

Таким образом, применение искусственного интеллекта в машиностроении позволяет повысить производительность, снизить затраты на производство и уменьшить количество ошибок в процессе работы. Это также дает возможность предсказать, какие материалы и оборудование нужны для оптимальной работы производственной системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Экономика и организация производства: пособие для студентов / Л. М. Короткевич [и др.]; Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Инженерная экономика». – Минск : БНТУ, 2021. – 55 с.

2. Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Организация подготовки производства» для направления специальности 1-27 01 01-08 Экономика и организация производства (приборостроения) [Электронный ресурс] / Белорусский национальный технический университет, кафедра дисциплине «Инженерная экономика»; сост.: Н. В. Зеленковская [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023.

*Поступила 30.11.2023*

УДК 621.793.72:533

**Кардаполова М. А., Касач Ю. И., Косякова И. М.**

### **К ВОПРОСУ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ МЕДИ, УПРОЧНЕННОГО ВЫСОКОТВЕРДЫМИ КАРБИДАМИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*В статье исследован процесс покрытий в условиях граничного трения со смазкой на основе бронзы БрА7Н6Ф, полученных гибридным методом: сочетанием плазменного напыления и лазерной обработки с дополнительным легированием шликера карбидами вольфрама (WC) и карбидами хрома (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>). Исследовалось влияние параметров лазерного излучения (скорость лазерного и площадь лазерного луча) при контактных нагрузках 500 Н и 1000 Н. Показана эффективность лазерного легирования и с помощью электронной микроскопии изменение микроструктуры поверхности после изнашивания в виде образования на бронзовых поверхностях губчато-капиллярной текстуры с одновременным выглаживанием стальных поверхностей.*

**Введение.** Лазерное легирование поверхностей с использованием добавочных легирующих соединений в настоящее время является эффективным процессом обработки поверхностей. В процессе лазерного легирования происходит модификация поверхностного слоя различными соединениями за счет их добавления в расплав. Тонкий слой соединения предварительно наносится на подложку, затем расплавляется и интенсивно перемешивается под воздействием лазерного луча, а при затвердевании образуется новый поверхностный слой с заданными свойствами.

Модифицирование поверхностного слоя деталей трения твердыми частицами по-прежнему остается передовым направлением лазерной обработки поверхности, а сплавы на основе меди находят широкое применение в промышленности. Однако имеющиеся данные о деталях технологии лазерного легирования и эксплуатационной эффективности этого процесса недостаточно систематизированы. В частности, отсутствует глубокий ана-

лиз особенностей трибологического поведения бронзовых покрытий при высоких нагрузках. Кроме того, слишком мало информации дается об изменении трибологических характеристик во времени, о детализации микродефектов на поверхностях трения, о поведении твердых упрочняющих частиц, вводимых в поверхностный слой бронзы, и т. д. Недостаточно информации и о деталях изношенных поверхностей контртел.

Целью данного исследования стал анализ особенностей эксплуатации бронзовых покрытий после армирования карбидами вольфрама ( $WC$ ) и карбидами хрома ( $Cr_2C_3$ ) с помощью иттербиевого волоконного лазера. В работе отражены характеристики механизмов износа и целостности поверхности бронзовых покрытий БрА7Н6Ф, изготовленных с различными исходными параметрами. Решение этих вопросов важно как для развития научных знаний в области функционально-эксплуатационных свойств твердых покрытий, так и для их практического применения.

**Методика исследования.** В качестве базового материала покрытия использовалась бронза БрА7Н6Ф. Материал имеет двухфазную структуру (рис. 1, а), состоящую из ( $\alpha$ ) твердого раствора (раствор  $Al$  и  $Ni$  в  $Cu$ ) и ( $\alpha + \gamma'$ ) эвтектоидов, представляющих собой смесь ( $\alpha$ ) фазы и  $\gamma'$  – твердого раствора на основе соединения  $Cu_{32}Al_{19}$  со сложной кубической решеткой. В табл. 1 приведен химический состав, а в табл. 2 – механические свойства бронзы БрА7Н6Ф.

