

УДК 621.891. 22

ВЛИЯНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ, НАПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

© 2023 г. В. П. Бирюков*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, 101990 Россия

*E-mail: laser-52@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.07.2022 г.

После доработки 11.07.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

В работе рассмотрен процесс лазерной наплавки порошка на основе меди с добавками дисульфида молибдена на образцы стали 40Х с использованием непрерывного излучения и поперечных колебаний луча с частотой 216 Гц. Показано влияние массовой доли дисульфида молибдена на коэффициент трения, сопротивление задиру и изменение интенсивности изнашивания. Изучено влияние поперечных колебаний на производительность наплавки.

Ключевые слова: лазерная наплавка, износостойкость, коэффициент трения

DOI: 10.56304/S2079562922050074

1. ВВЕДЕНИЕ

Существуют различные узлы трения, используемые в атомной энергетике и авиационной промышленности, которые работают при высокотемпературной трибологической нагрузке [1]. Самосмазывающиеся покрытия в основном используются для работы в тяжелых условиях эксплуатации, когда обычные материалы и смазочные материалы не могут обеспечить желаемую долговечность. Для лазерной наплавки стали 1045 использовали порошки Ni–Cr–Bi–Si с добавлением 7.5–17.5 мас. % WS_2 субмикронного размера и CaF_2 микронного размера каждого порошка [2]. Толщина шликерной обмазки на органическом связующем составляла 0.7 мм. Наплавку выполняли на Nd:YAG – лазере при средней мощности в импульсах 350 Вт, с частотой 60 Гц, с коэффициентом перекрытия 40% диаметром луча 3 мм. Испытания на трение и износ выполняли по схеме диск (сталь AISI E52100, HRC 60–62) – штифт (наплавленный образец $6 \times 4 \times 10$ мм) при скорости скольжения 2 м/с, нагрузке 20 Н, без смазочного материала. Коэффициент трения наплавленного слоя Ni60– WS_2 был значительно ниже, чем у покрытия Ni60 (примерно 0.5–0.6). Износостойкость покрытия Ni60– WS_2 была в три раза выше, чем у покрытия Ni60. В работе указана скорость сканирования 240 мм/с, что не может быть выполнено при указанных режимах обработки. Кроме того, не представлена ширина единичных наплавленных валиков, что не дает возможности определения производительности обработки.

Образцы из стали 1045 [3] с размерами $10 \times 10 \times 50$ мм были наплавлены лучом лазера композиционными порошками 70 мас. % Ni– MoS_2 смешанными в соотношении 3 : 1 и 20 мас. % TiC с 10 мас. % Ni. Обработку выполняли при мощности CO_2 – лазера 1.25 кВт, скорости сканирования 12 мм/с лучом диаметром 3 мм. Испытания на трение и износ без смазки проводились по схеме “палец (диаметром 4.8 мм и длиной 12.7 мм) – кольцо (сталь GCr15, 60 HRC)”, при нагрузке 17.8 Н, и скорости скольжения 0.24 м/с. Закаленная сталь 1045 с твердостью поверхности 50 HRC была выбрана в качестве эталона. Микротвердость покрытия MoS_2 –TiC–Ni в его верхних слоях до глубины 0.1 мм составляла 600–750 $HV_{0.2}$, а для покрытия MoS_2 –Ni ее максимальное значение было 440 $HV_{0.2}$ на глубине 0.1 мм. Коэффициенты трения для покрытий MoS_2 –Ni, MoS_2 –TiC–Ni и стали 1045 составили 0.376, 0.517 и 0.828 соответственно. Износостойкость композитного покрытия MoS_2 –TiC–Ni в 6 раз выше эталонной стали. Авторами не показана ширина наплавляемых дорожек и коэффициент их перекрытия, что препятствует определению производительности наплавки.

