

## Влияние легирующих элементов, скорости охлаждения и деформации на электропроводность медных сплавов

*Исследовано влияние некоторых технологических факторов на электропроводность сплавов на основе меди. Показано, что легирующие элементы по-разному влияют на величину электропроводности латуни. Увеличение массовой доли алюминия в сплаве Cu-35Zn от 0,25 до 3,0 % мас. способствует увеличению объемной доли  $\beta$ -фазы, что приводит к росту твердости и электропроводности. Определено, что снижение электропроводности при деформации связано с измельчением зерна, а дальнейший отжиг деформированных сплавов восстанавливает эту характеристику до ее уровня в литом состоянии.*

**Ключевые слова:** электропроводность, сплав, легирование, латунь, скорость охлаждения.

**М**едные сплавы широко распространены в промышленности. Их доминирующая роль среди других материалов и сплавов обусловлена удачным сочетанием технологических, функциональных и эксплуатационных свойств, возможностью получать сплавы с широким спектром цветов от блестяще-желтого до красного. Кроме того, медные сплавы имеют хорошую электро- и теплопроводность и заметно превосходят в этом отношении сплавы на основе железа и других металлов. Из медных сплавов делают электроконтактные детали (клеммы, ламповые цоколя, электрические разъемы, контактные штырьки и т. п.), другое применение – это чеканка монет. Электропроводность является важным физическим свойством при контроле качества медных сплавов. Так, например, проводимость электроконтактного материала должна быть на уровне не менее 20 % IACS (11,6 МСм/м), чтобы предотвратить разогревание контактов при токовой нагрузке [1]. В торговых автоматах для идентификации монет наряду с их геометрическими размерами и весом используется электропроводность, которая является основным функциональным параметром защиты монет от подделок. Для украинских монет средних и высоких номиналов Европейской комиссией был выделен интервал электропроводности 17–19 % IACS (9,86–11,02 МСм/м) [2].

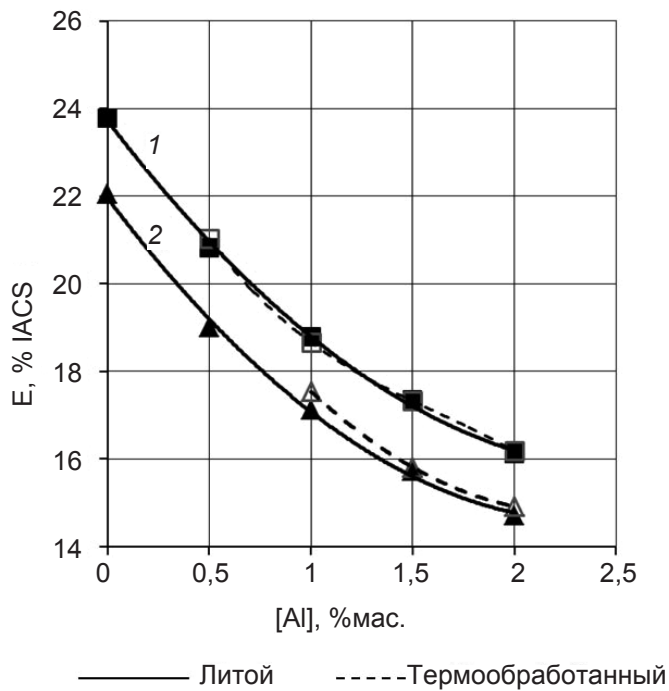
Таким образом, электропроводность можно считать одной из главных функциональных характеристик при разработке сплавов на основе меди для изделий специального назначения. Разработка сплава с заданной электропроводностью является комплексной задачей, которая требует выяснения различных факторов и изучения влияния этих факторов на электропроводность. Электрическая проводимость сплавов в первую очередь зависит от их химического состава и структуры, а именно: природы легирующих элементов и примесей, фазового состава, размеров и формы кристаллических зерен. В свою очередь существует ряд технологических факторов, которые влияют на структуру сплавов и соответственно на их электропроводность – это легирование и модифицирование, скорость охлаждения при кристаллизации сплава из

жидкого состояния, а также термопластическая обработка. Поэтому целью данной работы было изучение таких технологических параметров на электропроводность медных сплавов, в частности латуни.

