

## **PRECISION DIAMOND-ABRASIVE PROCESSING OF CERAMIC MATERIALS**

A.N. BOLOTOV, Dr Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc.,  
O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: onvk@mail.ru

The influence of load-speed wear conditions and the structural composition of ceramic diamond material on the grinding performance and consumption of abrasive tools is investigated. It is established that the determining factors are the load on the tool, its grain size and diamond concentration, the physical and mechanical properties of interacting materials, and the feed depth. The ratios of abrasive wear parameters depending on the type of grinding were obtained. Practical recommendations are given on the selection of ranges of grain size, diamond concentration, grinding depth, and processing speed. The diamond grades are evaluated.

*Keywords:* precision machining, grinding performance, diamond consumption, grinding modes, diamond-abrasive processing, ceramic binder.

Поступила в редакцию/received: 10.03.2025; после рецензирования/revised: 12.03.2025;  
принята/accepted: 19.03.2025

УДК 621.791.92

## **АБРАЗИВНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ХРОМОНИКЕЛЕВОГО НАПЛАВЛЕННОГО ПОКРЫТИЯ**

М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук

Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е., 2025

Представлены результаты экспериментальных исследований абразивной износостойкости покрытий, сформированных плазменно-порошковой наплавкой на различных токах дуги. Использовался порошок хромоникелевого сплава марки Colmonoy 315-P2. Лабораторные испытания на изнашивание о закрепленный абразив выявили значительную неоднородность износостойкости исследуемых никелевых наплавов, что может свидетельствовать о неоднородных механических свойствах и структуре поверхностного слоя наплавленного материала. По величине износостойкости исследованные покрытия относятся к 6-му классу, что можно признать средним результатом.

*Ключевые слова:* плазменная порошковая наплавка, хромоникелевый сплав, абразивная износостойкость, твердость.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-34-41**

## ВВЕДЕНИЕ

Перспективным методом восстановления изношенных деталей узлов трения, а также упрочнения контактных поверхностей новых изделий является порошковая наплавка [1–3]. Для ее реализации используют различные материалы и технологии (лазерную, плазменную наплавку и некоторые другие). Большое внимание исследователей и практиков привлекают износостойкие материалы на основе никеля, в частности хромоникелевые сплавы системы NiCrBSi.

Суперсплавы на основе никеля уже нашли широкое практическое применение в атомной, нефтехимической, горнодобывающей, оборонной промышленности, сельскохозяйственном машиностроении и многих других отраслях. По результатам обширных научных исследований опубликовано множество научных статей, например [4–8]. Однако интерес к этим сплавам не снижается, что связано прежде всего с высокими технологическими, механическими, эксплуатационными свойствами сплавов системы NiCrBSi, потенциал которых раскрыт не полностью.

В статье [1] представлены результаты анализа структурного состояния покрытия состава NiCrBSi, полученного порошковой плазменной наплавкой. Цель настоящей работы – провести фрикционные испытания поверхностного слоя покрытия состава NiCrBSi, полученного порошковой плазменной наплавкой на различных режимах.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения экспериментальных исследований использовали образцы покрытий, полученных плазменной наплавкой порошка хромоникелевого сплава марки Colmonoy 315-P2 на подложку из алюминиевой бронзы марки БрА9Ц8Н15. Химический состав порошкового материала и материала подложки приведен в статье [1]. Там же описана технология нанесения покрытия и изготовления исследуемых образцов.

Многообразие процессов изнашивания отражается в наличии целого ряда отечественных и зарубежных стандартов, регламентирующих технические средства и методики испытаний на износостойкость [9]. Для целей данного исследования представляют интерес испытания на износостойкость в процессе непосредственного взаимодействия при трении контактирующих поверхностей. Поставленной в данной работе цели частично соответствует метод испытаний на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 17367-71), согласно которому исследуемый и эталонный образцы изнашивают о поверхность абразивной бумаги. Цилиндрический образец трется об абразивную поверхность торцевой поверхностью. Недостатком метода является малый диаметр цилиндрического образца – всего 2 мм. На такую поверхность трудно нанести исследуемое покрытие. В наибольшей степени цели настоящего исследования соответствует метод испытаний по стандарту ASTM G 133 "Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear" («Стандартный метод испытаний на износ при линейном возвратно-поступательном скольжении шара по плоскости»). В этом методе шаровой образец диаметром примерно 9,5 мм совершает возвратно-поступательное скольжение по плоскому образцу с частотой 10 Гц и амплитудой 5 мм. Общий путь трения 100 м.

