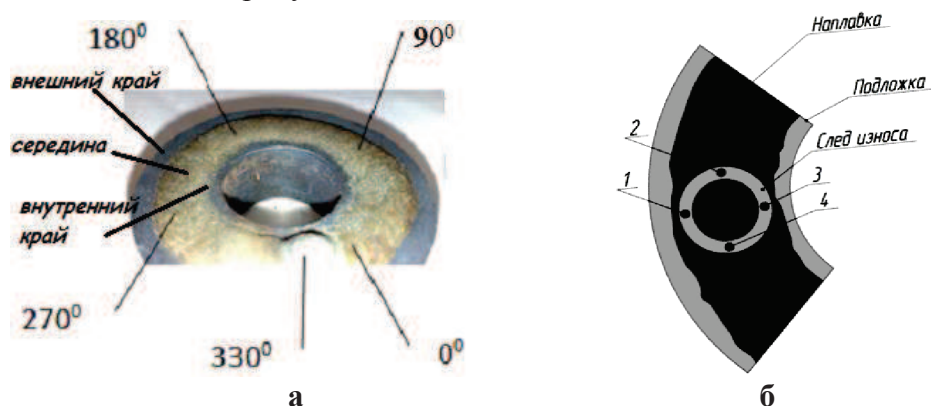


Рисунок 1. Общий вид наплавленного образца – а; схема расположения зон и точек измерения износа – б

Результаты исследований и их анализ. Данные по измерению геометрических размеров зоны наплавки в зависимости от времени наплавки (угла поворота образца) при постоянной скорости вращения (0,6 об/мин) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Изменения ширины и высоты наплавки по углу поворота наплавленного WOKA PTA-6040

Ток дуги	Точки измерений	0°	90°	180°	270°	330°
70 А	Ширина наплавки, мм	8,2	8,3	8,8	9,3	9,7
	Высота наплавки, мм	2,48	1,7	1,4	1,42	1,27
85 А	Ширина наплавки, мм	8,8	8,6	9,3	9,8	10
	Высота наплавки, мм	1,9	1,54	1,31	1,22	1,1
100 А	Ширина наплавки, мм	9,5	9,9	10,1	10,5	10,4
	Высота наплавки, мм	1,8	1,5	1,33	1,28	1,05

С ростом времени наплавки в результате увеличения тепловложения повышается температура заготовки и материала в зоне наплавки, соответственно происходит уменьшение скорости охлаждения наплавленного материала и повышение его температуры. Повышение температуры наплавленного материала приводит к уменьшению вязкости жидкого расплава, что вызывает дополнительное его растекание и, соответственно, увеличение ширины, и уменьшение высоты зоны наплавки. Изменение ширины и высоты наплавки вначале наплавки (0° поворота образца) можно объяснить расширением плазменной струи с ростом тока плазменной дуги.

Изменение физических и геометрических параметров зоны наплавки в зависимости от времени наплавки и тока плазменной дуги при постоянном расходе наплавленного порошка

приводит к изменению микроструктуры и свойств наплавленного материала.

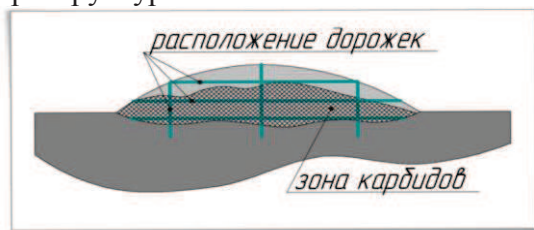


Рисунок 2. Схема расположения дорожек на образцах

На рисунках 3-9 приведены данные по изменению микротвердости наплавленного WOKA PTA-6040. Измерения проводились по 6 дорожкам (3 вертикальных и 3 горизонтальных). Схема расположения дорожек представлена на рисунке 2.

На рисунке 3 представлены сравнительные данные по микротвёрдости WOKA PTA-6040, наплавленного при различных токах плазменной дуги (зависимость бралась по вертикальным центральным дорожкам на каждом образце).

