

3. Пилюшина Г.А., Памфилов Е.А., Шевелева Е.В. Подшипники скольжения из армированных композиционных материалов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 6 (79). С. 56–64.

4. Подшипник скольжения: пат. 108519 Рос. Федерация. № 2011113560/11 / Памфилов Е.А., Лукаш А.А., Прусс Б.Н., Пилюшина Г.А.; заявл. 07.04.2011; опубл. 20.09.2011. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU108519U1_20110920 (дата обращения: 13.01.2024).

5. Пилюшина Г.А., Памфилов Е.А. Металлополимерные композиционные материалы для узлов трения технологических машин // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2020. № 31. С. 41–44.

6. ГОСТ 613-79. Бронзы оловянные литейные. Марки Tin foundry bronzes. Grades [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200009191> (дата обращения: 23.12.2023).

УДК 531.43

Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А., Измайлов В.В., Новоселова М.В.
Тверской государственный технический университет

МИКРОАБРАЗИВНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВА ТИТАНА, ПОЛУЧЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ СЭЛП

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

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований абразивной износостойкости образцов сплава титана, полученных по технологии селективного электронно-лучевого плавления. Показано, что в плоскости слоя и в поперечном сечении интенсивность изнашивания приблизительно одинакова (анизотропия износостойкости не выявлена).

Ключевые слова: износостойкость, микротвердость, сплав титана, селективное электронно-лучевое плавление.

MICROABRASIVE TESTS FOR WEAR RESISTANCE OF TITANIUM ALLOY OBTAINED USING EBM TECHNOLOGY

Abstract. The results of experimental studies of the abrasive wear resistance of titanium alloy samples obtained using selective electron beam melting technology are presented. It is shown that in the plane of the layer and in the cross section the wear rate is approximately the same (anisotropy of wear resistance has not been revealed).

Keywords: wear resistance, microhardness, titanium alloy, selective electron beam melting.

Технология селективного электронно-лучевого плавления (СЭЛП), основанная на избирательном плавлении слоя порошка в вакууме электронным лучом, получила широкое распространение в мире при производстве малыми сериями деталей сложной геометрической формы. В частности, применение аддитивных технологий при изготовлении изделий из сплавов титана дает возможность значительно сокращать время и стоимость выпуска продукции [1–3]. В настоящее время технология СЭЛП успешно используется в аэрокосмической и автомобильной промышленности, биомедицинской инженерии и ряде других отраслей.

Многие исследователи отмечают, что при послойном синтезе часто формируется микроструктура со столбчатой морфологией. Направление роста зерна совпадает с направлением синтеза детали, происходит рост новых зерен на зернах предыдущего слоя, формируется столбчатая микроструктура [2–4]. Направленность микроструктуры может вызывать анизотропию свойств.

Цель данной работы – исследование анизотропии износостойкости образца титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного по технологии СЭЛП, в процессе изнашивания о закреплённый абразив.

Методика изготовления образцов. Для послойного электронно-лучевого синтеза опытных образцов использовали порошок сплава Ti-6Al-4V, изготовленный методом газоструйного распыления расплава, произведенного фирмой Arcam (Швеция). В табл. 1 представлен химический состав используемого порошка (аналога титанового сплава марки BT6 ГОСТ 19807-91).

Таблица 1. Химический состав порошка сплава Ti-6Al-4V (мас. %)

Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
6,03	4,0	0,03	0,1	0,15	0,01	0,003	ост.

По технологии СЭЛП на установке Arcam A2 изготовлены опытные образцы размером 70 × 20 × 15 мм. На подложку с помощью плоского ножа наносили и равномерно выравнивали по всей площади слой порошка толщиной ~100 мкм. Обработку электронным лучом проводили в два приёма. Сначала выполняли предварительный подогрев слоя порошка; при этом происходило частичное спекание, что необходимо для удержания частиц во время действия электромагнитных сил при повторной обработке. Затем слой порошка расплавляли по заданному сечению при скорости сканирования электронного луча ~4,5 м/с и токе ~15 мА. Далее платформа опускалась на высоту наплавленного слоя, засыпался новый слой порошка, процесс повторялся [5, 6]. Первые десять слоев селективно спекались и плавилась для формирования специального каркаса в виде сетки с размером ячеек 6 × 6 мм для облегчения последующего демонтажа изделия. Следующие слои порошка спекали и плавилась равномерно по всей

площади сечения для создания монолитного образца. Синтез происходил в вакуумной камере при давлении остаточных газов $\sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Методика проведения испытаний на износостойкость. Испытания на износостойкость проводили о закрепленный абразив по схеме трения *шар – плоскость*. В качестве контробразца использовали стальной сферический наконечник с диаметром 1 мм, с алмазным напылением, размером алмазного зерна 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. Скорость движения контробразца составляла порядка 0,2 м/с. Время испытаний $t = 40$ мин. Путь трения $L_{тр} = 400$ м.