Композитные покрытия [4] из порошков NiCr 25% (35–60 мкм)–TiC 75% (до 75 мкм), NiCr 22.5%–TiC 67.5%–Cu 10% (до 50 мкм) и NiCr 20%–TiC 60%–Cu 10%– WS_2 10% (до 10 мкм) получали на образцах стали 30CrMnSi с размерами $50 \times 50 \times 6$ мм с помощью лазерной наплавки. Об-

работку образцов проводили с помощью Nd:YAG – лазера при мощности излучения 1500–3000 Вт, скорости сканирования лазерного луча 7–15 мм/с, пятном с размерами 5×5 мм в среде аргона. Триботехнические испытания выполняли на машине трения UMT-3M, Bruker, Германия по схеме вращающийся диск с наплавленным покрытием-шар (Al_2O_3 диаметром 10 мм) при нагрузке 100 Н, с частотой вращения 100 мин^{-1} по окружности диаметром 5 мм в течении 30 мин. Микротвердость покрытий NiCr – TiC, NiCr–TiC–Cu–WS₂ и NiCr–TiC–Cu составляла с 900–932, 850–880 и 800–830 HV_{0,2} при толщине слоя 1200, 800, 700 мкм соответственно. Минимальный коэффициент трения 0.3 получен на покрытие NiCr–TiC–Cu–WS₂ в то время как у материала основы он составлял 0.6. Наибольшую износостойкость показало покрытие NiCr–TiC–Cu–WS₂ в два раза выше, чем сталь 30CrMnSi. В работе не указана ширина наплавленных дорожек и коэффициент их перекрытия, что делает невозможным определение производительности наплавки.

Порошковые покрытия Ni60 (C1), h-BN/Ni60 (C2) и нано-Cu/h-BN/Ni60 (C3) были предварительно нанесены на низкоуглеродистую сталь Q235 [5]. Обработка образцов проводилась с помощью лазера (Laserline LDF-8000, Германия) при мощности излучения 3 кВт, скорости сканирования 2 мм/с, пятном с размерами 19×6 мм в среде аргона. Испытания на трение без смазки при высоких температурах по схеме диск (наплавленный образец)-шар (Al_2O_3 , диаметром 9.58 мм) на машине трения UMT-2, Bruker, Германия проведены на каждом типе покрытий при 25, 200, 300, 400, 500 и 600°C. Нагрузка составляла 30 Н, частота вращения 50 мин^{-1} , диаметр окружности трения 5 мм, время испытаний 30 мин. Микротвердость наплавленных покрытий C1, C2 и C3 составляла 780, 625, 585 HV и 575, 550, 525 HV при температуре 25 и 600°C соответственно. Коэффициенты трения для покрытий C1, C2, C3 составляли 0.57, 0.52, 0.47 и 0.36, 0.38, 0.33 при температуре 25 и 600°C. Скорость изнашивания при нормальной температуре была ниже, чем при повышенных температурах и составляла 0.33, 0.29, $0.27 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н м}$ и 1.5, 1.7, $1.72 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н м}$ при температуре 25 и 600°C. В работе не указаны ширина зон наплавки и коэффициент перекрытия дорожек для оценки производительности лазерной обработки.

На образцы нержавеющей стали 12Cr18Ni9Ti с размерами $50 \times 40 \times 8$ мм наносили шликерные покрытия NiCr/Cr₃C₂ и NiCr/Cr₃C₂–30%WS₂ толщиной 1.5 мм на основе органического связующего, с последующей сушкой в печи [6]. Наплавку проводили на CO₂-лазере (GS-TFL-10 кВт, Китай) при мощности излучения 1.5 кВт, размере луча 6×3 мм и скорости сканирования 4 мм/с.

Триботехнические испытания выполняли по схеме диск-шар (Si_3N_4 , диаметром 4 мм, 1700 HV) на открытом воздухе (тестер HT-1000, Китай). Испытания проводили при нагрузке 5 Н, со скоростью скольжения 16.9 м/мин, по окружности диаметром 4 мм, в течении 20 мин. Микротвердость покрытий NiCr/Cr₃C₂ и NiCr/Cr₃C₂–30%WS₂ составляла 1000–1100 и 1000–1200 HV_{0,3} при толщине наплавленных слоев 400 и 900 мкм соответственно. Коэффициенты трения покрытий NiCr/Cr₃C₂ и NiCr/Cr₃C₂–30%WS₂ при температуре 17, 300, 600°C снижались и имели значения 0.46, 0.42; 0.45, 0.3; и 0.43, 0.28 соответственно. Скорость износа покрытий NiCr/Cr₃C₂ и NiCr/Cr₃C₂–30%WS₂ возрастала при повышении температуры и составляла при 17, 300 и 600°C 9.8, 10.0; 21.0, 15.0 и 41.0, $47.0 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н м}$.

