

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Столяров

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

101990, Россия, Москва, Малый Харитоньевский пер., 4

vlstol@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.840

Аннотация: Статья посвящена обзору структурных факторов, влияющих на трибологическое поведение без смазки наноструктурных металлов и сплавов. Научное значение данной темы связано с пониманием механизмов износа и возможностью его прогнозирования при длительной эксплуатации. Особое внимание сфокусировано на влиянии размера зерен в интервале 0,01-10 мкм, как одного из наиболее важных структурных параметров. Сделан акцент на ультрамелкозернистые материалы, полученные интенсивной пластической деформации, и нанокристаллические материалы, полученные не деформационными методами напыления и осаждения. Показано, что нанокристаллические пленки на поверхности контакта являются более предпочтительными для повышения износостойкости, поскольку более устойчивы к структурно-фазовым превращениям в процессе трения. Среди чистых металлов, как объектов без фазовых превращений, рассматриваются медь, никель, алюминий и титан. Как пример более сложных объектов, представлены сплавы на основе титана (интерметаллидное соединение с памятью формы TiNi и двухфазный сплав Ti-Al-V). Кроме классической схемы трения при макроперемещении индентора на контактной поверхности, рассматривается фреттинг-трение при микроперемещении.

Ключевые слова: скольжение, износ, коэффициент трения, наноструктура, фреттинг, шероховатость.

1. Введение

Трибологическое поведение материалов является одним из многих откликов твердого тела на внешнее воздействие, которое представляет важный научный и практический интерес [1]. Практическая важность экспериментального исследования износа предполагает разработку научных принципов повышения износостойкости, включая требования к структуре материала. В этой связи данная работа посвящена обзору структурных факторов, влияющих на трение материалов.

Среди чистых металлов, как объектов без фазовых превращений при комнатной и умеренно повышенной температурах, рассматриваются ГЦК металлы медь, никель, алюминий [2] и ГПУ титан [3]. Как пример более сложных объектов, рассмотрены сплавы на основе титана (интерметаллидное соединение с памятью формы $TiNi$ и двухфазный сплав $Ti-Al-V$). Поскольку известно, что измельчение структуры приводит к упрочнению металлических материалов, как в объеме, так и на поверхности, то особое внимание сфокусировано на влиянии размера зерен в широком диапазоне, как одного из наиболее важных структурных параметров [4, 5, 6]. При этом акцент сделан на сравнение материалов с

крупнозернистой (КЗ) структурой ($d > 1$ мкм), ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой (с размером зерен в интервале 0,05-1,0 мкм), полученных интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования (РКУП) с последующей холодной прокаткой (ХП) или электропластической деформацией с применением импульсного тока [5], а также нанокристаллической (НК) структурой, сформированной не деформационными методами.

В обзоре кроме классической схемы трения, в которой индентор на контактной поверхности осуществляет макроперемещения, рассматривается схема с амплитудой микроперемещения менее 0,1 мкм, соответствующая особому случаю трения на микроконтактах, называемому фреттинг-износом [7]. Литературные данные свидетельствуют, что в случае фреттинг-трения сопутствующие явления фреттинг-усталости и фреттинг-коррозии изменяют известные зависимости между прочностью, твердостью и износом и приводят к ускоренному разрушению. Вследствие малой амплитуды перемещения соприкасающихся поверхностей повреждения сосредоточиваются на небольших площадках действительного контакта. Продукты изнашивания не могут выйти из зоны контакта, в результате чего возникает высокое давление и увеличивается их абразивное действие на основной металл.

2. Ультрамелкозернистые материалы

Влияние структурного измельчения ГЦК меди комбинацией методов РКУП и ИПДК на трибологические свойства было исследовано в работе [8]. Результаты структурных исследований, микротвердости H_v и трибологических характеристик приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры структуры и свойства в меди [8].

Состояние	d, мкм	H_v , МПа	Интенсивность полюса (111)	доля границ зерен			Плотность дислокаций, м ⁻²	Коэффициент трения		Износ, мм ³ /Н*м x 10 ⁻⁵
				МУГ	ΣЗ	БУГ		исходный	средний	
Исходное	20	0,87	2,64	4,4	67,2	28,4	4,22 x 10 ¹³	0,45	0,79	7,03
РКУП+ ИПДК	0,19	1,77	2,02	28,8	32,6	38,6	1,26 x 10 ¹⁵	0,34	0,89	7,11

Двукратное различие в микротвердости, различие на два порядка в плотности дислокаций и размере зерен d , доле малоугловых (МУГ), высокоугловых (БУГ) и специальных (ΣЗ) границ зерен, интенсивности кристаллографической текстуры для полюса (111) не привело к заметным преимуществам УМЗ меди перед КЗ медью в сопротивлении износу. Некоторая выгода в коэффициенте трения на начальной стадии скольжения нивелируется в процессе достижения установившейся стадии, То есть, известный экспериментальный факт положительного влияния

упрочнения поверхности [9] на износостойкость и коэффициент трения в данном случае не подтверждается. Авторы видят причину в трансформации исходной структуры УМЗ и КЗ меди в процессе трения в тонкий градиентный слой, верхняя часть которого могла быть даже наноструктурной. Формирование наноструктуры за счет динамической рекристаллизации при ИПД кажется правдоподобным, если ориентироваться на температуру рекристаллизации Cu около $120^{\circ}C$ [10].