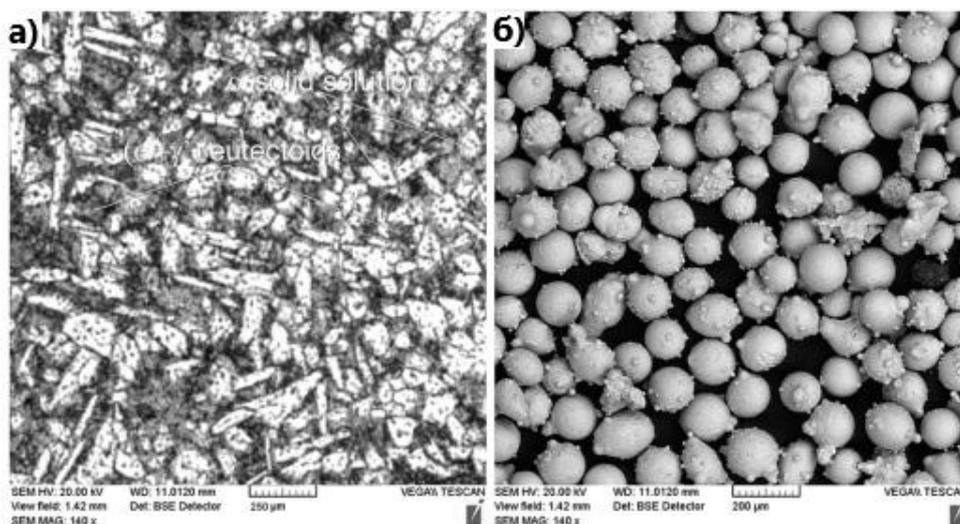


Рис. 1. Микроструктура исследуемой бронзы (а) и частицы в исходном состоянии (б)

Таблица 1 – Химический состав БрА7Н6Ф

Элемент	Al	Ni	P	Cu
Содержание, %	7	5,5	1,2	остальное

Таблица 2 – Механические свойства БрА7Н6Ф

Твердость, HRB	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа
92,0–97,0	640–725	330–380	760

Для нанесения покрытия использовались частицы размером 80–100 мкм (рис. 1, б). Было установлено, что в этом случае не возникает проблем с их прилипанием и засорением сопла плазмотрона, а также с их неравномерным нагревом в плазменном потоке.

В качестве материала подложки использовалась сталь 45. Для легирования поверхностного слоя использовались твердые керамические частицы карбида вольфрама  $WC$  и карбида хрома  $Cr_2C_3$  (рис. 2). Размер частиц составлял 2–50 мкм, несколько более крупных конгломератов были удалены механическим просеиванием.

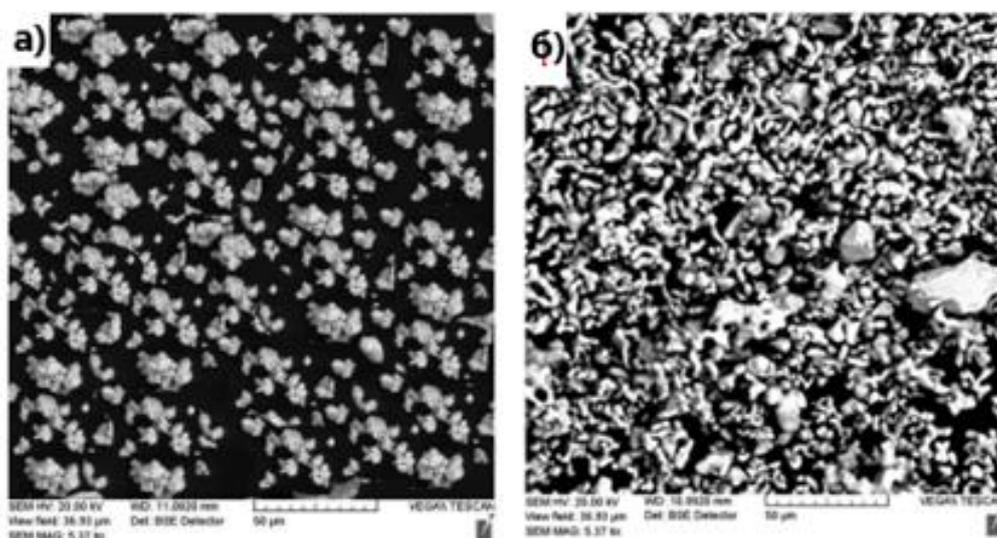


Рис. 2. Используемые твердые частицы:  
 а – карбид вольфрама ( $WC$ ); б – карбид хрома ( $Cr_3C_2$ )

Перед нанесением покрытия поверхность образцов была предварительно обработана дробеструйным методом. Нанесение бронзового слоя осуществлялось с помощью плазмотрона ПП-25. Ток дуги составлял 200 А, рабочее напряжение – 90–100 В. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовался технический азот. Расход плазмообразующего газа составлял 2,5 м<sup>3</sup>/ч, транспортирующего – 0,020–0,025 м<sup>3</sup>/ч. Толщина слоя покрытия составляла 0,6–0,7 мм. Расстояние от сопла плазмотрона до напыляемой поверхности составляло 120 мм. В указанных условиях был достигнут коэффициент расхода порошка 83–86 %, а производительность составила около 7 кг/ч.