Измерение удельной электрической проводимости металлов проводили вихретоковым методом на приборе «SMP-1» («Сигмаскоп», производства фирмы «X. Fischer», Германия) с использованием эталонов для данной области измерений. В статье электропроводность сплавов выражается в процентах от электропроводности чистой меди в отожженном состоянии – IACS (International Annealed Copper Standard). Электропроводность меди, которая составляет 58 МСм/м, взято за 100 % IACS, следовательно, электропроводность в 1 % IACS составляет 0,58 МСм/м. Измерение скорости охлаждения сплавов проводилось путем записи кривых охлаждения на оборудовании, разработанном во ФТИМС НАН Украины.

Проведенные исследования показали, что уровень необходимой электропроводности в сплавах двойной системы Cu-Zn можно достичь при их комплексном легировании, при этом каждый элемент по-разному влияет на интенсивность снижения электропроводности. Так, при разработке монетных сплавов, электропроводность двойного сплава Cu-10Zn снижается медленнее при легировании его оловом, чем при легировании алюминием [2]. При концентрации олова 5 % мас. в сплаве не удается достичь значения электропроводности 18 % IACS, в то время как при содержании алюминия 3,5 % мас. электропроводность становится ниже желаемого уровня. Еще более интенсивнее снижают электропроводность сплава Cu-10Zn железо, марганец, кремний [3, 4].

Дальнейшие исследования доказали эффективность регулирования электропроводности тройных сплавов системы Cu-Zn-Me за счет дополнительного легирования алюминием, никелем, кремнием [2]. При определенном содержании легирующего элемента электропроводность сплавов достигает желаемого значения 18 % IACS. В тройной системе Cu-Zn-Mn при повышении концентрации марганца с 1,5 до 2 % мас. электропроводность уменьшается на 1,75 % IACS (рис. 1). Дополнительное легирование этой системы

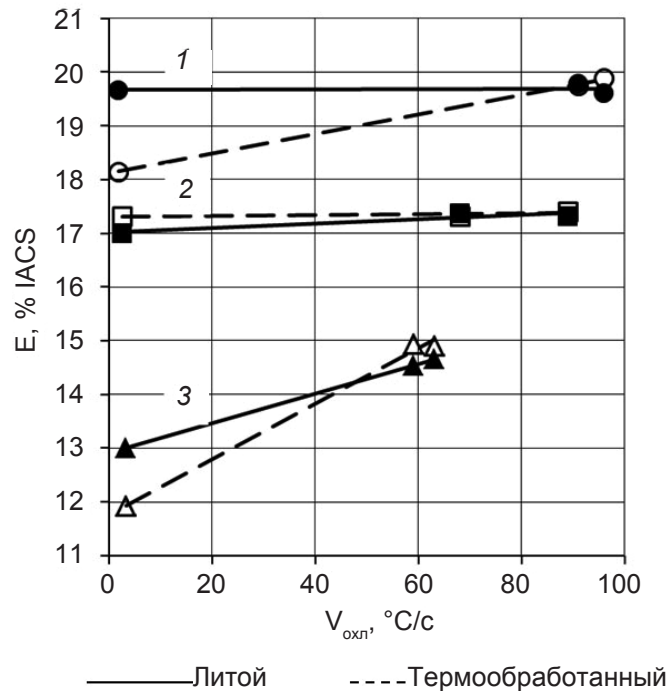


**Рис. 1.** Электропроводность сплавов системы Cu-Zn-Mn, легированных алюминием: 1 – Cu-10Zn-1,5Mn; 2 – Cu-10Zn-2Mn

алюминием до 2 %мас. снижает электропроводность сплава в литом состоянии приблизительно на 7,5 % IACS, а термообработка незначительно повышает его электропроводность на 0,1–0,4 % IACS.