Похожие результаты были продемонстрированы для технически чистого ГЦК алюминия $Al-1050$ с размером зерен 44 мкм и 1,3 мкм, полученном методом РКУП по маршруту B_c [2]. Хотя твердость образцов УМЗ образцов была значительно выше твердости КЗ алюминия, оба структурных состояния имели одинаковый коэффициент трения, а износ повышался с числом проходов и, соответственно, измельчением (см. рис. 1 а).

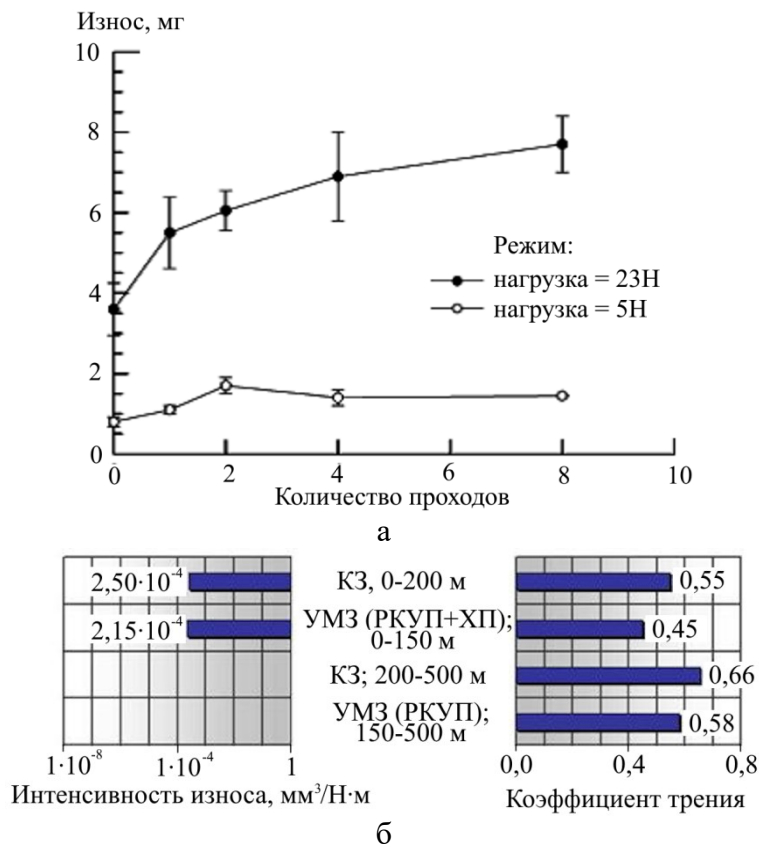


Рис. 1. Трибологические свойства алюминия $Al-1050$ (а) [2] и титана $VT1-0$ (б) [6].

Результаты исследования трения и износа в технически чистом ГПУ титане $VT1-0$ [6] подтвердили снижение средних значений коэффициента трения и износа в УМЗ (РКУП, РКУП+ХП) по сравнению с КЗ состоянием (см. рис. 1 б). Отметим, что титан имеет более высокую температуру плавления и, соответственно, температуру рекристаллизации по сравнению с медью и, тем более, алюминием. Более значимый результат в улучшении

износостойкости за счет подложки был продемонстрирован в [11]. Было показано, что покрытие TiN на чистом УМЗ Ti обладают гораздо лучшей несущей способностью, чем такое же покрытие на КЗ Ti .

В отличие от чистых металлов, микроструктура которых не стабильна в процессе трения, в УМЗ сплавах, упомянутое выше соотношение размер зерен и трибологические свойства, сохраняется. Так, в работе [5] для аустенитного при комнатной и повышенной температурах сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$, полученного интенсивной прокаткой с током и последующим отжигом, представлена температурная зависимость молекулярной составляющей коэффициента трения f_M с различным размером зерен (см. рис. 2 а). Видно, что с уменьшением размера зерен до 30 нм и соответственно повышением прочности и твердости сплава f_M уменьшается и достигает минимального значения. Кроме того, f_M для всех состояний с повышением температуры сначала возрастает, достигает максимума в интервале температур 250-350°C, а затем уменьшается.

Подобный максимум наблюдали для этого же сплава, полученного методом РКУП [6].