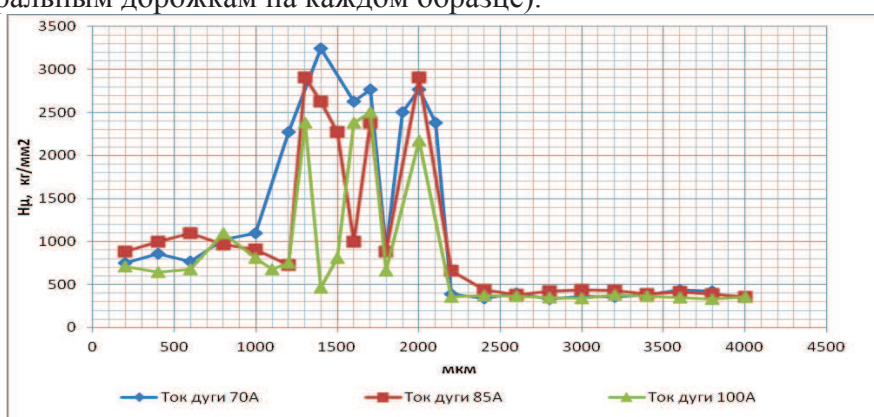


Рисунок 3. Изменение микротвёрдости по высоте наплавленного валика при различных токах плазменной дуги: $I_D=70A, 85A, 100A$

Высокая твердость наплавленного WOKA PTA-6040 обусловлена наличием карбидной фазы WC. При этом наблюдаемое смещение максимума твердости относительно верхней части зоны наплавки вглубь может быть объяснено седиментацией карбидов к границе с подложкой.

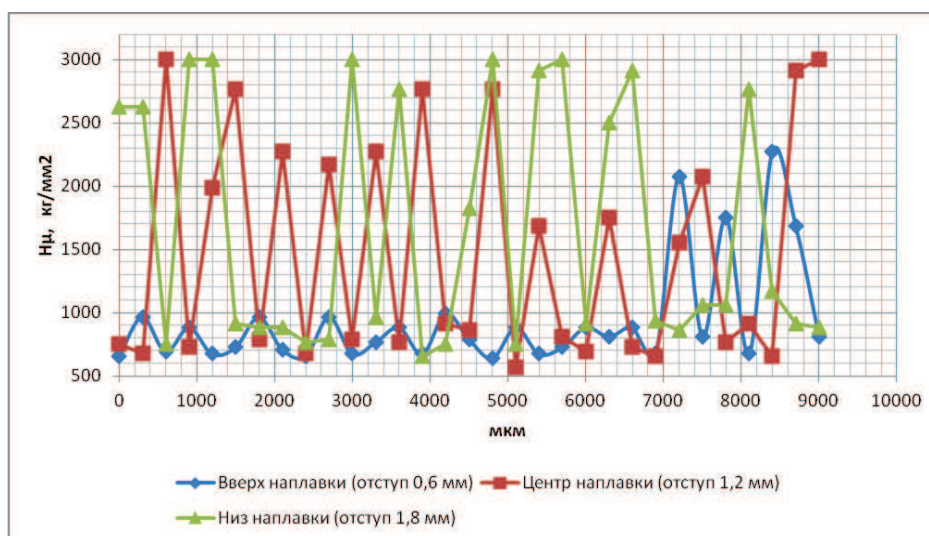


Рисунок 4. Распределение микротвёрдости по ширине наплавленного валика при токе плазменной дуги $I_D=85A$

Хорошо видно, что с ростом тока плазменной дуги уменьшается микротвердость карбидной фазы, данное явление может быть обусловлено распадом карбидов и растворением в

них железа, поступающего из подложки.

