

# Об изнашивании металлических материалов, нагруженных трением скольжения и электрическим током высокой плотности

Алеутдинова М.И.<sup>1,2†</sup>, Фадин В.В.<sup>1</sup>, Колубаев А.В.<sup>1,3</sup>

†aleut@ispms.ru

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический 2/4, 634021, Томск

<sup>2</sup>Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, пр. Коммунистический 65, 636036, Северск

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина 30, 634050, Томск

Реализовано сухое скольжение металлов и сталей под влиянием электрического тока при контактной плотности более 100 А/см<sup>2</sup>. Показано, что материалы, содержащие большое количество химических элементов или кристаллических фаз в первичной структуре, формируют легкоразрушающийся слой вторичных структур. Это приводит к низкой износостойкости контакта в отличие от контакта металлов с более простой первичной структурой.

**Ключевые слова:** скользящий электроконтакт, релаксация напряжений, пятно контакта.

## About wear of metal materials loaded by sliding friction and by electric current of high density

M.I. Aleutdinova<sup>1,2</sup>, V.V. Fadin<sup>1</sup>, A.V. Kolubaev<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, pr. Akademicheskii 2/4, 634021, Tomsk

<sup>2</sup> Severskiy Technological Institute - branch State Budget Educational Institution of Higher Professional Education «National Research Nuclear University MPhI», pr. Kommunisticheskii 65, 636036 Seversk

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, pr. Lenina 30, 634050 Tomsk

Unlubricated sliding of metals and steels has been realized under influence of electric current at contact density higher 100 A/cm<sup>2</sup>. It is shown that materials containing a lot of chemical elements or crystal phases in initial structure form light deteriorated layer of friction induced structures. This lead to low wear resistance of contact compared with contact of simple metals.

**Keywords:** sliding electric contact, stress relaxation, contact spot.

### 1. Введение

Известно, что механический контакт реальных поверхностей двух тел происходит на пятнах контакта. Микрообъемы материала, прилегающие к пятнам контакта, испытывают динамическую деформацию в условиях трения скольжения. В момент механического взаимодействия контактирующие микрообъемы переходят в структурное состояние, природа которого неясна [1,2]. Возникающие механические и термические напряжения релаксируются упругой или пластической деформацией поверхностного слоя (ПС), что приводит, как правило, к его структурным изменениям. Иногда изменения структуры ПС вызывают его разрушение, что проявляется как износ. Высокая износостойкость достигается за счёт стабилизации структуры ПС [3] и увеличения его твердости различными методами поверхностной обработки – ионной имплантацией, химико-термической обработ-

кой и т.п. Но этот путь направлен на обеспечение упругого взаимодействия на пятнах контакта, что должно привести к трению без износа. Если режим трения случайно или специально станет более жестким, т.е. увеличится энергия внешнего воздействия на пятна контакта, то увеличится средняя температура поверхности трения и уменьшится твердость материала ПС. Тогда микрообъемы у пятен контакта будут деформироваться пластически, что обусловит появление износа. Увеличить температуру ПС и создать условия для неизбежной пластической деформации ПС можно путём нагревания узла трения, за счет искусственного уменьшения теплоотвода из зоны трения, или увеличения давления и скорости скольжения, или пропуска электрического тока через контакт и т.п. Для этих условий, когда велика вероятность проявления неустойчивости структуры ПС, возникает вопрос о целесообразности создания ПС, содержащего много химических элементов или высоко-

модульных фаз (т.е. сложную структуру), появляющихся в процессе поверхностной обработки. Удовлетворительный ответ на этот вопрос отсутствует. Можно принять во внимание, что легированный или многофазный материал обычно имеет высокую твердость и низкую пластичность [4] и должен быстрее разрушаться при некотором значении параметра внешнего воздействия, создающего пластическую деформацию. Отсюда следует, что ПС, содержащие сложную структуру, будут быстро разрушаться в условиях пластической деформации, которая реализуется в условиях нормального изнашивания. Материалы, имеющие сложную первичную структуру, должны формировать ПС со сложной структурой, не способной к пластической деформации. Этот вывод из известных представлений о пластичности [4] следует подтвердить экспериментально. Для этого можно нагрузить сухим трением скольжения металлы, имеющие простую и сложную первичные структуры. Сверхструктура, многофазность и твёрдый раствор могут служить как факторы, усложняющие первичную структуру. Сравнение металлов с простой или сложной первичной структурой по критерию износостойкости позволит судить о механической прочности их ПС во взаимосвязи со сложностью первичной структуры. Сильное внешнее воздействие непосредственно на пятна контакта при трении можно осуществить пропусканием электрического тока повышенной плотности (более 100 А/см<sup>2</sup>).