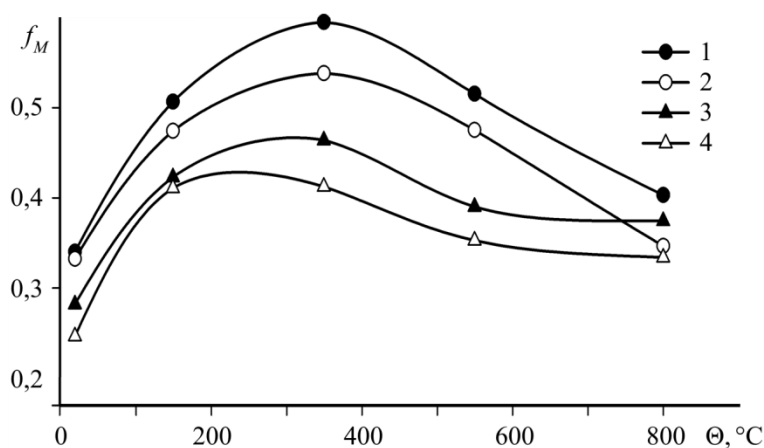


Рис. 2. Температурная зависимость молекулярной составляющей коэффициента трения f_M в сплаве $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ при размере зерен: 1 – $d = 80$ мкм; 2 – $d = 250$ нм; 3 – $d = 100$ нм; 4 – $d = 30$ нм [5].

Авторы связывают появление максимума с двумя возможными факторами, действующими с повышением температуры противоположным образом – обратным превращением мартенсита в аустенит и появлением признаков сверхпластичности. Ими же установлено, что УМЗ сплав близкого химического состава $Ti_{49,8}Ni_{50,2}$, являющийся мартенситным, имеет повышенную износостойкость по сравнению со своим КЗ аналогом [6].

3. Нанокристаллические материалы

Рассмотрим те же материалы, но полученные не деформационными

методами. Авторам работы [12] удалось создать на поверхности КЗ меди градиентный нанозернистый (ГНЗ) слой поверхностной механической обработкой трением (SMGT). В результате наноструктура поверхностного слоя в процессе трения оставалась неизменной, как и коэффициент трения ГНЗ образца, который достигал минимума 0,37 по сравнению с 0,74 для КЗ и 0,67 для УМЗ.

Поскольку получение УМЗ структуры в алюминии деформационными методами затруднено из-за низкой температуры рекристаллизации, то часто исследуются не массивные материалы, а покрытия или тонкие пленки, полученные одним из видов напыления. В [13] было показано, что коэффициент трения и скорость износа алюминиевой пленки ($\delta = 14$ мкм) с уменьшением размера зерен от 106 нм (после отжига) до 16,5 нм, снижаются, соответственно, от 1,12 до 0,69 и с $18,67 \times 10^{-4} \text{ мм}^3 \cdot \text{м}^{-1}$ до $0,45 \times 10^{-4} \text{ мм}^3 \cdot \text{м}^{-1}$. В отличие от КЗ меди кривая зависимости коэффициента трения от пути скольжения имела установившуюся стадию после достижения пикового значения (см. рис. 3 б).

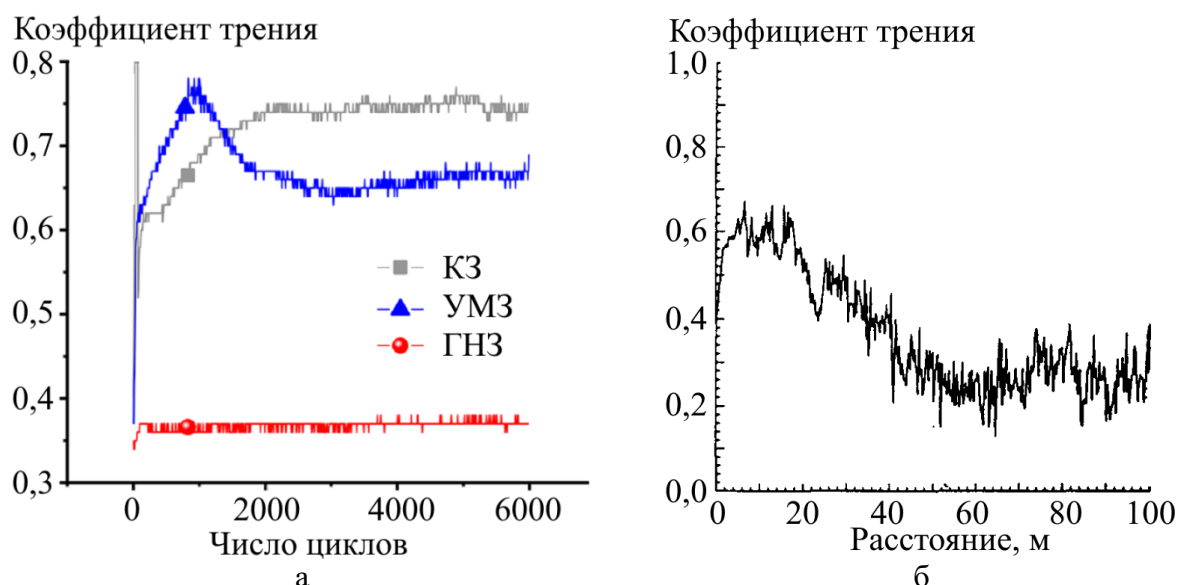


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от числа циклов или расстояния: а – *Cu* [12]; б – НК *Al* [13].

В [14] никель с $d = 20-100$ нм был получен электроосаждением. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) показала формирование трех зон, размер зерен в которых изменялся от 2-10 нм в зоне контакта (Зона 1) до 100 нм и более, вдали от поверхности (зона 3) (см. рис. 4 а).

