

УДК 669.112:669.15-196:546.56:546.22

**В. П. Гаврилюк, И. В. Олексенко, Е. А. Марковский,  
Н. А. Качко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ПРИСАДОК МИКРОПОРОШКОВ TiN НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЧУГУНА, ЛЕГИРОВАННОГО МЕДЬЮ И СЕРОЙ (СЧCuS)**

*Изучено влияние модифицирования микропорошком TiN сплава системы СЧCuS на структуру и износостойкость в условиях граничного трения. Модифицирование оказывает воздействие на распределение элементов, входящих в состав сплава между фазами структуры, что также зависит от структурного состояния: литого, закаленного и отожженного. Присадка в сплав микропорошков TiN значительно повышает износостойкость сплава СЧCuS, а также контртела и пары трения в целом за счет повышения смазочных свойств сульфидной и графитной фаз структуры сплавов.*

**Ключевые слова:** структура, фазовый состав, износостойкость, внешнее трение, массоперенос при трении.

*Вивчено вплив модифікування мікропорошком TiN сплаву системи СЧCuS на структуру та зносостійкість в умовах граничного тертя. Модифікування впливає на розподіл елементів, що входять до складу сплаву між фазами структури, що також залежить від структурного стану: литого, загартованого та відпаленого. Присадка в сплав мікропорошків TiN значно підвищує зносостійкість сплаву СЧCuS, а також контртіла і пари тертя в цілому за рахунок підвищення змащувальних якостей сульфідної та графітної фаз структури сплавів.*

**Ключові слова:** структура, фазовий склад, зносостійкість, зовнішнє тертя, масоперенос при терті.

*Influence of modification with mycropowder TiN of gray iron – CuS system alloy on the structure and wear resistance in condition of utmost friction. Modification influence on distribution of elements that compose alloy between structure`s phases and that also hangs on state of structure: cast, quenched and roasted. Adding to the alloy of TiN mycropowders increase greatly the wear resistance of gray iron – CuS alloy, also riders and contacting pair in general dye to increasing of lubricating property of sulphur and graphite phases of alloys structure.*

**Keywords:** structure, phase composition, wearlessness, external frictions, mass transfer et friction.

Установлено, что применение нанопорошков в качестве модификаторов позволяет повысить физико-механические свойства чугуна литья. Так, в работах [1, 2] применение порошков  $Al_2O_3$ , SiC, BN для модифицирования легированных чугунов позволило увеличить механические свойства чугунных изделий на 10-20 %.

Проведены исследования по влиянию модифицирования износостойких сплавов типа СЧCuS микропорошками нитрида титана на особенности их структуры и износостойкость пар трения с участием опытных сплавов.

## Новые литые материалы

В качестве микропорошков были взяты порошки TiN со средним размером частицы от 0,05 до 0,5 мкм. После выплавки сплавов при добавлении порошков TiN с массовой долей 0,1 % из полученных сплавов типа СЧCuS+TiN были изготовлены образцы для металлографического анализа, испытания на износ, определения массопереноса между поверхностями трения в литом состоянии, после закалки и отжига. Испытания на износ проводили по схеме торцевого и граничного трения.

В табл. 1 приведен общий химический состав опытного сплава, твердость в зависимости от структурного состояния литых сплавов – в табл. 2, а структура литого сплава – на рис. 1.

**Таблица 1. Химический состав опытного сплава**

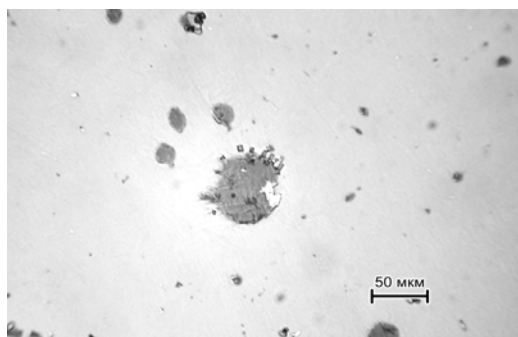
Сплав	Химический состав, массовая доля, %							примечание
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	
СЧCuS+TiN	3,29	0,35	0,25	0,05	0,90	0,15	5,17	микроспектральный анализ
		1,46	0,70	-	0,42	0,13	-	по данным химической лаборатории