Процессы распада и растворения карбидов, а также их седиментацию подтверждают данные измерения микротвердости по ширине наплавки из WOKA PTA-6040 на различной его глубине: 0,6 мм, 1,2 мм и 1,8 мм от вершины наплавленного валика. В качестве иллюстрации на рисунке 4 представлено распределение микротвердости по ширине зоны наплавки при токе дуги 85 А.

Хорошо видно, что у поверхности наплавленного валика (0,6 мм от вершины) карбиды практически отсутствуют за счет их распада и седиментации. Важно отметить, что на этом уровне карбиды сохраняются лишь в узкой области у внешнего края наплавленного валика, это может быть объяснено меньшим нагревом внешнего края наплавки и материала подложки при вращении образца. Подобное распределение карбидов наблюдалось и при токе 70А. Суммарные данные ширины карбидной области по глубине при различных токах плазменной дуги приведены в таблице 3.

Таблица 3

Ширина карбидной области по глубине наплавленного валика WOKA PTA-6040

Глубина наплавки (от вершины валика), мм	Ток дуги		70 А	85 А	100 А
	0,6	Ширина карбидной области, мм	1,4*	1,8*	-
1,2			8,6	8,4	4,8
1,8			6	8,2	5,4

* - у внешнего края наплавленного валика.

Расширение карбидной зоны на глубине наплавленного валика (отступ от вершины 1,8 мм) при токе плазменной дуги 85 А можно объяснить перегревом расплава WOKA PTA-6040 и дальнейшим понижением ее вязкости и, соответственно, более высокой скоростью седиментации.

Увеличение тока плазменной дуги до 100 А вызвало увеличение глубины залегания области с карбидной фазой, что может быть связано со значительным перегревом наплавляемого материала и материала заготовки за счет роста тепловложения и, соответственно, частичным растворением и распадом карбидной фазы. При этом отмечается сужение областей с карбидной фазой на глубине 1,2 мм и 1,8 мм.

Наглядное распределение карбидов в зоне наплавки представлено на рисунке 5. В верхней зоне наплавки при токе плазменной дуги 70 А наличие карбидов практически не наблюдается. Имеется неравномерное распределение карбидов вольфрама по ширине зоны наплавки – на краю зоны наплавки карбиды расположены несколько глубже от поверхности зоны наплавки.

При увеличении тока плазменной дуги до 85 А область, обедненная карбидами, увеличивается, т. е. происходит растворение и распад карбидов и их осаждение на большую глубину. Наблюдается также измельчение карбидов на дне ванны расплава на границе зоны сплавления.

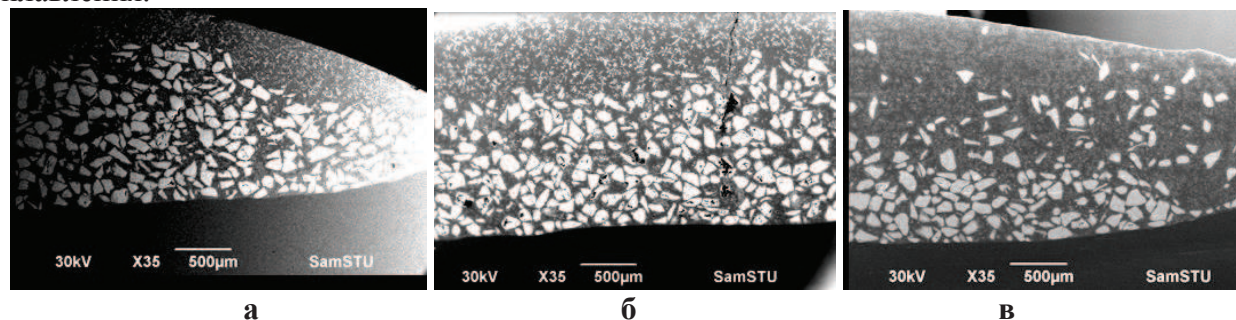


Рисунок 5. Распределение карбидов в WOKA PTA-6040 по высоте наплавки при различных токах плазменной дуги: а – 70 А; б – 85 А; в – 100 А

При токе плазменной дуги 100 А формируется неоднородная карбидная структура с наибольшей их плотностью на дне ванны расплава. В приповерхностном слое зоны наплавки наблюдаются отдельно разбросанные карбиды и, в целом, зона, обедненная карбидами, больше, чем при токах плазменной дуги 70 А и 85 А.