Заметен промежуточный слой (см. рис. 4 а, Зона 2), который характеризуется ростом зерен и удлинением в направлении скольжения. В статье [15] также для электроосажденного никеля показано снижение

коэффициента трения на 20% в нанокристаллическом состоянии по сравнению с крупнозернистым состоянием (см. рис. 4 б). Повышение размера зерен в интервале 10-20 нм повышает коэффициент трения. В другой статье нанокристаллический никель ($d = 8-28$ нм) получали электроосаждением в условиях постоянного или импульсного тока [16]. Трибологические испытания показали, что коэффициент трения нанокристаллического никеля был почти вдвое меньше, чем у поликристаллического никеля. Важным и интересным результатом является то, что чрезвычайно низкий коэффициент трения 0,16 может быть получен с покрытием из нанокристаллического никеля.

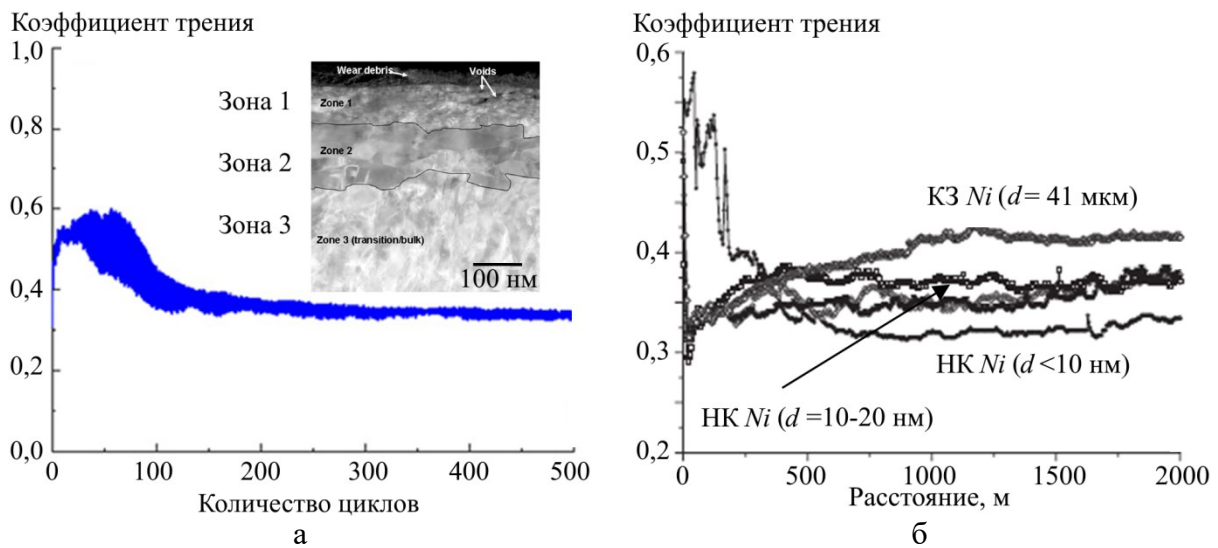


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения электроосажденного Ni от числа циклов или расстояния: а – НК [14]; б – КЗ, НК [15].

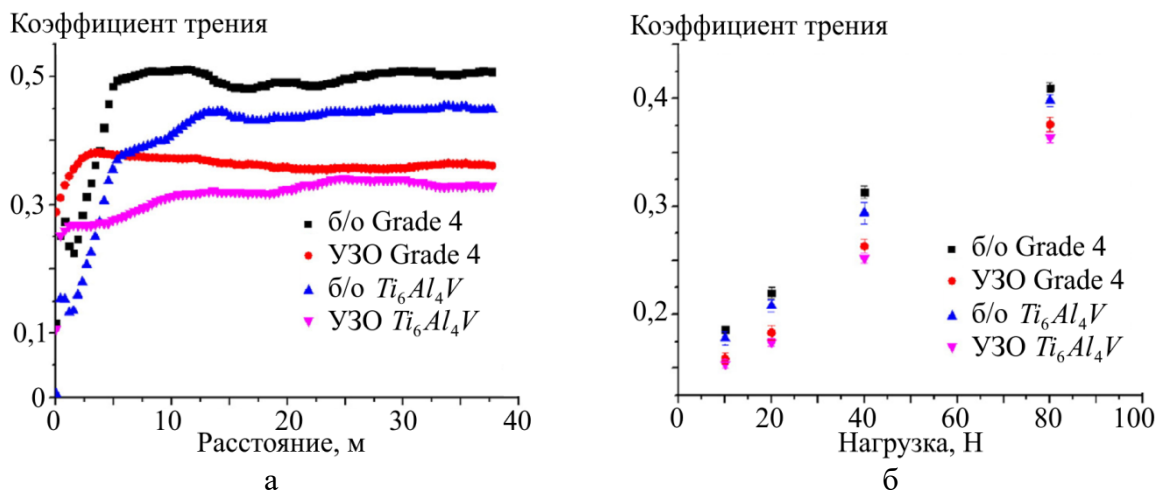


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от пройденного пути (а) и фреттинг-износа от нагрузки (б) для Ti Grade 2 и сплава Ti-6Al-4V [17].

