

Е. А. Марковский, д-р техн. наук, проф.**И. В. Олексенко**, науч. сотр., e-mail: svb@ptima.kiev.ua**А. П. Шатрава**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

Лазерная обработка как дополнительный метод повышения триботехнических свойств сплавов на основе чугунов, легированных Cu и S

В статье рассмотрены вопросы использования лазерного термического воздействия на структуру и триботехнические свойства антифрикционных сплавов на основе чугунов, легированных медью и серой. Отмечается, что в результате лазерной обработки происходит существенное перераспределение химических элементов в поверхностной структуре исследуемых сплавов с увеличением концентрации легирующих легкоплавких элементов на поверхности образцов. В работе отмечается положительное влияние лазерной обработки с оплавлением поверхности на структуру исследуемых образцов, а также прогнозируется перспективность использования данного метода обработки поверхностей металлических антифрикционных сплавов, как дополнительного метода повышения триботехнических свойств сплавов на основе чугунов, легированных Cu и S.

Ключевые слова: антифрикционные сплавы, лазерная обработка, структурно-фазовый анализ, компактные включения, триботехнические свойства.

Введение. За последние годы в мировой практике усилилась разработка новых триботехнических материалов, что позволяет существенно сократить использование традиционных цветных металлов, а также уменьшить применение смазочных материалов, трудно поддающихся утилизации и составляющих постоянную угрозу окружающей среде.

Данные литературных источников [1–8] по формированию низколегированных износостойких сплавов на основе железа, термодинамические расчеты образования химических и интерметаллидных фаз, позволяют сделать выводы о возможности получения сплавов, с содержанием в своей структуре фаз с высокой адгезией к металлическим поверхностям. По мнению авторов статьи, наиболее перспективными материалами для получения антифрикционных сплавов являются сплавы на базе серого чугуна, легированного медью и серой. Использование меди в качестве легирующего элемента в количествах, превышающих в несколько раз ее растворимость в железе, позволяет получать в чугуне перлитно-ферритную структуру сплава с включениями медной ε -фазы. А дополнительное легирование медьсодержащего чугуна серой, в результате взаимодействия атомов серы с медью и железом в литом сплаве, приводит к возникновению компактных включений комплексов сульфидов, соответствующих соединению $55\text{Cu}_25\text{Fe}_20\text{S}$.

Данные материалы обладают высокими триботехническими свойствами, однако дополнительная поверхностная термическая обработка лазерным излучением, как одним из наиболее эффективных источников концентрированного воздействия, позволяет существенно повысить физико-механические характеристики обрабатываемых материалов. Преи-

муществами лазерной обработки являются: высокая скорость подвода энергии, возможность регулировки толщины и свойств упроченного слоя, минимальные термические напряжения, возможность обработки труднодоступных участков готовых деталей и др. [9–11].

Технологию лазерной обработки поверхностей металлических антифрикционных сплавов следует рассматривать как дополнительный метод повышения триботехнических свойств сплавов на основе чугунов, легированных Cu и S, имеющих в структуре самостоятельную сульфидную фазу.

Методика экспериментальных исследований. В качестве исследуемого объекта был выбран сплав $\text{C4CuS} + \text{Ti}$ следующего химического состава (таблица):

Химический состав исследуемого сплава

Химический элемент	Fe	C	Cu	Si	Ti	Mn	S	P
%мас.	88,76	2,8	5,6	0,36	0,25	0,2	1,01	0,43

Образцы подвергали воздействию непрерывного CO_2 – излучения лазера (на базе лазерного технологического комплекса «Комета – 2» с номинальной мощностью 1 кВт) с оплавлением поверхности. Образцы обрабатывались без покрытия (на воздухе). Тепловой источник (рис. 1) плотностью мощности $W/p = 5 \cdot 10^8$ Вт/м² перемещался со скоростью 1 мм/сек, диаметр пятна фокусирования составлял $d_n = 1,5$ мм. При этом на образце наблюдали зону лазерного влияния (ЗЛВ), состоящую из зоны плавления (ЗП) и зоны термического влияния (ЗТВ).

Изучение структуры проводили на оптическом микроскопе «ЕРІQUANT», химический состав структурных составляющих после лазерной обработки определяли при помощи сканирующего электронного микроскопа с микроанализатором РЭММА-102.

