

1000 H преимущество легирования очень велико: при применении карбида хрома (Cr_3C_2) – в 15–20 раз, а при применении карбида вольфрама (WC) – даже в 20–30 раз.

При лазерном легировании карбидом вольфрама увеличение скорости лазерного излучения снижает интенсивность изнашивания, а при легировании карбидом хрома (Cr_3C_2) – увеличивает. При низкой скорости лазерного излучения часть карбидов вольфрама растворяется в бронзовой матрице.

ЛИТЕРАТУРА

1. Devojno O. G., Feldshtein E., Kardapolava M. A., Lutsko N. I. On the formation features, structure, microhardness and tribological behavior of single tracks and coating layers formed by laser cladding of Al-Fe powder bronze. Surf Coat Technol 2019; 358:195–206. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.014>. – Date of access: 13.11.2023.

2. Shah P., Khanna N., Zadafiya K., Bhalodiya M., Maruda R. W., Krolczyk G. M. In-house development of eco-friendly lubrication techniques (EMQL, Nanoparticles + EMQL and EL) for improving machining performance of 15–5 PHSS. Tribol Int 2020; vol. 151:106476.

3. Sirin S., Akıncıoğlu S., Gupta M. K., Kivak T., Navneet K. A. Tribological performance of vegetable-based oil combined with GNPs and hBN nanoparticles on the friction- wear tests of titanium grade 2. Tribol Int 2023; vol. 181. Article number 108314.

4. Yin T. Y., Zhang S., Wang Z. Y., Zhang C. H., Liu Y., Chen J. Effect of laser energy density on microstructural evolution and wear resistance of modified aluminum bronze coatings fabricated by laser cladding. Mater Chem Phys 2022;285:126191. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126191>. – Date of access: 13.11.2023.

5. Chand R., Sharma V. S., Trehan R., Gupta M. K., Sarikaya M. Investigating the dimensional accuracy and surface roughness for 3D printed parts using a multi-jet printer. J Mater Eng Perform 2023;vol. 32(Issue 3):1145–59.

6. Airao J., Nirala C. K., Bertolini R., Krolczyk G. M., Khanna N. Sustainable cooling strategies to reduce tool wear, power consumption and surface roughness during ultrasonic assisted turning of Ti-6Al-4V. Tribology Int 2022; Volume 169:107494.

Поступила 13.12.2023

УДК 621.793

Косякова И. М., Кардаполова М. А.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НИТРИДОМ АЛЮМИНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Изучено влияние параметров лазерной закалки и легирования нитридом алюминия деталей из серого чугуна на интенсивность износа в условиях со смазочным материалом. Исследованы изменения фазового состава покрытий в зависимости от режимов обработки, а также влияние фазового состава на интенсивность износа.

Одним из широко применяемых материалов в машиностроении является серый чугун. Широкое применение он нашел благодаря своим хорошим литейным свойствам и относительно невысокой стоимости. Однако возникает необходимость в упрочнении поверхностного слоя чугунных деталей [1–2].

Одним из эффективных способов поверхностного упрочнения чугунных деталей является лазерная закалка [3–4]. Однако, значительное повышение свойств поверхностного слоя можно достигнуть лазерным легированием, предусматривающим введение легирующих компонентов в процессе лазерного переплава поверхности. Оно обеспечивает формирование композиционного поверхностного слоя, включающего легированную матрицу с равномерно распределенными твердыми составляющими. Применительно к изделиям из серого чугуна доказана эффективность лазерной обработки с оплавлением поверхности и с добавлением легирующих компонентов, однако, такие исследования носят фрагментальный характер [5–6]. Для непосредственного применения и разработки технологических процессов поверхностного упрочнения чугунных деталей необходимо изучить влияние каждого технологического параметра процесса лазерного легирования на структуру поверхностного слоя, его физико-механические и эксплуатационные характеристики. Информация, полученная в результате этих исследований, позволит выявить механизмы формирования износостойкого слоя и установить связь между параметрами лазерной обработки и трибологическими свойствами.

