

---

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФАЗ

УДК 669.265:546.56:546.623.33

**Е. А. Марковский, И. В. Олексенко, В. П. Гаврилюк,  
Д. Д. Панасенко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ПРОДУКТОВ МАССОПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВА СПЛАВА ТИПА С4CuS, МОДИФИЦИРОВАННОГО МИКРОПОРОШКАМИ TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> И AlN**

*Для более детального изучения особенностей состава продукта массопереноса вещества сплава типа С4CuS, модифицированного микропорошками TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и AlN, были проведены исследования сплавов на трение при различных нагрузках и с разной продолжительностью времени.*

**Ключевые слова:** сплав, структура, сульфид, модифицирование, микролегирование, износостойкость.

*Для більш детального вивчення особливостей складу продукту масопереносу речовини сплава типу С4CuS, який модифікований мікропорошками TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і AlN, були проведені дослідження сплавів на тертя при різних навантаженнях і з різною тривалістю часу.*

**Ключові слова:** сплав, структура, сульфід, модифікування, мікролегкування, зносостійкість.

*For a more detailed study of the mass transfer characteristics of the product-type alloy С4CuS material modified micropowders TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AlN were investigated alloys friction at different loads and different lengths of time.*

**Keywords:** alloy structure, sulfide, modification, microalloying, wear.

**В** работах [1-3] подробно рассмотрены результаты исследования влияния модифицирования микропорошками тугоплавких нитридов и оксидов на структуру, твердостные показатели, износостойкость и общий массоперенос между трущимися поверхностями пар трения сплавов на основе серого чугуна, легированного медью и серой (С4CuS), а также закаленной сталью 5.

С целью более детального изучения процесса массопереноса между поверхностями трения дополнительно были проведены исследования состояния рабочих поверхностей пар трения методами оптической металлографии и микроспектрального

## Взаимодействие фаз

анализа с помощью REMMA-102. Так, для пары трения С4CuS + TiN - Ст5<sub>зак</sub> подвергали анализу поверхность трения контртела из закаленной стали 5. Испытания пар трения проводили в среде масла при нагрузках 100 и 200 кг/см<sup>2</sup> при разной продолжительности трения – 10, 30, 60 и 180 мин. Исходное состояние поверхности трения контртела из закаленной стали 5 характеризуется наличием деформации поверхностных слоев металла в нескольких направлениях в результате шлифования на абразивной шкурке (рис. 1).



Рис. 1. Структура поверхности контртела стали марки Ст5<sub>зак</sub> до испытания на трение

Характер изменения состояния поверхностей трения при разных нагрузках в зависимости от времени испытания на трение одинаков. При большей нагрузке (200 кг/см<sup>2</sup>) время приработки поверхностей трения сокращается вдвое по сравнению с нагрузкой 100 кг/см<sup>2</sup> и составляет 30 мин. Это и характер (форма и размеры) фрагментов переноса вещества подтверждают фотографии поверхностей трения контртела при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup> и разном времени испытаний (рис. 2-5). Состояние поверхностей трения позволяет оценить их деформацию в зависимости от длительности трения.

Процесс приработки сопровождается как теснением тонких слоев металла поверхности трения (рис. 2, 3) по направлению трения, так и выглаживанием поверхности трения (рис. 4, 5). Процесс выглаживания (его также можно отнести к полировке) имеет место в связи с наличием в сульфидах конгломератов на основе марганца и железа, которые имеют достаточно высокую твердость и по структуре могут быть отнесены к микроабразивам. На рис. 5 показан пример крупного фрагмента переноса сульфидной частицы в виде ее среза толщиной не более 0,01 мкм.

На рис. 6 приведены экспериментальные данные по изменению содержания элементов переноса с поверхности трения литого сплава С4CuS + TiN при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>. Зафиксированный значительный перенос основных элементов, входящих в состав сульфидов в начальный период изнашивания, по-видимому, связан с локальными интенсивными деформациями в период приработки.

Царапающее теснение поверхности контртела в процесса трения с литым сплавом С4CuS + TiN связано с наличием в структуре сплава карбидной фазы, средняя твердость которой составляет ~ 850 кг/мм<sup>2</sup>, твердость сплава – ~ 520 НВ.



Рис. 2. Структура поверхности контртела стали марки Ст5<sub>зак</sub> после испытания на трение в паре с литым сплавом С4CuS + TiN при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>, время испытания 10 мин

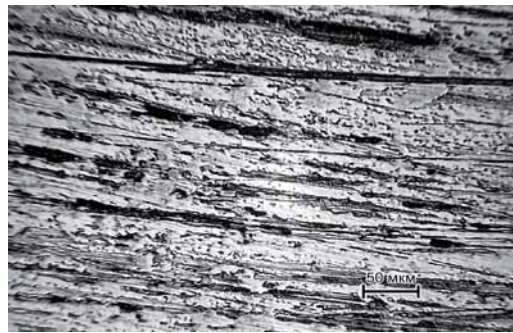


Рис. 3. Структура поверхности контртела стали марки Ст5<sub>зак</sub> после испытания на трение в паре с литым сплавом С4CuS + TiN при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>, время испытания 30 мин

## Взаимодействие фаз

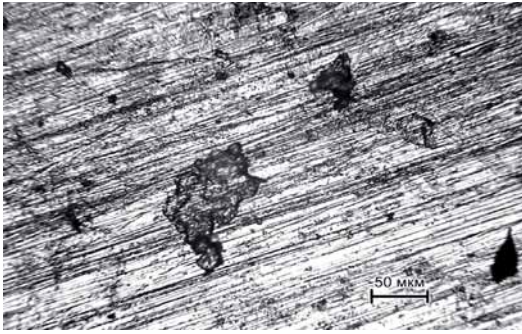


Рис. 4. Структура поверхности контртела стали марки Ст5<sub>зак</sub> после испытания на трение в паре с литым сплавом С4СuS + TiN при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>, время испытания 60 мин



