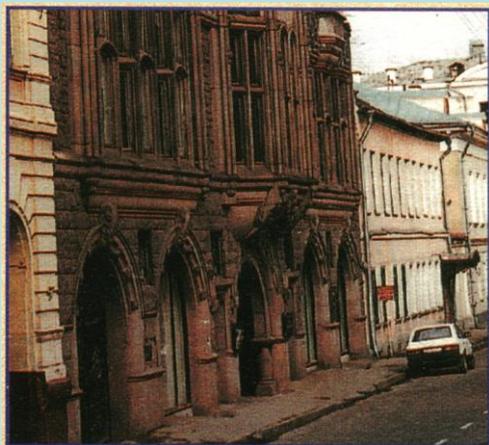




Институт машиноведения
им.А.А.Благонравова РАН

Влияние размера зерен на трение и износ металлических материалов



Столяров В.В.



Работа выполнялась при поддержке РФФИ грант № 16-19-10213

Международная научно-практическая конференция «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2020» (ICMSSTE 2020) 25-29 мая 2020 г. Ялта, Россия

Материалы исследования – Cu, Ni

медь (99.99%), электроосаждение, диск $\varnothing 7 \times 2$ мм, $d = 20$ нм.

Испытания на износ - сухое трение при 20 С, схема «шарик-диск», шарик (WC-Co) $\varnothing 10$ мм, нагрузка 5 - 40 Н с частотой 5 Гц.

HV=1.05 ГПа (НС медь) в два раза выше, чем для КЗ меди (0.5 ГПа).

никель, электроосаждение. $d = 20$ нм.

испытания - без смазки, схема «стальной шарик-диск», при нагрузке 100 г, частоте 8 Гц, тангенциальной амплитуде перемещения 100 мкм и числе циклов 10000.

КЗ Ni (для сравнения), $d = 61$ мкм.

BT1-0 (КЗ $d = 15$ мкм, УМЗ) $d = 0.3$ мкм, $d = 0.1$ мкм. $\varnothing 12 \times 6$ мм
полусферический индентор ВК-8 ($\varnothing 2.5 \times 25$ мм) и диском из Ti ().

Скорость вращения диска = 36°/с.

Температура контакта - 150, 350, 550 и 800 °С пропусканием электротока, длительностью менее 1 мин.

Al₂O₃+графен SPS в вакууме при 1550 °С

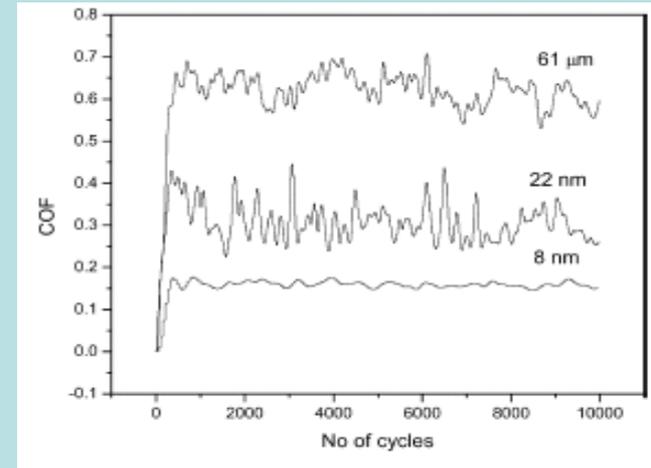
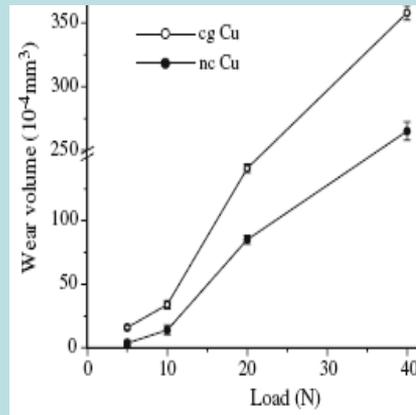
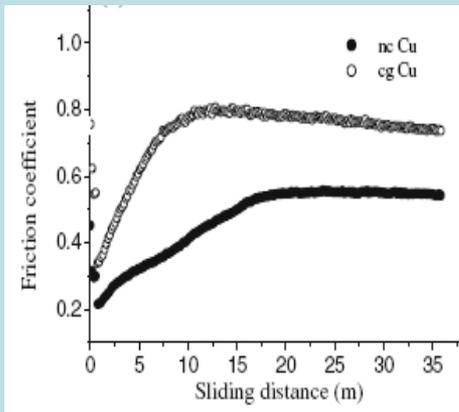
диск $\varnothing 15 \times 2$ мм сферического порошка Al₂O₃ различной дисперсности и пятислойного чешуйчатого графена (G) содержанием 0.5 вес.%. Нанопорошок δ -Al₂O₃, получен плазменным окислением дисперсного алюминия, заметно агломерирован, размер частиц 36 нм. (ИМЕТ)

5-слойный графен получен методом УЗ эксфолиации, чешуйки 3 нм \times 2-3 мкм.