Сравнивались три вида лазерных покрытий: бронза после лазерного переплава, бронза упрочненная карбидами вольфрама  $WC$ , и бронза упрочненная карбидами хрома  $Cr_2C_3$ . Эти частицы наносились на поверхность напыленного вида покрытия в виде шликера. Толщина слоя шликера составляла около 0,1 мм, в качестве связующего использовался клей БФ-2.

Лазерная обработка проводилась с помощью волоконного иттербиевого лазера YLR-2000 мощностью 2 кВт и длиной волны излучения 1,064 мкм. Размеры и скорости прямоугольного пятна лазера использовались в соответствии с полным факторным экспериментом 2<sup>2</sup> типа (табл. 3).

Таблица 3 – Параметры лазерной обработки

Скорость лазерного пятна, мм/мин		Площадь лазерного излучения		
Значение	Код	Размер	Площадь	Код
100	–1	2×0,5	1	–1
300	1	2×0,5	1	–1
100	–1	3×1	3	1
300	1	3×1	3	1

Контактные поверхности образцов и контртел перед трибологическими испытаниями шлифовались для получения требуемой шероховатости в парах трения. Измерения параметров шероховатости поверхности повторялись 3 раза для определения статистических погрешностей. Было установлено следующее: значения параметра  $Ra$  для образцов после лазерного переплава варьировались в диапазоне 0,53–0,61 мкм (разброс 13 %), а  $Rz$  – 2,20–2,70 мкм (разброс 18 %). После легирования карбидами вольфрама ( $WC$ ) значения параметра  $Ra$  изменялись в диапазоне  $Ra$  0,41–0,52 мкм (18 % рассеяния), а  $Rz$  1,74–2,0 мкм (13 % рассеяния). После легирования карбидами хрома ( $Cr_2C_3$ ) значения параметра  $Ra$  изменялись в диапазоне 0,53–0,61 мкм (21 % рассеяния), а  $Rz$  2,20–2,70 мкм (13 % рассеяния). Наблюдаемые изменения шероховатости аналогичны изменениям в случаях лазерного легирования другими твердыми частицами [1]. Довольно значительные вариации контролируемых значений обусловлены наличием пор, отдельных задиров и других дефектов, возникающих при шлифовании. Значения параметров шероховатости контртел из закаленной стали были стабильны и равны  $Ra$  0,35–0,38 мкм и  $Rz$  1,1–1,2 мкм (рассеяние ~8 %).

**Результаты исследования.** Микротвердость и трибологическая оценка. Результаты испытаний на микротвердость приведены на рис. 3. Видно, что значения микротвердости  $HV100$  уменьшаются пропорционально расстоянию от переплавленной поверхности и глубина упрочнения составляет ~0,3 мм. Глубина изменения микротвердости после лазерного легирования составляет около 0,6 мм, причем эти изменения практически не зависят от скорости лазерного излучения. Упрочнение слоя, легированного карбидами вольфрама ( $WC$ ) больше на ~10 % по сравнению с упрочнением карбидами хрома  $Cr_3C_2$  по глубине легирования и они выравниваются в «зоне термического влияния», размер которой составляет ~0,4–0,5 мм.