Рис. 5. Структура поверхности контртела стали марки Ст5<sub>зак</sub> после испытания на трение в паре с литым сплавом С4СuS + TiN при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>, время испытания 180 мин

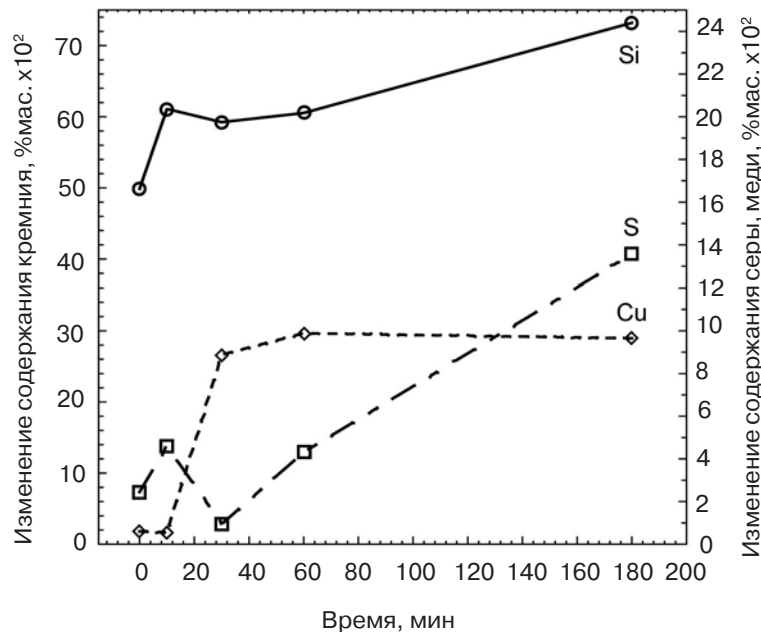


Рис. 6. Изменение содержания элементов в составе фрагментов переноса на изношенной поверхности контртела из стали марки Ст5<sub>зак</sub> в паре с литым сплавом С4СuS + TiN при испытании в масле и нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup> в зависимости от продолжительности испытаний

На рис. 7-9 приведены структуры поверхностей трения контртела из стали марки Ст5<sub>зак</sub> после трения в паре с отожженным сплавом С4СuS + TiN твердостью 250 НВ. Испытания пар трения проводили при нагрузке 100 кг/см<sup>2</sup>. В структуре отожженного сплава практически отсутствует карбидная фаза из-за ее распада, но в результате этого выделяется значительное количество мелкодисперсного графита.

По данным экспериментов, длительность приработки трущихся поверхностей увеличилась вдвое до 60 мин. Так как в структуре отсутствуют включения карбидов, то теснение продольных царапин в процессе трения происходит за счет отдельных фрагментов сульфидов.

## Взаимодействие фаз

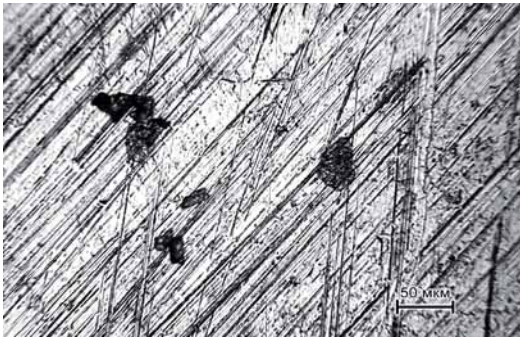


Рис. 7. Структура поверхности контртела стали марки Ст5<sub>зак</sub> после испытания на трение в паре с отожженным сплавом С4CuS + TiN при нагрузке 100 кг/см<sup>2</sup>, время испытания 10 мин

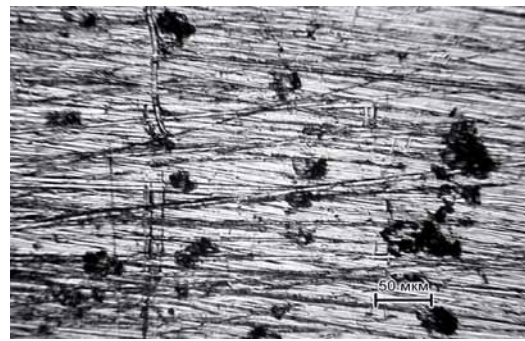


Рис. 8. Структура поверхности контртела стали марки Ст5<sub>зак</sub> после испытания на трение в паре с отожженным сплавом С4CuS + TiN при нагрузке 100 кг/см<sup>2</sup>, время испытания 60 мин

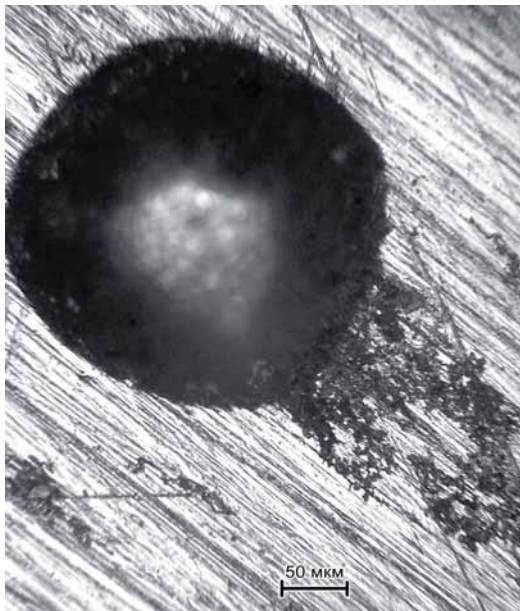


Рис. 9. Структура поверхности контртела стали марки Ст5<sub>зак</sub> после испытания на трение в паре с отожженным сплавом С4CuS + TiN при нагрузке 100 кг/см<sup>2</sup>, время испытания 180 мин