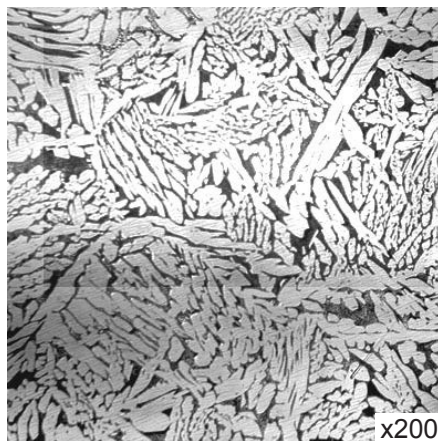
С повышением скорости охлаждения четырехкомпонентных сплавов Cu<sub>25</sub>Zn<sub>2</sub>Ni<sub>1</sub>Al, Cu<sub>10</sub>Zn<sub>1,5</sub>Mn<sub>2</sub>Al, Cu<sub>10</sub>Zn<sub>2</sub>Mn<sub>2</sub>Al при их кристаллизации наблюдается тенденция к увеличению электропроводности (рис. 2). Электропроводность литых сплавов Cu<sub>25</sub>Zn<sub>2</sub>Ni<sub>1</sub>Al, Cu<sub>10</sub>Zn<sub>1,5</sub>Mn<sub>2</sub>Al изменилась незначительно в изучаемом диапазоне скоростей охлаждения. В то время, как в литом сплаве Cu<sub>10</sub>Zn<sub>2</sub>Mn<sub>2</sub>Al разница электропроводности образцов, охлажденных с максимальной и минимальной скоростями, составляет около 1,5 % IACS. Все сплавы подвергались термообработке при температуре 800 °С в течение 2 часов. Электропроводность термообработанных сплавов, охлажденных во время кристаллизации с минимальной скоростью 2–3°С/с, заметно изменилась. Можно предположить, что термообработка сплавов, которые закристаллизовались при низких скоростях охлаждения в равновесных условиях, привела к образованию новых фаз (или интерметаллидов) с электропроводностью меньшей, чем у α-фазы. В случае неравновесной кристаллизации при повышенных скоростях охлаждения (больше, чем 60–80 °С/с) структура сплава остается однофазной из-за затрудненной диффузии легирующих элементов.

На примере отожженной латуни состава Cu-35Zn хорошо просматривается зависимость электро-

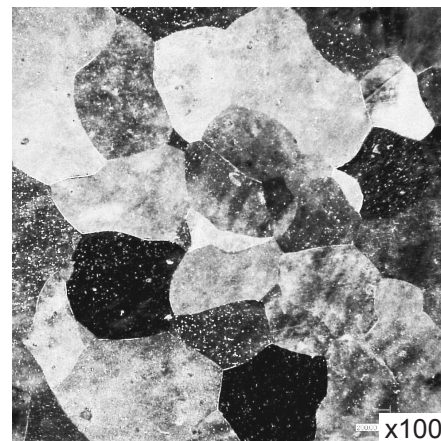


**Рис. 2.** Электропроводность сплавов, охлажденных с разными скоростями: 1 – Cu<sub>25</sub>Zn<sub>2</sub>Ni<sub>1</sub>Al; 2 – Cu<sub>10</sub>Zn<sub>1,5</sub>Mn<sub>2</sub>Al; 3 – Cu<sub>10</sub>Zn<sub>2</sub>Mn<sub>2</sub>Al

проводности от фазового состава при легировании сплава алюминием. Установлено, что изменение твердости и электропроводности в основном зависит от массовой доли алюминия (0,25–3 %мас.) в сплаве Cu-35Zn, который стабилизирует и увеличивает количество β-фазы (рис. 3). Двойная латунь с добавками алюминия до 1 %мас. (Cu<sub>35</sub>Zn<sub>0,25</sub>Al, Cu<sub>35</sub>Zn<sub>0,5</sub>Al, Cu<sub>35</sub>Zn<sub>0,75</sub>Al) имеет двухфазный состав α + β (рис. 3, а), а в сплавах Cu<sub>35</sub>Zn<sub>2</sub>Al, Cu<sub>35</sub>Zn<sub>2,5</sub>Al, Cu<sub>35</sub>Zn<sub>3</sub>Al обнаружено только β-фазу (рис. 3, б) с тенденцией измельчения зерна при увеличении концентрации алюминия. Увеличение содержания алюминия до 1,5 %мас. приводит к постепенному снижению электропроводности латуни Cu<sub>35</sub>Zn до значения 24,23 % IACS, а дальнейшее увеличение массовой доли алюминия до 3 %мас. сопровождается повышением электропроводности до величины 25,71 % IACS, что связано с изменением фазового



а



б

**Рис. 3.** Оптические фотографии микроструктуры сплавов: а – Cu<sub>35</sub>Zn<sub>1</sub>Al; б – Cu<sub>35</sub>Zn<sub>3</sub>Al

состава – ростом доли  $\beta$ -фазы (рис. 4). Увеличение электропроводности при появлении  $\beta$ -фазы в латунях подтверждается данными литературы [5]. Связь между твердостью и массовой долей алюминия для двойной латуни в отожженном состоянии можно описать полиномом второй степени. За счет увеличения количества  $\beta$ -фазы при легировании алюминием твердость сплава Cu35Zn3Al почти в 3,4 раза больше по сравнению с нелегированным сплавом (рис. 4).