**Таблица 2. Твердость опытного сплава в различном структурном состоянии**

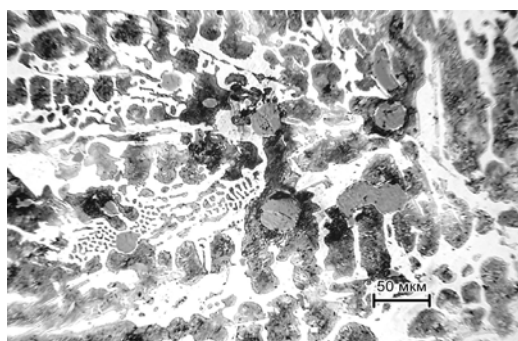
Сплав	Твердость					
	литой		закаленный		отожженный	
	HR <sub>c</sub>	HB	HR <sub>c</sub>	HB	HR <sub>c</sub>	HB
СЧCuS+TiN	52,0	515	56,0	578	23,3	250

Сплав СЧCuS+TiN в литом состоянии практически имеет ту же структуру, что и без модифицирования TiN. Основа структуры – половинчатый чугун с карбидной фазой в трооститной матрице, сульфидные включения имеют компактную форму, сферичность которой частично нарушена из-за выделений скоплений частиц TiN (рис. 1, а). Твердость сплава достаточно велика – 515 HB.

Структура сплава в закаленном состоянии представлена на рис. 2. Структура сплавов СЧCuS+TiN претерпела значительную перестройку по отношению к литой. В результате высокого нагрева под закалку (900 °С) карбид распался с выделением хлопьевидного графита. Основой матрицы стал мартенсит с высокой твердостью (табл. 3). Включения графита расположены на небольших участках феррита. Твердость сплава 578 HB. С явными структурными изменениями одновременно происходит существенное изменение химического состава фаз (табл. 4). Сплав на основе

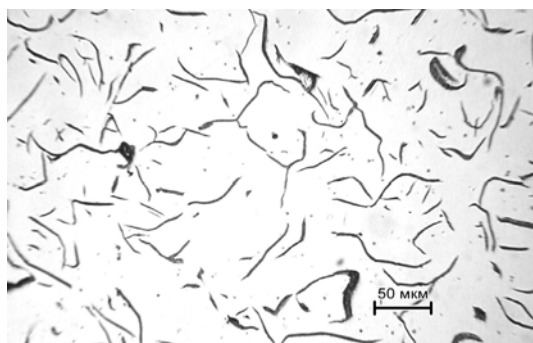


а

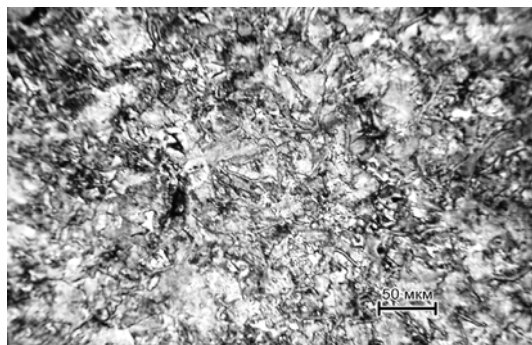


б

Рис. 1. Структура сплава СЧCuS+TiN в литом состоянии: а – нетравленная; б - травленная



а



б

Рис. 2. Структура сплава СЧ+TiN в литом состоянии: а – нетравленная; б - травленная

чугуна после закалки имеет мартенсито-трооститную матрицу с высокой твердостью – 495 НВ.

Кроме этого увеличилось содержание титана в матрице (по сравнению с литым состоянием).

Отжиг сплава СЧCuS+TiN привел к полному распаду карбидной фазы и образованию значительного количества графита (рис. 3) довольно компактной формы, в то же время сульфидные включения сфероидальной формы несколько увеличились. Матрица сплава – перлит. Твердость сплава – 250 НВ. Произошло также некоторое изменение состава сульфида, в нем увеличилась массовая доля меди (табл. 4).

Данные по износу пар трения приведены на рис. 4. Сравнение износостойкости пар трения со сплавами различного структурного состояния показало, что при всех нагрузках большей износостойкостью обладают пары, в контакте трения которых работает литой сплав.