Целью работы является изучение фазового состава и трибологических свойств деталей из серого чугуна после лазерного легирования нитридом алюминия в условиях трения со смазочным материалом.

В качестве исходного материала использовали серый чугун СЧ20. Он имеет перлитно-ферритную микроструктуру и содержит в %: 3,10–3,40 С, 1,90–2,30 Si, 0,60–0,90 Mn, $\leq 0,15$ % P и S. Серый чугун СЧ20 имеет твердость в состоянии поставки 170–210 HB, предел прочности при растяжении 200 МПа, предел прочности при сжатии 800 МПа и напряжение сдвига 230 МПа.

В качестве легирующего компонента использовали порошковый нитрид алюминия грануляцией 20 мкм, так как он по диаграмме двойных сплавов с железом образует металлические соединения – алюминиды железа, ограниченный твердый раствор как со стороны Fe, так и Al и соединения AlN [8]. Нитрид алюминия характеризуется очень высокой механической прочностью, высокой твердостью (около 12 ГПа) и высокой температурой плавления (2200 °C) [9].

Взаимное влияние диаметра лазерного луча и скорости плавления оценивалось с помощью 2²-факторной схемы, при диаметре луча лазера 1 мм и 2 мм и скорости перемещения лазерного луча 100 мм/мин и 600 мм/мин. Коэффициент перекрытия составлял 1,0. Легирующие компоненты наносились на поверхность чугуна в виде обмазки. После высыхания ее толщина составляла 0,1–0,05 мм.

Исследования микротвердости проводили на приборе ПМТ-3. Исследования интенсивности изнашивания при различных условиях нагружения при трении со смазкой провели на машине трения типа Amsler A–135 по PN-79/H-04329 по схеме «ролик (закаленная сталь 45) – плоский образец с покрытием». Рентгеновские съемки производили на дифрактометре ДРОН 3.0 при скорости поворота образца 1 град/мин в медном монохроматизированном излучении в максимально возможном интервале углов от 10° до 75° для качественного и количественного фазового анализа. Результаты рентгеноструктурного анализа были обработаны с помощью программного обеспечения ARSANAL («Автоматизация обработки результатов рентгеноструктурного анализа»).

Результаты и обсуждение. В результате предыдущих исследований [10] было установлено, что после лазерной закалки микротвердость серого чугуна увеличилась в 3,2–3,4 раза, а после лазерного легирования нитридом алюминия – в 5,5–7,9 раз. Поэтому, можно утверждать, что лазерное легирование, в сравнении с лазерной закалкой, является более эффективным способом поверхностного упрочнения для деталей из серого чугуна.

В результате исследований были проанализированы влияние режимов лазерной обработки на микротвердость и глубину зоны лазерного воздействия после легирования нитридом алюминия (рис. 1).