Фазовый состав и параметры тонкой структуры после лазерной обработки определяли при помощи рентгеноструктурного анализа (FeK α -излучении).

Результаты структурно-фазового анализа сплавов системы С4СuS + Ti. Литая структура сплава С4СuS + Ti содержит набор нескольких фаз (рис. 2, а, б). Металлическая матрица – сорбит (троостит) находится в сочетании с карбидной фазой, что создает основную составляющую структуры – половинчатый чугуи. В этой основной фазе расположены компактные включения меди и сульфидов. Подробно особенности структуры сплава С4СuS + Ti по химическому составу фаз и их показателям твердости даны в работах [1, 2].

Эта структурная особенность сплава в литом состоянии обеспечивает общую твердость сплава 425 НВ, а также такие показания микротвердости фаз: карбид – 730, сорбит – 350, ϵ -Cu фаза – 195, сульфид 230HV (кг/мм²). Следует подчеркнуть, что такая однородная структура обладает свойствами структур «Шарпи» и имеет твердую смазку – сульфид.

Тепловое воздействие лазерного луча (рис. 3, а, б) вызывает как скоростное оплавление, так и быструю кристаллизацию небольших объемов металла, в результате чего формируется и «фиксируется» дисперсная структура, которая по сечению оплавленного объема имеет слоистое строение. Структурное состояние зон (рис. 3, а) зависит от скорости и направления отвода тепла. Следует отметить значительную резкость перехода структурного строения зоны оплавления по отношению к неоплавленному материалу, а также отсутствие нарушения перехода оплавленного металла к твердому (отсутствие трещин и пор).

Оплавление фиксированного объема металла приводит к полному расплавлению всех структурных фаз, а быстрое затвердевание – к «фиксированию» структуры практически на кластерном уровне. Теплоотвод, согласно формы лунки оплавленного металла, направлен в сторону матрицы образца и минимален по отношению к открытой поверхности. Это подтверждается структурными особенностями оплавленной ЗЛВ.

В лунке расплава (рис. 4, 5), которая затвердевает в структуре тонкого поверхностного слоя, происходит частичное выделение фаз и, в первую очередь, фаз с низкой температурой плавления (сульфиды).

Результаты определения микрохимической неоднородности структуры (рис. 6) по основным легирующим элементам сплава С4СuS + Ti от поверхности оплавленного фрагмента перпендикулярно вглубь до

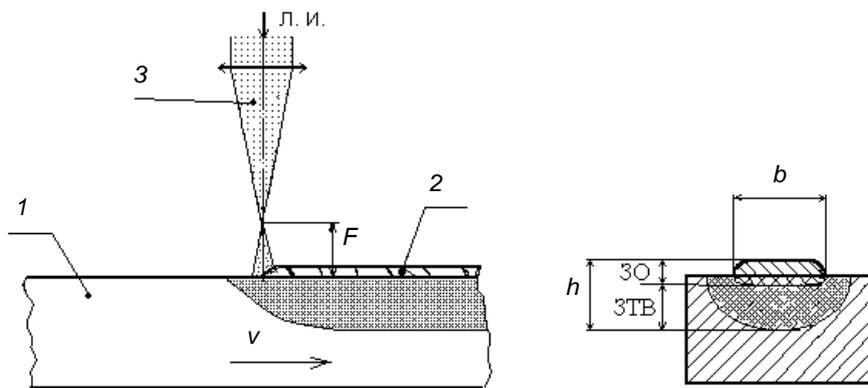
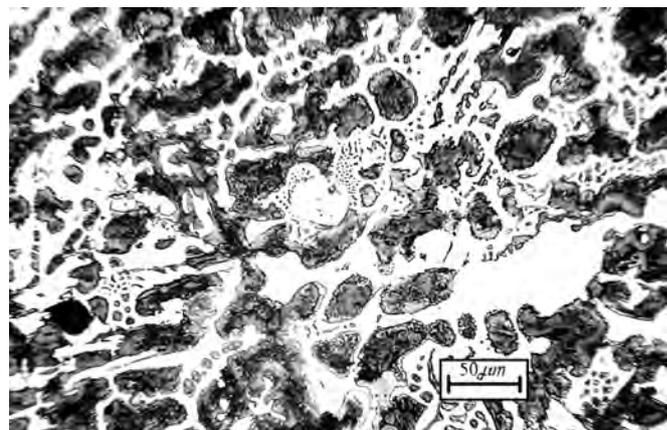
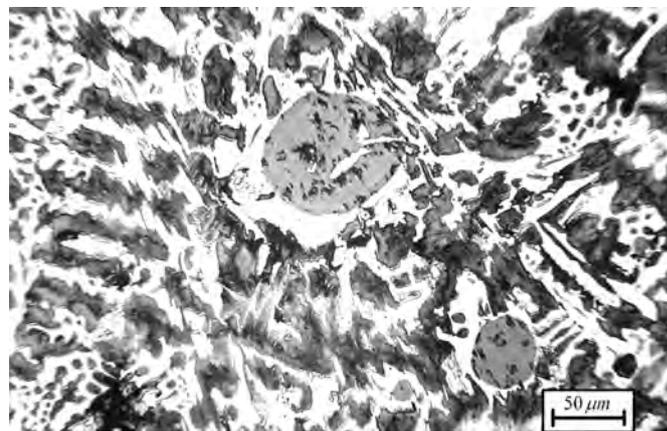