Также исследовано влияние скорости охлаждения на электропроводность трех сплавов Cu35Zn, Cu-35Zn-1Al, Cu-35Zn-2,5Al, которые заливали в формы с разной теплопроводностью. При этом повышение скорости охлаждения приводило к незначительному повышению электропроводности сплавов на 0,2-0,4 % IACS, что очевидно связано с формированием разной структуры в сплавах при разных скоростях охлаждения (рис. 5). Значения электропроводностей для трех сплавов, охлажденных с минимальной и максимальной скоростями соответственно, составляли 25,98 и 26,43 % IACS (Cu35Zn), 24,85 и 25,06 % IACS (Cu-35Zn-1Al), 25,72 и 25,87 % IACS (Cu-35Zn-2,5Al).

Термопластическая обработка еще один технологический фактор, который влияет на электропроводность сплавов. Снижение электропроводности при деформации связано только с изменениями микроструктуры сплавов, а именно размером зерен, которые измельчаются в процессе деформации, в результате чего увеличивается количество дефектов на межфазных границах (рис. 6) [6]. Последующий отжиг деформированных сплавов обеспечивает рекристаллизацию и практически восстанавливает электропроводность до уровня электропроводности сплава в литом состоянии. Так например, характер изменений электропроводности по нескольким операциям прокатки и отжига сплава Cu9,2Zn2,5Sn1,8Al такой: 18,25 % IACS (литое состояние)  $\rightarrow$  16,28 % IACS (прокатка с 7 до 3,2 мм (степень деформации –  $\varepsilon = 54\%$ ))  $\rightarrow$  17,51 % IACS (отжиг при 730 °C)  $\rightarrow$  16,18 % IACS (прокатка с 3,2 до 1,6 мм (степень деформации –  $\varepsilon = 50\%$ ))  $\rightarrow$  18,10 % IACS (отжиг при 730 °C) [7].

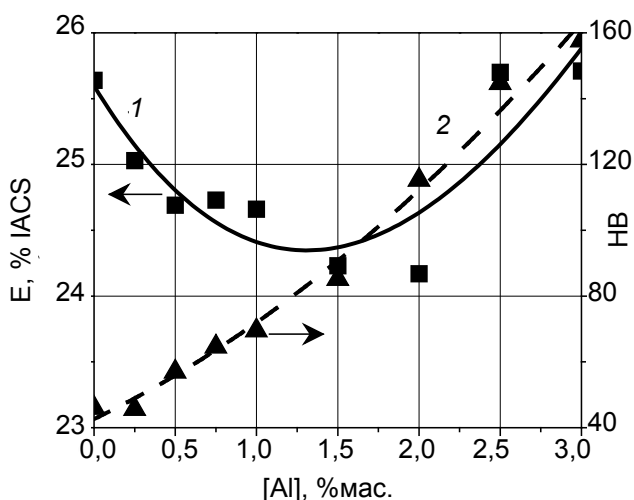


Рис. 4. Влияние легирования алюминием на электропроводность (1), и твердость (2) сплава Cu-35Zn

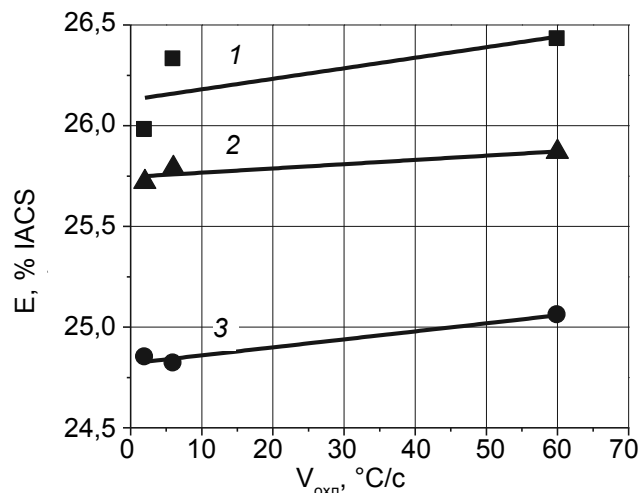


Рис. 5. Влияние скорости охлаждения на электропроводность при кристаллизации сплавов: 1 – Cu35Zn; 2 – Cu35Zn2,5Al; 3 – Cu35Zn1Al