Использованный в данной работе метод испытаний покрытия на износостойкость сочетает возможности двух описанных выше методов. В использованном нами методе испытание на изнашивание образцов наплавленного

покрытия проводили о закрепленные абразивные частицы по схеме «шар – плоскость». В качестве шарового контробразца использовали стальной сферический наконечник диаметром 1 мм с алмазным напылением, размер алмазного зерна составлял 40...50 мкм. К контакту прикладывали нагрузку  $N$  в 0,5 Н. Износостойкость определяли в процессе возвратно-поступательных движений шарового контробразца по плоской поверхности исследуемого образца с частотой 20 Гц и амплитудой 2,5 мм. Абразивному изнашиванию подвергались поверхности трех образцов, которые были получены при разных режимах наплавки, соответствующих силе тока 66, 83 и 94 А.

Износостойкость материала, полученного порошковой плазменной наплавкой, может значительно отличаться по ширине наплавки [10, 11], поэтому в наших экспериментах канавки изнашивания располагали: 1) в центральной части и 2) ближе к внешнему краю валика наплавленного материала.

В связи с тем, что износостойкость может отличаться по высоте плазменной порошковой наплавки (глубине от поверхностного слоя) [10, 11], образцы испытывали на износостойкость в течение 10 или 30 мин. Путь трения  $L_{тр}$  составил соответственно 100 и 350 м. Глубину канавки изнашивания  $h$  измеряли профилометром контактным модели 130. На рис. 1 представлена графическая зависимость линейного износа  $h$  от времени испытаний  $t$ . На участке 0...10 мин скорость изнашивания в 1,5 раза больше, чем на участке 10...30 мин, установившийся режим изнашивания не наблюдается.

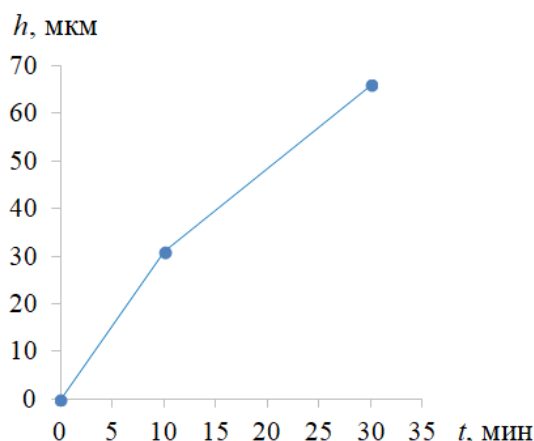


Рис. 1. Глубина канавки изнашивания образца, полученного при силе тока 66 А

После испытаний образцов проводили профилометрирование канавок изнашивания. По поперечным профилограммам (перпендикулярно направлению движения шарового контробразца) измеряли глубину канавки изнашивания. Затем рассчитывали линейную  $I_h$  и объемную  $I_V$  интенсивности изнашивания (ГОСТ 27674-88).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из важных триботехнических параметров материала является его твердость. На микромасштабном уровне (микротвердость) измерения проводили на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76. На макромасштабном уровне твердость

индентирования по ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) (макротвердость) измеряли на специально изготовленном твердомере с использованием конического индентора Роквелла при нагрузке 90 Н. Величины твердости со среднеквадратичным отклонением представлены на рис. 2.

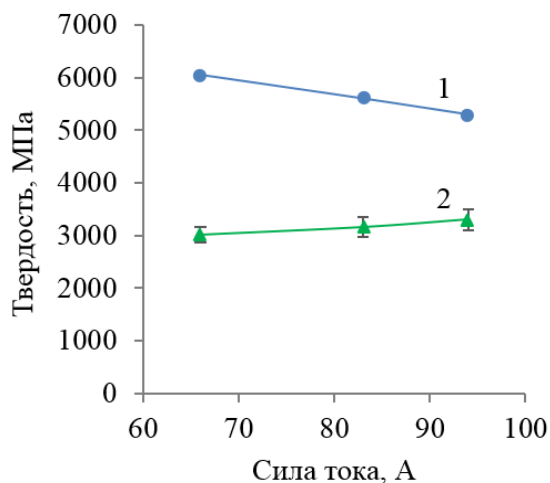


Рис. 2. Зависимость микротвердости (1) и макротвердости (2) исследованных наплавов от режима нанесения покрытия

Влияние твердости материала на его абразивную износостойкость отражено в известном уравнении Арчарда

$$I_V = K \frac{N}{H},$$

где  $I_V$  – объемная интенсивность изнашивания;

$K$  – коэффициент изнашивания;

$N$  – нормальная нагрузка на контакт;

$H$  – твердость.