**Таблица 3. Микротвердость фаз сплавов, легированных порошком TiN в различном структурном состоянии**

Фаза	Микротвердость, кг/мм <sup>2</sup>		
	литой	закаленный	отожженный
<b>сплав СЧCuS + TiN</b>			
Матрица перлит	410 троостит	-	250 перлит
Матрица мартенсит	-	950 мартенсит	-
Карбид	836	-	-
Сульфид	235	360	225
Графито-феррит	-	~ 90	100

Износостойкость пары трения со сплавом СЧCuS+TiN в различных структурных состояниях с увеличением нагрузки уменьшается и стабилизируется, причем, интенсивность изнашивания составляющих пару трения практически сравнивается. Однако, характерно, что интенсивность изнашивания пары трения незначительно увеличивается от литого состояния к закаленному и отожженному. Для этой пары трения следует отметить благоприятное действие модифицирования TiN как фактора, положительно влияющего на структуру во всех состояниях.

Применение порошков нитрида титана для повышения износостойкости как антифрикционных сплавов, так и пары трения в целом, вполне целесообразно, в том числе и для трения в условиях больших нагрузок.

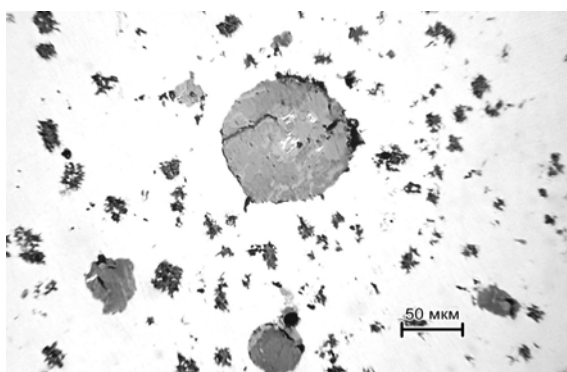
Модифицирование серого чугуна также повышает как износостойкость сплава,

так и пары трения. Однако, как для литого сплава, так и для закаленного, повышение нагрузки дает экстремальный эффект – минимальный износ пары трения при нагрузке 150 кг/см<sup>2</sup>. В то же время интенсивность изнашивания с литым сплавом в 5 раз меньше, чем с закаленным. Если уменьшение износа пары трения при нагрузке 150 кг/см<sup>2</sup> можно связать с положительным смазочным эффектом графита в структуре сплава на базе чугуна, то значительное увеличение интенсивности изнашивания при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup> свидетельствует о плохой адгезии графита к поверхности контртела, в результате чего имеет место падение износостойкости пары трения.

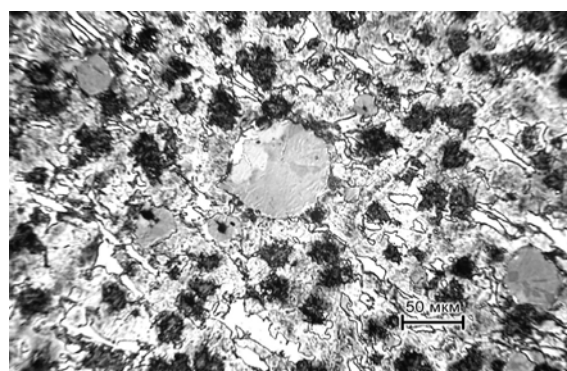
Процессы нормального (минимального) изнашивания пары трения при отсутствии микрорезания поверхностей и схватывания (микрохолодная сварка) полностью предопределяются процессами массопереноса на молекулярном и атомном уровнях.

Изменение состава сплавов на поверхностях трения пар определяет массоперенос, который формирует структуру поверхностных слоев металла по разнице химического состава поверхностей трения до и после изнашивания. Результаты этих исследований представлены на рис. 5-7.

