



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 621.785.78:620.178

В.А. КУКАРЕКО, д-р физ.-мат. наук
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

АБРАЗИВНАЯ СТОЙКОСТЬ ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩИХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЬ-ХРОМОВОЙ ОСНОВЕ

Исследована абразивная стойкость типичных дисперсионно-твердеющих сплавов на Ni-Cr основе, различающихся величиной объемной доли выделившихся при старении частиц γ' -фазы, а также величиной и знаком фактора несоответствия удельных атомных объемов матричной и выделившейся фаз ($\Delta v/v$). Сделано заключение, что использование в узлах трения дисперсионно-твердеющих сплавов с отрицательной величиной фактора объемного несоответствия ($\Delta v/v < 0$) нецелесообразно вследствие пониженного сопротивления таких сплавов абразивному и адгезионному изнашиванию.

Ключевые слова: дисперсионно-твердеющие сплавы, межфазовые деформации, абразивное изнашивание

Введение. Одним из наиболее распространенных в природе видов взаимодействия твердых тел является фрикционное контактное взаимодействие, лежащее в основе таких явлений как трение и изнашивание. Процессы фрикционного взаимодействия материалов сопровождаются интенсивным пластическим деформированием, разогревом и структурно-фазовыми превращениями в тонких поверхностных слоях. Комплексное механико-термическое воздействие на поверхностные слои контактирующих материалов при трении обуславливает специфические взаимосвязи между структурными параметрами материалов и их триботехническими свойствами. К одному из основных видов изнашивания относится абразивное изнашивание, происходящее в результате режущего или царапающего действия на поверхностные слои контактирующих материалов твердых тел — абразивных частиц [1]. При этом абразивные частицы, скользя по поверхности материалов пары трения, срезают с них частицы износа и деформируют поверхностный слой. Интенсивность абразивного изнашивания зависит от твердости абразивных частиц и материалов пары трения [1]. Кроме этого, большое влияние на сопротивление абразивному изнашиванию оказывает способность материала пары трения к деформационному упрочнению [1]. Несмотря на большой объем данных об абразивной стойкости различных материалов, систематизированные сведения о влиянии основных параметров структуры дисперсионно-твердеющих сплавов на их сопротивление абразивному изнашиванию практически отсутствуют.

В значительной степени это объясняется сложностью описания реального структурного состояния дисперсионно-твердеющих сплавов, упрочняемых за счет выделения при термообработке частиц второй фазы. В частности, прочностные свойства таких материалов определяются химическим составом, структурой, размером, морфологией и объемной концентрацией частиц выделившейся фазы, а также величиной и знаком полей упругих межфазовых деформаций, возникающих в матрице из-за различия удельных атомных объемов матричной (v_A) и выделяющейся (v_B) фаз. Мощность межфазовых деформаций характеризуется величиной фактора объемного несоответствия $\Delta v/v = (v_B - v_A)/v_A$. В частности, по данным [2] в никель-хромовых сплавах типа нимоник до 40 % прироста твердости и предела упругости сплавов при выделении в них частиц связаны с полями упругих межфазовых деформаций. Вместе с тем влияние этого фактора на процессы разрушения гетерофазных материалов при абразивном износе практически не изучено. В связи с этим представляло интерес на примере типичных дисперсионно-твердеющих Ni-Cr сплавов ХН77ТЮР, ХН67ВМТЮ и ХН56ВМТЮ, упрочняемых за счет выделения при старении частиц γ' -фазы ($Ni_3(Al, Ti)$) и различающихся величиной и знаком полей упругих межфазовых деформаций, провести исследование влияния основных структурных параметров сплавов на сопротивление абразивному изнашиванию. Указанные сплавы широко используются для изго-

товления ответственных деталей и изделий аэрокосмической техники и могут эксплуатироваться в условиях воздействия абразивных частиц. В сплаве ХН77ТЮР период решетки выделившихся при старении γ' -частиц (a_B) больше периода решетки матричной фазы (a_A) и частицы оказываются в состоянии гидростатического сжатия ($v_B > v_A$; $\Delta v/v > 0$). В сплаве ХН67ВМТЮ периоды решеток матричной и γ' -фаз одинаковы (рисунок 1) и упругие межфазовые деформации отсутствуют ($v_B \cong v_A$; $\Delta v/v \cong 0$). В сплаве ХН56ВМТЮ параметр a_B меньше a_A и частицы находятся в состоянии гидростатического растяжения ($v_B < v_A$; $\Delta v/v < 0$). Для исследуемых сплавов ХН77ТЮР, ХН67ВМТЮ и ХН56ВМТЮ значения фактора $\Delta v/v$ составляют соответственно 0,02; ~ 0 и $-0,015$ [2]. На рисунке 1 приведены схемы упругого выделения частиц второй фазы в Ni-Cr сплавах.