В качестве подложки для лазерной наплавки [7] была принята среднеуглеродистая сталь 1045 с размерами образцов $50 \times 20 \times 20$ мм. Порошковая шихта содержала смесь 50 мас. % порошка MoS₂, покрытого Ni, и 50 мас. % порошка Ni60. Лазерная наплавка выполнялась на CO₂ – лазере при мощности 1.8 кВт, диаметром луча 3 мм, со скоростью сканирования $V = 2$ мм/с. Триботехнические испытания покрытия на воздухе проводили с помощью машины трения по схеме шар-диск при нагрузке 20 Н и частоте вращения около 200 мин^{-1} , по окружности трения диаметром 43.8 мм. Микротвердость наплавленного покрытия составляла 350–400 HV. Коэффициенты трения MoS₂–Ni60 имели значения 0.1–0.2 и были значительно ниже, чем у стали 1045 – 0.3–0.45. Износостойкость покрытия MoS₂–Ni60 была выше материала основы в три раза, но ниже покрытия Ni60 в два раза.

Для лазерной наплавки использовали образцы [8] стали 12Cr18Ni9Ti с размерами $50 \times 30 \times 10$ мм. Порошковая смесь, состоящая из сферических матриц NiCr–Cr₃C₂ (70 мас. %) со средним размером 50 мкм, 30% дисульфида вольфрама WS₂ (2 мкм) и NiCr–Cr₃C₂ (70 мас. %) – WS₂(Ni–P)30 (мас. %) смешивались в шаровой мельнице. Наплавка шликерного покрытия выполнялась на CO₂-лазере при мощности 1500 Вт, скорости сканирования 6 мм/с, лазерным пятном 6×3 мм. Триботехнические испытания проводили без смазки при комнатной температуре (КТ), 300°C и 600°C по схеме диск-шар на тестере HT-1000, Китай при нагрузке 5 Н, времени 20 мин, радиусе трения 2 мм, со скоростью 16.9 м/мин. Средняя микротвердость покрытия NiCr–Cr₃C₂/WS₂ (1100 HV_{0,3}) выше, чем у покрытия NiCr–Cr₃C₂/WS₂ (Ni–P) (1000 HV_{0,3}). Коэффициент трения покрытия NiCr–Cr₃C₂/WS₂ (Ni–P) ниже, чем у покрытия NiCr–Cr₃C₂/WS₂ при КТ и 300°C, кроме того, коэффициент трения покрытия NiCr–

$\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{WS}_2$ (Ni–P) изменяется в меньшем диапазоне до 600°C . Покрытие NiCr– $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{WS}_2$ изнашивается больше, чем NiCr– $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{WS}_2$ (Ni–P) при КТ, 300°C и 600°C соответственно.

Образцы с размерами $40 \times 30 \times 10$ мм [9] на медной основе, с составом Cu–0.9Cr–0.26Zr (мас. %) использовали в экспериментах с лазерной наплавкой. Порошок кобальта Co (100%) (1) и смеси порошков Co (70%) – TiC (30%) (2); Co (70%) – TiC (20%), CaF_2 (10%) (3); Co (70%) – TiC (10%), CaF_2 (20%) (4) смешивали в шаровой мельнице и наносили на образцы с использованием органического связующего толщиной 1.3 мм. Наплавку выполняли на твердотельном лазере при мощности импульса 390 Вт, частоте 60 Гц, длительности 0.5 мс, скорости сканирования 5 мм/с в среде аргона. Средняя микротвердость покрытий (1), (2), (3) и (4) составляет 467, 650, 800, 1000 $\text{HV}_{0.1}$. Средние значения коэффициентов трения покрытий (1), (2), (3) и (4) составили 0.31; 0.24; 0.19 и 0.22. Скорость изнашивания кобальтового покрытия была выше в 2.1 раза по сравнению с покрытием (4) на пути трения 3000 м.

В качестве подложек использовались образцы из нержавеющей стали (12Cr18Ni9Ti) диаметром 25 мм, толщиной 20 мм [10]. Наплавка образцов выполнялась с предварительным нагревом и последующим отжигом при температуре 500°C , чтобы уменьшить остаточные напряжения от лазерной наплавки. Смеси порошков NiCr (27 мас. %, зернистость 45–105 мкм), Cr_3C_2 , покрытие NiCr (43 мас. %, зернистость 45–105 мкм), Ag (15 мас. %), $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$ (15 мас. %) были нанесены на образцы без связующего толщиной 1.2 мм. Наплавку покрытий выполняли при мощности излучения 1.0–2.0 кВт, скорости перемещения луча 500–1500 мм/мин, диаметром луча 2 мм с перекрытием дорожек 50%. Испытания на трение и износ проводили по схеме шар (Si_3N_4 , 1700 HV , диаметром 6 мм) – диск (образец с наплавленным покрытием) без смазочного материала при нормальной нагрузке 10 Н, постоянной скорости скольжения 0.21 м/с и пути трения 300 м. Микротвердость покрытий уменьшалась в зависимости от времени измельчения порошков от 1 до 24 ч. Максимальное ее значение 700 HV получено при измельчении в течение 1 ч. Минимальный коэффициент трения 0.35 получен при измельчении порошков в течение 12 ч. Минимальная скорость изнашивания $8 \cdot 10^{-5}$ $\text{мм}^3/\text{Н м}$ при измельчении в течение 8 ч.