Анализ формируемой структуры наплавленного WOKA PTA-6040 показывает, что для получения износостойкой поверхности для каждого режима наплавки после обработки необходимо проводить шлифовку наплавленного валика (снятие технологического припуска) на разную глубину: при токе плазменной дуги 70 А – не менее 0,7 мм, при 85 А – не менее 1 мм, а при токе дуги 100 А – около 1,4 мм.

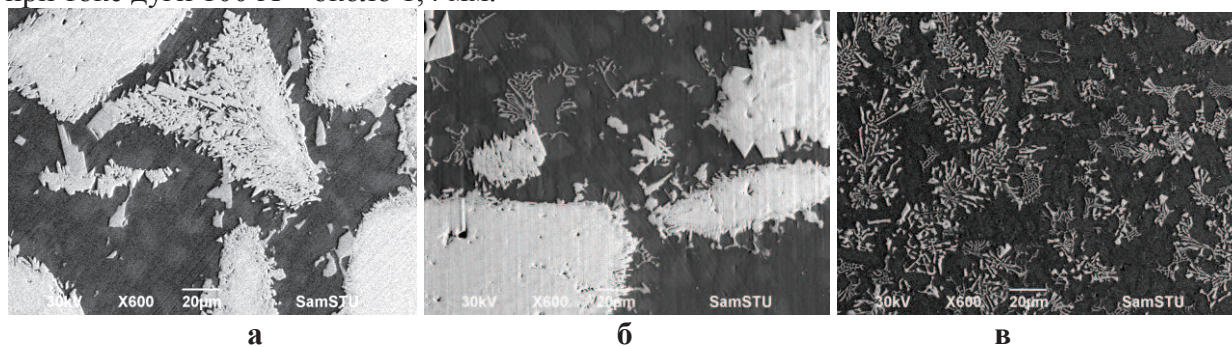


Рисунок 6. Микроструктура WOKA PTA-6040 после плазменной наплавки при разных токах дуги: а – 70 А; б – 85 А; в – 100 А

Таблица 4

Распределение элементов по глубине WOKA PTA-6040, наплавленного при различных токах плазменной дуги

Глубина	C	Si	Cr	Fe	Co	Ni	W
WOKA PTA-6040 (ток наплавки 70А)							
0.359 mm	5,53	2,33	2	13,4	6,2	66	4,19
0.717 mm	6,52	5,08	1,31	3,93	2,08	28	53,4
1.076 mm	7,23	6,73	0,23	0,91	0,42	3,3	81,2
1.435 mm	6,76	6,08	0,66	1,98	0,69	5,9	78
1.793 mm	4,94	2,56	1,73	41,7	2,39	19	27,8
1.893 mm	4,78	1,03	1,23	56,1	3,47	30	3,11
WOKA PTA-6040 (ток наплавки 85А)							
0.359 mm	4,05	1,83	2,03	26,4	6,14	59	0,98
0.717 mm	4,2	1,8	2,22	26,2	5,92	58	1,35
1.076 mm	8,16	6,62	0,29	0,72	0,2	2,1	81,9
1.435 mm	2,98	2,39	2,82	26,2	4,37	32	29
1.793 mm	4,15	1	1,16	60	3,34	24	5,97
1.893 mm	5,02	2,65	1,69	24,6	5,51	53	7,72
WOKA PTA-6040 (ток наплавки 100А)							
0.359 mm	4,02	1,31	2,6	46,6	5,3	36	4,57
0.717 mm	5,78	1,17	2,89	47,7	4,73	31	7,09
1.076 mm	4,26	2,74	1,95	32,2	3,51	26	29,1
1.435 mm	5,22	0,72	3,12	48,6	5,03	30	6,89
1.793 mm	6,25	1,38	1,7	46,3	4,79	37	2,14
1.893 mm	5,79	0,98	1,62	54,2	4,04	30	3,12