Согласно уравнению Арчарда, износостойкость  $I$  материала (величина, обратная  $I_h$ ) возрастает с ростом его твердости, что подтверждено многочисленными экспериментами [12–14], хотя зависимость  $I_V(H)$  не обязательно строго обратно пропорциональная. Элемент случайности в зависимости  $I_V(H)$  связан с тем, что абразивная износостойкость, помимо чисто механических (прочностных) характеристик материала, к числу которых относится твердость, зависит также от его структуры [10, 11, 15].

Результаты испытаний на износостойкость приведены на рис. 3.

Анализ рис. 3(а), (б) (меньшее время испытаний) не позволяет выявить какую-либо однозначную зависимость интенсивности изнашивания от тока. Износостойкость в центральной части наплавленных валиков закономерно выше, максимум в 1,3 раза (интенсивность изнашивания ниже), это различие является незначительным.

Из рис. 3(в), (г) (большее время испытаний) видно, что интенсивность изнашивания в центральной и периферийной части наплавленных валиков может различаться в 2 раза, при этом характер соотношения величины износа в центре и на периферии части трех образцов неодинаков. Так, меньшая по величине интенсивность изнашивания в центральной части у образца, наплавленного при силе тока 66 А, в

периферийной – при 94 А. Интенсивность изнашивания образца, изготовленного при силе тока 83 А, в центре и на периферии одинакова как при 10-минутном испытании наплавки (рис. 3(а), (б)), так и при 30-минутном (рис. 3(в), (г)). Широкий диапазон значений  $I_h$  и  $I_V$  свидетельствует о неоднородных свойствах поверхностного слоя материала.

Однозначный характер влияния силы тока на интенсивность изнашивания на рис. 3(в) и (г) также не наблюдается. Повышение силы тока может приводить как к повышению износостойкости, так и к ее снижению. Аналогичные результаты получены в работе [16]. Поскольку микротвердость исследуемых образцов практически одинакова, изменение абразивной износостойкости может быть связано с ролью структурного фактора.