Анализ проведенных исследований свидетельствует о недостаточной изученности влияния концентрации самосмазывающихся добавок, режимов лазерной наплавки и их влияния на триботехнические свойства полученных покрытий.

Целями настоящих исследований являются определение геометрических параметров наплав-

ленных валиков, их микротвердости, элементного состава и триботехнических свойств покрытий, наплавленных лазерным лучом с дисульфидом молибдена и без него на стали 40Х.

2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАПЛАВКИ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения экспериментов по наплавке использовали лазерный автоматизированный комплекс ИМАШ РАН. В качестве материала подложки выбрана сталь 40Х. Размеры образцов составляли $15 \times 20 \times 70$ мм. Для лазерной наплавки использовали порошковый материал на основе меди ПР-Мц 4-55 (Бр) с размером частиц 40–150 мкм. Порошок дисульфида молибдена (MoS_2) с размером частиц 1–20 мкм добавляли в шихту в количестве 6, 8, 10%. Лазерную наплавку выполняли при мощности излучения $W = 700$ –1000 Вт, скорости обработки $V = 5$ –10 мм/с и диаметре расфокусированного пучка $d = 1.5$ –2.3 мм. Для увеличения ширины зоны наплавки использовали поперечные колебания луча по нормали к скорости обработки с частотой 216 Гц.

Металлографические исследования выполняли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0.98 Н, металлографическом и цифровом микроскопах. Структура и элементный состав наплавленных покрытий исследовались на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного анализа с применением режимов отраженных и вторичных электронов.

Для определения триботехнических свойств наплавленных покрытий выполняли испытания по схеме широкая сторона наплавленного образца после шлифования – торец кольцевого контробразца втулки (сталь 50ХФА, 50–54 HRC). Режимы испытаний изменяли ступенчато, скорость скольжения (V) и давление (P) в интервале 0.1–3.5 м/с и 1–4 МПа соответственно. В качестве смазочного материала использовали масло МГЕ-10А.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1. представлены общий вид наплавленного слоя порошком бронзы (рис. 1а) расфокусированным лучом (рис. 1б) колеблющимся лучом. Ширина и высота единичных наплавленных валиков при обработке расфокусированным и колеблющимся лучом составила 1.5–2.2 и 3.5–4.5 мм и 0.5–0.6 и 0.49–0.54 мм соответственно. На рис. 2 представлен микрошлиф зоны наплавки Бр с обозначением зоны определения элементного состава с помощью СЭМ. В табл. 1 приведен состав покрытия в весовых процентах. На рис. 3 представлен фрагмент зоны наплавки порошком Бр с добавкой дисульфида молибдена 10% и зона определения элементного состава.