Абразивному изнашиванию подвергались две поверхности образца (рис. 1). Поверхность трения № 1 (верхняя) параллельна плоскостям слоев синтезируемого материала, поверхность трения № 2 (боковая) перпендикулярна плоскостям слоев и совпадает с направлением синтеза. В свою очередь, на поверхности трения № 2 были получены канавки износа в двух взаимно перпендикулярных направлениях (вдоль слоя и перпендикулярно слоям). После испытаний проводили профилометрирование канавок износа в направлении, перпендикулярном движению контробразца. На длине канавки было записано несколько поперечных профилограмм, по которым определяли средние значения ширины и глубины канавки. 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 .

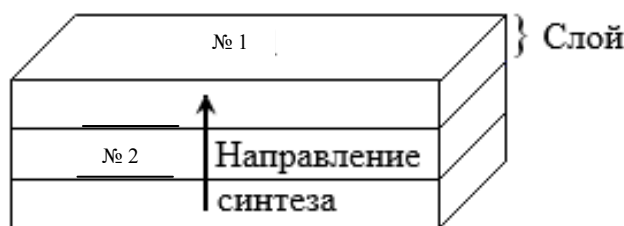


Рис. 1. Схематичный вид образца

Исследование скорости изнашивания. Исследование временной зависимости линейного износа титанового сплава (скорости изнашивания) проводилось с целью установления продолжительности испытаний, от которой зависит достоверность оценки таких характеристик изнашивания, как скорость и интенсивность изнашивания.

Согласно ГОСТ 27674-88, линейная интенсивность изнашивания определяется по формуле $I_h = \frac{h}{L}$, где h – линейный износ; L – путь трения.

При этом считается, что скорость изнашивания не зависит от пути трения (или от времени испытаний, что при постоянной скорости скольжения трущихся тел одно и то же). Однако при испытаниях на изнашивание о закрепленный абразив наблюдается такое явление, как «засаливание» основы, в которой закреплены абразивные частицы. Заключается это явление в том, что частицы изнашиваемого материала заполняют пространство между абразивными частицами, вследствие чего скорость изнашивания существенно снижается (иногда вплоть до нулевого значения).

Была проведена серия испытаний различной длительности. По завершении испытания при помощи профилометра измеряли глубину канавки изнашивания h и рассчитывали скорость и интенсивность изнашивания. Результаты представлены на рис. 2.

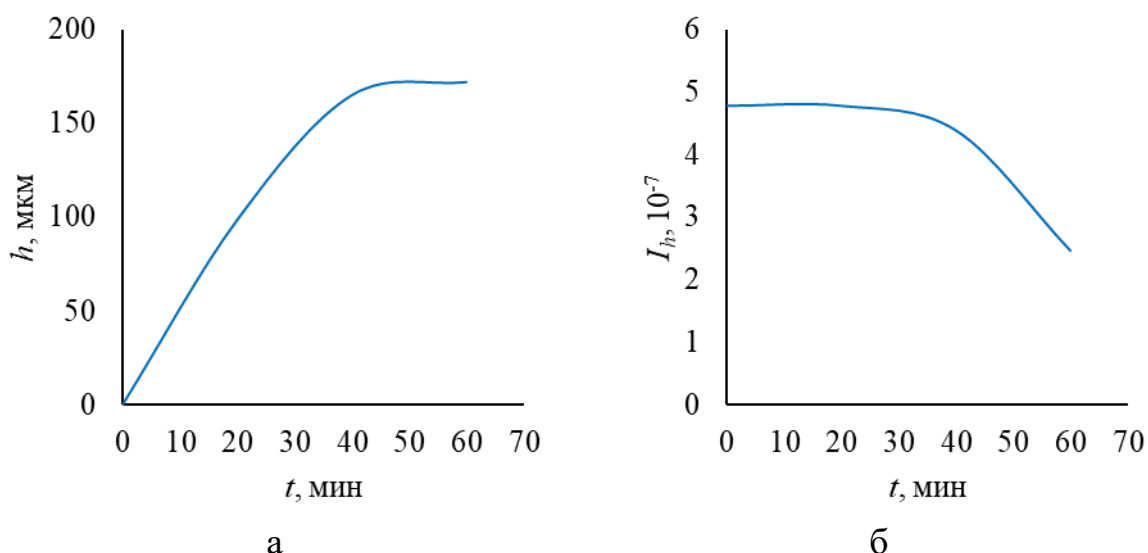


Рис. 2. Зависимость характеристик изнашивания от времени:
а – линейный износ; б – линейная интенсивность изнашивания