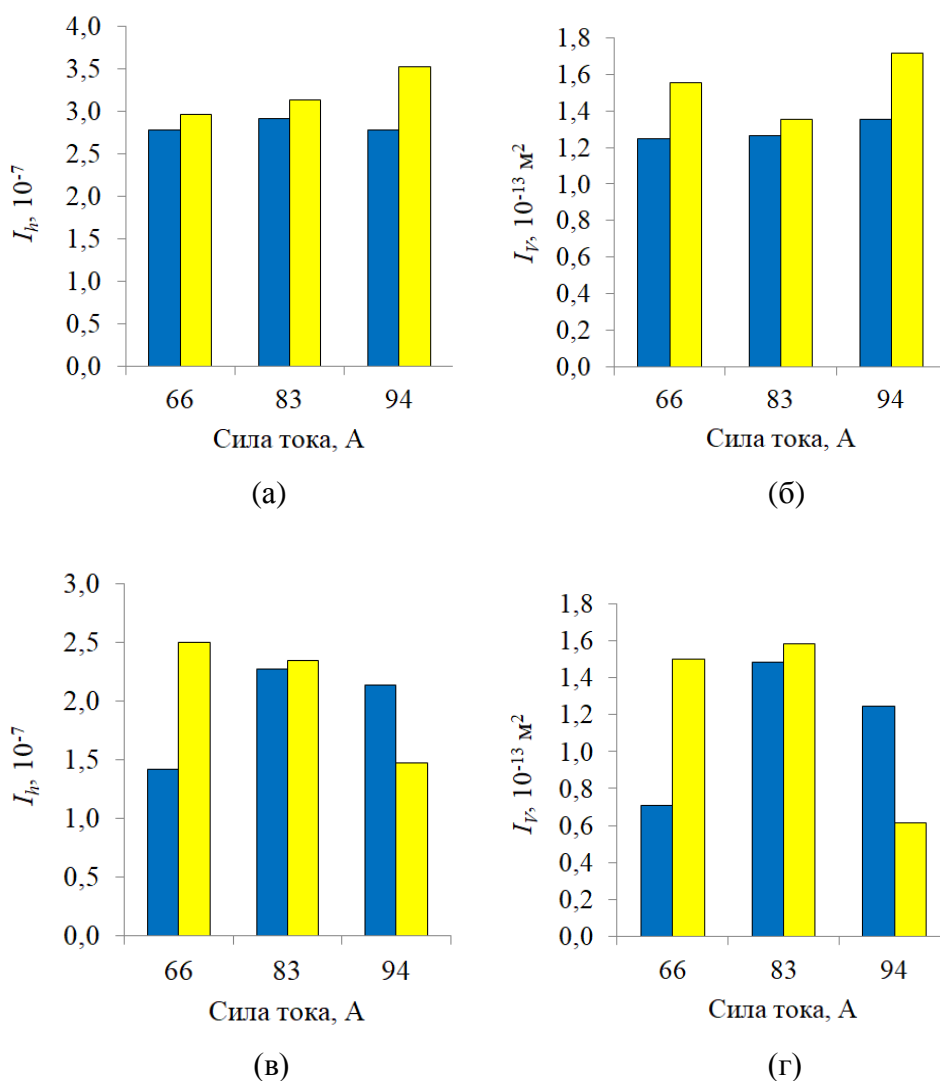


Рис. 3. Линейная и объемная интенсивность изнашивания исследуемых образцов: время испытаний 10 мин (а), (б); 30 мин (в), (г); ■ – в центральной части; ■ – в периферийной части

Сравнение усредненных значений интенсивности изнашивания  $\langle I_V \rangle$  в центральной и периферийной областях одной и той же поверхности представлены на рис. 4.

В таблице приведены усредненные величины коэффициента изнашивания  $K$  в уравнении Арчарда и значения износостойкости испытанных покрытий. Абразивная износостойкость исследованных образцов практически не зависит от силы тока (рис. 4), что коррелирует с практически отсутствующим влиянием силы тока на твердость наплавки (см. рис. 2).

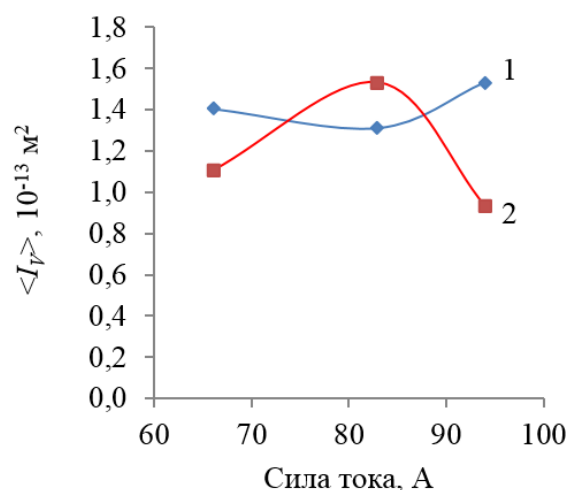


Рис. 4. Средние значения объемной интенсивности изнашивания исследуемых наплавов: 1 – время испытаний 10 мин; 2 – 30 мин

#### Характеристики изнашивания исследованных образцов

Сила тока, А	$K, 10^{-4}$		$I = 1 / I_h, 10^6$	
	10 мин	30 мин	10 мин	30 мин
66	8,5	6,8	3,5	5,1
83	8,2	9,7	3,3	4,3
94	10,1	6,2	3,2	5,5

Полученные экспериментально значения коэффициента изнашивания  $K$  исследуемых образцов сравнимы по порядку величины с известными значениями для упрочненных инструментальных сталей [17] и примерно на порядок меньше соответствующих значений для абразивного изнашивания сталей о закрепленный абразив [18].

По величине износостойкости все исследованные покрытия относятся к 6-му классу износостойкости из 13 существующих, что является средним показателем.