Методика эксперимента. В качестве материалов для исследования выбраны типичные дисперсионно-твердеющие сплавы на никель-хромовой основе ХН77ТЮР, ХН67ВМТЮ и ХН56ВМТЮ. Химический состав исследуемых сплавов приведен в таблице 1. Листовые образцы сплавов ХН77ТЮР, ХН67ВМТЮ и ХН56ВМТЮ ($\delta = 0,3$ мм) гомогенизировались при 1350 К (0,5 ч), 1430 К (0,5 ч) и 1470 К (0,5 ч), соответственно, а затем закаливались в масле. Старение образцов проводилось при температурах 1020, 1070, 1120, 1170 и 1220 К с выдержками от 0,5 до 100 ч. В результате гомогенизирующей закалки образцы Ni-Cr сплавов приобретают структуру однофазного γ -твердого раствора с гранцентрированной кубической решеткой. В сплаве ХН56ВМТЮ наряду с матричной γ -фазой регистрируется присутствие небольшого количества (до 2–3 об. %) крупных частиц карбида M_6C диаметром 0,2–0,5 мкм. Размер зерен сплавов составлял ~ 100 мкм.

Для исследований были выбраны режимы старения, обеспечивающие:

- выделение в сплавах различных объемных долей γ' -фаз (от 7 до 22 об. %) при приблизительно одинаковом размере их частиц $D \sim 20$ –35 нм;
- выделение γ' -частиц размером ~ 100 нм при приблизительно одинаковой их объемной доле ($f \approx 12$ об. %, для сплавов ХН67ВМТЮ, ХН56ВМТЮ и $f \approx 8$ об. % для сплава ХН77ТЮР).

Выбранные режимы старения и структурные параметры исследуемых Ni-Cr сплавов приведены в таблице 2. Объемную долю f частиц упрочняю-

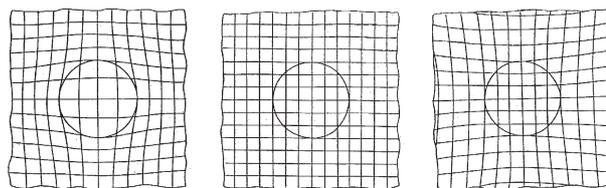


Рисунок 1 — Схема упругого выделения частиц второй фазы:
а — $\Delta v/v > 0$; б — $\Delta v/v = 0$; в — $\Delta v/v < 0$

щей γ' -фазы ($Ni_3(Al, Ti)$) в Ni-Cr сплавах определяли методом количественного электролитического экстрагирования [3]. Эффективный размер частиц γ' -фазы D в сплавах оценивали рентгенографическим методом [4].

Термообработка образцов проводилась в трубчатой печи в атмосфере аргона. Заданная температура поддерживалась с точностью ± 5 К. После термической обработки для удаления окисленного поверхностного слоя листовые заготовки сплавов подвергались механической шлифовке с последующей электрополировкой на глубину 50 мкм.

Испытания на абразивный износ осуществлялись на установке У-32 [5] при возвратно-поступательном движении образца по закрепленному абразиву со средней скоростью 0,02 м/с. Вырезанный из листовой пластины образец ($12 \times 5 \times 0,3$ мм) приклеивался эпоксидным клеем к специальному держателю и закреплялся в установке У-32. В качестве абразивного материала применялась шлифовальная лента на матерчатой основе BOSH 320 с абразивными частицами из корунда ($\alpha-Al_2O_3$) размером ~ 50 мкм. Давление при испытаниях составляло 0,02 МПа. Интенсивность изнашивания I_g определялась по величине среднего весового износа образца после 35–42 метрового пробега по абразивной ленте. Абразивная лента менялась после каждых 3,5 метров пробега. Число измерений для каждого исследуемого режима термической обработки сплавов составляло 8–10 раз. Перед испытаниями рабочая поверхность образца обезжиривались спиртом и ацетоном и высушивались. Измерение величины износа образцов осуществлялось весовым методом с использованием аналитических весов АДВ-200М. Погрешность измерения массы образца составляла 0,05 мг.

Результаты исследования и их обсуждение. На рисунке 2 представлена характерная микрофотография поверхности трения закаленного образца сплава ХН77ТЮР после испытаний на изнашивание закрепленным абразивом (корунд).