Рис. 1. Схема лазерной обработки: 1 – образец, 2 – оплавленный слой, 3 – лазерное излучение; h – глубина зоны лазерного влияния (ЗЛВ); b – ширина зоны воздействия; ЗО – зона оплавления; ЗТВ – зона термического влияния; Л.И. – лазерное излучение; F – фокусное расстояние; v – скорость перемещения заготовки



а



б

Рис. 2. Структура исходного сплава С4СuS + Ti

границы с неоплавленным металлом показали существенные изменения химического состава.

Согласно этим данным, в расплавленной лунке металла происходит скоростное изменение соотношения легирующих элементов. Марганец (Mn) диффундирует к поверхности, а титан (Ti) и медь (Cu) стремятся в обратном направлении.

Аналогичное химическое состояние сплава фиксируется в поперечном отношении к поверхности (рис. 7).

В определенных точках структуры фиксируется повышенная концентрация таких элементов как медь, титан и сера, что свидетельствует о сохране-

нии в структуре микровключений сульфидов размерами нескольких параметров решетки.

Такая структурная и химическая неоднородность создает изменение твердости участков металла, обработанного лазерным излучением, в широком диапазоне от 800 до 1200 кг/мм² по шкале *HV*.

Данные по усредненному химическому составу поверхностей трения сплавов С4СuS до трения и после трения с нагрузкой 100 кг/см² с граничной смазкой (рис. 8, 9) получены методом микроспектрального анализа.

Данные по количеству основных элементов, составляющих основу сульфидных включений (рис. 9)