Результаты испытаний для Cu и Ni

Ктр при 5 Н

износ



2 стадии – резкое повышение и насыщение.

Хотя с увеличением нагрузки до 10 Н ситуация меняется наоборот, коэффициент трения на стадии насыщения для НС Cu всегда меньше, чем для КЗ Cu.

Износ увеличивается с увеличением нагрузки, но скорость износа для НС меди была меньше, чем для КЗ меди.

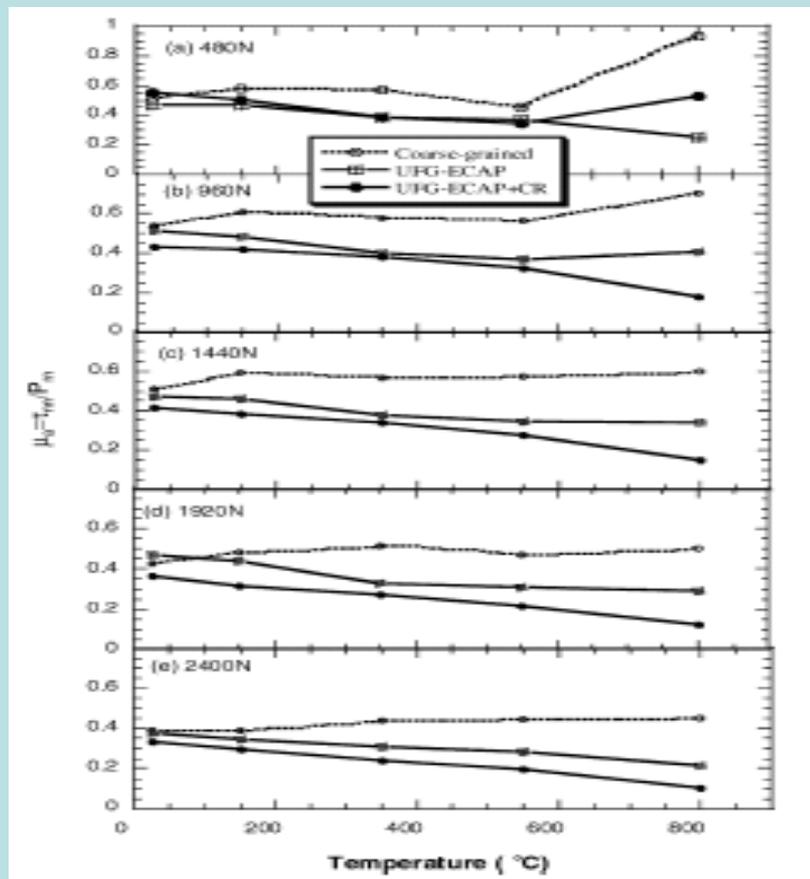
d, нм	Hv	Ктр
61000	269	0.62
28	572	0.55
10*	724	0.29
8*	689	0.16

Ктр повышается в первый период (до 500 циклов) циклирования, а затем достигает устойчивой стадии насыщения.

Более высокая микротвердость образцов, связанная с наименьшим размером зерен, является основной причиной снижения коэффициента трения.

Ti

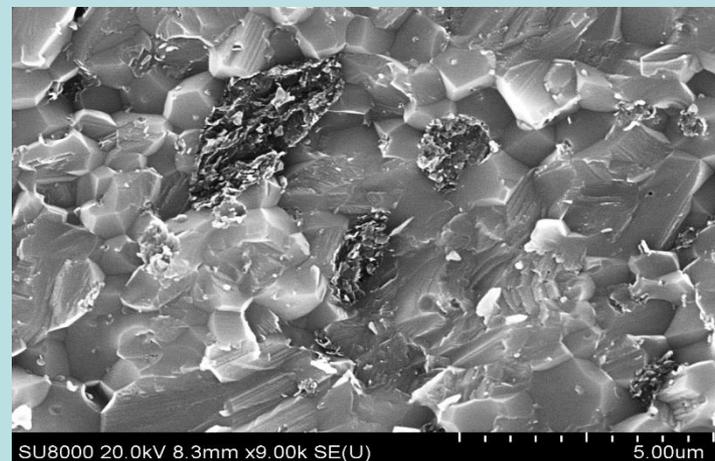
Al₂O₃+графен



графен, %	Ширина дорожки, мм	Глубина дорожки, мкм	Скорость износа, мм ³ /мин (мм ³ /час)	Коэффициент трения
0	0,55	5,5	5,4 x10 ⁻⁴	0.77
1	~0,1	<0,5	<3 x10 ⁻⁶	0.45
2	~0,1	<0,5	<2 x10 ⁻⁶	0.67