Целью настоящей работы является получение начального представления о взаимосвязи элементного и фазового состава первичной структуры и износостойкости металлических материалов при нагружении их трением и электрическим током высокой контактной плотности.

## 2. Материалы и методика исследований

Металлы и стали, служившие модельными материалами, получены по стандартным промышленным технологиям и представлены в таб.1. Быстрорежущая сталь Р6М5 закалена от 1220°С и отпущена при 200°С. Сталь Гадфильда 110Г13 (13%Mn) закалена от 1050°С. Сплав NiTi (Ni+49,5%Ti) из литого состояния был деформирован в экструдоре, после чего прокатан в ручьевых валах и в плоских валах. Триботехническое нагружение проведено в условиях скользящего электроконтакта с

Таблица 1

Свойства материала и контактная плотность тока, соответствующая началу катастрофического изнашивания

Состав \ свойство	НВ, МПа	$\lambda$ , Вт/м К	$j_c$ , А/см <sup>2</sup>
Сталь 3	1360	55	275
Медь М1	1100	400	330
Никель Н0	1700	70	240
Титан ВТ1-0	2910	15	370
NiTi	-	1	190
Сталь Р6М5	64 HRC	28	-
Сталь 110Г13	2430	11	180

переменным током без смазки при давлении 0,13 МПа, скорости скольжения 5 м/с на машине трения СМТ-1. Нагружение осуществлено по схеме “вал-колодка”, аналогично [5]. Контртелом служила сталь 45 (50 HRC). Путь трения составлял 9 км. Контактная плотность тока  $j$  определена как отношение силы тока  $i$  к номинальной площади  $A_a$  трибоконтакта. Интенсивность изнашивания  $I_n$  определена как отношение изменения высоты образца к пути трения.

## 3. Результаты эксперимента

Токсовая зависимость износостойкости отчасти отражает характер контактного взаимодействия. На рис.1а,б видно, что трение сталей 110Г13, Р6М5 и сплава NiTi происходит при относительно высоких значениях интенсивности изнашивания  $I_n$ . Кроме того, резкое увеличение интенсивности изнашивания  $I_n$ , которое является признаком катастрофического изнашивания, начинается при относительно низкой контактной плотности тока. Видно также, что сталь Р6М5 имеет самые высокие значения  $I_n$  при низкой плотности тока. Простые металлы имеют более высокую износостойкость и катастрофическое изнашивание начинается при более высокой плотности тока.

Структурные изменения материала ПС наблюдаются в виде слоя вторичных структур (ВС) (рис.2). Видно, что ВС сплава NiTi имеют неравномерную толщину (менее 30 мкм) и не покрывают полностью поверхность трения. ВС стали 110Г13 и стали Р6М5 имеют толщину более 30 мкм и высокую насыщенность несплошностями различной природы (поры, микротрещины и т.п.). Сталь 3 и титан формирует ВС с небольшой толщиной, высокой сплошностью и с равномерным расположением на поверхности трения. ВС меди имеют неравномерную толщину и несплошности. Такие же ВС формирует никель. Особенность этих ВС проявлена в их частичном внедрении в первичную структуру. Все материалы имеют цвета побежалости в пределах 3 мм от зоны трения.