При нагрузке 100 кг/см<sup>2</sup> для всех испытаний фиксируется перенос фрагментов сульфидов. С увеличением продолжительности испытаний количество и размеры фрагментов переноса увеличиваются. При 180 мин на поверхности трения фиксируются целые поля переноса, в том числе, срезы сульфидной фазы, которая в структуре сплава имеет сферическую форму. Картину такого характера массопереноса, с точки зрения образования на поверхности трения участков плен из массы вещества антифрикционного износостойкого сплава С4CuS + TiN, подтверждают данные по переносу на поверхность контртела элементов, составляющих сульфидную фазу (рис. 10).

Более точный состав перенесенных фрагментов по точкам определил химический состав перенесенного фрагмента. Результаты приведены на рис. 11.

Полученные данные позволяют сделать заключение о том, что в процессе массопереноса на поверхность переходят фрагменты, составляющие часть или полный срез сульфидного включения в структуре антифрикционного сплава С4CuS + TiN, которые затем во время деформации трением размазываются по поверхности контртела, а также после определенного цикла деформирования выносятся из зоны трения с продуктами изнашивания.

В то же время на поверхность трения поступают новые фрагменты сульфида – твердой смазки, что приводит к активной защите трущихся поверхностей от металлического контакта.

Дополнительно было изучено состояние поверхностей трения для пар трения С4CuS + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Ст5<sub>зак</sub> и С4CuS + AlN - Ст5<sub>зак</sub>. В целом для изучения рельефа и наличия фрагментов переноса вещества износостойкого и антифрикционного материала были взяты пары трения, испытанные при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup> в среде машинного

## Взаимодействие фаз

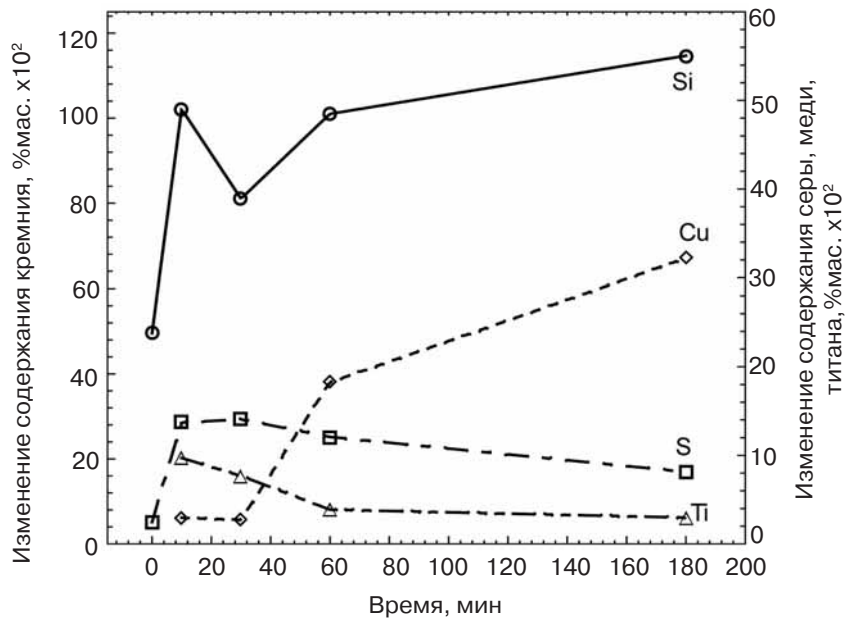


Рис. 10. Изменение содержания элементов в составе фрагментов переноса на изношенной поверхности контртела из стали марки Ст5<sub>зак</sub> в паре с отожженным сплавом СЧCuS + TiN при испытании в масле и нагрузке 100 кг/см<sup>2</sup> в зависимости от продолжительности испытаний (средняя по площади)

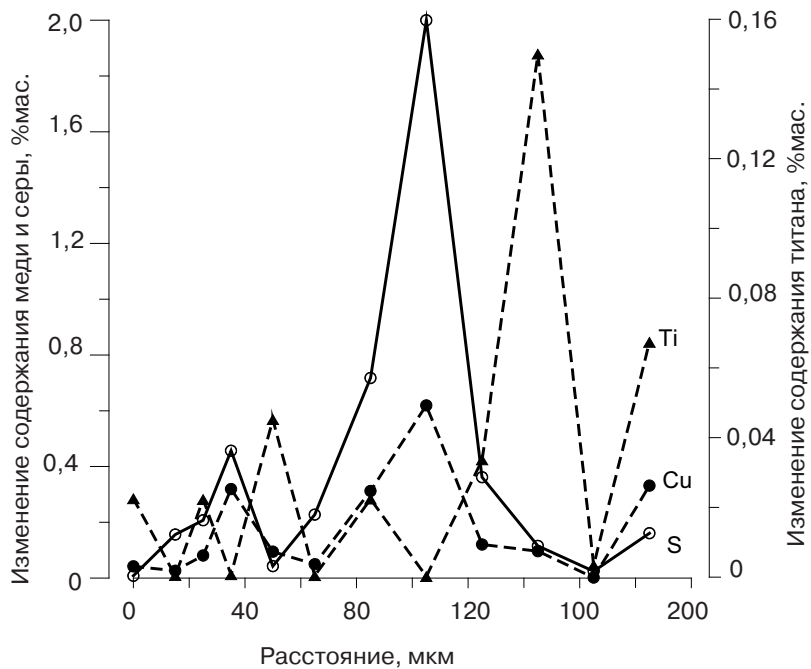


Рис. 11. Изменение содержания элементов по сечению фрагмента, перенесенного с поверхности трения отожженным сплавом СЧCuS + TiN на поверхность контртела из стали марки Ст5<sub>зак</sub>

## Взаимодействие фаз

масла в условиях граничного трения. Опытные износостойкие сплавы на основе базового материала С4CuS испытывали на внешнее трение в литом и отожженном состояниях.