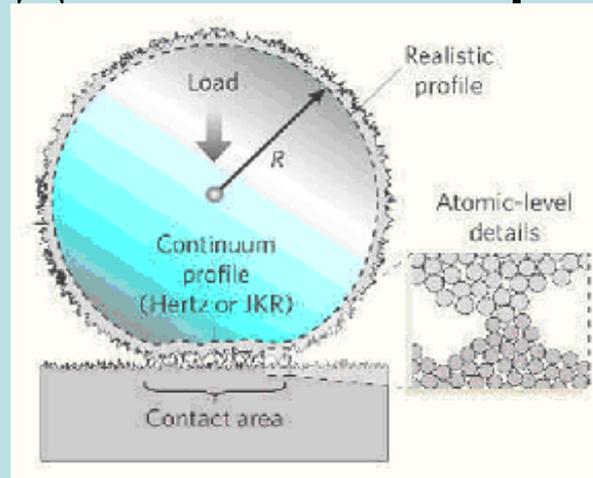
d	W (10 ⁻³ мм ³)	скорость W Kv (10 ⁻⁶ мм ³ /Н·м)	Kтр
> 100 нм	6.38	7.97±0.05	0.61±0.05
< 100 нм	3.54	4.42±0.05	0.53±0.05

Температурные зависимости Kтр при разных нагрузках. При всех температурах Kтр КЗ Ti > в УМЗ Ti, увеличивается с температурой для КЗ титана и, как правило, уменьшается для УМЗ Ti. Аналогичный эффект снижения Kтр и износа при измельчении структуры до нанометрового диапазона наблюдался для титановых сплавов ВТ6 и TiNi

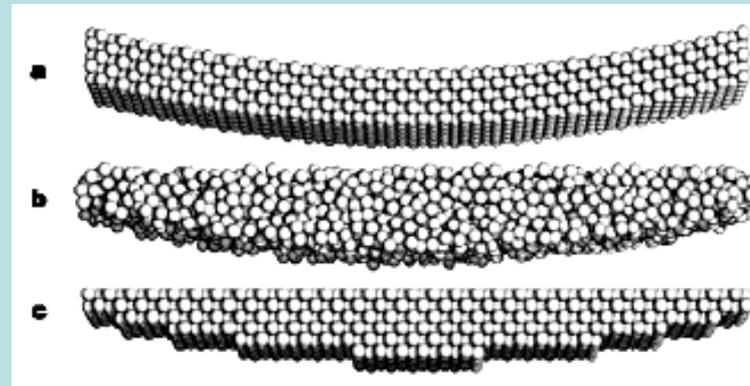


Модели трения и износа: от континуальных моделей к микроскопике

Расчет сил адгезии и трения между поверхностями основан на континуальной механике или линейной теории упругости. Поверхности предполагаются гладкими; их атомное строение не учитывается. Например, сила, необходимая для отрыва поверхности с радиусом кривизны R от плоской подложки, находится по простой формуле $F = 3\pi Rg$, где g – поверхностная энергия. В некоторых случаях континуальная теория дает на удивление точные результаты, а иногда расходится с экспериментом в десятки раз. Причина - поверхность реальных тел неровная, что существенно влияет на силу адгезии. .



Континуальная (пунктир) и реальная форма поверхности.



- (a) - атомарно гладкая поверхность;
- (b)- поверхность аморфного твердого тела;
- (c) "ступенчатая" поверхность. $Rz < D$ атома.

Континуальные модели в принципе не годятся для расчета. Необходимы разработки микроскопической теории контактных механических явлений на основе методов молекулярной динамики.

Заключение

1. Коэффициент трения и величина износа в наноструктурных металлах минимальны и обусловлены максимальной величиной микротвердости, которая в свою очередь зависит от степени структурного измельчения.
2. Переход к наноструктурным поверхностям контакта может быть осуществлен в рамках моделей, основой которых является рельеф поверхности на атомарном уровне.
3. Полученные результаты имеют как фундаментальное, так и практическое значение. Они определяют подходы к “поверхностной инженерии”, т.е. к надлежащей микрообработке контактирующих поверхностей.
4. Выше представлен предельный случай малых деформаций, что отвечает контактам металлов или керамик. Однако описание взаимодействия “реальных поверхностей” в режиме “реального времени” требует учета нестационарных явлений. Эти не решенные вопросы – тема дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.