В работе [17] измельчение микроструктуры в поверхностном слое 170-200 мкм в титановых сплавах было получено методом высокочастотной ультразвуковой обработки. Размер зерен в образцах

чистого титана (Grade 2) и сплава $Ti-6Al-4V$ уменьшился с 35 мкм до 200 нм и с 10 мкм до 1 мкм, соответственно. Все обработанные ультразвуком образцы показали низкий коэффициент трения и повышенное сопротивление износу по сравнению с необработанными образцами (см. рис. 5). Авторы считают, что улучшение трибологических свойств обработанных ультразвуком образцов вызвано повышением микротвердости и формированием сжимающих напряжений на поверхности.

4. Фреттинг-трение

Известно, что фреттинг-трение наблюдается при экстремально низких амплитудах и частотах, при условии, что соотношение $A/\delta \leq 1$, где A – амплитуда перемещения, δ – радиус контакта. Известно, что при подобных режимах трения продукты износа сохраняются в зоне контакта, что приводит к сильному повышению износа, вплоть до разрушения [18]. Ранее выполненные исследования фреттинг трения в основном касались материалов с крупнозернистой структурой. Однако важно понимать влияние режима фреттинг-трения на трибологическое поведение материалов с ультрамелкозернистой или нанокристаллической структурой.

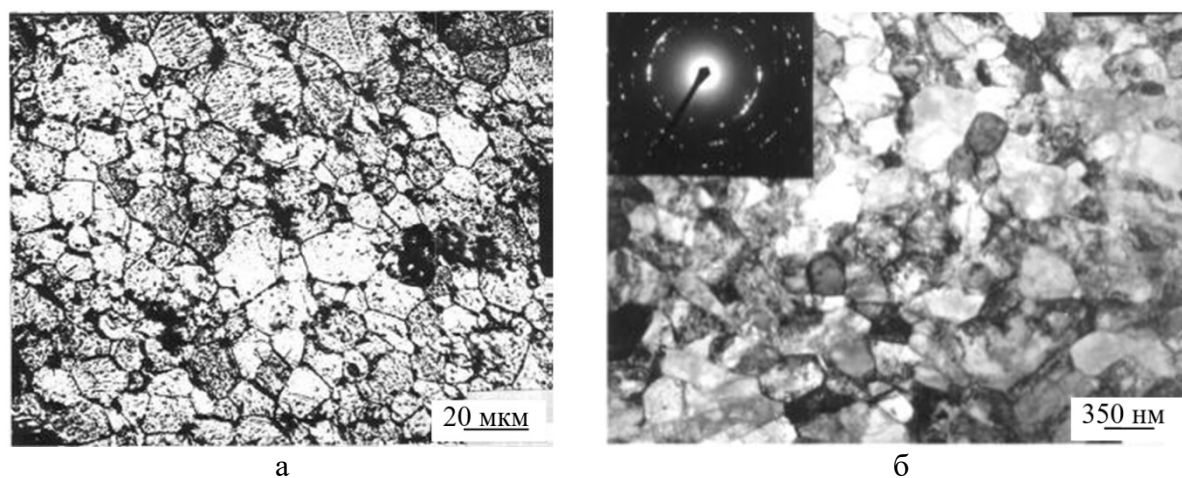


Рис. 6. Микроструктура титана Grade 4 в КЗ (а) и УМЗ (б) состояниях [3].

В статье [3] выполнено экспериментально сравнение трибологических характеристик КЗ (40 мкм) и РКУП (0,4 мкм) титана Grade 4 в условиях (см. рис. 6), приближающихся к фреттингу-трению. Результаты показали, что при длительности испытания около 7000 с коэффициент трения не зависел от размера зерен, а износ в УМЗ титане, несмотря на большую микротвердость, был вдвое выше, чем в крупнозернистом (КЗ) состоянии (см. Таблицу 1). Полученный результат не согласуется с приведенной выше работой [18], также исследующей фреттинг-трение титана. Причинами могут быть отличающиеся химический состав и размер зерен исходного титана, а также индекс

скольжения, который кратно отличался в обеих работах.

Более высокий износ в УМЗ титане Grade 4 вероятно обусловлен большей плотностью границ зерен, являющихся местом скопления дефектов кристаллического строения (дислокаций, пор, примесей) и, соответственно, местом разрушения.

Таблица 2. Параметры трения и трибологические характеристики в титане [4].

Состояние	Размер зерен, мкм	H_v , МПа	Размер зоны контакта, мкм	Амплитуда перемещения, мкм	Износ, мкм	Коэффициент трения
КЗ	40	2860	75	300	10	1,0
УМЗ	0,4	3320	70	300	20	1,0

Многократное пересечение индентором границ зерен приводит к большему износу в УМЗ титане, чем в КЗ титане.

Недавно свежая статья была опубликована [19] по моделированию и сравнению фреттинг поведения стали 304 с КЗ и градиентным наноструктурным поверхностным слоем при обкатке в условиях упругого и пластического контакта. Градиентные наноматериалы с их меньшим пластически деформируемым объемом в области контакта демонстрируют превосходную стойкость при многоцикловом скольжении по сравнению с крупнозернистым состоянием поверхности.