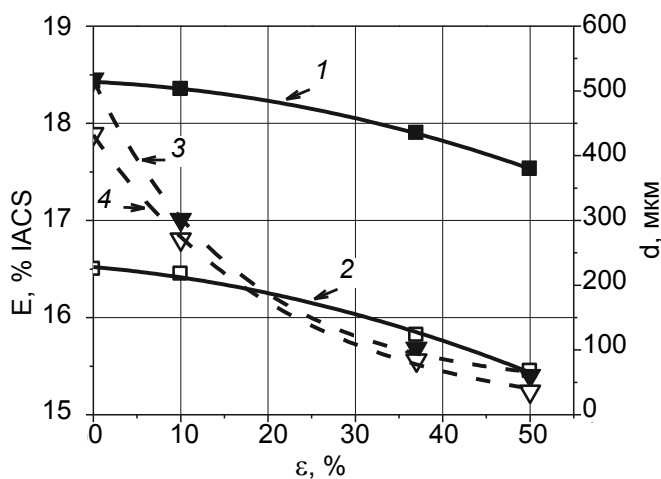
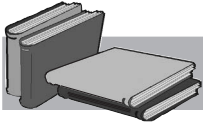


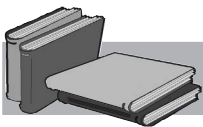
Рис. 6. Влияние степени деформации на электропроводность (1, 2) и размер зерна (3, 4) сплавов: 1, 3 – Cu35Zn2Ni; 2, 4 – Cu6Al2Ni

Таким образом, на основе выше рассмотренного анализа можно сделать выводы, что при разработке функциональных сплавов с заданной электропроводностью можно применять различные технологические приемы, основные из которых – это легирование, пластическая деформация и термическая обработка, а также скорость охлаждения при кристаллизации сплава, которая влияет на электропроводность через изменение структуры, при этом самым эффективным методом, обеспечивающим стабильные результаты, остается легирование.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Pat. US6949150 B2. Connector copper alloys and a process for producing the same. Appl. 23.09.2002; publ. 27.09.2005.
2. Верховлюк А. М., Ляхненко В. Л., Щерецький О. А., Сергієнко Р. А., Науменко М. І., Апухтін В. В., Назаренко О. А. Основні принципи розробки монетних сплавів із заданою електропровідністю // Вісник Національного банку України. – 2014. – № 12. – С. 30–36.
3. Верховлюк А. М., Беспалый А. А., Науменко М. И., Апухтин В. В. Влияние кремния и железа на удельную электропроводность латуни в литом состоянии и после термообработки // Процессы литья. – 2012. – № 6. – С. 50–54.
4. Шумихин В. С., Плитченко В. В., Апухтин В. В. Влияние примесей железа и марганца на электропроводность литых латунных заготовок // Процессы литья. – 2008. – № 2. – С. 62–64.
5. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 488 с.
6. Плітченко В. В., Апухтін В. В., Науменко М. І. Вплив деформації на електропровідність і твердість багатокомпонентних сплавів на основі міді // Металознавство та обробка металів. – 2008. – № 1. – С. 59–62.
7. Плітченко В. В. Розробка економічнолегованого багатокомпонентного сплаву на основі міді для монет середніх номіналів: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Плітченко Валерій Васильович – Київ, 2008. – 160 с.