На рис. 12-13 приведены структуры поверхностей трения литого сплава С4CuS + AlN. Тертая поверхность характеризуется наличием в ней как компактных сульфидных включений размером 50-25 мкм, так и тонких пленок сульфида в результате размазывания его в процессе деформирования сплава трением. Размеры участков пленок по площади сульфидной массы можно оценить как 20-100 мкм в случае частичной, так и полной приработки.

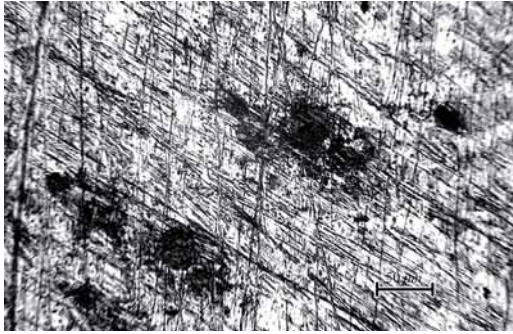


Рис. 12. Структура поверхности литого сплава С4CuS + AlN после испытания на трение в масле с контртелом из стали марки Ст5<sub>зак</sub> при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>, время испытания 9 ч

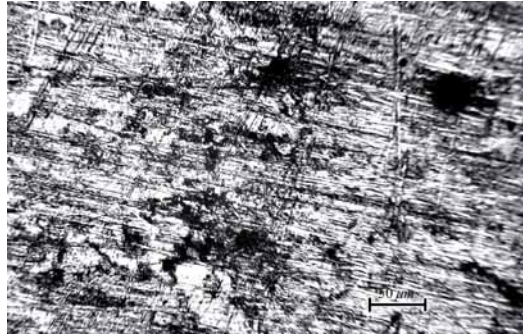


Рис. 13. Структура поверхности литого сплава С4CuS + AlN после испытания на трение в масле с контртелом из стали марки Ст5<sub>зак</sub> при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>, время испытания 9 ч

Данные структур поверхностей трения сплава С4CuS + AlN свидетельствуют об адгезии вещества сульфидных включений на деформированной поверхности, а также в случае полной приработки образования на поверхности износостойкого сплава защитных слоев, общую площадь которых можно оценить до 30 % от номинальной поверхности трения.

На рис. 14-16 приведены структуры поверхностей трения контртела из стали марки Ст5<sub>зак</sub>. На поверхности трения с недостаточной приработкой наблюдается фиксация незначительных фрагментов сульфидной массы (рис. 14). При полной приработке (рис. 15) на поверхности трения кроме отдельных фрагментов следует отметить

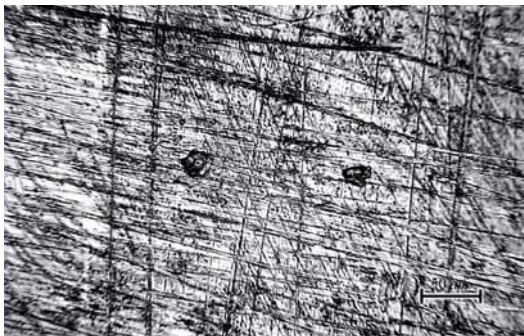


Рис. 14. Структура поверхности контртела из стали марки Ст5<sub>зак</sub> после испытания на трение в масле со сплавом С4CuS + AlN при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>, время испытания 9 ч

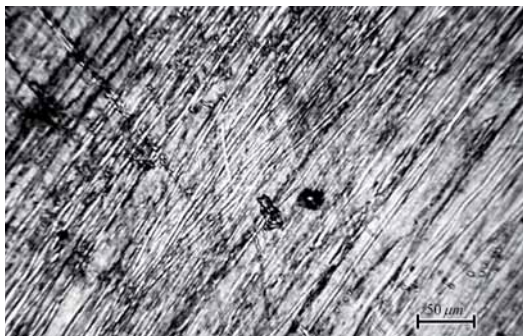


Рис. 15. Структура поверхности контртела из стали марки Ст5<sub>зак</sub> после испытания на трение в масле со сплавом С4CuS + AlN при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>, время испытания 9 ч

## Взаимодействие фаз

перенос вещества сульфидной массы по канавкам деформации поверхности. В ряде участков поверхности трения переносятся пленки сульфидной массы (рис. 16) в результате размазывания по поверхности трения значительного фрагмента сульфида.

