

## **ОБ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ**

© Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е.,  
Новоселова М.В., 2024

*Аннотация.* Представлены результаты экспериментальных исследований абразивной износостойкости образцов нержавеющей стали, полученных по технологии селективного лазерного плавления. Показано, что в плоскости слоя интенсивность изнашивания заметно ниже, чем в поперечном сечении.

*Ключевые слова:* износостойкость, микротвердость, нержавеющая сталь, селективное лазерное плавление.

### **ABOUT THE ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF STAINLESS-STEEL SAMPLES PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING**

*Abstract.* The results of experimental studies of the abrasive wear resistance of stainless-steel samples obtained using selective laser melting technology are presented. It is shown that in the plane of the layer the wear rate is noticeably lower than in the cross section.

*Keywords:* wear resistance, microhardness, stainless steel, selective laser melting.

В настоящее время наблюдается большой практический и научный интерес к аддитивным порошковым технологиям [1–5]. Совмещение CAD- и RP-технологий (CAD – сокращение от Computer Aid Design, RP – от Rapid Prototyping) позволяет эффективно преобразовывать компьютерные модели в готовый продукт, что крайне выгодно в экономическом плане для изготовления изделий сложной геометрической формы. Селективное лазерное плавление (СЛП) является одним из вариантов таких технологий, при котором изделия или материалы производятся путем наращивания слоев из порошка, расплавляемого лазерным лучом. Физические явления, происходящие в процессе аддитивного производства металлических изделий, включают процессы плавления, тепло- и массопереноса, затвердевания в неравновесных условиях и некоторые другие. Для получения материала с высоким комплексом механических характеристик необходимо проведение большого количества экспериментов с целью определения оптимальных режимов его изготовления.

В данной статье описываются сравнительные испытания на абразивную износостойкость образцов из нержавеющей стали, полученных с помощью СЛП.

**Исследуемый материал и режим СЛП.** Для получения опытных образцов использовали порошок марки CL20ES, по химическому составу близкий к нержавеющей хромоникельмолибденовой стали аустенитного класса 03X17H14M3 (см. ГОСТ 5632-2014) и стали AISI 316L. Средний размер частиц порошка составляет около 30 мкм.

Опытный образец был получен по технологии СЛП с использованием системы аддитивного производства деталей из металлов M2-cusing компании Concept Laser. Система оснащена Yb:YAG-оптоволоконным лазером с диодной накачкой, мощностью 400 Вт, длиной волны 1 070 нм. Технологические параметры синтеза исследуемого материала представлены в табл. 1 и соответствуют условиям для формирования плотной беспористой структуры с высокой твердостью [3]. За нулевую отметку положения фокальной точки лазерного излучения принимали верхний уровень насыпанного порошка. При этом диаметр пятна в фокусе составлял 50 мкм. Отрицательное значение положения фокальной точки соответствует сканированию слоя порошка сходящимся пучком.

Таблица 1. Технологические параметры СЛП

Мощность, Вт	Скорость сканирования, мм/с	Положение фокальной точки, мм	Шаг штриховки, мкм	Удельная энергия $E$ , Дж/мм <sup>3</sup>
200	800	-2	100	25

Для снижения уровня внутренних напряжений в образцах применяли рекомендованную фирмой Concept Laser стратегию сканирования: поверхность сканирования разделяли на квадраты размером 5 × 5 мм, затем в каждом квадрате в случайном порядке переплавляли слой порошка лазерным пучком с девяностоградусным вращением направления сканирования в соседних квадратах и с 1 мм сдвига между слоями.

Одним из основных технологических параметров СЛП, позволяющих сравнивать результаты, полученные на различных видах оборудования с отличающимися рабочими параметрами, является удельная энергия [6–8]. Для режима изготовления исследуемого образца величину удельной энергии  $E$  (см. табл. 1), обобщающей основные параметры лазерной обработки, рассчитывали по формуле  $E = \frac{P}{v \cdot l \cdot h}$ , где  $P$  – мощность лазерного излучения;  $v$  – скорость сканирования;  $l$  – расстояние между дорожками (шаг штриховки);  $h$  – высота слоя.

**Твердость.** В качестве характеристики механических свойств исследуемого материала использовали стандартные величины: твердость по Виккерсу  $HV$  (см. ГОСТ 2999-75) и твердость индентирования  $H_{IT}$  (см. ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002), которую иногда называют твердостью по Мейеру. Величину твердостей  $HV$  и  $H_{IT}$  оценивали по

общей формуле  $H = \frac{F}{A}$ , где  $F$  – нагрузка на индентор;  $A$  – площадь боковой поверхности внедренной части алмазной пирамиды для  $HV$ , или площадь поперечного сечения контактной поверхности между конусом и образцом для  $H_{IT}$ .