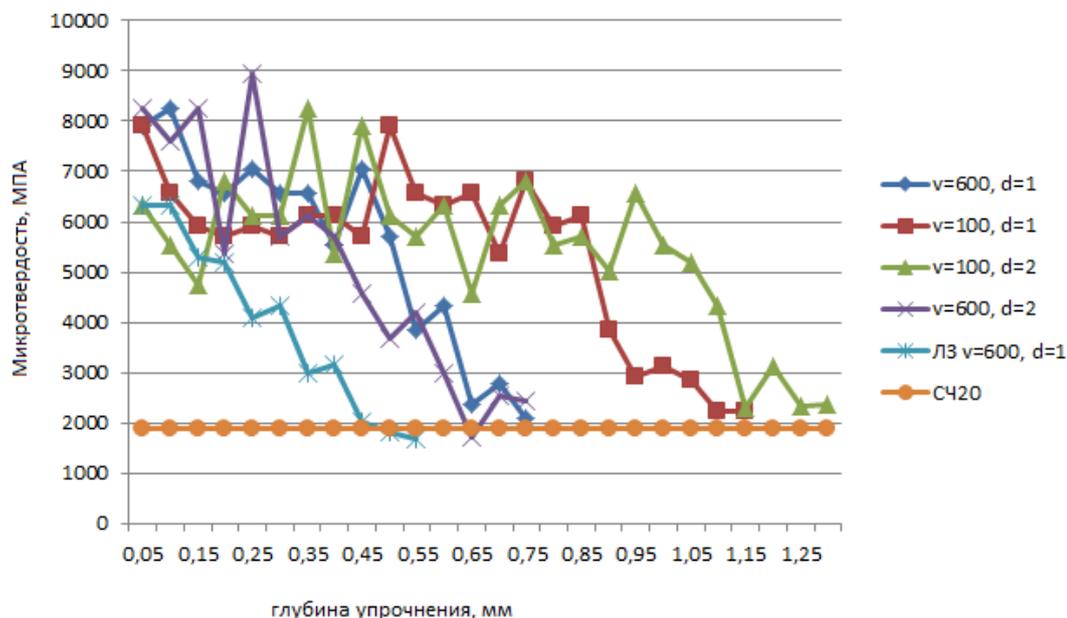


Рис. 1. Зависимость микротвердости и глубины зоны лазерной воздействия после лазерного легирования AlN от скорости и диаметра луча лазера

Как видно из рис. 1, на глубину зоны лазерного воздействия в большей степени влияет скорость перемещения луча лазера. При этом, корреляция отрицательная, т. е. максимальная глубина наблюдается при скорости перемещения луча лазера 100 мм/мин и составляет 1,05–1,2 мм. Между скоростью перемещения луча лазера и микротвердостью наблюдается положительная корреляция, т. е. максимальное значение микротвердости на поверхности наблюдается при скорости перемещения луча лазера 600 мм/мин и составляет 7900–8200 ГПа. График зависимости средней микротвердости в зоне оплавления от режимов обработки представлен на рис. 2.

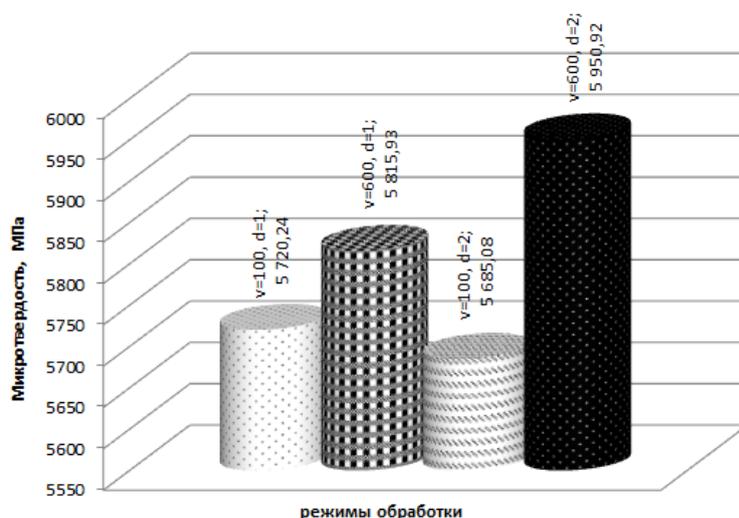


Рис. 2. Зависимость средней микротвердости в зоне оплавления от режимов обработки

Как видно из рис. 2 средняя микротвердость в зоне оплавления зависит от скорости перемещения луча лазера. Наибольшая средняя микротвердость наблюдается при скорости перемещения луча лазера 600 мм/мин и составляет 5950,92 МПа.

Так как значение микротвердости коррелируют с режимами обработки, то представляет интерес исследование фазового состава после лазерного легирования при различных режимах обработки. На рис. 3 представлен фазовый состав для серого чугуна в состоянии поставки и после лазерной закалки.