В случае пары трения с отожженным сплавом  $\text{С4CuS} + \text{AlN}$  процессы массопереноса между поверхностями пары трения значительно больше, чем по сравнению с литым сплавом (рис. 17). Это связано с большей пластичностью металлической матрицы, отсутствием карбидного каркаса и т. д. На структуре четко фиксируются на-

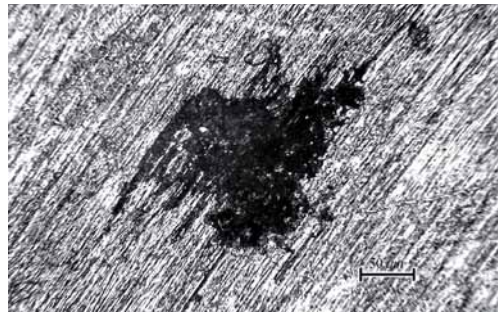


Рис. 16. Структура поверхности контртела из стали марки  $\text{Ст5}_{\text{зак}}$  после испытания на трение в масле со сплавом  $\text{С4CuS} + \text{AlN}$  при нагрузке  $200 \text{ кг/см}^2$ , время испытания 9 ч

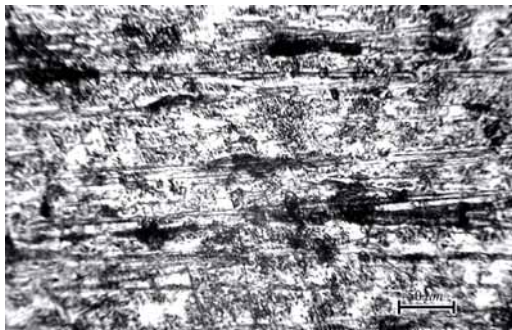


Рис. 17. Структура поверхности отожженного сплава  $\text{С4CuS} + \text{AlN}$  после трения в масле с контртелом из стали марки  $\text{Ст5}_{\text{зак}}$  при нагрузке  $200 \text{ кг/см}^2$ , время испытания 9 ч

правление деформации поверхностей трения и наличие размазанных участков достаточно большой длины –  $50 + 300 \text{ мкм}$ . Такой интенсивный процесс размазывания вещества фаз с свойствами твердых смазок приводит, в свою очередь, к значительно большему массопереносу вещества на поверхности контртела (рис. 18).

Данные микроспектрального анализа по изменению микрохимического состава рабочих поверхностей пары трения по площадям до и после изнашивания подтверждают наличие интенсивных процессов массопереноса, в том числе прямого и обратного (рис. 19).

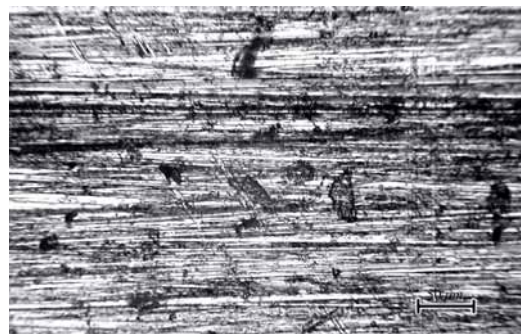
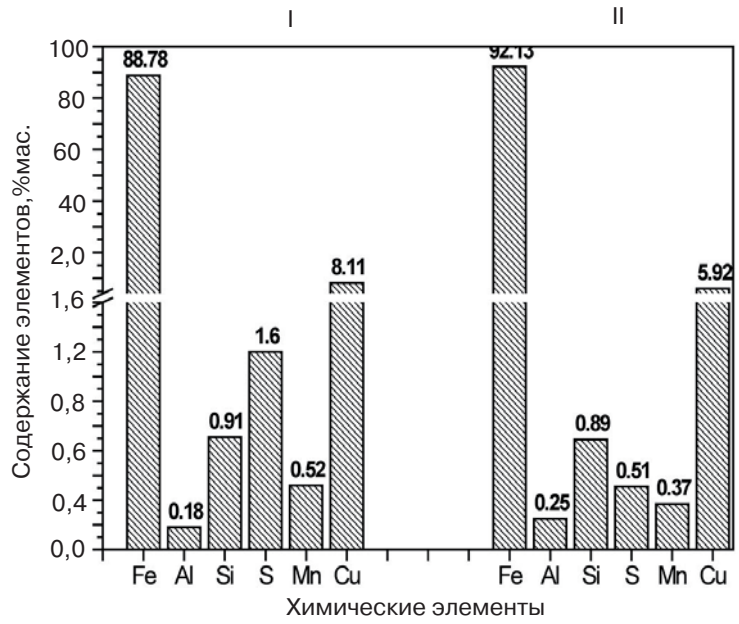
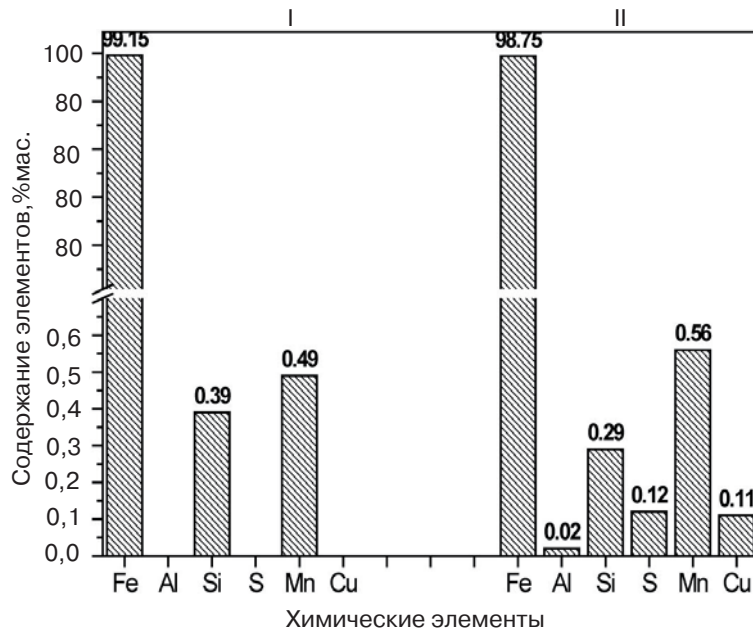