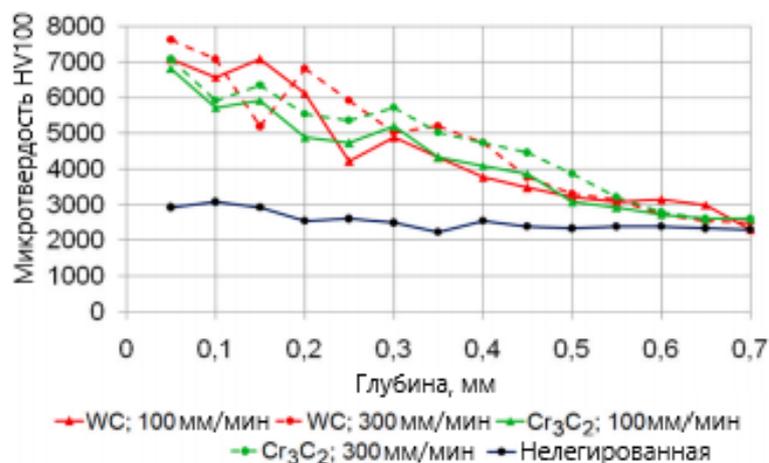
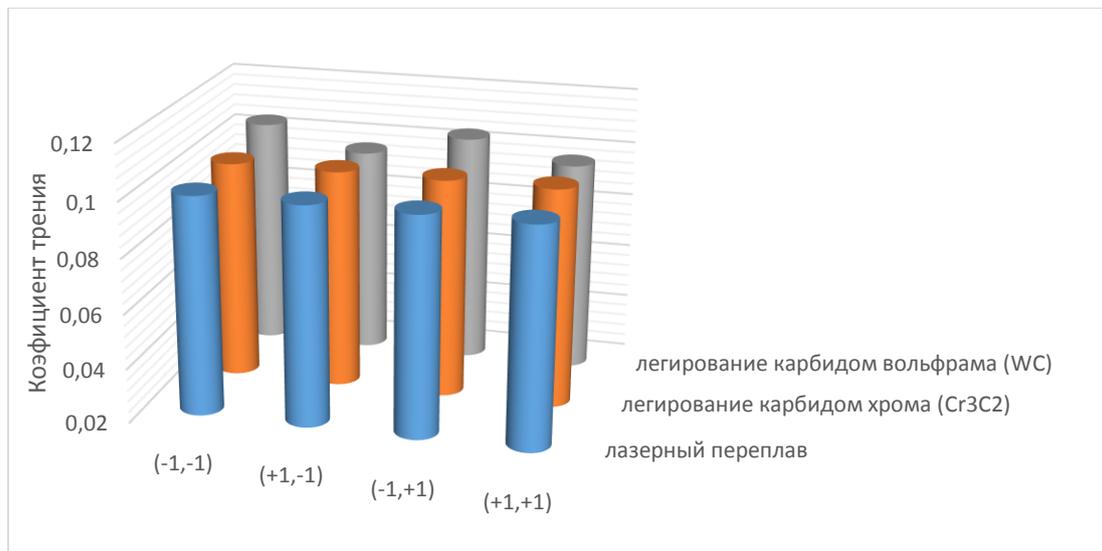
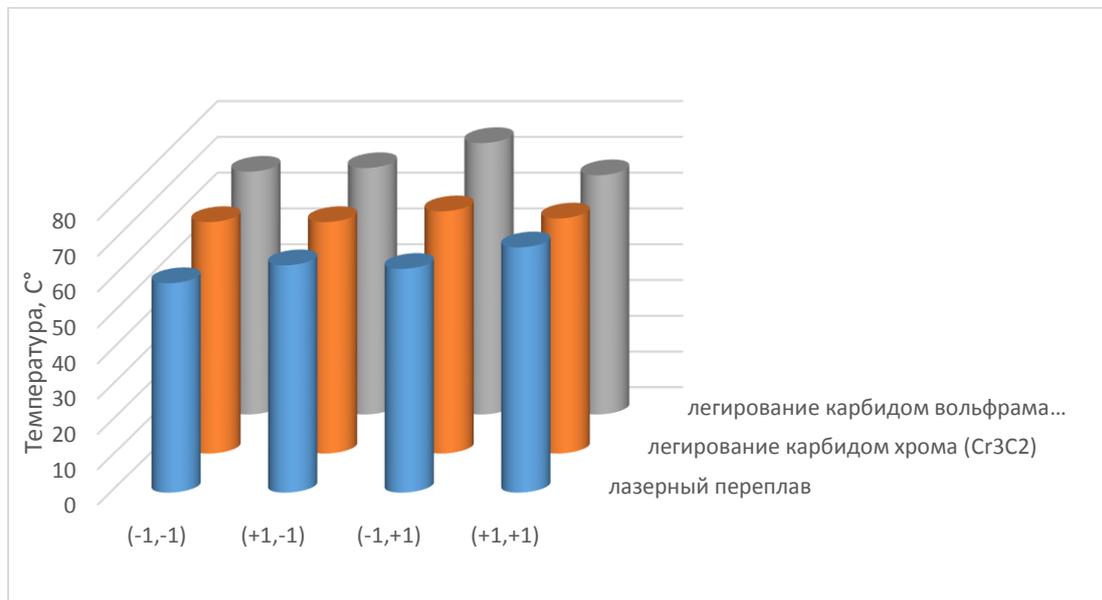


Рис. 3. Изменение распределения микротвердости в зависимости от условий лазерной обработки

На следующем этапе была проведена характеристика коэффициентов трения, которая является одним из основополагающих факторов при характеристике трибологических свойств [2; 3]. Исследования процесса трения после лазерной обработки под нагрузкой 500 Н показали, что параметры армирования не оказывают существенного влияния на значения мгновенных коэффициентов трения и температур в зоне трения, как это показано на рис. 4. Важно также отметить, что значения температур под нагрузкой 1000 Н увеличиваются в 1,5–1,8 раза, достигая ~130 °С, а значения коэффициентов трения остаются практически неизменными. Указанные детали отличаются от других исследований.



а



б

Рис. 4. Влияние параметров лазерной обработки на трибологические свойства (коды 1, -1 и т. д. соответствуют данным табл. 3)

Изменения трения и интенсивности изнашивания являются не только следствием изменения рельефа поверхности. В зависимости от особенностей трибосистемы они включают также изменения состава поверхностного слоя и микроструктуры. Важную роль в этих явлениях играет плотность энергии лазерного пятна [4].