Величина твердости  $H_{IT}$ , помимо характеристики непосредственно механических свойств материала, применяется в трибологии в качестве характеристики износостойкости материала, например в известном уравнении Хольма – Арчарда  $I_v = k \frac{N}{H_{IT}}$ , где  $I_v$  – объемная интенсивность изнашивания;  $N$  – нормальная нагрузка на пару трения;  $H_{IT}$  – твердость более мягкого материала пары трения;  $k$  – эмпирический коэффициент [9]. Здесь твердость выступает как среднее значение фактического давления в контакте индентора и образца.

Анализ результатов измерения твердости  $HV$  (табл. 2) показал, что в образце наблюдается анизотропия свойств. В плоскости слоя микротвердость на 25 % выше, чем в поперечном сечении. Величины твердости индентирования  $H_{IT}$  в плоскости слоя и в поперечном сечении не отличаются.

Таблица 2. Характеристики при измерении твердости, МПа, образца

Индентор	Нагрузка, кг	Глубина индентирования, мкм	Твердость в плоскости слоя	Твердость в поперечном сечении
Пирамида	0,1	3,4–3,8	3 300	2 600
Конус	0,5	15	2 548	2 548
	2	56		

**Абразивная износостойкость.** Испытание на изнашивание образца проводили о закрепленный абразив по схеме *шар – плоскость*. В качестве контробразца использовали стальной сферический наконечник диаметром 1 мм с алмазным напылением, размер алмазного зерна составлял 40–50 мкм. К контакту прикладывали нагрузку  $N = 0,5$  Н. Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контробразца осуществлялись электромеханическим приводом с питанием от генератора импульсов с частотой 20 Гц. Каждый образец подвергался испытанию в течение 60 мин. Путь трения составлял 720–835 м.

Абразивному изнашиванию подвергались две поверхности образца: в плоскости слоя и в поперечном сечении образца. На каждой поверхности были получены канавки износа в трех различных относительно друг друга направлениях (в двух взаимно перпендикулярных направлениях и под углом 45° (рис. 1)). Далее рассчитывали характеристики изнашивания образца: линейную интенсивность изнашивания  $I_h$  (см. ГОСТ 27674-88);

объемную интенсивность изнашивания  $I_V$  (см. ГОСТ 27674-88); линейный износ за цикл  $i_h$ ; скорость изнашивания  $u$ ; коэффициент изнашивания  $k$ .

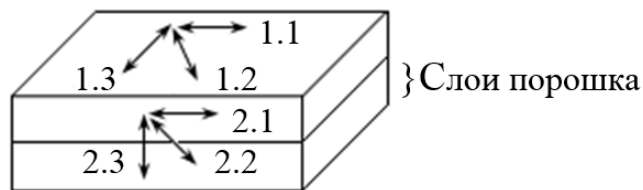


Рис. 1. Схема расположения канавок изнашивания: направления 1.1, 1.2, 1.3 – в плоскости слоя; 2.1, 2.2, 2.3 – в поперечном сечении

Расчеты характеристик производились по среднему значению глубины канавки  $\langle h \rangle$ . Для определения  $\langle h \rangle$  на участке канавки длиной 4–5 мм было записано несколько поперечных профилограмм, по которым находили ширину и глубину канавки. Распределение глубины канавки по относительной координате  $r/x$  вдоль направления канавки (аналогично продольной профилограмме) изображено на рис. 2.