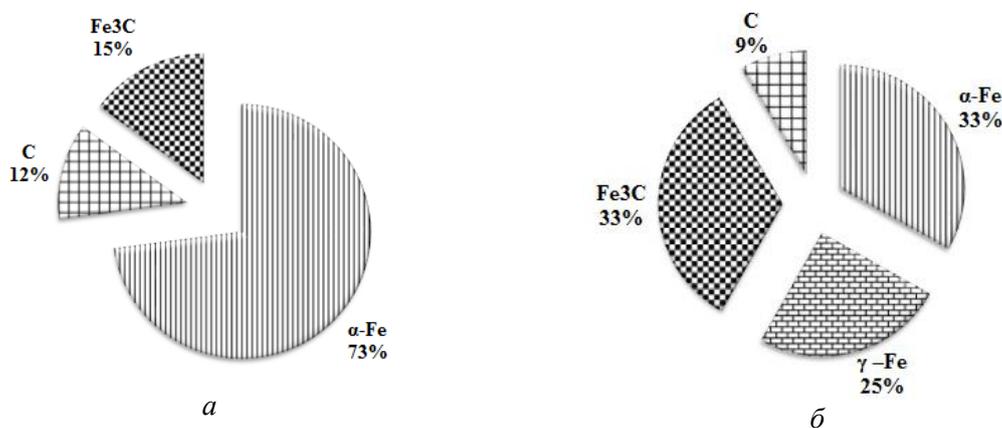


Рис. 3. Фазовый состав чугуна: (а) в исходном состоянии, (б) после лазерной закалки при режимах $V = 100$ мм/мин, $d = 1$ мм

Чугун в состоянии поставки (рис. 3, а) имеет три фазы – α -Fe, цементит и углерод. После лазерной закалки (рис. 3, б), как было выявлено в результате рентгеновского анализа, наблюдаются изменения в содержании основных структурных компонентов – имеются линии γ -Fe, α -Fe, Fe₃C и C, при том, что аустенита в сером чугуне в состоянии поставки вообще не наблюдается. Как было уже доказано [11], количество различных фаз зависит от режимов обработки, например, количество аустенита в серых чугунах после лазерной закалки колеблется в пределах (25–65) %, цементита – (10–45) %, α -Fe – (5–50) %.

Представляет интерес изучить влияние параметров лазерной обработки и легирования на количественный и качественный фазовый состав серого чугуна после лазерного легирования нитридом алюминия, который представлен на рис. 4.

Если сравнить лазерную закалку и лазерное легирование при одинаковых режимах, то можно заметить, что количество твердого раствора, углерода и карбидов меньше при лазерном легировании, чем при лазерной закалке.

Как видно из рис. 4 максимально содержание Al (19 %) и оксидов железа (18 %) наблюдается при минимальной скорости перемещения луча лазера и минимальном диаметре луча лазера ($d = 1$ мм, $v = 100$ мм/мин). При $d = 2$ мм, $v = 100$ мм/мин присутствует максимальное содержание углерода (7 %), карбидов (14 %) и оксидов алюминия (17 %). При увеличении скорости до 600 мм/мин и диаметре лазерного луча 1 мм наблюдается максимальное содержание нитрида алюминия (8 %) и твердого раствора (42 %).

При максимальной скорости обработки и максимальном диаметре лазера ($d = 2$ мм, $v = 600$ мм/мин) получено максимальное содержание алюминидов железа (33 %). При данном режиме обработки также наблюдается максимальная средняя микротвердость в зоне оплавления (рис. 2).

Интенсивность износа при различных режимах лазерного легирования нитридом алюминия (AlN), различных режимах лазерной закалки (ЛЗ) и серого чугуна в состоянии поставки представлена на рис. 5.