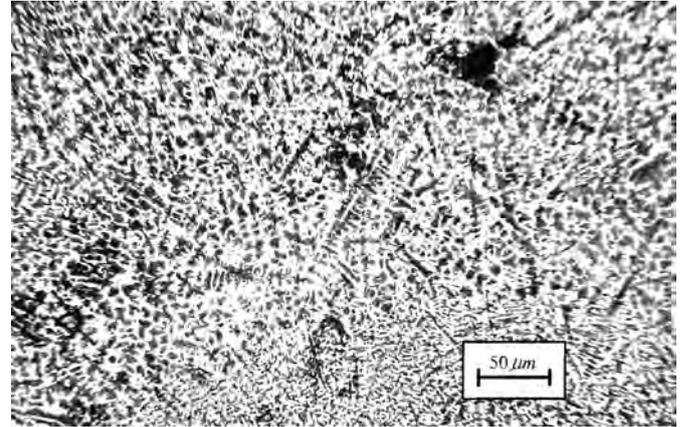
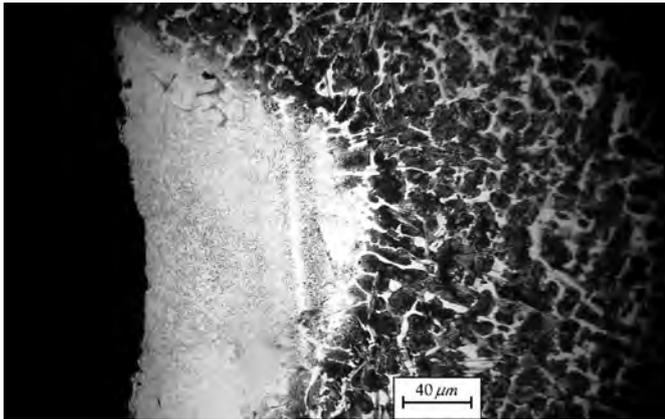
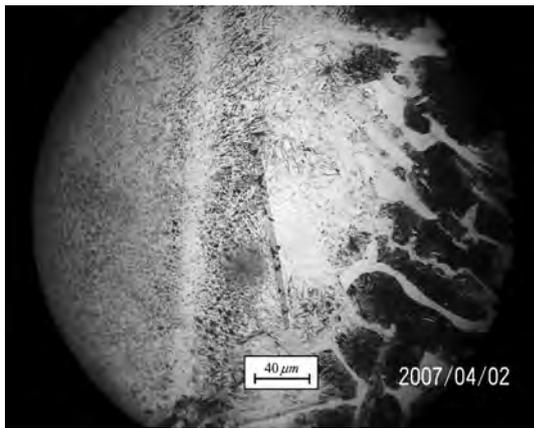


Рис. 5. Структура травленной поверхности сплава С4СuS + Ti (после лазерной обработки)



а



б

Рис. 3. Структура сплава С4СuS + Ti (после лазерной обработки)

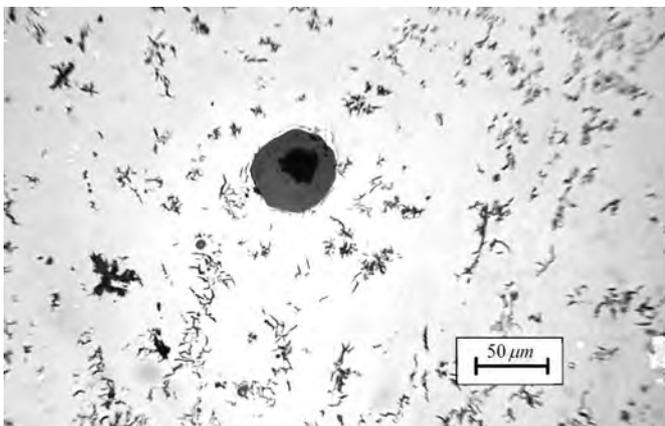


Рис. 4. Структура не травленной поверхности сплава С4СuS + Ti (после лазерной обработки)