При токе плазменной дуги 70 А заметное содержание карбидов вольфрама наблюдается на глубине 0,717 мм, при токе дуги 85 А – на глубине 1,076 мм, при токе дуги 100А точки измерения попали в промежуток между карбидами вольфрама, поэтому точно определить не представилось возможным. Однако масштабное измерение указывает на глубину выше 1,4 мм. Структура карбидов и процесс их растворения и распада с ростом тока дуги показаны на

рисунке 6.

Фотографии получены в верхних слоях зоны плазменной наплавки. При токе 70 А в зоне наплавки формируется структура, близкая к исходной литой структуре WOKA PTA-6040, а процесс распада первичных карбидов только начинается, в то время как при 100 А первичные карбиды отсутствуют и образуются вторичные карбиды.

В таблице 4 представлены данные элементного микроанализа зоны наплавки WOKA PTA-6040 по глубине наплавленного валика при разных токах плазменной дуги. Результаты микроанализа в целом подтверждают процесс седиментации карбидов вольфрама, установленный по измерению микротвердости и исследованию микроструктуры. Процессы осаждения карбидов в жидкой фазе наплаваемого материала особенно интенсивно протекают при токах 85 А и 100 А. Из представленных диаграмм (рисунок 8) видно, что при токе плазменной дуги 70 А распределение карбидной фазы по размерам практически также не меняется. Повышение тока плазменной дуги до 85 А уменьшает процентное содержание крупных карбидов (250 – 400 мкм), то есть происходит их распад и растворение в связующем никеле. Дальнейшее повышение тока плазменной дуги до 100 А вызывает измельчение карбидов размером 200 – 250 мкм.

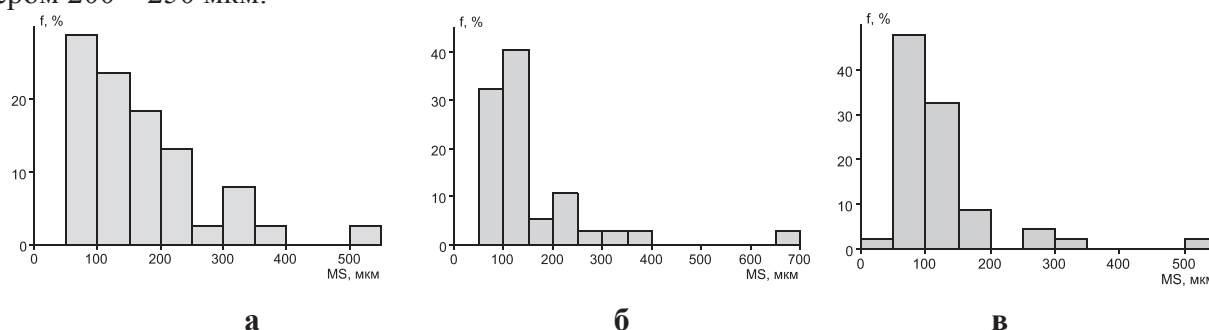


Рисунок 8. Средние размеры карбидов в WOKA PTA-6040 в зависимости от тока дуги: а – $I_d = 70$ А; б – $I_d = 85$ А; в - $I_d = 100$ А

Таблица 5

Результаты послойного износа образцов наплавки WOKA PTA-6040 при различных токах плазменной дуги