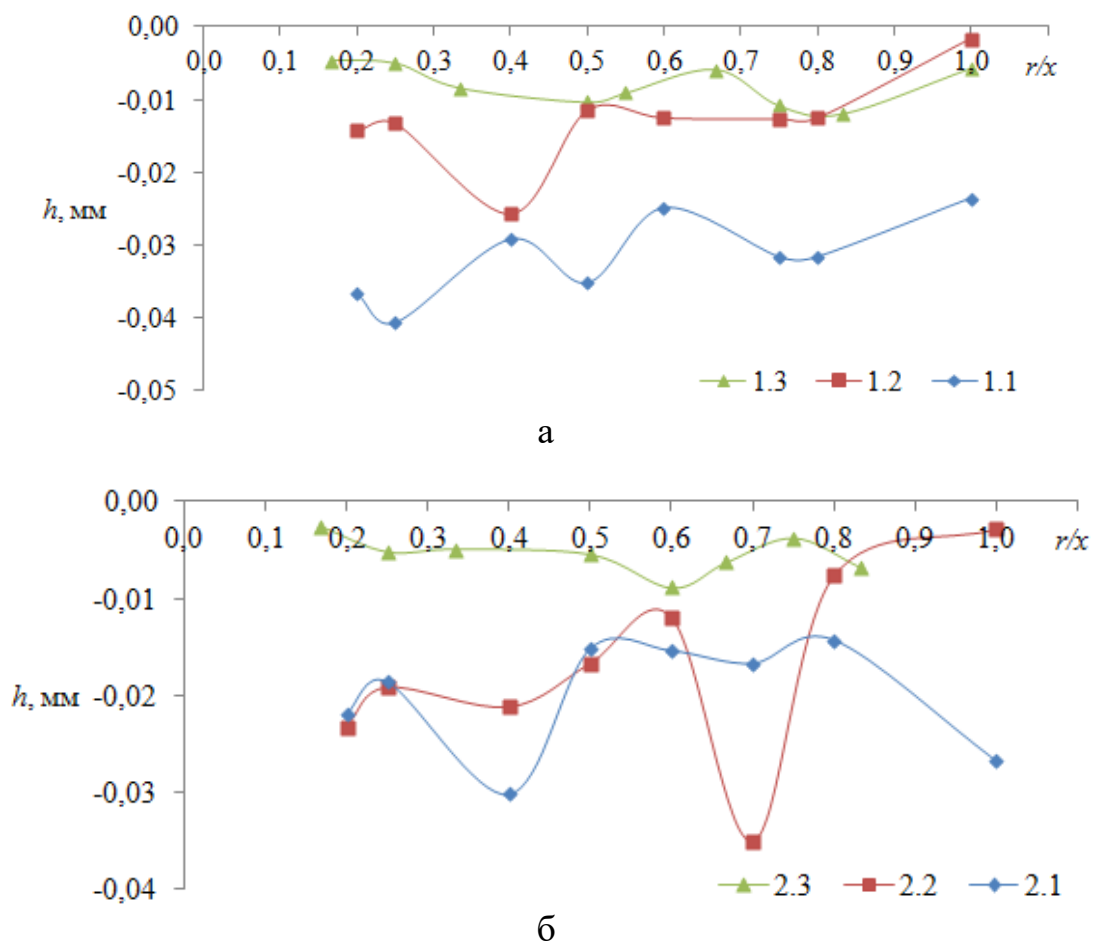


Рис. 2. Величина глубины канавок изнашивания вдоль канавки изнашивания: а – в плоскости слоя; б – поперечном сечении

На исследуемом образце наблюдается значительная неоднородность рельефа дна канавки. Максимальный перепад глубины одной из канавок в плоскости слоя составляет около 10 мкм, в поперечном сечении – до 25 мкм. Величины линейного износа в плоскости слоя и в поперечном сечении образца лежат примерно в интервале 10–40 мкм, соизмеримым с интервалом глубины индентирования конусом (см. табл. 2). В табл. 3 представлены результаты испытаний на абразивное изнашивание исследуемого образца.

Таблица 3. Характеристики изнашивания образца

Параметр	Номер канавки					
	в плоскости слоя			в поперечном сечении		
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
$I_h, 10^{-8}$	3,86	1,81	1,11	2,38	2,13	0,74
$I_v, 10^{-14} \text{ м}^2$	9,52	2,62	1,71	4,12	5,59	1,20
$i_h, 10^{-7} \text{ мм/цикл}$	4,40	1,81	1,11	2,76	2,39	0,76
$u, \text{ мм}^3/\text{ч}$	0,078	0,019	0,012	0,034	0,045	0,009
$k, 10^{-4}$	4,85	1,34	0,87	2,10	2,85	0,61

При абразивном изнашивании во время циклического движения индентора (абразивного зерна) по поверхности изнашиваемого материала наблюдаются процессы микрорезания, пластического и упругого оттеснения. Согласно литературным данным [10], при микрорезании линейная интенсивность изнашивания  $I_h$  составляет  $1-10^{-4}$ , при пластическом оттеснении –  $10^{-4}-10^{-9}$ , при упругом – меньше  $10^{-9}$ . Анализ данных табл. 3 выявил наличие анизотропии износостойкости в исследуемом образце.

Полученные экспериментально значения коэффициента изнашивания  $k$  образцов сравнимы по порядку величины с известными значениями для упрочненных инструментальных сталей [11] и примерно на порядок меньше соответствующих значений для абразивного изнашивания сталей о закрепленный абразив [12]. Возможно, различие связано с размером абразивного зерна, он в наших экспериментах был как минимум в 1,5–2 раза меньше, чем в экспериментах, на результаты которых ссылается автор работы [12].