*Оценка скорости изнашивания.* Результаты сравнения скорости изнашивания покрытий с различными условиями лазерного переплава приведены на рис. 5. В зависимости от условий лазерного переплава скорость изнашивания снижается в 1,3–6,8 раза по сравнению с результатами, полученными для образцов, изготовленных плазменным напылением (исходное состояние испытуемых покрытий).

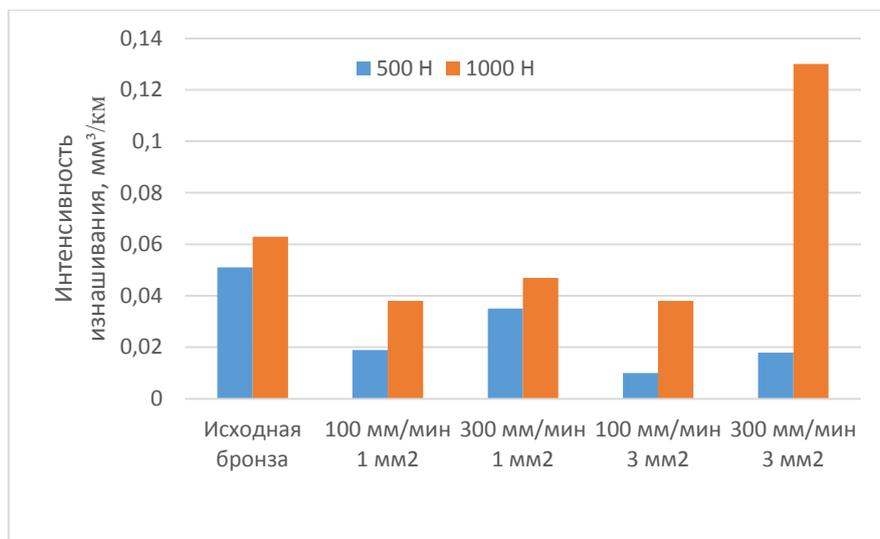


Рис. 5. Значения скорости изнашивания бронзы, напыленной плазмой и переплавленной лазером, при нагрузках 500 и 1000 Н

Анализ изменения интенсивности изнашивания позволяет сделать вывод, что по сравнению с плазменным напылением лазерный переплав с последующим лазерным легированием твердыми карбидами значительно эффективнее. При нагрузке 500 Н легирование твердыми сплавами имеет преимущество до 5–6 раз независимо от параметров обработки и вида упрочняющих частиц. Нагрузка 1000 Н является тяжелой. В этих условиях преимущество легирования очень велико: при использовании карбидов хрома ( $Cr_3C_2$ ) оно составляет 15–20 раз, а при использовании карбидов вольфрама ( $WC$ ) – даже 20–30 раз.

Выше было сказано, что на интенсивность изменения условий трения большое влияние оказывает плотность энергии лазерного пятна. Этот фактор отвечает за скорость теплового потока через поверхностный слой и возможные фазово-структурные превращения.

*РЭМ-анализ поверхности.* Наблюдения за скоростью изнашивания образцов и коэффициентами трения подтверждались изменениями в поверхностном слое изношенных поверхностей исследуемых образцов. Следует отметить, что эксплуатационные и функциональные свойства целостности поверхности в значительной степени зависят от входных параметров технологических процессов [5; 6]. РЭМ-анализ проводился для образцов, испытанных под нагрузкой 1000 Н, поскольку все физико-химические процессы проявляются более интенсивно при больших механических нагрузках и, как следствие, более высоких температурах.

Для характеристики микроструктуры на рис. 6–8 использованы следующие обозначения: 1 – микротрещины; 2 – пластификация; 3 – треки интерметаллидов; 4 – отслоение; 5 – поры; 6 – пористо-капиллярная текстура; 7 – обломки; 8 – карбиды вольфрама ( $WC$ ); 9 – интерметаллидное зерно; 10 – карбиды хрома ( $Cr_3C_2$ ).

Импульсное лазерное пятно удаляет или уменьшает размеры микротрещин и закрывает мелкие поры. В исследованном диапазоне параметров лазерной обработки можно выделить два случая формирования морфологии изношенных поверхностей. В одном из них наблюдается преобладание более или менее однородных слоев в виде связанных между собой отдельных участков (рис. 6, в, д). В этих областях можно выделить усиление адгезии, а также появление заломов. Это характерно для меньшей скорости лазерного излучения, 100 мм/мин, независимо от значений площади лазерного пятна. В результате адгезионного разрушения поверхности переплавленной бронзы наблюдается отслоение поверхностного слоя и его шелушение, а абразивный износ практически отсутствует.