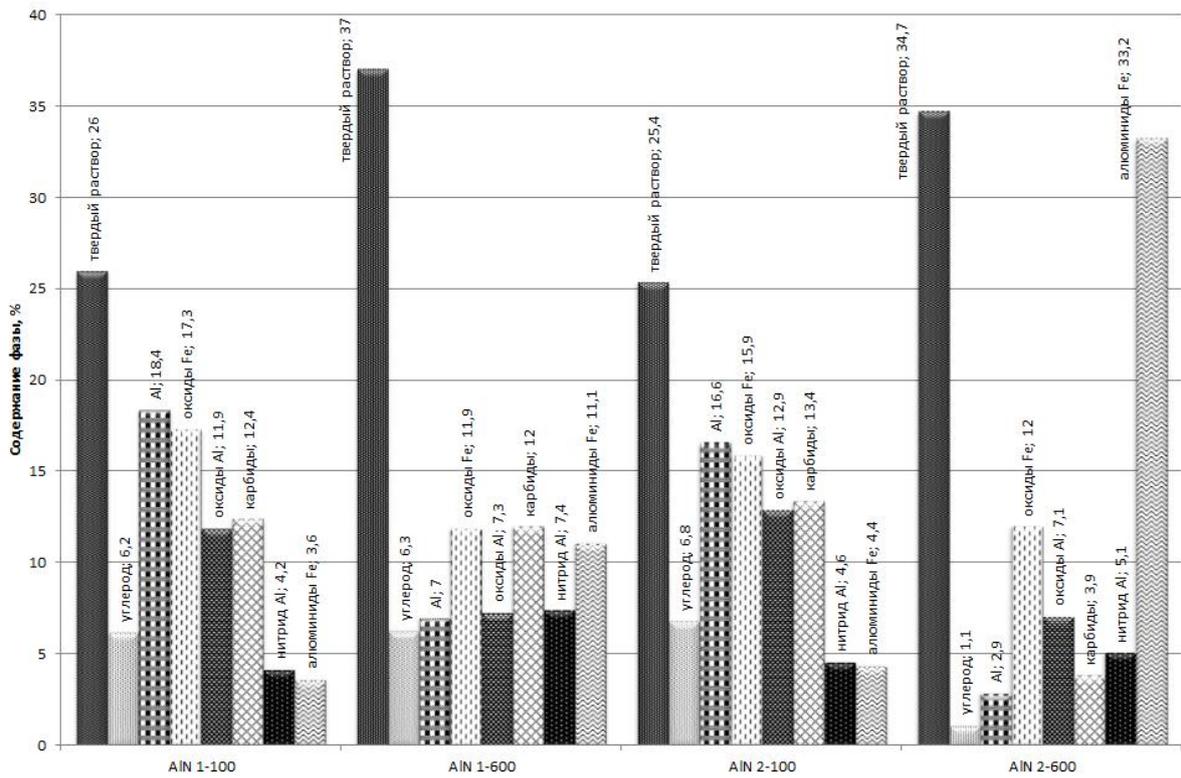


Рис. 4. Фазовый анализ после лазерного легирования нитридом алюминия при различных режимах обработки