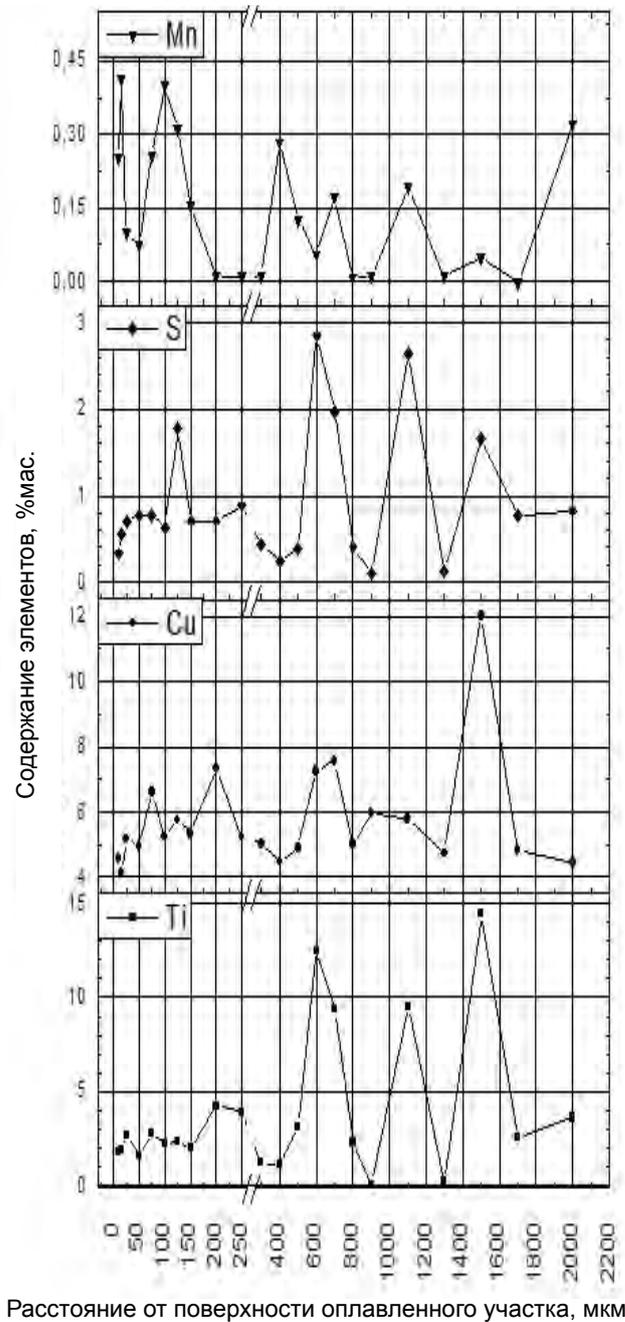


Рис. 6. Распределение основных легирующих элементов сплава С4СuS + Ti по глубине металла лунки от поверхности образца

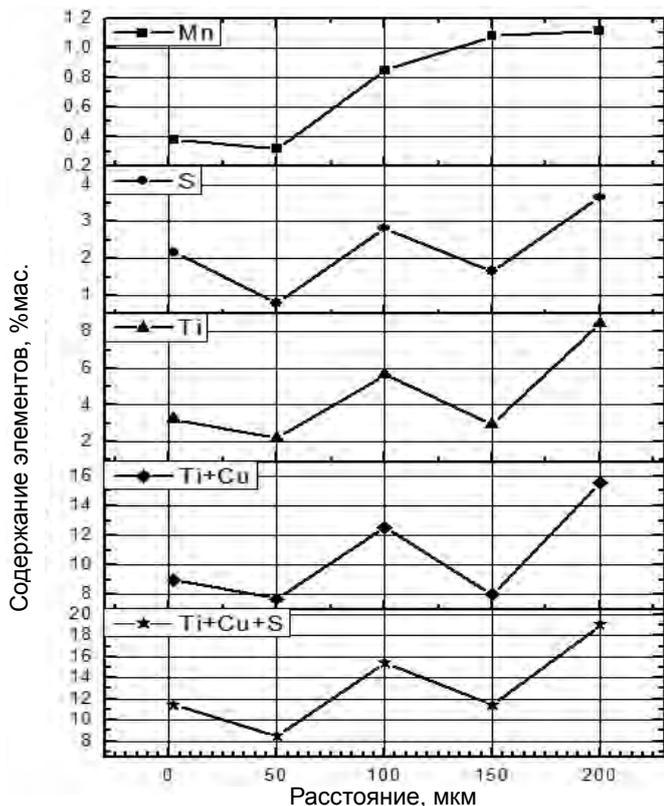


Рис. 7. Распределение основных легирующих элементов сплавов С4CuS по продольному направлению поверхности лунки