Для пары трения сплав СЧCuS+TiN-Ст<sup>5</sup><sub>зак</sub> независимо от структурного строения



а

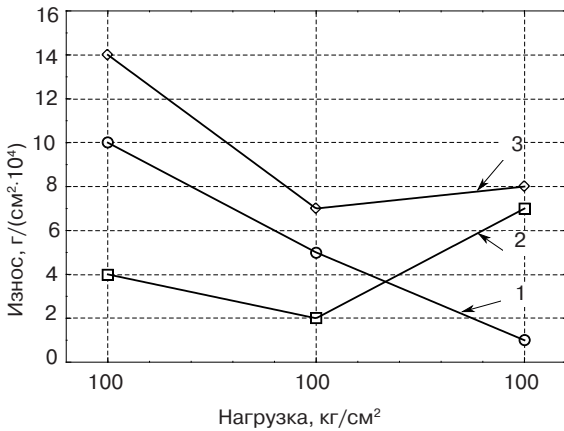


б

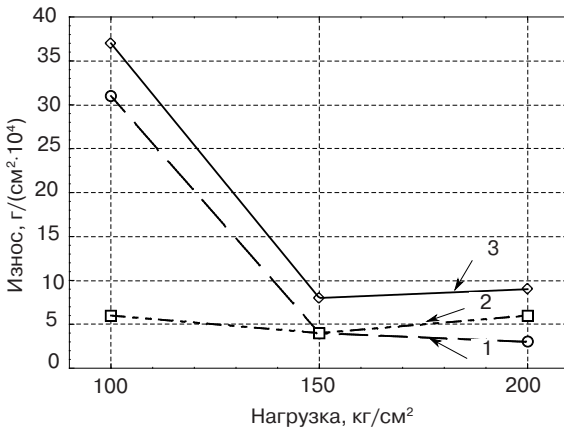
Рис. 3. Структура сплава СЧCuS+TiN после отжига: а – нетравленная; б – травленная

**Таблица 4. Микрхимический анализ фаз сплава СЧCuS с TiN**

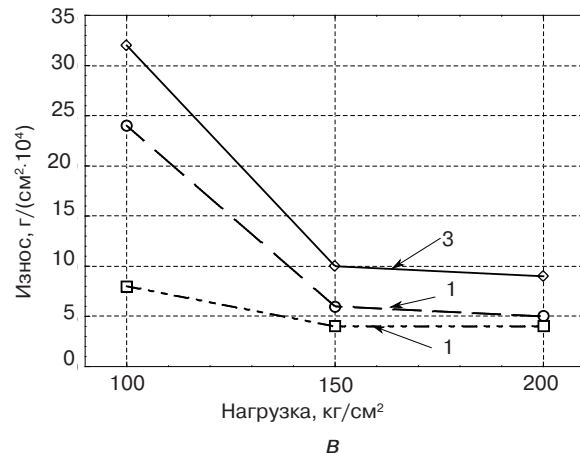
Элемент	Химический состав, массовая доля, %							
	литой			закаленный			отожженный	
	карбид	матрица	сульфид	матрица белая	матрица серая	сульфид	матрица	сульфид
Al	0,00	0,00	1,57	0,00	0,00	0,97	0,00	0,12
Si	0,07	0,38	0,23	0,86	1,13	0,81	0,33	0,23
P	0,02	0,01	0,40	0,00	0,02	0,17	0,07	0,60
S	0,00	0,00	28,70	0,21	0,29	23,43	0,08	26,34
Ti	0,08	0,06	1,81	0,13	0,10	2,21	0,09	2,05
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	0,00	0,00	4,90	0,03	0,00	1,73	0,09	3,05
Fe	99,18	91,92	16,13	94,63	92,86	27,00	95,58	14,50
Cu	0,15	7,55	46,15	4,07	5,59	43,70	3,73	51,93



а



б



в

Рис. 4. Влияние нагрузки на износ пары трения СЧCuS+TiN – Ст5<sub>зак</sub>; сплавы: а – литой; б – закаленный; в – отожженный; 1 – сплав; 2 – контртело; 3 – суммарный износ

сплава показало следующее. В результате деформирования трением литого сплава содержание элементов в поверхности трения, кроме серы, практически не изменяется. В то же время на поверхности контртела фиксируется перенос серы и титана, кроме этого увеличивается содержание кремния. Сочетание структурных особенностей сплава, который содержит достаточное количество графитовой фазы и относительной

сплавов в процессе массопереноса участвует вещество фаз, относящихся к сульфидам, а именно медь, сера и титан. Следует также отметить тот факт, что литой сплав в результате изнашивания увеличивает в деформированной трением поверхности количество меди и серы, в результате чего с увеличением нагрузки (рис. 4) интенсивность изнашивания сплава уменьшается до минимума. В то же время сплав СЧCuS + TiN после закалки и отжига в результате внешнего трения теряет в поверхностном слое элементы меди и серы при некотором увеличении массовой доли титана.