		Верх зоны наплавки (отступ 500мкм)			Середина зоны наплавки (отступ 1000 мкм)			Низ зоны наплавки (отступ 1900мкм)		
Ток дуги	№	износ в 4 точках	Средняя величина износа	Скорость износа	износ в 4 точках	Средняя величина износа	Скорость износа	износ в 4 точках	Средняя величина износа	Скорость износа
А		мкм	мкм	мкм\ час	мкм	мкм	мкм\ час	мкм	мкм	мкм\ час
70	1	22	25	152	18	20	117	28	22	134
	2	24			27			25		
	3	25			22			15		
	4	30			11			21		
85	1	40	31	185	27	21	128	27	20	119
	2	30			18			20		
	3	25			15			9		
	4	28			25			23		
100	1	45	35	207	34	27	159	8	17	102
	2	38			35			12		
	3	25			16			25		
	4	30			21			23		

В таблице 5 представлены результаты послойных испытаний на абразивный износ образцов после наплавки WOKA PTA-6040 в зависимости от тока плазменной дуги и глубины проведения испытаний. Схема расположения точек измерения локального износа WOKA PTA-6040 приведена выше на рисунке 1б.

При токе плазменной дуги 70 А с ростом глубины шлифовки от 0,5 мм до 1,0 мм и 1,9 мм происходит незначительное уменьшение величины износа. В целом можно сделать вывод, что при токе 70 А величина износа практически не меняется по глубине наплавки. При токе плазменной дуги 85 А средняя величина износа на глубине 0,5 мм выше, чем при токе дуги 70 А, обусловленная распадом и седиментацией карбидов. Наличие карбидов на глубине 1 мм и 1,8-1,9 мм определяет и меньшую величину износа наплавленного материала. В то же время при токе 100 А средняя величина износа возросла на глубине 0,5 мм и 1 мм, а на глубине 1,8-1,9 мм даже несколько снизилась по сравнению с токами плазменной дуги 70 А и 85 А.

На рисунке 9 представлена диаграмма величины износа наплавленного материала по глубине.

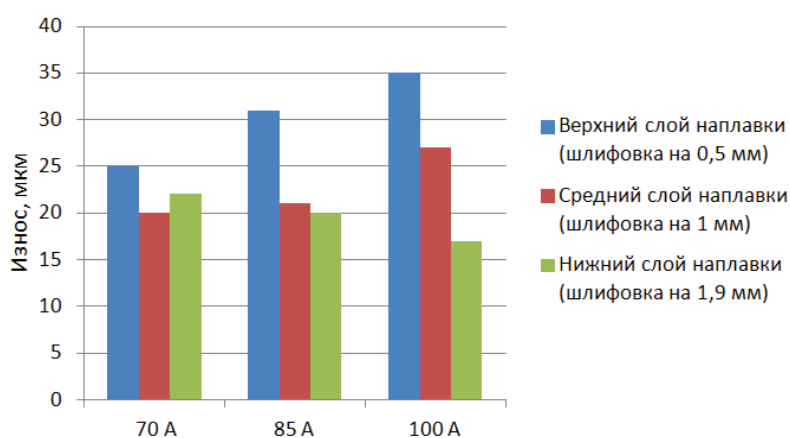


Рисунок 9. Изменение среднего значения величины износа наплавленного WOKA PTA-6040 после послойного шлифования

В целом проведенные испытания на абразивный износ показали, что наиболее интенсивному износу подвергается верхняя зона наплавленного валика, где практически отсутствует карбидная фаза. С увеличением глубины зоны наплавки возрастает плотность карбидов вольфрама и соответственно уменьшается величина износа.