Из анализа рис. 2 следует, что на графиках $h(t)$ и $I_h(t)$ можно выделить два интервала времени с различными характерами зависимостей. Первые 40 мин испытаний наблюдался линейный рост глубины канавки износа h , затем эта линейность нарушилась. Соответственно, интенсивность изнашивания I_h (и скорость изнашивания) на линейном участке зависимости $h(t)$ постоянна, затем фиксировалось ее снижение. Таким образом, установившееся изнашивание длится около 40 мин. Это время целесообразно принять в качестве длительности испытаний.

Механизм изнашивания. В общем случае в процессе абразивного изнашивания частицы абразива оказывают воздействие на изнашиваемую поверхность либо пластическим оттеснением материала (пропахиванием), либо микрорезанием (отделением стружки). В первом случае отделение

материала не происходит и износ выражается в образовании канавки с оттеснением материала в стороны. При микрорезании материал удаляется с поверхности изнашиваемой детали. На рис. 3 представлен типичный вид профилограммы канавки изнашивания титанового сплава.

На рис. 3 видно, что гребни выдавленного материала по сторонам канавки износа отсутствуют, то есть в процессе изнашивания происходит микрорезание материала изнашиваемой поверхности.

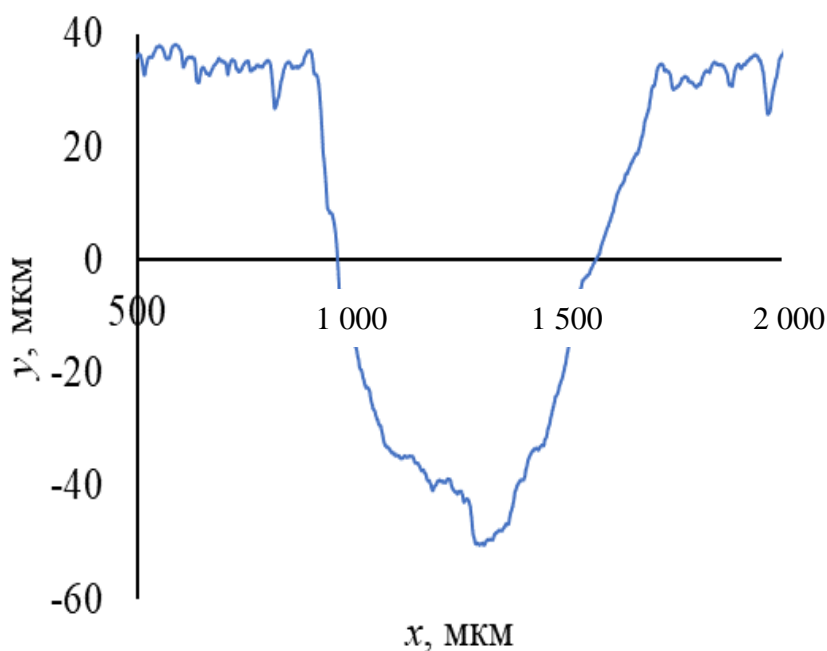


Рис. 3. Пример поперечной профилограммы канавки изнашивания

Результаты испытаний. Рельеф канавки износа на исследованных поверхностях трения образца однородный (рис. 4). Величина линейного износа в направлении синтеза в двух взаимно перпендикулярных направлениях практически одинакова (см. кривые 2 и 3 на рис. 4). В абсолютных величинах линейный износ составляет 140–180 мкм, что превышает размер алмазного зерна контртела практически в 3 раза. Другие фрикционные характеристики исследуемого образца представлены в табл. 2.