При трении с литым и закаленным сплавами на поверхности контртела из закаленной стали 5 относительное количество перенесенного вещества по сере составляет 0,12-0,14 %, а по меди – 0,18-0,19 % (в связи с тем, что толщина слоя перенесенного металла составляет в среднем не более 0,1 мкм). Это свидетельствует о том, что в качестве эффективного вещества, которое играет роль твердой смазки, выступает сульфид на основе меди и серы.

После отжига в структуре сплава в большом количестве выделился графит, металлическое вещество слоя, в основном, формируется на основе меди. Выделение на поверхности сплава СЧCuS+TiN графита создает благоприятное условие для прирабатываемости пары трения в условиях высоких нагрузок: 150-200 кг/см², что также способствует повышению износостойкости контртела и пары трения в целом.

Изучение процесса массопереноса пары трения сплав СЧ+TiN-Ст5<sub>зак</sub> в различном структурном состоянии

## Новые литые материалы

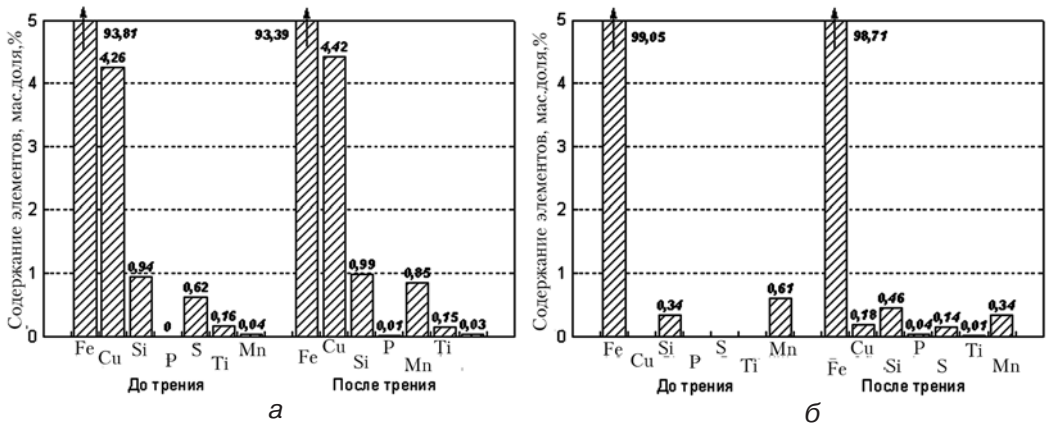


Рис. 5. Микрохимический анализ поверхностей трения при граничном трении до и после изнашивания при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>: а – сплав СЧCuS+TiN литой; б – контртело Ст5<sub>зак</sub>