## REFERENCES

1. Pat. US6949150 B2. Connector copper alloys and a process for producing the same. Appl. 23.09.2002; publ. 27.09.2005 [in English].
2. Verkhovliuk A. M., Lakhnenko V. L., Shcherets'kyi O. A., Sergiienko R. A., Naumenko M. I., Apukhtin V. V., Nazarenko O. A. (2014). Osnovni pryntsypy rozrobky monetnykh splaviv iz zadanoiu elektroprovodnistiu [Basic principles of development of coinage alloys with the specified electrical conductivity]. Visnyk Natsionalnoho banku Ukrainy, no. 12, pp. 30–36 [in Ukrainian].
3. Verhovliuk A. M., Bespalyi A. A., Naumenko M. I., Apukhtin V. V. (2012). Vliianie kremniia i zheleza na udelnuiu elektroprovodnost' latunei v litom sostoianii i posle termoobrabotki [Effect of silicon and iron on the conductivity of brass in the cast state and after heat treatment]. Protsessy lit'ia, no. 6, pp. 50–54 [in Russian].
4. Shumikhin V. S., Plitchenko V. V., Apukhtin V. V. (2008). Vliianie primesei zheleza i margantsa na elektroprovodnost' litykh latunnykh zagotovok [Effect of iron and manganese impurities on the electrical conductivity of cast brass billets]. Protsessy lit'ia, no. 2, pp. 62–64 [in Russian].
5. Smiriagin A. P., Smiriagina N. A., Belova A. V. (1974). Promyshlennye tsvetnye metally i splavy [Industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgii, 488 p. [in Russian].
6. Plitchenko V. V., Apukhtin V. V., Naumenko M. I. (2008). Vplyv deformatsii na elektroprovodnist' i tverdist' bahatokomponentnykh splaviv na osnovi midi [Influence of deformation on electrical conductivity and hardness of multi-component alloys based on copper]. Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, no. 1, pp. 59–62 [in Ukrainian].
7. Plitchenko V. V. (2008). Rozrobka ekonomnolehovanoho bahatokomponentnoho сплаву на основі міді для монет середніх номіналів [Development of the economically alloyed copper-based multicomponent alloy for coins of medium denominations]. Candidate's thesis. Kyiv, 160 p. [in Ukrainian].

### Анотація

Верховлюк А. М., Сергієнко Р. А., Щерецький О. А., Потрух О. Г., Науменко М. І.  
Вплив легуючих елементів, швидкості охолодження і деформації на електропровідність мідних сплавів

Досліджено вплив деяких технологічних факторів на електропровідність сплавів на основі міді. Показано, що різні легуючі елементи по-різному впливають на величину електропровідності латуней. Збільшення масової частки алюмінію в сплаві Cu-35Zn від 0,25 до 3,0 %мас. сприяє збільшенню об'ємної частки β-фази, що призводить до зростання твердості і електропровідності. Визначено, що зниження електропровідності при деформації пов'язано з подрібненням зерна, а подальший відпал деформованих сплавів відновлює цю характеристику до її рівня в литому стані.

### Ключові слова

Електропровідність, сплав, легування, латунь, швидкість охолодження.

*Verhovliuk A., Sergiienko R., Scheretskiy A., Potruk A., Naumenko M.*  
Influence of alloying elements, rate of cooling and deformation on the electrical conductivity of copper alloys

*The paper considers a number of technological factors that affect the electrical conductivity of copper-based alloys. Studies have shown that different alloying elements affect variously on the electrical conductivity of brasses. An increase in the mass fraction of aluminum from 0.25 to 3.0 %wt. in the Cu-35Zn alloy makes for an increase in the  $\beta$ -phase volume fraction, which leads to an increase in the hardness and electrical conductivity. A decrease in electrical conductivity during deformation is due to the grain size refinement. Subsequent annealing of the deformed alloys restores the electrical conductivity to the level of electrical conductivity of the alloy in the cast state.*

*Electrical conductivity, alloy, brass, cooling rate.*

Поступила 05.08.17

**ВНИМАНИЮ АВТОРОВ И ПОДПИСЧИКОВ!**  
**Порядок приема статей в редакцию журнала**  
**«Металл и литье Украины»**

*В журнале «Металл и литье Украины» публикуются результаты исследований, которые ранее не издавались и законченные экспериментальные работы, оформленные в виде статей. Статьи публикуются на русском языке.*

**Комплект документов, необходимых для регистрации статьи:**

- *один экземпляр рукописи, пронумерованной с первой до последней страницы и подписанной на последней странице текста всеми авторами, а также электронный вариант статьи;*
- *соглашение о передаче авторских прав, подписанное всеми авторами и рецензия на статью*
- *сведения об авторах (ФИО – полностью)*

**В электронном виде по e-mail: [mlu@ptima.kiev.ua](mailto:mlu@ptima.kiev.ua) предоставляются:**

- *рукопись, идентичная бумажной версии (просьба называть файл по фамилии первого автора статьи, например, *sidorov.doc* или *Сидоров. doc*);*
- *все иллюстрации в чёрно-белом варианте в одном из стандартных графических форматов «tif» или «jpeg»;*
- *информация об авторах: фамилии, имена и отчества всех авторов, выделив одного из них, с кем следует вести переписку, факс и номер телефона (с кодом), e-mail каждого автора, а также названия учреждений, в которых выполнена работа.*