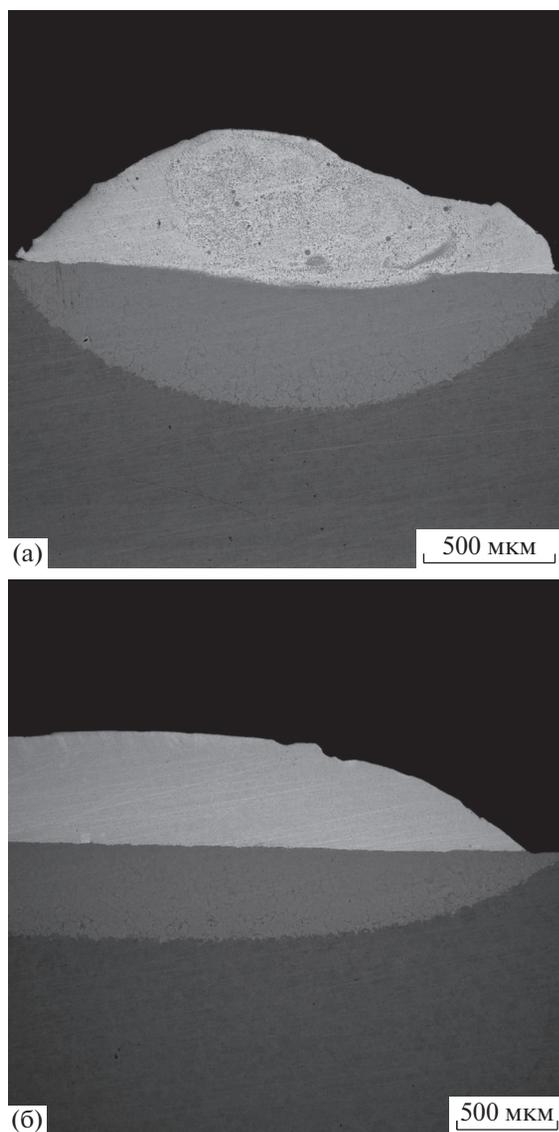


Рис. 1. Микрошлифы зон лазерной наплавки порошка бронзы: (а) расфокусированным лучом $\times 100$, (б) колеблющимся лучом $\times 100$.

В табл. 2 приведен состав покрытия Бр + 10% MoS_2 в весовых процентах.

Микротвердость наплавленных покрытий составляла 1870–2010, 2100–2400, 2450–2670 и 2360–2480 МПа при содержании дисульфида молибдена 0, 6, 8, и 10% соответственно.

На рис. 4 представлены зависимости изменения давления заедания от скорости скольжения. Из проведенных исследований следует, что наибольшую нагрузку заедания во всем диапазоне скоростей выдерживают образцы с наплавкой медным сплавом Бр, содержащим 8% MoS_2 . С увеличением давления коэффициент трения уменьшается, его минимальное значение получено при 10% MoS_2 . Минимальная интенсивность изнашивания полу-

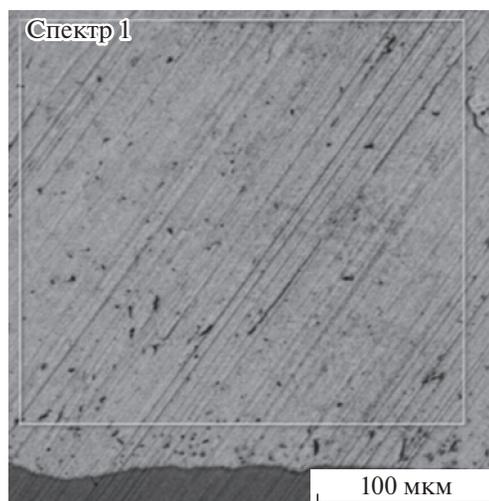


Рис. 2. Зона лазерной наплавки порошком Бр.

чена при содержании 8% MoS_2 . Полученные результаты свидетельствуют о том, что площадь наплавленных дорожек увеличивается в 2.1–2.6 раза в зависимости от режимов обработки. При этом производительность процесса возрастает пропорционально площади наплавки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология лазерной наплавки стали порошком на основе меди с добавками дисульфида молибдена. Определена предельная несущая способность наплавленных покрытий, интенсивность изнашивания и получен оптимальный результат при 8% содержании MoS_2 в составе шихты. Минимальный коэффициент трения по-