**Заключение.** Во время лабораторных испытаний действие абразивного зерна или продуктов изнашивания можно условно разделить на две стадии: внедрение на определенную глубину и процарапывание, от которого в основном зависит изнашивание материала. Первая стадия характеризуется твердостью материала, в то время как вторая обуславливается его структурой, то есть абразивная износостойкость является структурно-чувствительной характеристикой [9]. Таким образом, интенсивность абразивного изнашивания зависит не только от твердости материала, но и от других факторов: структуры, пластичности,

напряженного состояния поверхностных слоев. Испытания на изнашивание выявили значительную неоднородность износостойкости образца. Интенсивность изнашивания в плоскости слоя заметно ниже, чем в поперечном сечении.

Обнаруженную анизотропию свойств образцов нержавеющей стали, полученных по технологии СЛП, необходимо учитывать при изготовлении изделий.

### Библиографический список

1. Селиверстов С.Д., Николаев И.А., Быценко О.А. Трибологические исследования деталей авиационных двигателей, полученных методом селективного лазерного сплавления // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2021. Т. 25. № 3 (93). С. 64–71.

2. Сметкин А.А., Оглезнева С.А., Калинин К.В., Ханипов Э.Ф. Структура и свойства коррозионно-стойкой стали, полученной селективным лазерным плавлением // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2019. № 1. С. 91–97.

3. Селективное лазерное плавление коррозионно-стойкой стали / Г.В. Раткевич [и др.] // Технология металлов. 2018. № 8. С. 31–35.

4. Неоднородность износостойкости аустенитной коррозионно-стойкой стали, полученной селективным лазерным плавлением / Л.Е. Афанасьева [и др.] // Черные металлы. 2023. № 6. С. 41–46.

5. Абразивная износостойкость сплава Ti6Al4V, полученного по технологии селективного электронно-лучевого плавления / Л.Е. Афанасьева [и др.] // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2019. № 1 (1). С. 26–35.

6. Исследование влияния режимов выращивания методом селективного лазерного плавления на пористость в изделиях из медных сплавов / Д.С. Колчанов [и др.] // Фотоника. 2019. Т. 13. № 2. С. 160–171.

7. Влияние параметров селективного лазерного сплавления на образование пористости в синтезированном материале коррозионно-стойкой стали / Д.И. Сухов [и др.] // Труды ВИАМ. 2017. № 8 (56). С. 34–44.

8. Особенности процесса селективного лазерного плавления из конструкционной стали 28Х3СНМВФА / Д.С. Колчанов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 10. С. 79–88.

9. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.

10. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

11. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 560 с.

12. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с

УДК 621.7

К.А. Сахаров, Л.Е. Афанасьева  
Тверской государственный технический университет

## ПОРОШКОВАЯ ПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ

© Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е., 2024

*Аннотация.* Представлены результаты экспериментальных исследований микроструктуры и микротвердости износостойкого покрытия, полученного плазменно-порошковой наплавкой (использовали порошок марки Colmonoy 315-P2 на основе никеля). Показано, что линия сплавления имеет однородное строение. Сформировано прочное металлургическое сплавление между наплавкой и основой. (микротвердость наплавленного металла  $5\ 300 \pm 60$  МПа).

*Ключевые слова:* износостойкое покрытие, плазменно-порошковая наплавка, система NiCrBSi, алюминиевая бронза, микроструктура, микротвердость.

### PLASMA POWDER CLADDING OF WEAR-RESISTANT COATING

*Abstract.* The results of experimental studies of the microstructure and microhardness of a wear-resistant coating obtained by plasma-powder cladding are presented (nickel-based Colmonoy 315-P2 powder was used). It is shown that the fusion line has a homogeneous structure. A strong metallurgical fusion is formed between the surfacing and the base (microhardness of the deposited metal is  $5\ 300 \pm 60$  MPa).

*Keywords:* wear-resistant coating, plasma-powder cladding, NiCrBSi system, aluminum bronze, microstructure, microhardness.

Для повышения срока службы новых деталей и ремонта изношенных часто используют порошковую наплавку. Она применяется в атомной, нефтехимической, горнодобывающей, оборонной промышленности, сельскохозяйственном машиностроении и многих других отраслях. В качестве присадочных материалов выбирают в основном порошки на основе никеля, кобальта, железа [1–4]. Сплавы на основе никеля имеют важное преимущество – способность сохранять твердость при повышенных температурах. Представителем таких сплавов являются порошковые присадочные материалы системы NiCrBSi.