

Дьяченко О. В., Кардаполова М. А.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЙ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Изучено влияние параметров лазерной обработки и легирования покрытий на основе железа на коэффициент трения в условиях трения без и со смазочным материалом. Исследованы изменение фазового состава покрытий в зависимости от способа оплавления и режимов обработки.

Рост мощности и производительности машин и механизмов требует повышения надежности, долговечности и ремонтпригодности трущихся деталей машин. Кроме того, работоспособность оборудования зависит от износа его деталей. Лазерное легирование покрытий и готовых деталей широко используется как при изготовлении новых, так и при восстановлении изношенных деталей машин. Для этой цели широко используются такие легирующие компоненты как карбиды бора [1], карбиды вольфрама [2], молибден и оксиды циркония [2].

Работоспособность оборудования зависит от износа его деталей. Использование износостойких покрытий в производстве деталей машин может послужить одним из путей обеспечения этих требований. Одним из методов повышения износостойкости является лазерное легирование предварительно нанесенных плазменным напылением покрытий на железной основе боридами.

Целью работы является изучение триботехнических свойств и фазового состава порошковых покрытий на железной основе после лазерного легирования в условиях сухого трения и трения со смазочным материалом.

Для испытаний износостойкости при сухом трении и трении со смазкой использовали образцы из стали 45 цилиндрической формы диаметром 35 мм, на периферийную поверхность которых наносили плазменным методом покрытия из самофлюсующегося порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф следующего химического состава (в %): Fe (83,1–87,6), В (3,3–4,3), Cr (3,5–4,5), Si (2,0–2,5), Mn (2,0–2,5), С (1,0–1,2), V (0,5–0,9), Al (0,05–0,5), Cu (0,05–0,5). Подслой наносили на поверхность методом плазменного напыления с использованием установки УПУ-3Д с источником питания ИПН-160/600 и плазмотроном ПП-25 на режимах: $I = 250$ А, $U = 80$ В, $p = 0,6$ МПа. Плазмообразующий газ – азот. Толщина слоя 0,5–0,6 мм. Кроме того, для сравнительного анализа были нанесены слои из порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф (нижний слой) и ПГ-СР4 (верхний слой) и оплавлены горелкой.

Для измерения работы трения, момента трения и области трения контртела до момента износа в условиях сухого трения и трения со смазкой использовалась машина трения и износа типа Amsler. В этом случае исследования проводились на неподвижном контртеле (колодка) и вращающемся образце (диск). Номинальная поверхность соприкосновения колодки и вращающегося диска в результате износа не изменяется. Твердость контртела составила 40–45 HRC

Испытания проведены при сухом трении, а также с использованием смазывающего средства типа базовое масло SN150.

Рентгеновские съемки производились 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 анализа обрабатывали с использованием пакета программ автоматизации рентгеноструктурного анализа «ARSANAL» («Автоматизация обработки результатов рентгеноструктурного анализа») на ПЭВМ.

Результаты и обсуждение.

Износостойкость лазерных покрытий в условиях сухого трения. Покрытия на основе железа имеют высокое сопротивление изнашиванию [3; 4]. Ниже приведены результаты исследования износостойкости покрытий в условиях сухого трения.

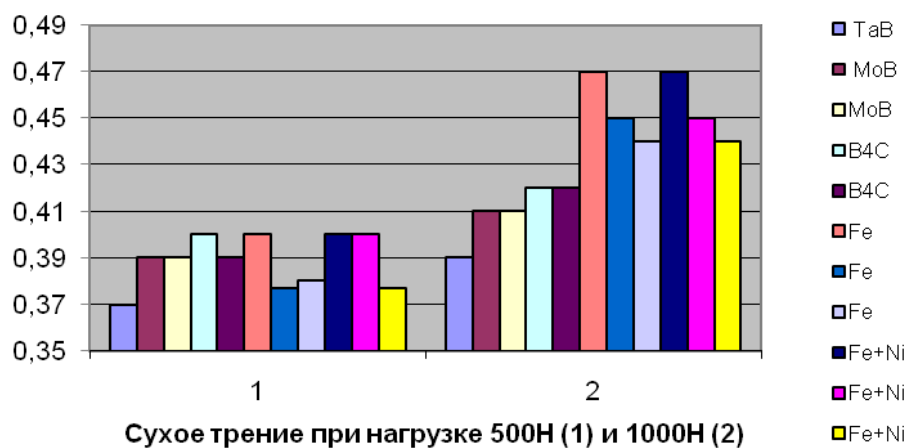


Рис. 1. Коэффициент трения при трении без смазочного материала:

1 – удельная нагрузка 500 Н; 2 – удельная нагрузка 1000 Н;

TaB – для образцов после лазерного легирования TaB;

MoB – для образцов после лазерного легирования MoB;

B4C – для образцов после лазерного легирования B4C;

Fe – для образцов после лазерного оплавления порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф;

Fe + Ni – для образцов после оплавления горелкой двойного слоя порошка; ПР-Х4Г2Р4С2Ф (нижний слой) и ПГ-СР4 (верхний слой)

Из рисунка видно, что наименьший коэффициент трения при нагрузке 500 Н был отмечен у покрытий после лазерного легирования TaB – 0,37. Наибольший – 0,4 принадлежит покрытиям, легированным B₄C. Среднее значение – 0,39 у покрытий после легирования MoB. Аналогичные результаты получены как для однослойного оплавленного порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф (Fe на рис. 1), так и для двухслойного покрытия ПР-Х4Г2Р4С2Ф (нижний слой) + ПГ-СР4 (верхний слой) (Fe + Ni на рис. 1) и равняются 0,4.

Повышая удельную нагрузку до 1000 Н, добиваемся того, что наименьший коэффициент трения 0,39 был отмечен у покрытий, легированных TaB, MoB – 0,41, 0,42 в покрытиях, легированных B₄C. Наибольший коэффициент трения – 0,47 соответствует износу двух видов покрытий: после оплавления лазером порошка на основе железа (Fe на рис. 1) и оплавленного горелкой двухслойного покрытия ПР-Х4Г2Р4С2Ф (нижний слой) + ПГ-СР4 (верхний слой) (Fe + Ni рис. 1).

Износостойкость лазерных покрытий в условиях трения со смазочным материалом. Смазка образует между трущимися поверхностями промежуточный слой, при этом процесс сухого трения двух твердых тел заменяется процессом внутреннего трения в смазочном веществе.

Анализ структуры поверхностей и величины износа образцов, испытанных при сухом трении и трении со смазочным материалом указывает на большую эффективность смазки и правильность выбора метода смазки.

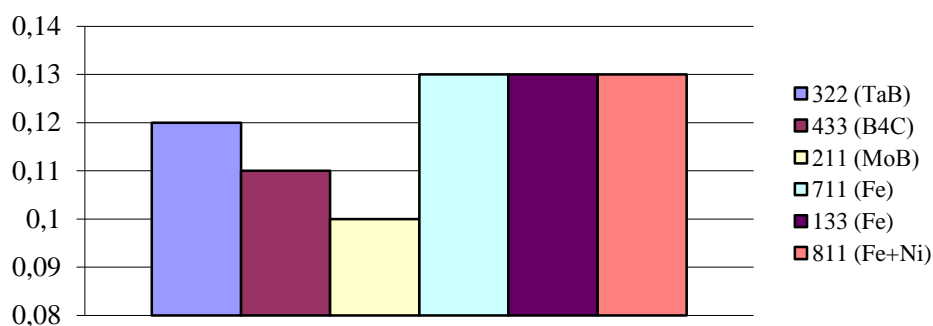


Рис. 2. Коэффициент трения скольжения при трении со смазкой и нагрузке 1000Н:
 1 – TaB – для образцов после лазерного легирования TaB;
 2 – MoB – для образцов после лазерного легирования MoB;
 3 – B₄C – для образцов после лазерного легирования B₄C;
 4 – Fe (л) – для образцов после лазерного оплавления порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф;
 5 – Fe – для образцов после оплавления горелкой порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф;
 6 – Fe + Ni – для образцов после оплавления горелкой двойного слоя порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф (нижний слой) и ПГ-СР4 (верхний слой)

Смазка резко в 3,6–4 раза снижает коэффициент трения скольжения (рис. 2) по сравнению с сухим трением. При нагрузке 1000 Н наименьший коэффициент трения у покрытий, после легирования MoB – 0,1. Далее по возрастающей – 0,11 после легирования B₄C; 0,12 – легирование TaB. У покрытий оплавленных горелкой и лазером без легирования однослойного и двухслойного наблюдается одинаковый коэффициент трения – 0,13.