Рис. 18. Структура поверхности контртела из стали марки  $\text{Ст5}_{\text{зак}}$  после трения в масле с отожженным сплавом  $\text{С4CuS} + \text{AlN}$  при нагрузке  $200 \text{ кг/см}^2$ , время испытания 9 ч



а



б

Рис. 19. Микрохимический анализ поверхностей трения до (I) и после (II) изнашивания при граничном трении и нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>: а – отожженный сплав С4СuS + AlN; б – контроло Ст5<sub>зак</sub>



## Взаимодействие фаз

Сопоставление данных по поверхности трения сплава  $\text{С4CuS} + \text{AlN}_{\text{отож}}$  с литым свидетельствует о том, что в результате более интенсивного износа отожженного сплава в его поверхности количество легирующих элементов (Mn, Cu, S, Al) значительно меньше, чем у литого. Это, в свою очередь, приводит к снижению количества этих элементов на поверхности контртела.

Литой антифрикционный сплав  $\text{С4CuS} + \text{Al}_2\text{O}_3$  в структуре содержит сферические включения сульфида размером от 20 до 350 мкм (рис. 20). В процессе трения

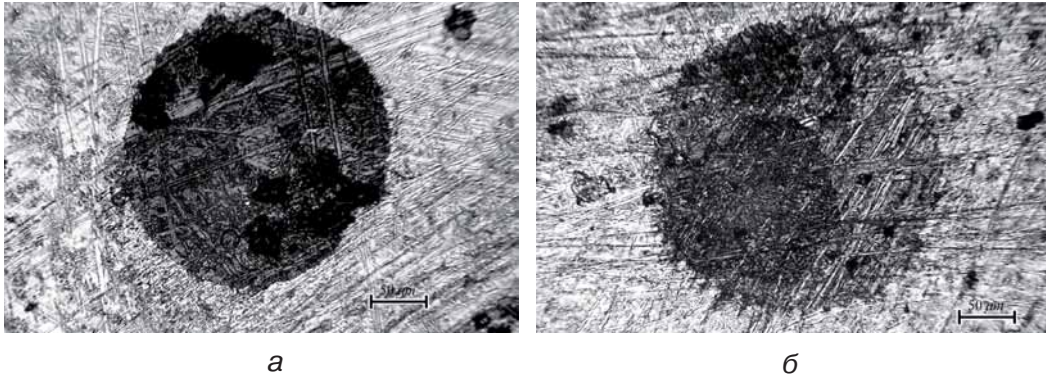


Рис. 20. Структура поверхности сплава  $\text{С4CuS} + \text{Al}_2\text{O}_3$  после испытания на трение в масле с контртелом из стали марки  $\text{Ст5}_{\text{зак}}$  при нагрузке  $200 \text{ кг/см}^2$ , время испытания 3 ч

с контртелом из  $\text{Ст5}_{\text{зак}}$  при неполной приработке поверхностей пары трения исходная структура сульфида подвергается незначительному разрушению и малым выносом вещества (сульфида) на металлическую матрицу сплава. При уплотнении контакта между поверхностями трения в процессе приработки (рис. 21) поверхность сульфидного включения подвергается разрушению, которое сопровождается выносом массы сульфида на металлическую поверхность с заполнением углублений деформации.

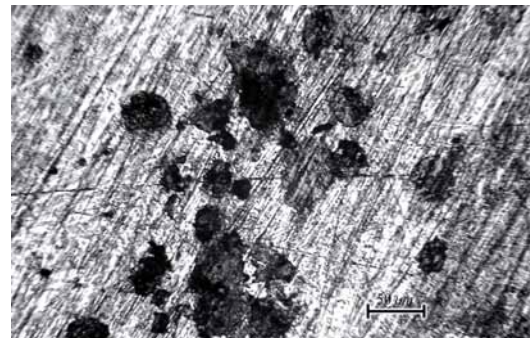


Рис. 21. Структура поверхности сплава  $\text{С4CuS} + \text{Al}_2\text{O}_3$  после испытания на трение в масле с контртелом из стали марки  $\text{Ст5}_{\text{зак}}$  при нагрузке  $200 \text{ кг/см}^2$ , время испытания 3 ч

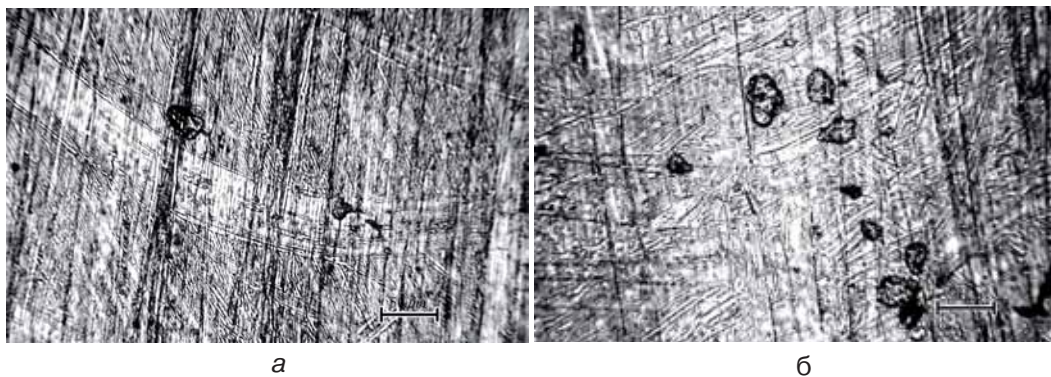


Рис. 22. Структура поверхности контртелом из стали марки  $\text{Ст5}_{\text{зак}}$  после испытания на трение в масле со сплавом  $\text{С4CuS} + \text{Al}_2\text{O}_3$  при нагрузке  $200 \text{ кг/см}^2$ , время испытания 3 ч

## Взаимодействие фаз

Поверхность трения в зависимости от степени приработки стального закаленного образца содержит фрагменты перенесенного вещества сульфида при заполнении сульфидом шероховатости поверхности. Толщину перенесенного сульфида оцениваем в пределах 0,01-0,05 мкм.