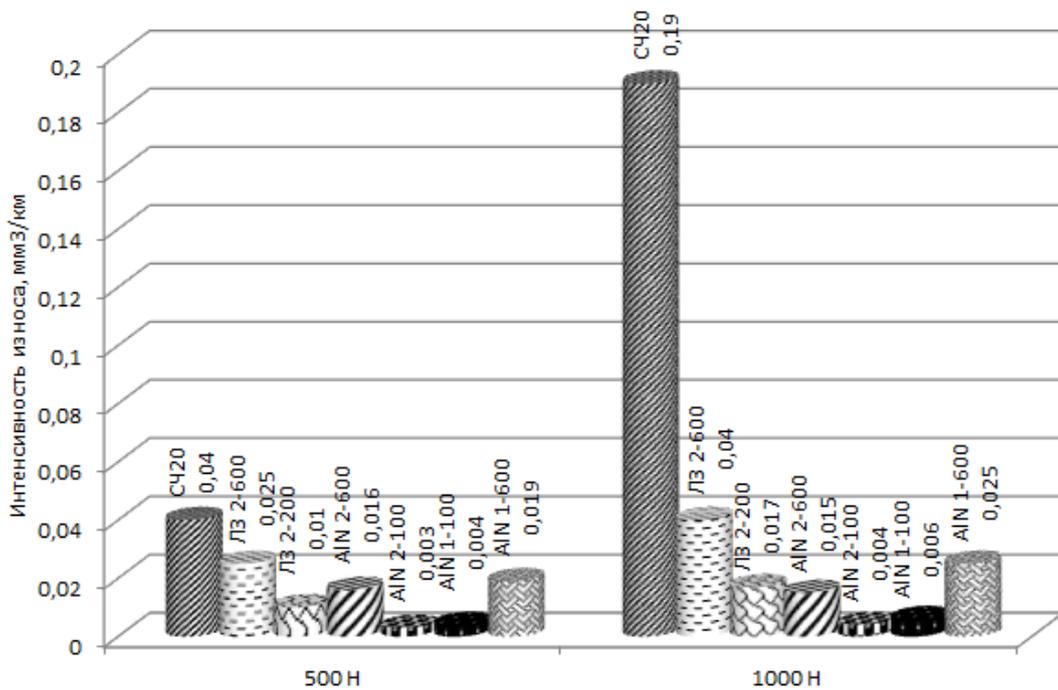


Рис. 5. Диаграмма значений интенсивности износа необработанного чугуна (СЧ20), чугуна после лазерной закалки (ЛЗ) и после лазерного легирования (AIN)

Лазерная закалка уменьшает интенсивность износа и это хорошо видно при высоких нагрузках. Кроме того, интенсивность износа при скорости перемещения лазерного

луча 100 мм/мин значительно ниже, чем при скорости перемещения лазерного луча 600 мм/мин. Аналогичная картина наблюдается и для лазерного легирования, т. е. образцы после обработки со скоростью перемещения лазерного луча $v = 100$ мм/мин достигают значительно меньших значений интенсивности износа, чем образцы после обработки со скоростью перемещения лазерного луча $v = 600$ мм/мин. Из рис. 5 видно, что диаметр лазерного луча на интенсивность износа не оказывает значительного влияния.

Лазерное легирование позволило значительно уменьшить интенсивность износа – минимальная интенсивность износа наблюдается после лазерного легирования нитридом алюминия при скорости перемещения луча лазера 100 мм/мин и при диаметре 1 мм и 2 мм, и она составляет $0,003$ мм³/км при интенсивности износа необработанного чугуна $0,04$ мм³/км.

Если сравнить значения микротвердости и интенсивности износа при различных режимах (рис. 1 и 5), то можно увидеть, что режимы, при которых наблюдается максимальная микротвердость, не соответствуют режимам, при которых наблюдается минимальная интенсивность износа. Можно предположить, что на микротвердость и на интенсивность износа оказывают влияние различные структурные состояния упрочненного слоя.

Из рис. 4 и 5 видно, что и на фазовый состав и на интенсивности износа оказывают влияние режимы лазерной обработки, т. е. скорость перемещения луча лазера и диаметр лазерного луча [4].

Основной вопрос исследования – существует ли корреляционная зависимость между интенсивностью износа деталей из серого чугуна после лазерного легирования нитридом и факторами, определяющими их структуру (в основном фазовым составом). Для ответа на этот вопрос был проведен корреляционный анализ полученных результатов. Корреляции между основными оптимизационными параметрами (износостойкостью и микротвердостью покрытий) и факторами, определяющими структуру покрытий, оценивались с помощью программы «Approximator».

Для каждой пары факторов были рассчитаны парные коэффициенты корреляции для всех возможных взаимодействий.

Результаты корреляционных расчетов между структурными параметрами и величиной интенсивности изнашивания приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Корреляционные зависимости между фазовым составом и интенсивностью износа деталей из чугуна после лазерного легирования при нагрузке 500 Н

Фаза и микротвердость	Уравнения корреляции	Коэффициент корреляции
<i>AlN</i>		
твердый раствор Fe	$Y = -0,032 + 0,0013X$	0,99
карбиды	нет	нет
нитриды	$Y = 0,042 - 0,1604/X$	0,87
алюминиды	$Y = 0,0205 - 0,0644/X$	0,91
Al	$Y = 0,0218 - 0,0011X$	0,92
Упрочняющая фаза Микротвердость	$Y = 0,0333 - 6072/X$	0,86
	нет	нет

Можно сделать вывод, что на интенсивность износа в первую очередь оказывает влияние количество твердого раствора, что четко прослеживается в табл. 2. Именно между интенсивностью изнашивания и количеством упрочняющей фазы для нитрида алюминия наблюдается максимальный коэффициент корреляции – 0,99. При этом корреляция положительная, то есть максимальное значение интенсивности изнашивания наблюдается при максимальном количестве упрочненной фазы, что подтверждается на рис. 4 и 5.