Представленные вторичные структуры (рис.2) резко отличаются внешне от материала первичной структуры. Обычно ПС после трения имеет деформацию сотни и тысячи процентов, что указывает на мегапластическую деформацию, когда напряжения релаксируются путём фазовых превращений и аморфизации, вызывающих образование слоя ВС. В условиях трения ВС насыщаются кислородом. В результате образуется сложный фазовый состав ВС. Стали 110Г13, Р6М5 и сталь 3 формируют ВС, содержащие оксид FeO, ОЦК- и ГЦК-железо. ВС сплава TiNi состоят из ОЦК-фазы В2. В общем случае, износостойкость определяется свойствами ВС. Приблизительно одинаково низкая износостойкость стали 110Г13 и сплава TiNi реализуется при разных фазовых составах ВС. Но качественно одинаковый состав ВС сталей 3 и Р6М5 соответствует резкому различию износостойкости. ВС никеля содержат ГЦК-железо, Ni. оксид FeO. ВС титана состоят из титана и оксида TiO<sub>2</sub>. ВС меди содержат медь, ОЦК-железо и оксид FeO. Не-

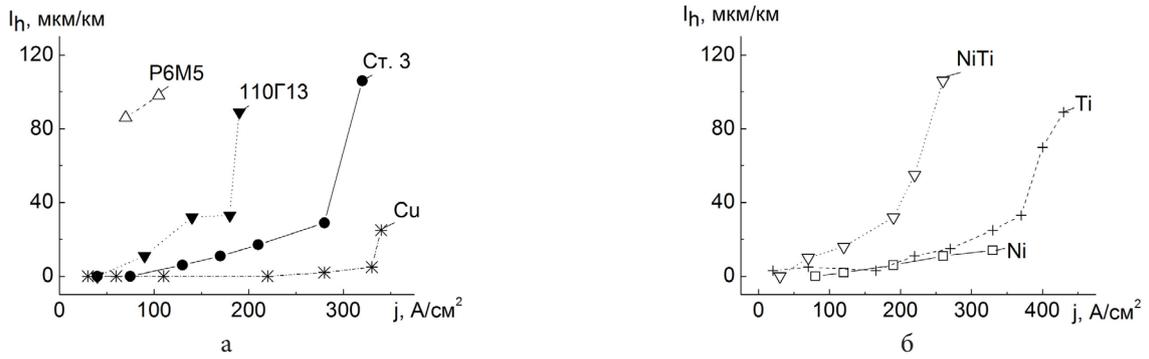


Рис. 1. Токовая зависимость интенсивности изнашивания металлических материалов.