Выводы

1. На основе проведенных комплексных исследований установлены особенности распределения карбидов WC по зоне наплавленного композиционного материала WOKA PTA-6040 после плазменной порошковой наплавки. С увеличением тока плазменной дуги от 70 до 100 А повышается неоднородность в распределении карбидов как по высоте, так и по ширине наплавленного валика.
2. С ростом тока плазменной дуги от 70 до 100 А в процессе наплавки происходит седиментация карбидов к границе сплавления покрытия с подложкой. Наиболее выраженная седиментация карбидов в наплавленном WOKA PTA-6040 наблюдается при токах дуги 85 и 100 А за счет перегрева расплава и снижения его вязкости.
3. Распад первичных карбидов в верхних слоях наплавленного валика и их седиментация вглубь к зоне сплавления с подложкой при повышении тока дуги вызывает неравномерный износ наплавленного слоя по его высоте. При этом по результатам послойных испытаний на абразивный износ установлено, что меньшему износу подвержены нижние слои наплавленного валика с наиболее высокой плотностью карбидов в них.
4. Неравномерный износ наплавленного материала WOKA PTA-6040 по высоте обуславли-

вадет необходимый технологический припуск для шлифовки наплавленных валиков. При токе плазменной дуги 70 А припуск должен быть не менее 0,7 мм, при 85 А – не менее 1 мм, а при токе дуги 100 А – около 1,4 мм.

Литература

1. Моргунов Ю.А., Панов Д.В., Саушкин Б.П., Саушкин С.Б. Научно-технические технологии машиностроительного производства. Физико-химические методы и технологии: учебное пособие. / Под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Издательство «Форум», 2013. 928 с. ISBN – 978-5-91134-774-1.
2. Паркин А.А., Жаткин С.С., Ткачев С.П. Структура и свойства плазменно-наплавленного порошка WOKA PTA-6040. XVI Междунар. конф. «Физика прочности и пластичности материалов», Самара. Июнь 2006. С. 194.
3. Ana Sofia C.M. D' Oliveira, Paulo Sergio C.P. da Silva, Rui M.C. Vilar. Microstructural features of consecutive layers of Stellite 6 deposited by laser cladding // Surface and Coatings Technology 153 (2002) 203-209.
4. ZHU Yuan-zhi, YIN Zhi-min, TENG Hao. Plasma cladding of Stellite 6 powder on Ni76Cr19AlTi exhausting valve // Trans. Nonferrous Met. Soc. China 17 (2007) 35-40.
5. Hazoor Singh Sidhu, Buta Singh Sidhu, S. Parkashc. Characteristic Parameters of HVOF sprayed NiCr and Stellite-6 coatings on the boiler steels using LPG as fuel gas // International Journal of Engineering and Information Technology Copyright© 2010 waves publishers IJEIT 2010, 2(2), 133-139.
6. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев // Монография / И.Д. Ибатуллин – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с. ISBN – 978-5-7964-1211-4.
7. Ибатуллин И.Д. Новые методы и приборы для экспрессной оценки энергетических параметров усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. // Диссертация на соискание ученой степени д. т. н. Специальность: 01.04.01. Год: 2010. 387 с.

Оптимизация процесса комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием

к.т.н. доц. Пини Б.Е., Ветрова Е.А., д.т.н. проф. Максимов Ю.В.
Университет Машиностроения
495 223-05-23, доб. 1327

Аннотация. Рассмотрена возможность оптимизации процесса комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием с использованием новых решений по конструкциям режущей и обкатной части устройства для комбинированной обработки.

Ключевые слова: комбинированная обработка, регламентированное усилие обкатывания, вращающийся режущий блок, нежесткие цилиндрические детали, устройство для комбинированной обработки, точность обработки, шероховатость поверхности.

В машиностроении широко применяются изделия с гладкими протяжёнными поверхностями с точностью обработки IT 7...9 и шероховатостью поверхности $R_a = 0,32 - 0,63 \text{ мкм}$. Такая шероховатость поверхности обеспечивает высокие эксплуатационные показатели в гидро- и пневмоцилиндрах, широко применяемых в различных механизмах, например таких, как автомобили с установленными на них гидрофицированными кранами, автомобили для транспортирования мусорных контейнеров, мусоровозы, снегоуборочные машины, тракторы с навесными орудиями, дорожно-строительные машины и т.д. Широко используются также гладкие приводные и свободно вращающиеся ролики в системах транспортирования изделий