Объяснением этому может послужить то, что лазерное легирование покрытий на железной основе боридом молибдена увеличивает их теплоустойчивость. Это немало важно при повышенных нагрузках на образец. Кроме того, молибден, взаимодействуя с кислородом воздуха и смазкой, образует оксиды, дополнительно снижающие коэффициент трения [5; 6].

Рассмотрим теперь влияние параметров лазерной обработки и легирования на количество упрочняющей фазы.

Режимы лазерного облучения, т. е. плотность мощности, диаметр и коэффициент перекрытия луча лазера определяют структуру и состав зоны термического влияния. Результаты испытаний фазового состава исходного порошка приведены на рис. 3.

Исходный порошок содержит α -железо, небольшое количество γ -железа и карбидо-боридные фазы [7] табл. 1.

Таблица 1 – Порошок в состоянии поставки

Фазы	Количество легирующих элементов, %
α -Fe	39,1
γ -Fe	6,7
Бориды Fe	23,5
Карбид Fe	9,8
Карбиды V, Cr, B ₄ C	9,5
Бориды	11,3

Переплавление плазменных покрытий в пламени горелки приводит к резкому снижению количества α -железа, увеличение карбидо-боридной фазы и практически не влияет на содержание γ -железа (рис. 3).

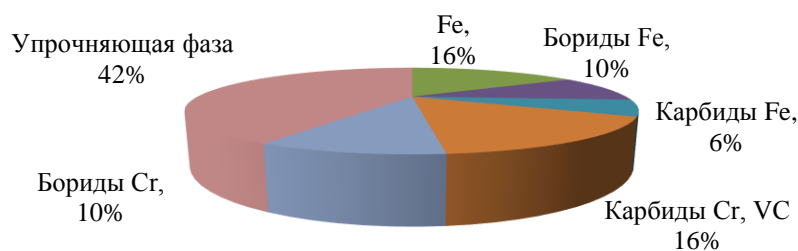


Рис. 3. Фазовый состав покрытия после оплавления горелкой

Как было показано в предыдущих исследованиях [8], лазерное оплавление приводит к формированию метастабильных структур, армированных дендритами первого, второго и третьего порядка, состоящих из легированного α -Fe и γ -Fe тонкой эвтектики, образованной между осями дендритов. Фазовый состав покрытий для различных условий лазерного оплавления без легирования показан на рис. 4.