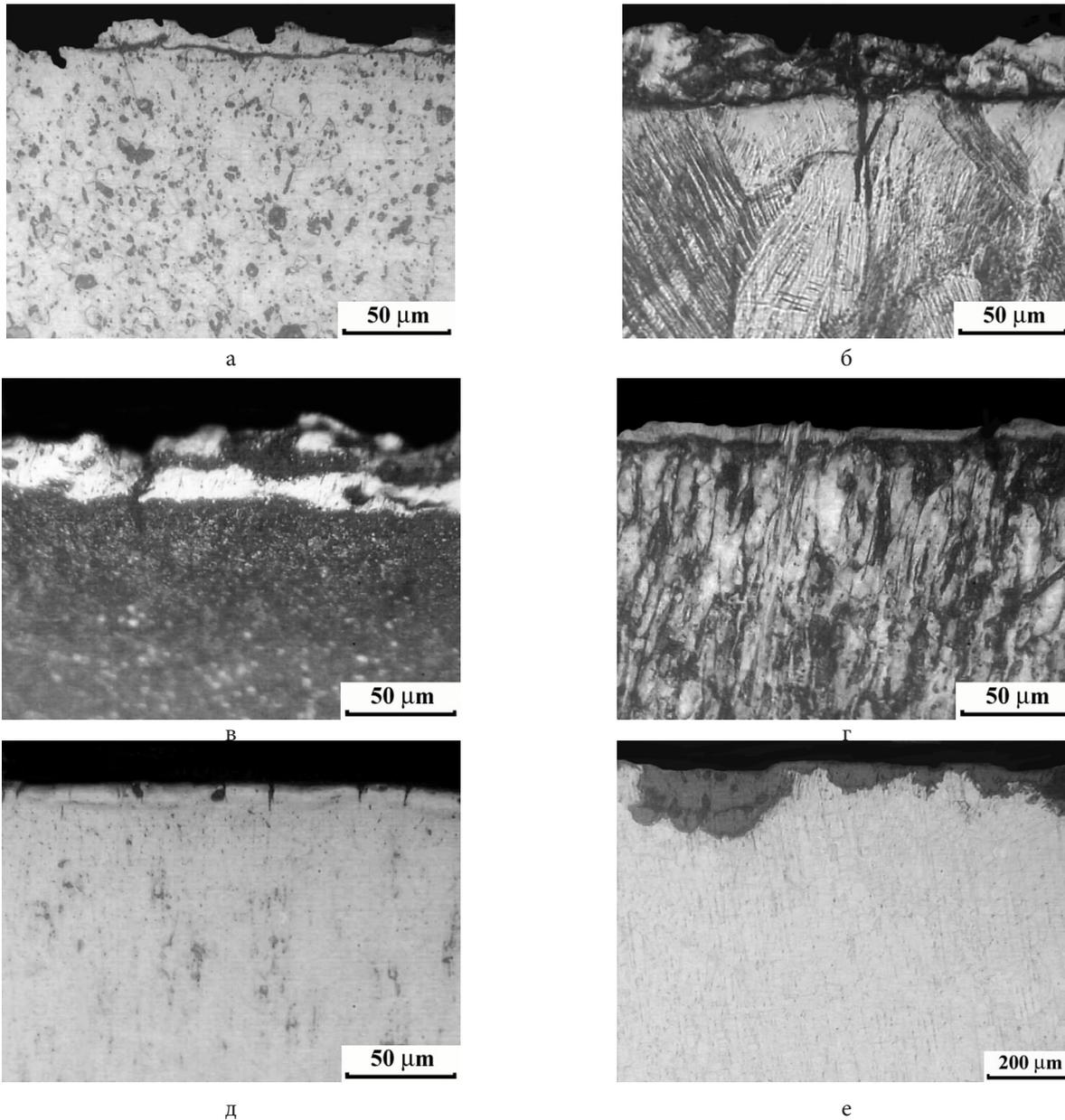


Рис. 2. Сечение поверхности трения и общий вид первичной структуры сплава NiTi (а), стали 110Г13 (б), стали P6M5 (в), стали 3 (г), титана (д) и меди (е)

смотря на различие в составе ВС этих металлов, они реализуют высокую износостойкость. Это указывает на то, что причина высокой износостойкости заложена не в фазовом составе ВС, но в запасе пластичности. Известно, что при мегапластической деформации ре-

лаксация напряжений в чистых металлах протекает заметно легче, чем в интерметаллидах [6]. Это позволяет предположить, что ВС чистых металлов легко релаксируют внешнее механическое воздействие за счёт пластической деформации даже в присутствии оксида FeO.

Сложная первичная структура должна проявляться также в микрообъемах, прилегающих к пятну контакта. Такой микрообъем за время динамического контакта испытывает импульсную мегапластическую деформацию и импульсный нагрев выше 1000°C. Сложная первичная структура имеет, как правило, низкую теплопроводность, что характерно для сплава NiTi, стали 110Г13 и Р6М5 (таб.1). Это обусловит слабый теплоотвод из зоны трения и приводит к образованию высокотемпературной зоны, уходящей на большую глубину. Эта нагретая зона имеет некоторую пластичность, но область её пластичности низка.

Нагружение трением такой зоны вызовет деформацию на разных структурных уровнях на большой глубине, что способствует формированию толстого слоя ВС с высокой концентрацией деформационных дефектов (рис.2б,в). Эти ВС не обладают высокой механической прочностью, что проявляется как низкая износостойкость (рис.1). Высокая склонность ВС к разрушению может проявиться в виде поверхности трения, покрытой вторичными структурами лишь частично (рис.2а).

Отсутствие факторов, усложняющих первичную структуру, приводит к более лёгкой релаксации напряжений, возникающих в микрообъемах пятна контакта. В этом случае разрушение микрообъема происходит при более высоких энергетических параметрах внешнего воздействия, т.е. при более высокой контактной плотности тока  $j_c$ , соответствующей началу катастрофического изнашивания. Относительно высокая теплопроводность стали 3 (таб.1) и простой состав первичной структуры уменьшает глубину теплового воздействия и приводит к формированию относительно тонкого и прочного слоя ВС, который хорошо удерживается на поверхности трения в виде сплошного покрытия (рис.2г). Это способствует реализации относительно высокой износостойкости контакта (рис.1). Вторичные структуры, возникающие в зоне трения меди, состоят в основном из оксида FeO, железа и меди [5]. Эти ВС шаржируют поверхность меди (рис.2г) и создают слой с высокой сдвиговой устойчивостью, приводящей к формированию контакта с относительно высокими характеристиками (рис.1). Можно утверждать, что металлы с простой первичной структурой (таб.1) формируют ВС с большим запасом пластичности.