Не наблюдается корреляционная зависимость между карбидами, микротвердостью и интенсивностью износа после лазерного легирования, что говорит о том, что упрочнение произошло за счет легирования матрицы.

Выводы.

1. Режимы лазерной обработки оказывают значительное влияние на микротвердость упрочненного слоя. Между скоростью перемещения луча лазера и микротвердостью наблюдается положительная корреляция, т. е. максимальное значение микротвердости на поверхности наблюдается при скорости перемещения луча лазера 600 мм/мин и составляет 7900–8200 ГПа.

2. Лазерное легирование оказывает существенное влияние на интенсивность износа. Трение при удельной нагрузке 500 Н приводит к следующим результатам: наименьшее значение интенсивности износа наблюдается при режиме обработки $d = 1$ мм $v = 100$ мм/мин и составляет $0,003$ мм³/км. Наибольшее значение интенсивности износа ($0,04$ мм³/км) наблюдается у необработанного серого чугуна. При нагрузке в 1000 Н наименьшее значение интенсивности износа $0,004$ мм³/км было отмечено при режиме обработки $d = 2$ мм $v = 100$ мм/мин, наибольшее значение – у необработанного серого чугуна ($0,19$ мм³/км).

3. На интенсивность износа в первую очередь оказывает влияние количество твердого раствора. Между интенсивностью износа и микротвердостью не наблюдается корреляционных зависимостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.: ил.
2. Гилев, В. Г. Лазерное инжекционное легирование аустенитного чугуна ЧН16Д7ГХ титаном / В. Г. Гилев, Е. А. Морозов // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 3. – С. 44–52.
3. Gilev, V. Laser Quenching Of Axial Bearings In Submersible Multistage Pumps Made Of Steel-Brass Pseudo-Alloy / V. Gilev, E. Morozov, A. Khanov, T. Ablyaz // International Journ. of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 20. – P 40861–40868.
4. Mordike, B. L. Improvement of wear properties by laser surface treatment / B. L. Mordike // Proc. 3d Eurohean Cjnf. Laser Treatment of Materials. ECLAT'90. 2 Vol. Eds. H. W. Bergmann, R/ Kupfer. – Vol. 1. – P. 371–376.
5. Чеканова, Н. Т. Исследование влияния мощного CO₂ – лазера и свойства чугунов, применяемых в автомобилестроении: Дисс. канд. тех. наук. – Завод ВТУЗ при Моск. автом. з-де им. И. А. Лихачева, 1981. – 187 с.
6. Ходаковский, В. М. Особенности лазерного упрочнения чугунных деталей судовых технических средств / В. М. Ходаковский, Е. П. Патенкова // Металлообработка. – 2003. – № 4. – С. 26–29.
7. Сафонов, А. Н. Изучение структуры и твердости поверхности железоуглеродистых сплавов после их оплавления лазерным излучением / А. Н. Сафонов // МиТОМ. – 1999. – № 1. – С. 7–10.
8. Диаграммы состояний двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 1 / под общ. ред. Н. П. Лякичева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.: ил.
9. Łyżwa K., Otrzymywanie i badanie właściwości nanoproszkyw azotku glinu, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2011.
10. Feldshtein, Eugene On the Efficiency of Laser Alloying of Grey Cast Iron with Tungsten and Silicon Carbides / Eugene Feldshtein, Oleg Devojno, Justyna Patalas-Maliszewska, Marharyta Kardapolava, Iryna Kosyakova // Materials 2023, 16, 6230. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/ma16186230>. – Date of access: 30.10.2023.
11. Feldshtein, Eugene On the Microstructure, Microhardnes and Wear Behavior of Gray Cast Iron Surface Layer after Laser Strengthening / Eugene Feldshtein, Oleg Devojno, Szymon Wojciechowski, Marharyta Kardapolava, Iryna Kosyakova // Materials 2022, 15, 1075. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/ma15031075>. – Date of access: 30.10.2023.

Поступила 30.10.2023