При меньших плотностях энергии (рис. 6, *з*), то есть при минимизации адгезионных изменений, наблюдается губчато-капиллярная текстура. Однако при минимальной плотности энергии на поверхности износа наблюдаются две зоны: зона с губчато-капиллярной текстурой и зона очень гладких полос. Однако при этом появляются довольно крупные обломки и микротрещины (рис. 6, *е*), а также толстый след траектории движения зерен интерметаллида).

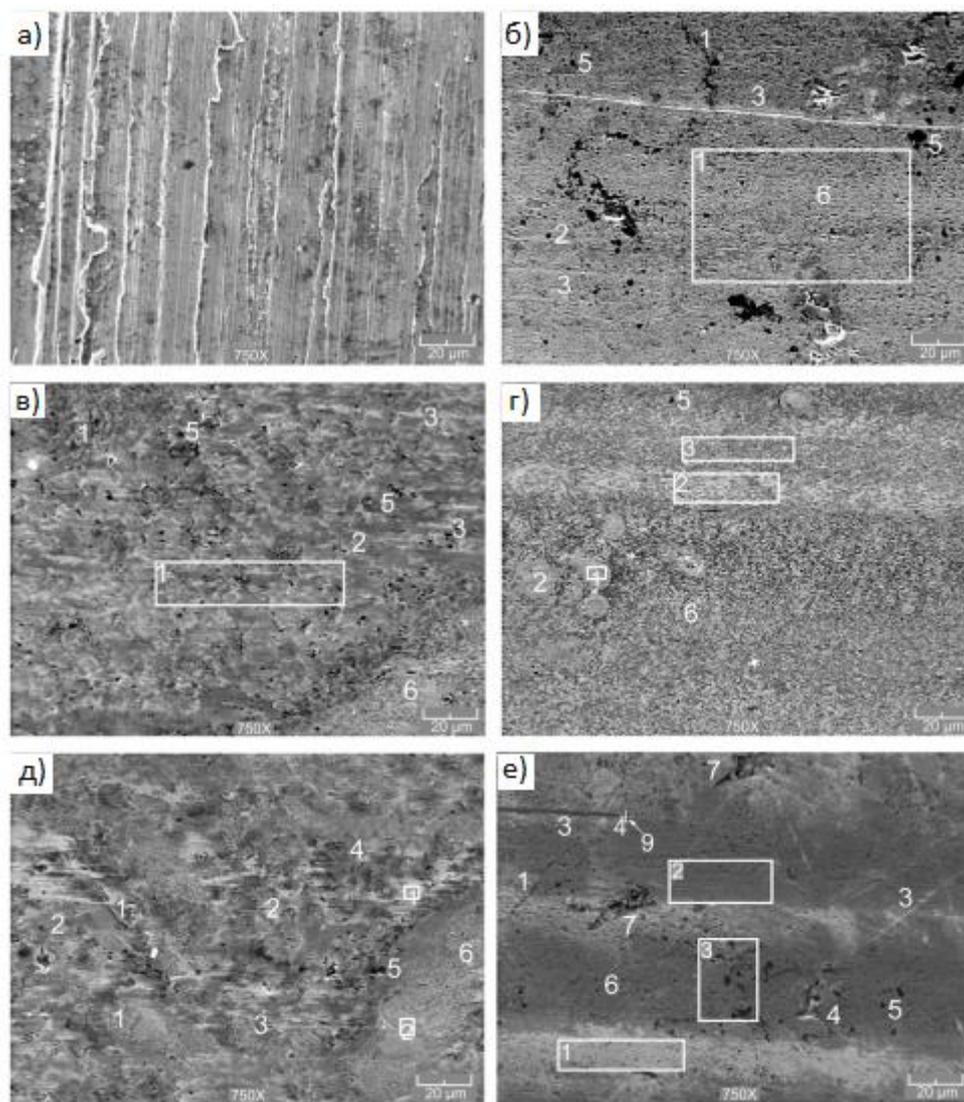


Рис. 6. Изображения поверхности после шлифования (*а*) и изношенных поверхностей, сформированных плазменным напылением (*б*) и лазерным переплавом при различных параметрах лазерной обработки: *в* – 100 мм/мин, 1 мм<sup>2</sup>; *з* – 300 мм/мин, 1 мм<sup>2</sup>; *д* – 100 мм/мин, 3 мм<sup>2</sup>; *е* – 300 мм/мин, 3 мм<sup>2</sup>