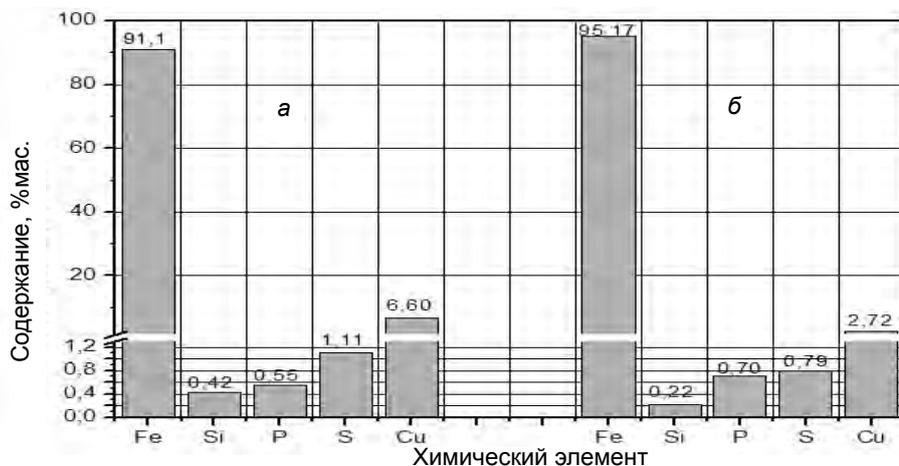


Рис. 8. Химический состав поверхности трения до и после трения: а – исходный сплав С4CuS; б – сплав С4CuS после лазерной обработки

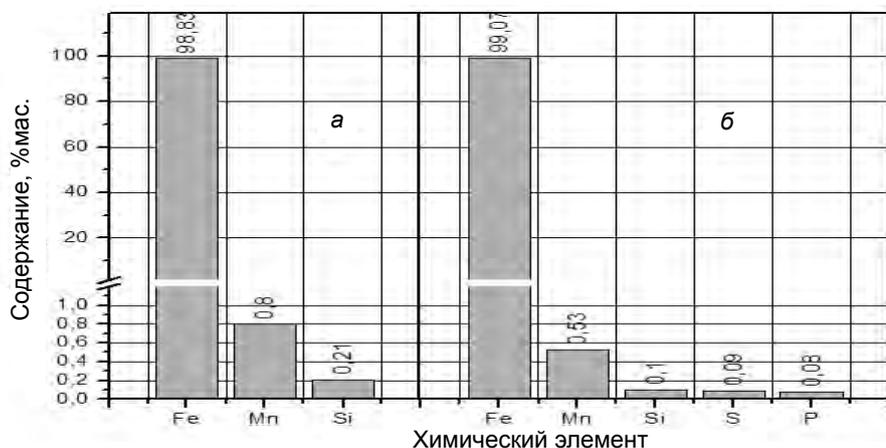


Рис. 9. Химический состав поверхностей трения контртела из стали 5 закаленной: а – до изнашивания; б – после изнашивания

на участках поверхностей, подвергнутых обработке лазерным излучением и без обработки в состоянии до и после внешнего трения, позволили дополнительно установить, что скоростное оплавление, с практически мгновенной кристаллизацией лунки расплавленного металла, повышает в поверхности трения содержание меди и серы. Так, содержание меди увеличилось на 2,4 %, а серы – на 0,33 %. В результате изнашивания в процессе трения количество этих элементов на обеих поверхностях значительно уменьшилось.

Несмотря на то, что микротвердость поверхности оплавленных участков имеет общую твердость свыше 720 НВ, хотя твердость литого сплава С4CuS + Ti – 450 НВ, в результате процессов трения осуществляется массоперенос легирующих элементов на поверхность трения контртела из закаленной стали 5 (рис. 8).

На рабочей поверхности стального образца замечено наличие тонкой пленки из меди и серы, которая, по-видимому, может осуществлять защитную функцию, значительно снижающую интенсивность изнашивания пары трения.

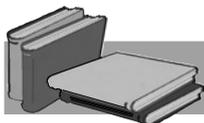
Выводы

В результате исследований установлено, что в процессе лазерной обработки происходят существенные изменения в структуре и распределении химических элементов в поверхностных слоях сплава С4CuS.

Полученные данные свидетельствуют о том, что скоростное лазерное оплавление, с практически мгновенной кристаллизацией лунки расплавленного металла, приводит к повышению на поверхности содержания меди на 2,4 %, а серы – на 0,33 %.

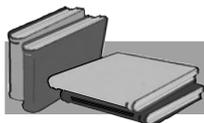
На поверхности образцов замечено образование пленки из меди и серы, наличие которой может привести к снижению коэффициента трения данных сплавов.

Сравнительный анализ полученных данных позволяет сделать вывод о перспективности применения данного метода обработки для повышения триботехнических свойств сплавов на основе чугуна, легированных медью и серой.