Исследования фреттинг-износа в исходно крупнозернистом двухфазном $Ti-6Al-4V$ сплаве были только что опубликованы в [20]. Используя просвечивающую электронную микроскопию, авторы демонстрируют появление на поверхности нанослоя, состав и микроструктура которого критически зависят от контактного давления и числа циклов фреттинга. Одна из зон состоит из текстурированных нанозерен α -фазы размером 20-50 нм, а другая представляет собой безтекстурные зерна размером 5-20 нм.

5. Заключение

Ультрамелкозернистые и нанокристаллические материалы проявляют исключительно высокие механические свойства, включая высокую твердость, прочность, усталостную прочность. В этой связи важно понимать их трибологическое поведение. В обзоре фокус был сделан на влияние структурных параметров, преимущественно, размера зерен, на трибологическое поведение в обычных условиях и при фреттинг трении, в основном чистых металлов и некоторых сплавов.

Следующие выводы могут быть сделаны:

1. Показано, что трение, как и многие другие свойства, является зависимым свойством от размера зерен. Как правило, износ и коэффициент трения снижаются с уменьшением размера зерен. Однако, в случае супермалых размеров зерен (менее 10 нм) механизм трения может

меняться от дислокационного к зернограничному и негативно влиять на трибологические свойства. Скорее всего, в этом случае наблюдается аномальный закон Холла-Петча.

2. В процессе трения нано- и ультрамелкозернистых чистых металлов с низкой температурой рекристаллизации поверхностный слой, контактирующий с индентором, способен трансформироваться в слоистые структуры с увеличивающимся размером зерен и способствовать повышению износа и коэффициента трения.

3. Формирование градиентных наноструктурных поверхностных слоев большой толщины позволяет стабилизировать структуру и фазовый состав покрытий и препятствовать снижению трибологических характеристик, особенно в условиях фреттинг-трения.

Библиографический список:

1. **Колубаев, А.В.** Структурные аспекты трения металлов / А.В. Колубаев // В книге: Перспективные материалы: учебное пособие / под ред. Д.Л. Мерсона. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – Т. V. – С. 126-218.
2. **Wang, C.T.** Wear behavior of an aluminum alloy processed by equal-channel angular pressing / C.T. Wang, N. Gao, R.J.K. Wood, T.G. Langdon // *Journal of Materials Science*. – 2011. – V. 46. – I. 1. – P. 123-130. DOI: 10.1007/s10853-010-4862-0.
3. **Pakhomov, M.** Features of wear and friction in titanium / M. Pakhomov, D. Gorlov, V. Stolyarov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – V. 996. – Art. № 012017. – 5 p. DOI: 10.1088/1757-899X/996/1/012017.
4. **Gao, N.** Tribological properties of ultrafine-grained materials processed by severe plastic deformation / N. Gao, C.T. Wang, R.J.K. Wood, T.G. Langdon // *Journal of Materials Science*. – 2012. – V. 47. – I. 12. – P. 4779-4797. DOI: 10.1007/s10853-011-6231-z.
5. **Misochenko, A.A.** Influence of grain size and contact temperature on the tribological behaviour of shape memory Ti_{49.3}Ni_{50.7} alloy / A.A. Misochenko, S.V. Chertovskikh, L. Sh. Shuster, V.V. Stolyarov // *Tribology Letters*. – 2017. – V. 65. – I. 4. – Art. № 131. – 7 p. DOI: 10.1007/s11249-017-0917-6.
6. **Чертовских, С.В.** Анализ трения и изнашивания ультрамелкозернистых материалов с позиции термодинамики / С.В. Чертовских, Л.Ш. Шустер // *Вестник УГАТУ*. – 2016. – Т. 20. – № 2 (72). – С. 55-60.
7. **Столяров, В.В.** Феноменология и структурные аспекты фреттинг-трения конструкционных материалов / В.В. Столяров, В.П. Кузнецов // В монографии: Актуальные проблемы прочности; под ред. В.В. Рубаника. – Молодечно: ОАО «Типография «Победа», 2020. – С. 20-33.
8. **Zhilyaev, A.P.** Wear resistance and electroconductivity in copper processed by severe plastic deformation / A.P. Zhilyaev, I. Shakhova, A. Belyakov, R. Kaibyshev, T.G. Langdon // *Wear*. – 2013. – V. 305. – I. 1-2. – P. 89-99. DOI:10.1016/j.wear.2013.06.001.
9. **Sadykov, F.A.** The influence of strain-heat processing on copper wear / F.A. Sadykov, N.P. Barykin, I.R. Aslanyan // *Wear*. – 1997. – V. 212. – I. 2. – P. 160-164. DOI: 10.1016/S0043-1648(97)00164-6.
10. **Li, Y. S.** Effect of thermal annealing on mechanical properties of a nanostructured copper prepared by means of dynamic plastic deformation / Y.S. Li, Y. Zhang, N.R. Tao, K. Lu // *Scripta Materialia*. – 2008. – V. 59. – I. 4. – P. 475-478. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.04.043.
11. **Wang, C.T.** Tribology testing of ultrafine-grained Ti processed by high-pressure torsion with subsequent coating / C.T. Wang, N. Gao, M.G. Gee, R.J.K. Wood, T.G. Langdon // *Journal of Materials Science*. – 2013. – V. 48. – I. 13. – P. 4742-4748. DOI: 10.1007/s10853-012-7110-y.
12. **Chen, X.** Friction and wear reduction in copper with a gradient nano-grained surface layer / X. Chen, Z. Han, K. Lu // *ACS Applied Materials Interfaces*. – 2018. – V.10. – I. 16. – P. 13829-13838. DOI: 10.1021/acsami.8b01205.
13. **Farhat, Z.N.** Effect of grain size on friction and wear of nanocrystalline aluminum / Z.N. Farhat, Y. Ding, D.O. Northwood, A.T. Alpas // *Materials Science and Engineering A*. – 1996. – V. 206. – I. 2. – P. 302-313. DOI: 10.1016/0921-5093(95)10016-4.