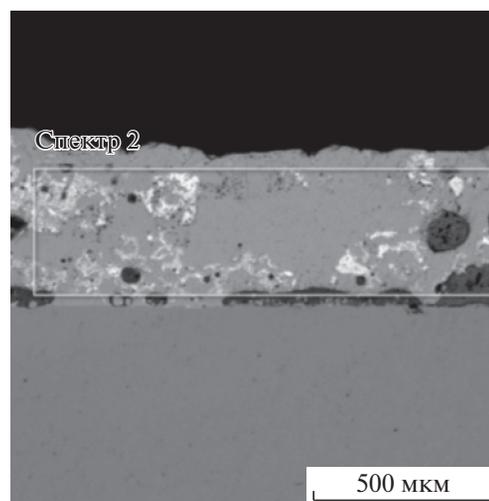


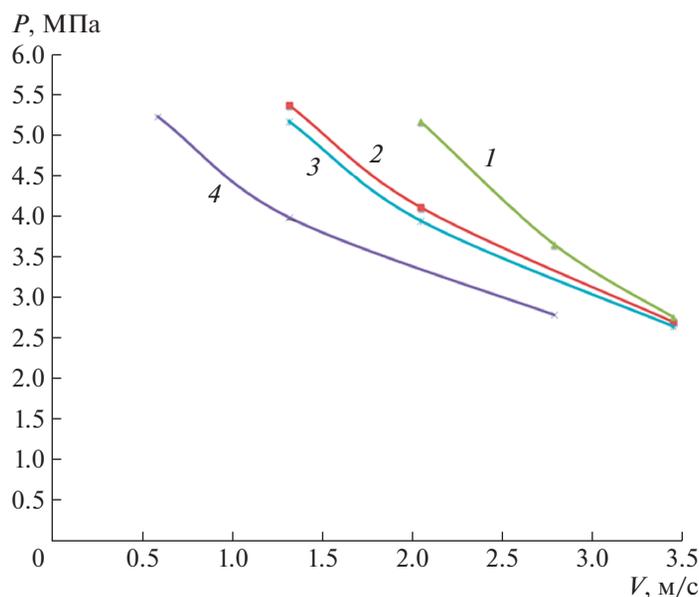
Рис. 3. Зона лазерной наплавки порошком Бр + 10% MoS_2 .

Таблица 1. Состав покрытия Бр

Спектр 1	Вес. %	Сигма вес. %
C	4.84	0.25
O	2.15	0.08
Al	8.93	0.08
Si	0.19	0.05
S	0.07	0.05
Cr	0.11	0.03
Mn	1.61	0.04
Fe	2.32	0.05
Ni	0.35	0.05
Cu	79.42	0.28
Сумма	100	

Таблица 2. Состав покрытия Бр + 10% MoS₂

Спектр 2	Вес. %	Сигма вес. %
C	6.63	0.46
O	2.92	0.16
Al	6.62	0.12
Si	0.84	0.12
S	2.53	0.13
Mn	1.05	0.07
Fe	5.18	0.11
Ni	0.34	0.09
Cu	64.29	0.53
Mo	9.59	0.36
Сумма	100	

Рис. 4. Зависимость давления заедания от скорости скольжения: 1 – Бр + 8% MoS₂, 2 – Бр + 6% MoS₂, 3 – Бр + 10% MoS₂, 4 – Бр.

лучен при 10% MoS₂. Технология может лазерной наплавки медных сплавов с MoS₂ быть использована в узлах трения, работающих при высоких температурах в качестве твердых смазочных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Quazi M.M. et al. // Lasers Manuf. Mater. Process. 2016. V. 3 (2). P. 67.
2. Wang A.H. et al. // Mater. Sci. Eng. 2008. V. 475 (1–2). P. 312.
3. Xu J., Liu W., Zhong M. // Surf. Coating. Technol. 2006. V. 200 (14–15). P. 4227.
4. Yuan J. et al. // Tribol. Int. 2021. V. 157. P. 106872.
5. Zhao Y. et al. // Surf. Coatings Technology. 2019. V. 359. P. 485.
6. Yang M.S. et al. // Appl. Surf. Sci. 2012. V. 258 (8). P. 3757.
7. Niu W., Sun R., Lei Y. // Proc. Int. Conf. Electronics and Optoelectronics (ICEOE 2011). 2011. V. 2. P. 321.
8. Liu X.B. et al. // J. Mater. Proc. Technol. 2013. V. 213 (1). P. 51.
9. Yan H. et al. // Surf. Coat. Technol. 2013. V. 232. P. 362.
10. Wang L. et al. // Appl. Surf. Science. 2012. V. 258 (17). P. 6697.

Effect of Mass Fraction of Molybdenum Disulfide on Tribotechnical Characteristics of Coatings Deposited by a Laser Beam

V. P. Biryukov*

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 101990 Russia

**e-mail: laser-52@yandex.ru*

Received July 11, 2022; revised July 11, 2022; accepted July 18, 2022

Abstract—The paper considers the process of laser surfacing of copper-based powder with molybdenum disulfide additives on 40Kh steel samples using continuous radiation and transverse beam vibrations with a frequency of 216 Hz. The influence of the mass fraction of molybdenum disulfide on the coefficient of friction, the resistance to bulging and the change in the intensity of wear is shown. The influence of transverse vibrations on the surfacing performance has been studied.

Keywords: laser surfacing, wear resistance, coefficient of friction