Изношенные поверхности образцов после лазерного легирования карбидами вольфрама показаны на рис. 7. В целом заметно присутствие карбидов вольфрама (WC) (8) при различных условиях трения, но при малой площади лазерного излучения и высокой скорости большая часть карбидов растворяется в бронзовой матрице (рис. 7, *в*). В то же время при различных значениях параметрах лазерной обработки выявляется наличие губчато-капиллярного эффекта (6). Наиболее ярко это явление проявляется при скорости

100 мм/мин и площади лазерного пятна 3 мм<sup>2</sup>, что видно на рис. 7, в. При других условиях легирования значение плотности энергии лазерного пятна не обеспечивает полного растворения карбидов вольфрама. Их присутствие на поверхностях трения очень велико (рис. 7, а, б, г), а интенсивность изнашивания легированной бронзы низкая, как это было показано на рис. 7, б. В большинстве исследованных случаев микротрещины *T* (1) на изношенных поверхностях отсутствуют, за исключением рисунка 7, г. Поры (5) также присутствуют независимо от значений параметров обработки, а при высоких значениях площади пятна независимо от скорости излучения наблюдаются небольшие области пластификации (2).

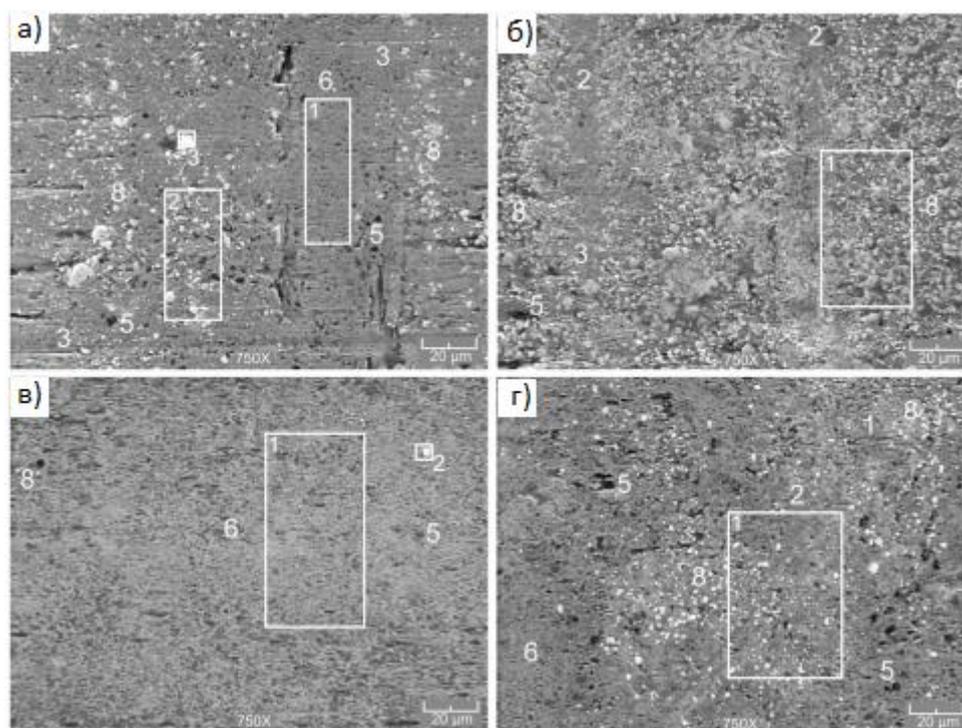


Рис. 7. Изображения изношенных поверхностей, образованных лазерным легированием карбидами вольфрама (WC) при различных параметрах лазерной обработки: а – 100 мм/мин, 1 мм<sup>2</sup>; б – 300 мм/мин, SLS 1 мм<sup>2</sup>; в – 100 мм/мин, 3 мм<sup>2</sup>; г – 300 мм/мин, 3 мм<sup>2</sup>

Изношенные поверхности образцов после лазерного легирования карбидами хрома показаны на рис. 8. В отличие от легирования карбидами вольфрама, карбиды хрома (10) на изношенных поверхностях значительно уменьшаются. При этом независимо от условий легирования наблюдаются микротрещины (1) и текстурная пластическая деформация (2) участков изношенной поверхности. Присутствуют очень мелкие интерметаллические соединения (единичные следы 3), а также поры (5).

Единичные карбиды хрома были зарегистрированы в порах бронзовой матрицы, как это видно на рис. 8, б, область 2 и рис. 8, г. Размеры карбидов хрома ( $Cr_3C_2$ ) значительно меньше размеров карбидов вольфрама (WC), что подтверждает растворение первых в бронзовой матрице; изношенные поверхности равномерно окислены; в зону трения впитываются молекулы масла, содержащие серу.