Таблица 1 — Химические составы исследуемых Ni-Cr сплавов (масс. %)

Сплав	Ni	Cr	Al	Ti	W	Mo	Cu	Fe	B	C
ХН77ТЮР	осн.	20,69	0,85	2,67	—	—	0,01	0,58	0,01	0,06
ХН67ВМТЮ	осн.	18,00	1,48	2,49	4,61	4,66	—	1,40	0,005	0,06
ХН56ВМТЮ	осн.	19,95	2,31	1,22	9,96	4,47	—	0,86	0,008	0,06

Таблица 2 — Структурные параметры и твердость Ni-Cr сплавов

Сплав	Режим термической обработки	Параметры структуры				HV, МПа
		Размер зерна, мкм	$\Delta v/v$	Объемная доля γ' -фазы, %	Размер γ' -частиц, нм	
ХН77ТЮР	Закалка	120	—	—	—	1500
	Старение 1170 К, 1 ч	120	0,020	3,0	26	1800
	1120 К, 3 ч	120	0,020	8,5	24	2550
	1070 К, 10 ч	120	0,020	10,0	23	2700
	1020 К, 100 ч	120	0,020	13,5	32	3100
	1120 К, 100 ч	120	0,020	8,5	105	2500
ХН67ВМТЮ	Закалка	90	—	—	—	1700
	Старение 1220 К, 0,5 ч	90	~ 0	7,0	30	2200
	1170 К, 1 ч	90	~ 0	11,0	28	2600
	1120 К, 3 ч	90	~ 0	15,0	25	2900
	1070 К, 10 ч	90	~ 0	17,0	25	3050
	1020 К, 100 ч	90	~ 0	21,0	30	3400
	1170 К, 20 ч	90	~ 0	12,0	≈ 100	2700
ХН56ВМТЮ	Закалка	80	—	—	—	1950
	Старение 1220 К, 0,3 ч	80	-0,015	8	28	2650
	1170 К, 0,5 ч	80	-0,015	11,5	25	3100
	1120 К, 3 ч	80	-0,015	15,0	28	3300
	1170 К, 10 ч	80	-0,015	18,0	25	3550
	1020 К, 100 ч	80	-0,015	21,5	23	3850
	1170 К, 20 ч	80	-0,015	12,0	≈ 100	3050

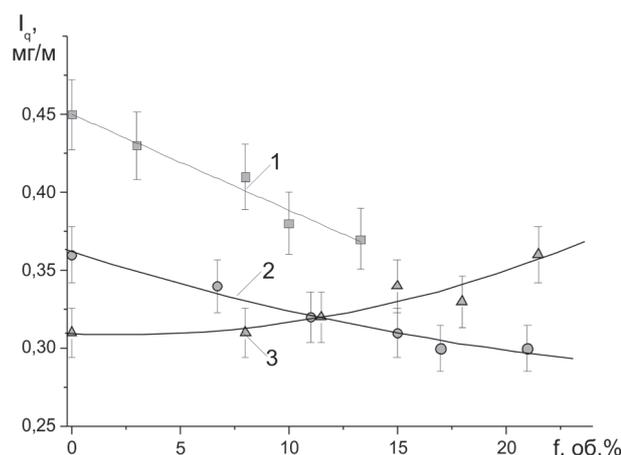
Можно видеть, что поверхность исследуемого образца имеет характерную микроструктуру с бороздами, образовавшимися в результате царапания поверхности частичками абразива. При переходе к другим исследуемым сплавам характер микроструктуры поверхностей трения испытываемых образцов существенно не изменяется. Результаты сравнительного исследования интенсивности абразивного изнашивания сплавов ХН77ТЮР, ХН67ВМТЮ и ХН56ВМТЮ представлены на рисунке 3 а. Из приведенных на рисунке 3 а данных следует, что в закаленном однофазном состоянии наиболее высокий износ имеет сплав ХН77ТЮР, характеризующийся сравнительно низкой твердостью (см. рисунок 3 б). Закаленные сплавы ХН67ВМТЮ и ХН56ВМТЮ отличаются более высокой стойкостью к абразивному изнашиванию. Для объяснения различной

износостойкости исследуемых сплавов в гомогенном (однофазном) состоянии необходимо учитывать, в первую очередь, отличия в их химическом составе. В частности, сплав ХН56ВМТЮ, по сравнению со сплавом ХН67ВМТЮ и, в особенности, сплавом ХН77ТЮР, характеризуется более высокой концентрацией атомов W, Mo и Al в твердом растворе. Увеличение содержания этих элементов приводит, с одной стороны, к увеличению энергии межатомных связей в твердом растворе и к эффективному твердорастворному упрочнению этих сплавов, а с другой — к понижению в них энергии дефектов упаковки (ЭДУ) [6]. Совместное действие указанных факторов приводит к повышению твердости Ni-Cr сплавов в гомогенном состоянии и увеличивает их сопротивление срезанию микрочастиц при трении по закаленному абразиву.