Отожженный сплав  $\text{С4CuS} + \text{Al}_2\text{O}_3$  имеет несколько большую твердость, чем отожженный  $\text{С4CuS} + \text{AlN}$ , и содержит частично сохранившийся в структуре первичный карбид. Поэтому поверхность трения этого сплава меньше деформирована и отсутствуют большие участки размазанного вещества сульфидов (рис. 23).

В то же время поверхность контртела  $\text{Ст5}_{\text{зак}}$  имеет значительную деформацию в виде канавок царапания (рис. 24), причем интенсивность этой деформации значительно больше, чем в случае контртела с литым сплавом.

Изменение микрохимического состава рабочих поверхностей до и после изнашивания показало, что состав отожженного сплава  $\text{С4CuS} + \text{Al}_2\text{O}_3$  относительно мало изменился под воздействием деформации и износа, а также при внешнем трении (рис. 25). Однако, отмечается повышение (незначительное) таких элементов, как алюминий, сера, марганец и медь. Можно считать, что содержание алюминия повышается из-за накопления (избирательный износ) в структуре  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , серы и меди за счет высокой адгезии сульфида типа  $\text{Cu}_x\text{S}_y$  на металлической составляющей структуры сплава. Высокое содержание алюминия на поверхности контртела свидетельствует о шаржировании  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в поверхность стали марки  $\text{Ст5}_{\text{зак}}$  в процессе микрорезания и теснения ее повышенным содержанием оксидов сплава.

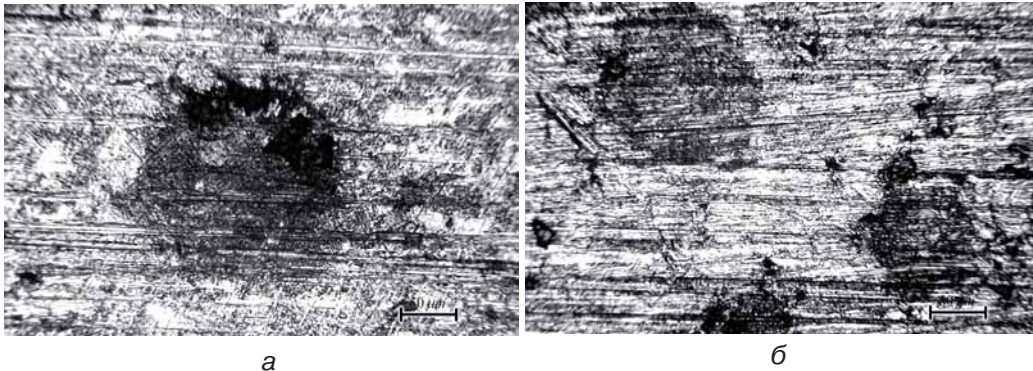


Рис. 23. Структура поверхности отожженного сплава  $\text{С4CuS} + \text{Al}_2\text{O}_3$  после испытания на трение в масле с контртелом из стали марки  $\text{Ст5}_{\text{зак}}$  при нагрузке  $200 \text{ кг/см}^2$ , время испытания 9 ч