ЛИТЕРАТУРА

1. Марковский Е. А., Гаврилюк В. П., Олексенко И. В., Хоружий В. Я. Влияние особенностей структуры литых сплавов на основе чугуна, легированного Cu, S, Al, Cr и Ti на их триботехнические свойства и износостойкость пар внешнего трения // Процессы литья. – 2010. – № 2. – С. 63–69.
2. Олексенко И. В. Влияние дополнительного легирования сплава на основе чугуна с медью и серой (С4CuS) на структуру, износ и массоперенос при внешнем трении // Процессы литья. – 2012. – № 2. – С. 58–67.
3. Локтионов-Ремизовский В. А., Олексенко И. В., Новицкий В. Г. Структура и трибологические характеристики литых сплавов СЧ + CuS // Литье. Metallurgia. 2016: Материалы XII Международной научно-практической конференции. – Запорожье, 2016. – С. 140–142.
4. Марковский Е. А., Олексенко И. В. и др. Влияние термоциклической обработки на структуру и износостойкость серого чугуна, легированного медью и серой // Процессы литья. – 2002. – № 2. – С. 10–15.
5. Олексенко И. В., Марковский Е. А., Гаврилюк В. П., Качко Н. А. Износостойкость чугунов, легированных медью и серой // Литейное производство на рубеже столетий. Тез. докл. ФТИМС НАНУ, 2003. – С. 61–63.
6. Марковский Е. А., Олексенко И. В., Гаврилюк В. П., Качко И. В. Триботехнические свойства сплавов системы СЧ+Cu+S при трении скольжения // Металл и литье Украины. – 2006. – № 6. – С. 7–11.
7. Марковский Е. А., Олексенко И. В., Хоружий В. Я. Некоторые особенности строения сульфидов сплавов С45Cu1S, легированных алюминием и титаном // Процессы литья. – 2007. – № 3. – С. 62–69.
8. Гаврилюк В. П., Марковский Е. А., Тихонович В. И. Трибология литейных сплавов. – Киев, 2007. – 428 с.
9. Григорянц А. Г., Сафонов А. Н. Методы поверхностной лазерной обработки. – М.: Высшая школа, 1987. – 191 с.
10. Коваленко В. С., Котляров В. П. Справочник по технологии лазерной обработки. – К.: Техніка, 1985. – 167 с.
11. Переломы В. А., Лихошва В. П., Гладун К. К., Скрипка Н. Н., Шатрава А. П. Лазерно-плазменная обработка железистоуглеродистых сплавов // Металл и литье Украины. – 1994. – № 5. – С. 29–32.