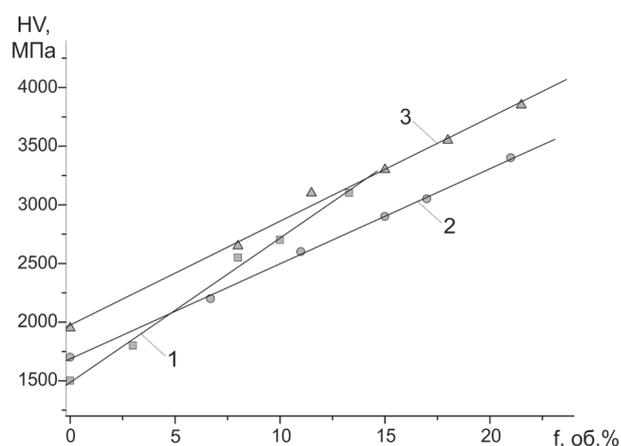


Рисунок 2 — Микроструктура поверхности трения закаленного образца сплава ХН77ТЮР после абразивного изнашивания ($p = 0,02$ МПа)

Рассматривая полученные данные по влиянию объемной доли выделившейся при старении сплавов γ -фазы на их абразивную стойкость можно отметить тенденцию возрастания сопротивления изнашиванию сплавов ХН77ТЮР и ХН67ВМТЮ по мере увеличения f . В этом отношении между износостойкостью и твердостью материалов существует определенная корреляция (см. рисунок 3 а, б). Из приведенного на рисунке 3 б графика можно видеть, что с увеличением объемной доли упрочняющих частиц регистрируется линейное возрастание их твердости. Из представленных графиков следует, что из всех исследованных сплавов у сплава ХН77ТЮР при выделении γ -частиц наблюдается наиболее интенсивное увеличение твердости и возрастание сопротивления абразивному износу (об этом можно судить по углу наклона графиков зависимости I_q и HV от f). В случае сплава ХН67ВМТЮ возрастание износостойкости и HV с ростом f не столь значительно, как у сплава ХН77ТЮР. Для понимания указанных особенностей поведения сплавов ХН77ТЮР и ХН67ВМТЮ необходимо иметь в виду, что в дисперсионно-твердеющих сплавах сопротивление микроразрушению формируется в результате одновременного действия нескольких упрочняющих факторов, к числу которых относятся частицы выделений, поля упругих межфазовых деформаций и деформационное упрочнение матричной фазы. Кроме того, на кинетику разрушения сплавов сильное влияние может оказывать скорость зарождения и распространения микротрещин в гетерогенных материалах, которая зависит от упруго-напряженного состояния фаз и межфазовых поверхностей и характеризуется величиной и знаком фактора $\Delta v/v$ [7]. В сплаве ХН77ТЮР относительно большой вклад в упрочнение сплава наряду с деформационным упрочнением вносят γ -частицы и поля упругих межфазовых деформаций [2, 7]. Комплексное действие этих факторов приводит к снижению подвижности дислокаций в сплаве ХН77ТЮР и заметному уменьшению величины абразивного износа при увеличении объемной доли f , присутствующих



а



б

Рисунок 3 — Зависимость интенсивности абразивного изнашивания (а) и твердости (б) Ni-Cr сплавов от объемной доли, содержащейся в них γ -фазы: 1 — сплав ХН77ТЮР; 2 — сплав ХН67ВМТЮ; 3 — сплав ХН56ВМТЮ

в сплаве γ -частиц. В сплаве ХН67ВМТЮ, где поля межфазовых деформаций отсутствуют, снижение износа и возрастание твердости по мере увеличения f выражено слабее.