14. **Prasad, S.V.** Friction transitions in nanocrystalline nickel / S.V. Prasad, C.C. Battaile, P.G. Kotula // *Scripta Materialia*. – 2011. – V. 64. – I. 8. – P. 729-732. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.12.027.
15. **Guidry, D.J.** Tribological behavior of nanocrystalline nickel / D.J. Guidry, K. Lian, J.C. Jiang, E.I. Meletis // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2009. – V. 9. – № 7. – P. 4156-4163. DOI: 10.1166/jnn.2009.m25.
16. **Mishra, R.** Effect of grain size on the tribological behavior of nanocrystalline nickel / R. Mishra, B. Basu, R. Balasubramaniam // *Materials Science and Engineering: A*, 2004. – V. 373. – I. 1-2. – P. 370-373. . DOI: 10.1016/j.msea.2003.09.107..
17. **Amanov, A.** Fretting wear and friction reduction of CP titanium and Ti–6Al–4V alloy by ultrasonic nanocrystalline surface modification / A. Amanov, I.-S. Cho, D.-E. Kim, Y.-S. Pyun // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – V. 207. – P. 135-142. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.046
18. **Waterhouse, R.** Fretting wear / R. Waterhouse // *Wear*. – 1984. – V. 100. – I. 1-3. – P. 107-118. DOI: 10.1016/0043-1648(84)90008-5.
19. **Yang, T.** Modeling fretting wear resistance and shakedown of metallic materials with graded nanostructured surfaces / T. Yang, T.A. Venkatesh, M. Dao // *Nanomaterials*. – 2023. – V. 13. – I. 10. – Art. № 1584. – 17 p. DOI: 10.3390/nano13101584.
20. **Lefranc, V.** Heterogeneity in tribologically transformed structure (TTS) of Ti-6Al-4V under fretting / V. Lefranc, S. Baydoun, C. Gandiolle et al. // *Wear*. – 2023. – V. 522. – Art. № 204680. – 11 p. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204680.

References:

1. Kolubaev A.V. Strukturnye aspekty treniya metallov [Structure aspects of friction of metals], *Perspektivnye materialy: uchebnoe posobie [Advanced materials: tutorial]*, ed. D.L. Merson, Tolyatti, TGU Publ., 2013, vol. 5, pp. 126-218. (In Russian).
2. Wang C.T., Gao N., Wood R.J.K., Langdon T.G., Wear behavior of an aluminum alloy processed by equal-channel angular pressing, *Journal of Materials Science*, 2011, vol. 46, issue 1, pp. 123-130. DOI: 10.1007/s10853-010-4862-0.
3. Pakhomov M., Gorlov D., Stolyarov V. Features of wear and friction in titanium, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 996, art. no. 012017, 5 p. DOI: 10.1088/1757-899X/996/1/012017.
4. Gao N., Wang C.T., Wood R.J.K., Langdon T.G. Tribological properties of ultrafine-grained materials processed by severe plastic deformation, *Journal of Materials Science*, 2012, vol. 47, issue 12, pp. 4779-4797. DOI: 10.1007/s10853-011-6231-z.
5. Misochenko A.A., Chertovskikh S.V., Shuster L.Sh., Stolyarov V.V. Influence of grain size and contact temperature on the tribological behaviour of shape memory Ti_{49,3}Ni_{50,7} alloy, *Tribology Letters*, 2017, vol. 65, issue 4, art. no. 131, 7 p. DOI:10.1007/s11249-017-0917-6.
6. Chertovskikh S.V., Shuster L.Sh. Analiz treniya i iznashivaniya ul'tramelkozernistykh materialov s pozitsii termodinamiki [Friction and wear analysis of ultrafine-grained materials from standpoint of thermodynamics], *Vestnik UGATU [Bulletin of USATU]*, 2016, vol. 20, no. 2 (72), pp. 55-60. (In Russian).
7. Stolyarov V.V., Kuznetsov V.P. *Fenomenologiya i strukturnye aspekty fretting-treniya konstruktsionnykh materialov* [Phenomenology and structure aspects of fretting friction of structure materials], *Actual'nye problemy prochnosti: monograph [Actual strength issues: monograph]*, ed. V.V. Rubanik, Molodechno, Pobeda LTD Publ., 2020, pp. 20-33. (In Russian).
8. Zhilyaev A.P., Shakhova I., Belyakov A., Kaibyshev R., Langdon T.G. Wear resistance and electroconductivity in copper processed by severe plastic deformation, *Wear*, 2013, vol. 305, issue 1-2, pp. 89-99. DOI: 10.1016/j.wear.2013.06.001.
9. Sadykov F.A., Barykin N.P., Aslanyan I.R. The influence of strain-heat processing on copper wear, *Wear*, 1997, vol. 212, issue 2, pp. 160-164. DOI: 10.1016/S0043-1648(97)00164-6.
10. Li Y.S., Zhang Y., Tao N.R., Lu K. Effect of thermal annealing on mechanical properties of a nanostructured copper prepared by means of dynamic plastic deformation, *Scripta Materialia*, 2008, vol. 59, issue 4, pp. 475-478. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.04.043.
11. Wang C.T., Gao N., Gee M.G., Wood R.J.K., Langdon T.G. Tribology testing of ultrafine-grained Ti processed by high-pressure torsion with subsequent coating, *Journal of Materials Science*, 2013, vol. 48, issue 13, pp. 4742–4748. DOI: 10.1007/s10853-012-7110-y.