Для сравнения, характеристики износостойкости аналогичного по составу покрытия, полученного с помощью лазерных технологий, на порядок выше:

- линейная интенсивность изнашивания  $I_h$  порядка  $10^{-8}$ ;
- объемная интенсивность изнашивания  $I_v$  порядка  $10^{-14} \text{ м}^2$ ;
- износостойкость соответствует 7–8-му классу [19].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторные испытания на абразивное изнашивание выявили значительную неоднородность износостойкости исследуемых хромоникелевых покрытий. Величина интенсивности изнашивания значительно отличается по ширине и глубине наплавов, полученных при силе тока 66 и 93 А. Наплавка, сформированная при силе тока 83 А, характеризуется более однородными характеристиками изнашивания. При данных режимах изготовления не выявлено зависимости между интенсивностью изнашивания и твердостью наплавки. Исследование влияния структурного фактора на износостойкость является целью дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е. Порошковая плазменная наплавка износостойкого покрытия // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2024. № 17. С. 89–95.
2. Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка износостойкого композиционного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 21–26.
3. Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А. Порошковая лазерная наплавка быстрорежущей стали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 29–35.
4. Savrai R.A., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L. The structural characteristics and contact loading behavior of gas powder laser clad CoNiCrW coating // *Optics & Laser Technology*. 2020. V. 126. P. 106079.
5. Афанасьева Л.Е., Раткевич Г.В., Новоселова М.В. Роль структурного фактора в повышении износостойкости Ni – Cr – B – Si покрытия после лазерной обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2019. № 9. С. 55–60.
6. Balaguru S., Gupta M. Hardfacing studies of Ni alloys: A critical review // *Journal of materials research and technology*. 2021. V. 10. P. 1210–1242.
7. Singh V.P., Kumar D., Mahesh V., Harursampath D., Kuriachen B. Role of interfacial shear strength in nanotribological behaviour of PTA deposited Colmonoy 6 coating on SS304 steel // *Materials Letters*. 2023. V. 353. P. 135287.
8. Wu Z., Wang B., Jin D., Xie M., Lui X., Lu S. Effect of Co-Ni-Cr-W and Ni-Cr-B-Si Alloy Coatings Upon the Hot Corrosion-fatigue Resistance of Several Heat-Resisting Steels // *Journal of Chinese Society for Corrosion and protection*. 2009. V. 1. № 4. P. 60–67.
9. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.
10. Паркин А.А., Жаткин С.С., Минаков Е.А. Влияние структуры и свойств на износ покрытия Micro Melt NT-60 после плазменной порошковой наплавки // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 847–852.
11. Минаков Е.А., Жаткин С.С., Паркин А.А., Фураев О.С., Климов В.Г. Влияние режимов плазменной наплавки, структурных факторов и свойств на износостойкость наплавленного порошкового материала Stellite 190W // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 818–823.

12. Хрущев М.М. Закономерности абразивного изнашивания // Хрущев М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120-летию со дня рождения). М.: КРАСАНД, 2012. С. 45–77.
13. Дроздов Ю.Н. Прогнозирование изнашивания с учетом механических, физико-химических и геометрических факторов // Современная трибология: итоги и перспективы / отв. ред. К.В. Фролов. М.: ЛКИ, 2014. С. 24–32.
14. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2021. 236 с.
15. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю. Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 4. С. 311–318.
16. Нефедьев С.П., Дема Р.Р., Котенко Д.А. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твердых наплавленных покрытий // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия»*. 2015. Т. 15. № 1. С. 103–106.
17. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. 560 с.
18. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.
19. Раткевич Г.В. Повышение износостойкости поверхностей трения модифицированием структуры сплавов лазерным излучением: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2021. 137 с.

**Для цитирования:** Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Абразивная износостойкость хромоникелевого наплавленного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 3 (27). С. 34–41.

## **ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF CHROMIUM-NICKEL DEPOSITED COATING**

M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc., L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

The article presents the results of experimental studies of abrasive wear resistance of coatings formed by plasma-powder surfacing at different arc currents. The powder of chromium-nickel alloy of the Colmonoy 315-P2 brand was used. Laboratory tests for wear on fixed abrasive revealed significant heterogeneity of wear resistance of the studied nickel surfacings, which may indicate non-uniform mechanical properties and structure of the surface layer of the deposited material. In terms of wear resistance, the studied coatings belong to class 6, which can be considered an average result.

**Keywords:** plasma powder welding, chromium-nickel alloy, abrasive wear resistance, hardness.

Поступила в редакцию/received: 22.02.2025; после рецензирования/revised: 12.03.2025;  
принята/accepted: 19.03.2025