В случае сплава ХН56ВМТЮ выделение частиц с отрицательной величиной фактора $\Delta v/v$ наряду с существенным увеличением твердости сплава (см. рисунок 3 б) приводит к резкому понижению его сопротивления контактному разрушению при абразивном изнашивании (см. рисунок 3 а). Для понимания природы указанного явления необходимо учитывать то, что выделение частиц с $\Delta v/v < 0$ приводит, с одной стороны, к увеличению сопротивления перемещению дислокаций в сплаве, а с другой — вызывает сильное снижение деформационного упрочнения сплава и облегчает зарождение микротрещин в гидростатически растянутых γ -частицах и на межфазовых поверхностях [7, 8]. Вследствие превалирующего влияния последнего фактора абразивная стойкость сплава ХН56ВМТЮ по мере увеличения объемной доли частиц γ -фазы заметно снижается (см. рисунок 3 а). Увеличение размера ча-

стиц γ' -фазы до $D \sim 100$ нм не приводит к существенному изменению износостойкости сплавов и регистрируемая у перестаренных сплавов величина абразивного износа приблизительно соответствует величине износа у сплавов, состаренных на размер частиц $D \sim 25$ нм. Подобная зависимость износостойкости Ni-Cr сплава от объемной доли выделившихся в нем при старении частиц с $\Delta v/v < 0$, зарегистрирована в случае триботехнических испытаний при трении без смазочного материала (адгезионное изнашивание) в работе [8].

Таким образом, использование дисперсионно-твердеющих сплавов с отрицательной величиной фактора несоответствия удельных атомных объемов матричной и выделившейся фаз в узлах трения нецелесообразно вследствие пониженного сопротивления таких сплавов абразивному и адгезионному изнашиванию.

Заключение. Исследовано влияние параметров структурного состояния типичных дисперсионно-твердеющих Ni-Cr сплавов на их абразивную стойкость. Установлено, что для сплавов ХН67ВМТЮ и ХН77ТЮР, характеризующихся нулевой и положительной величиной фактора объемного несоответствия ($\Delta v/v \geq 0$) наблюдается возрастание сопротивления изнашиванию по мере увеличения объемной доли частиц выделившейся фазы. В случае сплава ХН56ВМТЮ выделение частиц с $\Delta v/v < 0$ наряду с увеличением твердости приводит к снижению абразивной стойкости сплава. Указанное явление связано с ускоренным зарождением микротрещин в гидростатически растянутых γ' -частицах и на межфазовых поверхностях. Увеличение размера частиц

γ' -фазы от 25 до 100 нм не приводит к существенному изменению абразивной стойкости Ni-Cr сплавов. Сделано заключение, что использование в узлах трения дисперсионно-твердеющих сплавов с отрицательной величиной фактора несоответствия удельных атомных объемов матричной и выделившейся фаз нецелесообразно вследствие пониженного сопротивления таких сплавов абразивному и адгезионному изнашиванию.

Список литературы

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение. — 2003. — 576 с.
2. Питгарц, М.И. Роль субмикроскопической структуры в сопротивлении микропластической деформации дисперсионно-твердеющих сплавов на никель-хромовой основе. 1. Стадия упрочнения / М.И. Питгарц, В.А. Кукареко // Физика металлов и металловедение. — 1985. — Т. 60, № 4. — С. 798–809.
3. Физико-химические методы фазового анализа сталей и сплавов / под ред. Н.Ф. Лашко. — Минск: Металлургия, 1970. — 476 с.
4. Уманский, Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков, А.Н. Ивановю. — Минск: Металлургия, 1982. — 632 с.
5. Исследование износостойкости зубчатых колес с упругим соединением обода и ступицы / О.В. Берестнев [и др.] // Трение и износ. — 1980. — Т. 1, № 2. — С. 325–333.
6. Новиков, И.И. Дефекты кристаллической решетки металлов / И.И. Новиков. — Минск: Металлургия, 1968. — 188 с.
7. Кукареко, В.А. Влияние субмикроскопической структуры на циклическую долговечность никель-хромовых дисперсионно-твердеющих сплавов / В.А. Кукареко // Физика металлов и металловедение. — 2009. — Т. 107, № 1. — С. 101–110.
8. Кукареко, В.А. Субмикроскопическая структура Ni-Cr дисперсионно-твердеющих сплавов и их триботехнические свойства в условиях адгезионного взаимодействия / В.А. Кукареко // Трение и износ. — 2003. — Т. 24, № 2. — С. 192–202.

Kukareko V.A.

Abrasive wear resistance of precipitation hardened Ni-Cr alloys

Abrasive wear resistance of typical precipitation hardened Ni-Cr alloys with various volume fraction of γ' -precipitates and different mismatch factor $\Delta v/v$ of crystal lattices of matrix and precipitates was investigated. Based on the results obtained it was concluded that the application of the alloys with negative mismatch factor ($\Delta v/v < 0$) as friction joints is not suitable because of low abrasion and adhesive wear resistance of these alloys.

Keywords: precipitation hardening alloy, interphase deformations, abrasion wear

Поступила в редакцию 13.02.2014.