12. Chen X., Han Z., Lu K. Friction and wear reduction in copper with a gradient nano-grained surface layer, *ACS Applied Materials Interfaces*, 2018, vol.10, issue 16, pp. 13829-13838. DOI: 10.1021/acsami.8b01205.
13. Farhat Z.N., Ding Y., Northwood D.O., Alpas A.T. Effect of grain size on friction and wear of nanocrystalline aluminum, *Materials Science and Engineering A*, 1996, vol. 206, issue 2, pp. 302-313. DOI: 10.1016/0921-5093(95)10016-4.
14. Prasad S.V., Battaile C.C., Kotula P.G. Friction transitions in nanocrystalline nickel, *Scripta Materialia*, 2011, vol. 64, issue 8, pp. 729-732. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.12.027.
15. Guidry D.J., Lian K., Jiang J.C., Meletis E.I. Tribological behavior of nanocrystalline nickel, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2009, vol. 9, no. 7, pp. 4156-4163. DOI: 10.1166/jnn.2009.m25.
16. Mishra R., Basu B., Balasubramaniam R. Effect of grain size on the tribological behavior of nanocrystalline nickel, *Materials Science and Engineering A*, 2004, vol. 373, issue 1-2, pp. 370-373. DOI: 10.1016/j.msea.2003.09.107.
17. Amanov A., Cho I.-S., Kim D.-E., Pyun Y.-S. Fretting wear and friction reduction of CP titanium and Ti-6Al-4V alloy by ultrasonic nanocrystalline surface modification, *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 135-142. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.046.
18. Waterhouse R. Fretting wear, *Wear*, 1984, vol. 100, issue 1-3, pp. 107-118. DOI: 10.1016/0043-1648(84)90008-5.
19. Yang T., Venkatesh T.A., Dao M. Modeling fretting wear resistance and shakedown of metallic materials with graded nanostructured surfaces, *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, issue 10, art. no. 1584. 17 p. DOI: 10.3390/nano13101584.
20. Lefranc V., Baydoun S., Gandiolle C. et al. Heterogeneity in tribologically transformed structure (TTS) of Ti-6Al-4V under fretting, *Wear*, 2023, vol. 522, art. no. 204680, 11 p. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204680.

Review

TRIBOLOGICAL ASPECTS OF NANOSTRUCTURED MATERIALS

V.V. Stolyarov

Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.840

Abstract: The article is devoted to the review of structural factors influencing the tribological behavior of nanostructure metals and alloys without lubrication. The scientific significance of this topic is related to the understanding of wear mechanisms and the possibility of its prediction during long-term operation. Particular attention is focused on the effect of the grain size in the range of 0,01-10 μm , as one of the most important structural parameters. Emphasis is placed on materials with ultrafine grains obtained by severe plastic deformation, and nanocrystalline materials obtained by non-deformation methods of sputtering and deposition. It is shown that nanocrystalline films on the contact surface are more preferable for increasing wear resistance, since they are more resistant to structural-phase transformations during friction. Among pure metals, as objects without phase transformations, copper, nickel, aluminum and titanium are considered. As an example of more complex objects, alloys based on titanium (an intermetallic compound with shape memory *TiNi* and two phases *Ti-Al-V* alloy) are presented. In addition to the classical scheme of friction during macrodisplacement of the indenter on the contact surface, the fretting friction during microdisplacement is considered.

Keywords: *slip, wear, friction coefficient, nanostructure, fretting, roughness.*

Столяров Владимир Владимирович – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГБВН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук»

Vladimir V. Stolyarov – Dr.Sc., Chief Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the RAS

Поступила в редакцию/received: 29.07.2023; после рецензирования/reviised: 05.09.2023; принята/accepted: 10.09.2023.