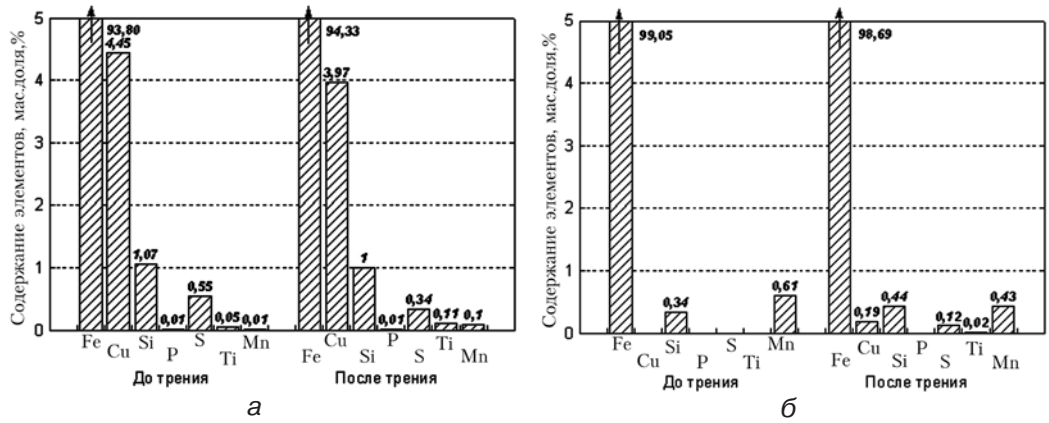


Рис. 6. Микрохимический анализ поверхностей трения при граничном трении до и после изнашивания при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>: а – сплав СЧCuS + TiN после закалки; б – контртело Ст5<sub>зак</sub>

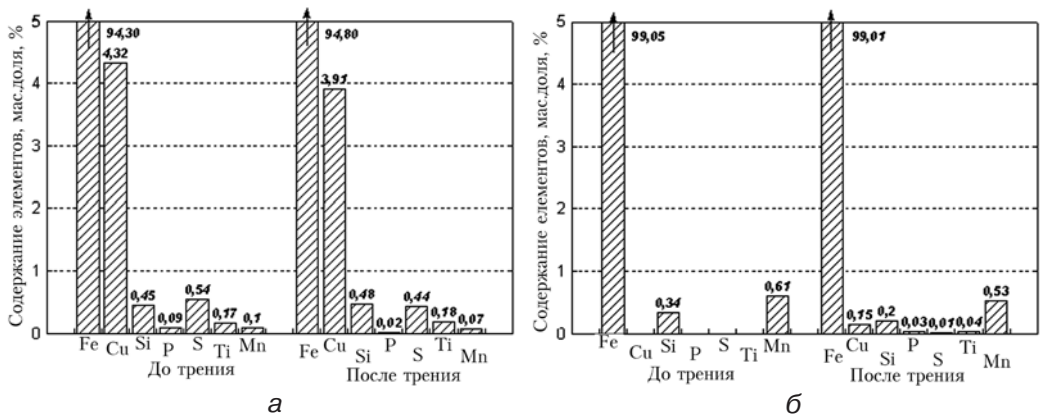


Рис. 7. Микрохимический анализ поверхностей трения при граничном трении до и после изнашивания при нагрузке 200 кг/см<sup>2</sup>: а – сплав СЧCuS + TiN после отжига; б – контртело Ст5<sub>зак</sub>

твердости 250 НВ, обеспечивает достаточно высокую износостойкость пары трения за счет высокой износостойкости сплава СЧ+TiN литой структуры.

Результаты исследования влияния нагрузки на интенсивность изнашивания сплавов типа СЧCuS, модифицированных микропорошками TiN, показали, что их износостойкость зависит от исходного структурного и микрохимического состояний. Литой сплав СЧCuS+TiN обладает максимально возможной износостойкостью во всем диапазоне нагрузок.

Такой же высокой износостойкостью обладает и сплав СЧCuS +TiN после отжига и закалки, причем последний при больших нагрузках обеспечивает минимальный износ контртела и пары трения. Это объясняется тем, что термическая обработка вызывает распад цементита структуры и выделение графита компактной розеточной формы.

Высокая износостойкость сплавов СЧCuS+TiN и пар трения полностью определяется наличием на поверхности трения наноструктурного слоя, состоящего из фрагментов (молекул) сульфида на основе меди и титана, а также графита.



### Список литературы

1. Модифицирование высокохромистого чугуна ИСИ ультрадисперсным порошком / В. Ф. Пинкин, Г. Г. Крушенко, А. Г. Карегин и др. // Литейн. пр-во. – 1994. – № 3. – С. 7.
2. Повышение качества чугунных отливок с помощью нанопорошков / Г. Г. Крушенко, И. С. Ямских, А. А. Бонченков и др. // Металлургия машиностроения. – 2002. – № 2 (9). – С. 20-21.

Поступила 12.04.2010

### **Вниманию авторов!**

*В соответствии с требованиями ВАКа все статьи, поступающие в редакции научных журналов, должны обязательно проходить рецензирование, иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.*

*Статьи в редакции поступают как на бумажном, так и электронном носителе. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.*