Различия вторичных структур, рассмотренные во взаимосвязи с первичной структурой и характеристиками контакта, представлены исходя из реализации мегапластической деформации ПС без учёта электроэрозии. Это возможно так, как время жизни разряда  $t_d < 10^{-10}$  с. Такой результат можно получить, если записать  $R_z = at_d^2/2$  и найти  $t_d$  с помощью силы, действующей на электрон,  $F = m_e a = eU/R_z$ , где  $m_e$ ,  $e$ ,  $U$ ,  $R_z$  – масса и заряд электрона, контактное падение напряжения и параметр шероховатости соответственно. Разряд, способный осуществить электроэрозию, должен иметь длительность  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  с. Это значит, что разряды в контактном пространстве не имеют мощности, достаточной для реализации электроэрозии поверхности трения. Поэтому основное разрушение ПС осуществляется за счёт пластической деформации. Следует учесть, что при низкой плотно-

сти тока ( $j < 100$  А/см<sup>2</sup>) мегапластическая деформация и электроэрозия могут отсутствовать и реализуется простая пластическая деформация. Но даже в этих относительно мягких условиях нагружения характеристики контакта материалов со сложной первичной структурой оказались ниже, чем характеристики контакта простых металлов (рис.1). Это указывает на то, что материалы, имеющие сложный элементный и фазовый состав первичной структуры и поверхностного слоя будут реализовывать низкие характеристики контакта в условиях нормального изнашивания, когда микрообъемы пятен контакта неизбежно деформируются пластически, т.е. выполняется условие  $I_h > 0$ .

#### 4. Заключение

Нагружение металла трением и электрическим током приводит к структурным изменениям поверхностного слоя. Глубина проникновения структурных изменений увеличивается при низкой теплопроводности и при увеличении содержания элементов и фаз в первичной структуре металла. Вместе с этим уменьшается износостойкость материала, что обусловлено низкой релаксацией напряжений в деформируемых микрообъемах, прилегающих к пятнам контакта

*Работа выполнена по проекту III.23.2.4 программы III.20.2 фундаментальных исследований СО РАН и при финансовой поддержке гранта РФФИ №13-08-00076.*

#### Литература

1. L.I. Tushinsky, Yu.P. Poteryaev. Problems of materials science in tribology. Novosibirsk:NETI. (1991) 64 p. (in Russian). [Л.И. Тушинский, Ю.П. Потеряев. Проблемы материаловедения в трибологии. Новосибирск: НЭТИ. (1991) 64 с.]
2. Friction, wear and lubricant (tribology and tribotechnics)/ A.V.Chichinadze et al. – М.:Mashinostroenie. (2003) 576 p. (in Russian) [Трение, износ и смазка (трибология и триботехника). Чичинадзе А.В. и др.; Под общ. ред. А.В.Чичинадзе. М.:Машиностроение. (2003) 576 с.]
3. A.V. Bely, V.A. Kukareko, V.E. Rubtsov, A.V. Kolubaev Phis. Mesomech. 5 (1), 51 (2002). (in Russian) [А.В. Белый, В.А. Кукареко, В.Е. Рубцов, А.В. Колубаев. Физ. мезомех. 5 (1), 51 (2002).]
4. Physics bases of plastic deformation. Polukhin P.I. et al. Moscow:Metallurgy. (1982) 584 p. (in Russian) [Физические основы пластической деформации. Учебное пособие для вузов. Полухин П.И. и др. М.: Металлургия. (1982) 584 с.]
5. M.I. Aleutdinova, V.V. Fadin. Materialovedenie. 3, 31 (2013). (in Russian) [М.И. Алеутдинова, В.В. Фадин. Материаловедение. 3, 31 (2013).]
6. A.M. Gleser, L.S. Metlov. Solid state physics. 6, 1090 (2010). (in Russian) [А.М. Глезер, Л.С. Метлов. ФТТ. 6, 1090 (2010).]