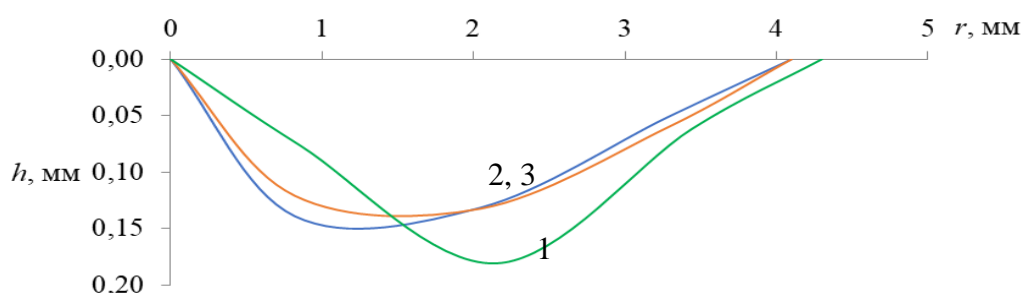


Рис. 4. Типичный профиль канавки износа в направлении движения контробразца:
1 – поверхность № 1; 2 и 3 – поверхность № 2

Таблица 2. Характеристики абразивного изнашивания образца

Параметр	Номер поверхности		
	1	2	
	Вдоль слоя	В направлении синтеза	Вдоль слоя
$I_h, 10^{-7}$	2,58	2,73	2,66
$I_V, 10^{-13} \text{ м}^2$	6,29	5,47	5,36
$i_h, 10^{-6} \text{ мм/цикл}$	2,22	2,24	2,18
$u, \text{ мм}^3/\text{ч}$	0,39	0,32	0,32

Анализ данных табл. 2 показал, что характеристики износостойкости в плоскости слоя и в направлении синтеза близки. Столбчатость микроструктуры не вызывает анизотропию износостойкости.

Сплав состава Ti-6Al-4V относится к двухфазным ($\alpha+\beta$)-сплавам [7]. На формирование его структуры и свойств решающее влияние оказывают фазовые превращения, связанные с полиморфизмом титана. Исходная β -фаза при первичной кристаллизации имеет столбчатую морфологию. Направление роста зерна совпадает с направлением синтеза детали. При температуре полиморфного превращения $995 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ [1] в сплаве происходит вторичная кристаллизация с образованием неравновесной α' -фазы. Перекристаллизация сплава в твердом состоянии приводит к измельчению микроструктуры и формированию более однородных свойств, не зависящих от направления.

Вывод. Метод СЭЛП позволяет изготавливать изделия из сплава состава Ti-6Al-4V, поверхности которых обладают практически одинаковой износостойкостью как в плоскости слоев, так и в направлении синтеза.

Библиографический список

1. Safdar A., Wei L.-Y., Snis A., Lai Z. Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti-6Al-4V // Materials characterization. 2012. V. 65. P. 8–15.
2. The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V / S.S. Al-Bermani [et al.] // Metallurgical and materials transactions A. 2010. V. 41. P. 3422–3434.
3. Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting / S.M. Gaytan [et al.] // Materials Technology. 2009. V. 24. P. 181–190.
4. Афанасьева Л.Е. Закономерности формирования структуры сплава Ti-6Al-4V при послойном электронно-лучевом плавлении и горячем изостатическом прессовании // Вопросы материаловедения. 2017. № 3 (91). С. 27–34.

5. Измайлов В.В., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Микрогеометрия поверхностного слоя изделия из сплава титана, синтезированного электронным лучом // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2021. № 10. С. 461–465.

6. 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.

7. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.

УДК 621.892

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.И. Болотов
Тверской государственный технический университет

ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛИ ПРИ ЕЕ ИЗНАШИВАНИИ АЛМАЗНЫМ АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

© Болотов А.Н., Новиков В.В.,
Новикова О.О., Болотов М.И., 2024

Аннотация. Указано, что высокая объемная режущая способность керамического алмазного инструмента вызывает сложность в фиксации необходимых геометрических размеров изделия. Получены соотношения, описывающие изменение геометрических параметров обрабатываемых керамических деталей на микро- и макроуровне при абразивном алмазном изнашивании. Сделан вывод, что проведенные испытания подтвердили высокие триботехнические характеристики алмазосодержащего минералокерамического инструмента и правомерность предложенной модели.

Ключевые слова: алмазный инструмент, абразивный материал, объем, изнашиваемый материал, микротопография, поверхность, шероховатость, износ.

CHANGE IN THE GEOMETRIC PARAMETERS OF A PART WHEN IT WEARS WITH A DIAMOND ABRASIVE TOOL

Abstract. The high volumetric cutting capacity of ceramic diamond tools makes it difficult to fix the required geometric dimensions of the product. Relationships were obtained that describe the change in the geometric parameters of processed ceramic parts at the micro- and macro-level during abrasive diamond wear. The tests carried out confirmed the high tribological characteristics of diamond-containing mineral-ceramic tools and the validity of the proposed model.

Keywords: diamond tools, abrasive material, volume, wear material, microtopography, surface, roughness, wear.