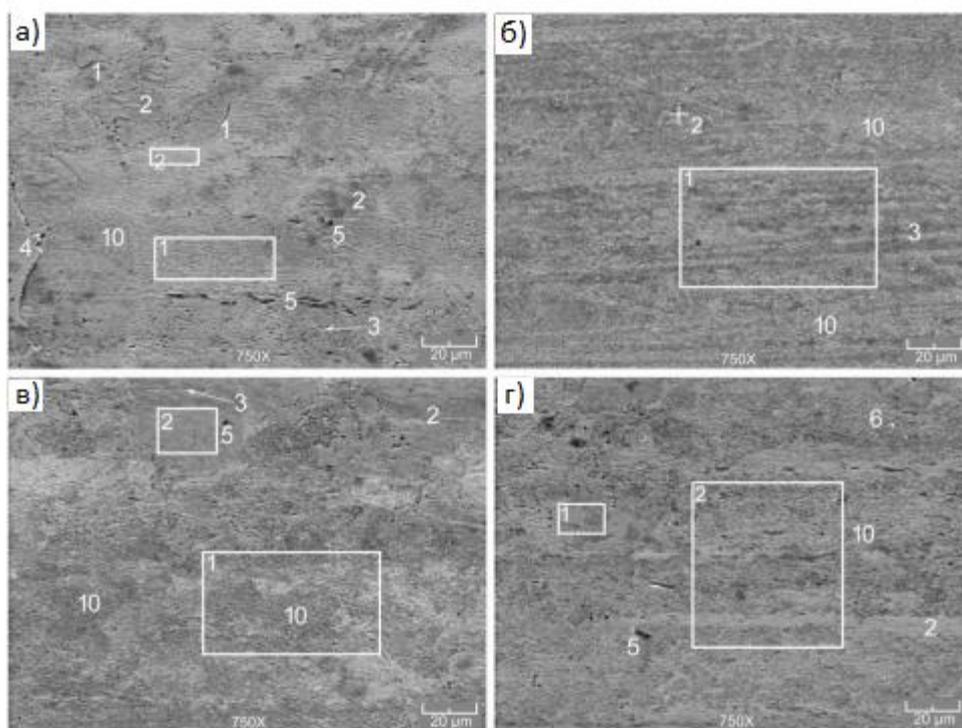


Рис. 8. Изображения изношенных поверхностей, сформированных лазерным легированием карбидами хрома ( $Cr^3C^2$ ) при различных параметрах лазерной обработки:  
*a* – 100 мм/мин, 1 мм<sup>2</sup>; *б* – 300 мм/мин, 1 мм<sup>2</sup>; *в* – 100 мм/мин, 3 мм<sup>2</sup>; *г* – 300 мм/мин, 3 мм<sup>2</sup>

Обобщая описанные РЭМ-анализ, можно сделать вывод, что лазерное легирование бронзы твердыми частицами карбидов металлов при лазерном переплаве поверхностного слоя серьезно изменяет свойства и микроструктуру этого слоя. Значительные изменения происходят в процессе трения на изнашиваемых поверхностях. На бронзовых поверхностях формируется губчато-капиллярная текстура с одновременной притиркой и выглаживанием стальных поверхностей. Эти эффекты при дополнительном положительном влиянии смазочного масла, находящегося в микроозерах губчато-капиллярной текстуры, обеспечивают многократное снижение интенсивности изнашивания и могут рассматриваться как основа для дальнейшего научного и практического применения.

#### **Выводы.**

В данной работе описано поведение при износе бронзы БрА7Н6Ф, полученной лазерным переплавом и легированной карбидами вольфрама ( $WC$ ) и карбидами хрома ( $Cr_2C_3$ ). По результатам исследования можно сформулировать следующие выводы.

Микротвердость уменьшается пропорционально расстоянию от переплавленной поверхности, а глубина упрочнения составляет  $\sim 0,3$  мм. Глубина изменения микротвердости практически не зависит от скорости лазерного излучения. Упрочнение карбидами вольфрама ( $WC$ ) выше на  $\sim 10\%$  по сравнению с упрочнением карбидами хрома ( $Cr_3C_2$ ).

Параметры лазерного легирования практически не влияют на мгновенные коэффициенты трения, которые составляют 0,1–0,12 при нагрузках 500 Н и 1000 Н. Температуры в зоне трения стабильны и невелики, однако при нагрузке 1000 Н они существенно возрастают, достигая  $\sim 130$  °С.

В зависимости от условий лазерного переплава интенсивность изнашивания снижается в 1,3–6,8 раза по сравнению с той, которая достигается при плазменном напылении.

По сравнению с плазменным напылением лазерное легирование твердыми карбидами гораздо эффективнее. При нагрузке 500 Н он имеет преимущество до 5–6 раз, а при нагрузке

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., Akincioğlu 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].