REFERENCES

1. Markovskii E. A., Havruliuk V. P., Oleksenko I. V., Khoruzhyi V. Ya. (2010). Vliianie osobennostei struktury litykh splavov na osnove chuguna, legirovannogo Cu, S, Al, Cr i Ti na ikh tribotekhnicheskie svoistva i iznosostoičnost' par vneshnego treniia [*Influence of the structure features of cast alloys on the basis of cast iron doped with Cu, S, Al, Cr and Ti on their tribotechnical properties and wear resistance of external friction pairs*]. Protsessy lit'ia, no. 2, pp. 63–69 [in Russian].
2. Oleksenko I. V. (2012). Vliianie dopolnitel'nogo legirovaniia splavov na osnove chuguna s med'iu i seroi (С4CuS) na strykturu, iznos i massoprenos pri vneshnem trenii [*Influence of additional alloying of the alloy on the basis of cast iron with copper and sulfur (С4CuS) on the structure, wear and mass transfer with external friction*]. Protsessy lit'ia, no. 2, pp. 58–67 [in Russian].
3. Loktionov-Remizovskii V. A., Oleksenko I. V., Novitskiy V. G. (2016). Struktura i tribologicheskie kharakteristiki litykh splavov СЧ + CuS [*Structure and tribological characteristics of cast alloys of СЧ + CuS*]. Lit'o. Metallurgia. Zaporozhie, pp. 140–142 [in Russian].
4. Markovskii E. A., Oleksenko I. V. et al. (2002). Vliianie termotsiklicheskoj obrabotki na strukturu i iznosostoičnost' serogo chuguna, legirovannogo med'u i seroi [*Effect of thermocycling on the structure and wear resistance of gray cast iron alloyed with copper and sulfur*]. Protsessy lit'ia, no. 2, pp. 10–15 [in Russian].
5. Oleksenko I. V., Markovskii E. A., Havruliuk V. P., Kachko N. A. (2003). Iznosostoičnost' chugunov, legirovannykh med'iu i seroi [*Durability of cast iron alloyed with copper and sulfur*]. Liteinoe proizvodstvo na rubezhe stoletii, tezisy dokladov FTIMS NANU, pp. 61–63 [in Russian].
6. Markovskii E. A., Oleksenko I. V., Havruliuk V. P., Kachko N. A. (2006). Tribotekhnicheskie svoistva splavov sistemy СЧ+Cu+S pri trenii skol'zheniia [*Tribotechnical properties of alloys of the system СЧ+Cu+S for sliding friction*]. Metall i lit'o Ukrainy, no. 6, pp. 7–11 [in Russian].
7. Markovskii E. A., Oleksenko I. V., Khoruzhyi V. Ya. (2007). Nekotorye osobennosti stroeniia sul'fidov splavov С45Cu1S, legirovannykh aluminiem i titanom [*Some features of the structure of sulphides of alloys of С45Cu1S doped with aluminum and titanium*]. Protsessy lit'ia, no. 3, pp. 62–69 [in Russian].
8. Markovskii E. A., Havruliuk V. P., Tikhonovich V. I. (2007). Tribologiiia liteinukh splavov [*Tribology of foundry alloys*]. Kiev, 428 p. [in Russian].
9. Grigoriant A. G., Saphonov A. N. (1987). Metody poverkhnostnoi lazernoj obrabotki [*Surface laser treatment methods*]. Moscow: Vysshiaia shkola, 191 p. [in Russian].
10. Kovalenko V. S., Kotliarov V. P. (1985). Spravochnik po tekhnologii lazernoj obrabotki [*Handbook on laser processing technology*]. Kiev: Tekhnika, 167 p. [in Russian].
11. Pereloma V. A., Likhoshva V. P., Gladun K. K., Skripka N. N., Shatrava A. P. (1994). Lazerno-plazmennaiia obrabotka zhelezo-uglerodistykh splavov [*Laser-plasma treatment of iron-carbon alloys*]. Metall i lit'o Ukrainy, no. 5, pp. 29–32 [in Russian].

Анотація

Марковський Є. А., Олексенко І. В., Шатрава О. П.

Лазерна обробка як додатковий метод підвищення триботехнічних властивостей сплавів на основі чавунів, що леговані Cu і S

В статті розглянуто питання використання лазерного термічного впливу на структуру і триботехнічні властивості антифрикційних сплавів на основі чавунів, що леговані міддю та сіркою. Відзначається, що в результаті лазерної обробки відбувається суттєвий перерозподіл хімічних елементів в поверхневій структурі досліджуваних сплавів зі збільшенням концентрації легуючих легкоплавких елементів на поверхні зразків. У роботі відзначається позитивний вплив лазерної обробки з оплавленням поверхні на структуру досліджуваних зразків, а також прогнозується перспективність використання даного методу обробки поверхонь металевих антифрикційних сплавів, як додатковий метод підвищення триботехнічних властивостей сплавів на основі чавунів, легованих Cu і S.

Ключові слова

Антифрикційні сплави, лазерна обробка, структурно-фазовий аналіз, компактні включення, триботехнічні властивості.

Summary

Markovskii E., Oleksenko I., Shatrava A.

Laser treatment as an additional method to increase the tribotechnical properties of alloys based on cast irons alloyed with Cu and S

The article deals with the use of laser thermal effects on the structure and tribotechnical properties of antifriction alloys based on cast irons alloyed with copper and sulfur. It is noted that as a result of laser processing, there is a significant redistribution of chemical elements in the surface structure of the investigated alloys with an increase in the concentration of alloying low-melting elements on the surface of the samples. The paper notes the positive effect of laser treatment with surface fusion on the structure of the samples under study, and the prospects for using this method for treating surfaces of metal antifriction alloys are predicted as an additional method for improving tribotechnical properties of alloys based on cast iron alloyed with Cu and S.

Keywords

Antifriction alloys, laser processing, structural-phase analysis, compact inclusions, tribotechnical properties.

Поступила 21.11.17