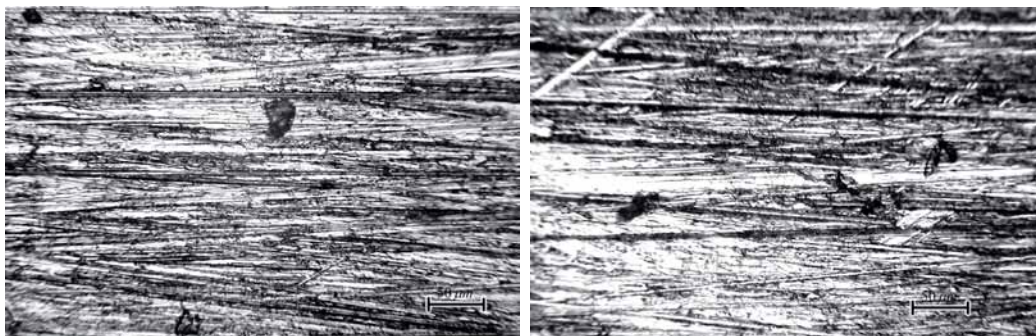
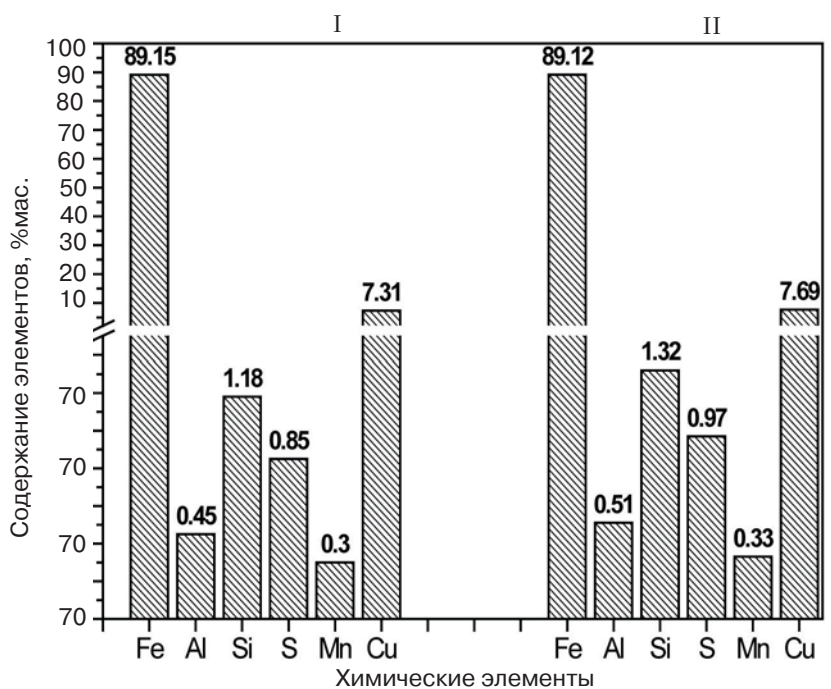
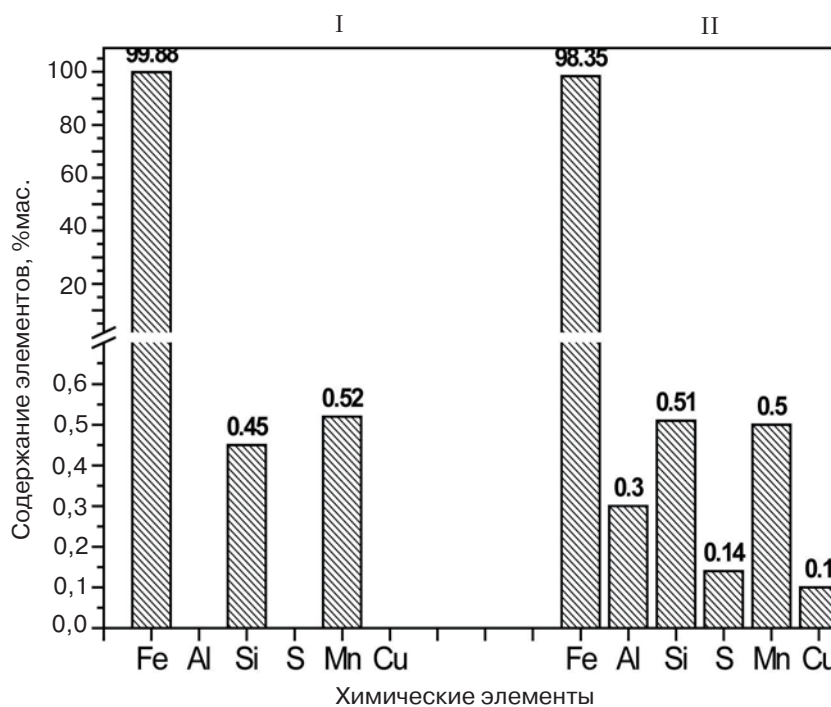


Рис. 24. Структура поверхности контртела из стали марки  $\text{Ст5}_{\text{зак}}$  после испытания на трение в масле с отожженным сплавом  $\text{С4CuS} + \text{Al}_2\text{O}_3$  при нагрузке  $200 \text{ кг/см}^2$ , время испытания 9 ч

## Взаимодействие фаз



а



б

Рис. 25. Микрохимический анализ поверхностей трения до (I) и после (II) изнашивания при граничном трении и нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>: а – отожженный сплав С4CuS + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; б – контролено Ст5<sub>зак</sub>

## Взаимодействие фаз

Результаты этих исследований позволяют однозначно утверждать, что наличие самостоятельной компактной фазы сульфида в структуре сплава на основе чугуна, легированного медью и серой (С4CuS), обеспечивает:

- Процесс приработки поверхностей пары трения с минимальной интенсивностью изнашивания.
- Защиту от механического контакта поверхностей трения за счет образования слоев сульфида со свойствами твердой смазки по механизму массопереноса, в основном, адгезионной природы.
- Влияние модифицирования микропорошками на структуру сплавов в литом и отожженном состояниях в результате их воздействия на химический состав, прежде всего, сульфидной фазы, в результате чего обеспечивается максимальная износостойкость при высоких контактных нагрузках на поверхностях трения.
- Влияние модифицирования микропорошками на химический состав фаз сплавов в виде микрочастиц, которые играют определенную роль в процессе деформирования поверхностных слоев металла, осуществляя микропроцессы шлифования, полирования, размазывания фрагментных сульфидных участков массопереноса.
- Применение порошка TiN в качестве модификатора, при этом в значительном диапазоне расширяется возможность получения максимальной фазности структуры сплавов на основе базового С4CuS за счет графитизирующей способности титана, что позволяет дополнительно получить в структуре сплава еще и графит.



### Список литературы

1. *Олексенко И. В., Марковский Е. А., Гаврилюк В. П.* Влияние модифицирования микропорошком TiN на особенности структуры сплавов типа С4CuS и триботехнические свойства // *Процессы литья.* – 2012. – № 1. – С. 41-49.
2. *Олексенко И. В.* Влияние дополнительного легирования сплава на основе чугуна с медью и серой (С4CuS) на структуру, износ и массоперенос при внешнем трении // *Там же.* – 2012. – № 2. – С. 58-67.
3. *Олексенко И. В., Марковский Е. А., Гаврилюк В. П.* Влияние микропорошков Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и AlN, как модификаторов, на структуру и механические свойства серого чугуна, легированного медью и серой // *Там же.* – 2013. – № 4. – С. 3-6.

Поступила 28.05.2013