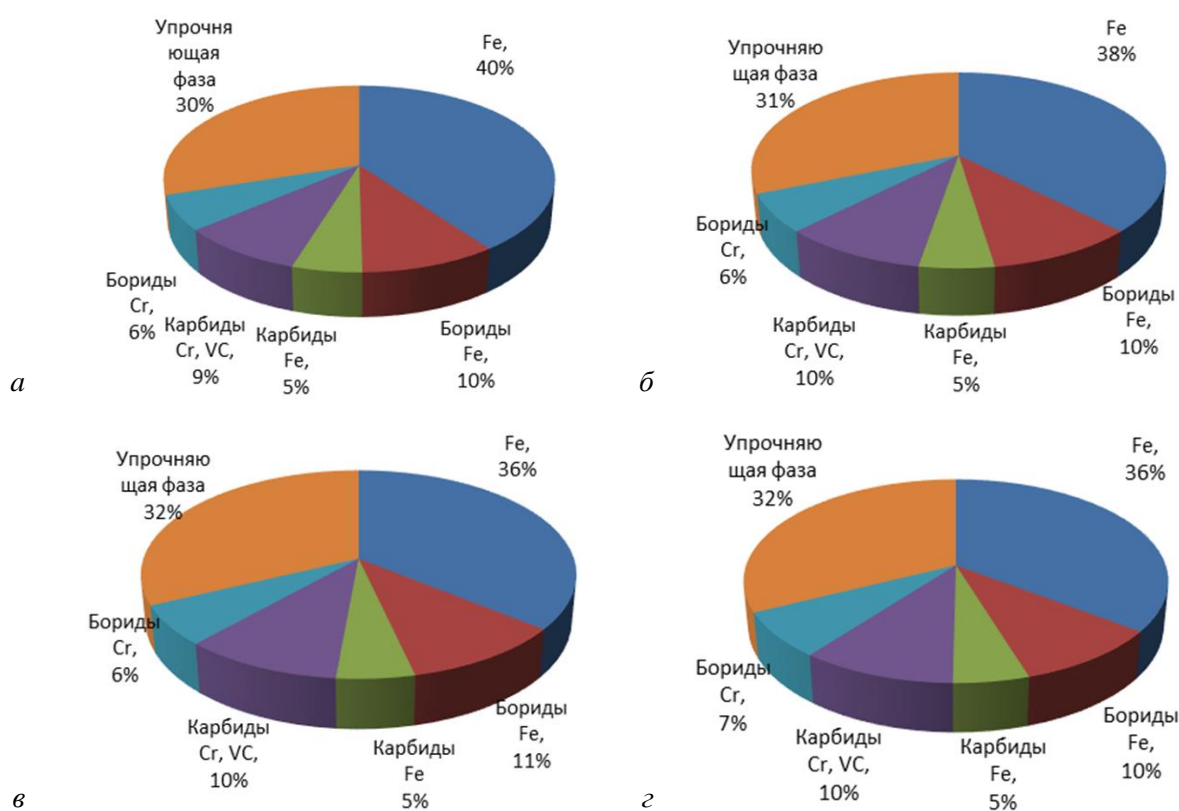


Рис. 4. Фазовый состав покрытий без легирования в зависимости от скоростей оплавления лазером:

а – $V = 50$ мм/мин; б – $V = 100$ мм/мин; в – $V = 200$ мм/мин; г – $V = 300$ мм/мин

Анализируя состав покрытий оплавленных горелкой и лазером без легирования приходим к выводу, что наибольших значений в % по объему концентрация упрочняющей фазы достигается при оплавлении покрытий горелкой.

Как видно из рис. 3 и 4 наибольшее количество упрочняющей фазы 42 % замечено в покрытиях без легирования после оплавления горелкой. Лазерная обработка уменьшает количество упрочняющей фазы до 30 % при скорости оплавления лазером 50 мм/мин, и 32 % при скоростях 200 и 300 мм/мин.

Лазерное оплавление не оказывает существенного влияния на количество боридов хрома, железа, а также карбидов Cr, Fe, V, и на количество Fe.

Свойства зоны легирования зависят от концентрации легирующих элементов и получения фаз различной степени стабильности и дисперсности, образующихся в процессе охлаждения. Строение и состав зоны термического влияния определяются режимом лазерного облучения: плотностью мощности излучения, временем его действия, а также концентрацией легирующих компонентов в обмазке [8].

Рассмотрим теперь влияние лазерного легирования TaV на фазовый состав получаемых покрытий (рис. 5).

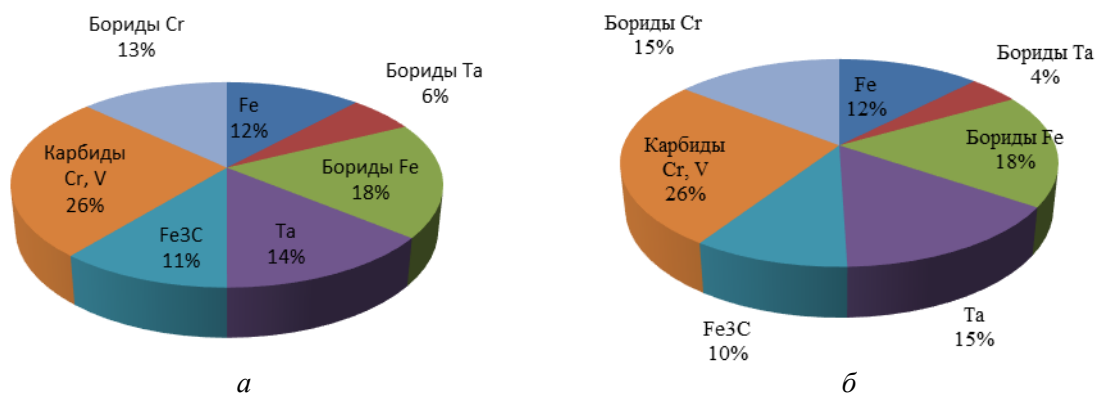


Рис. 5. Фазовый состав покрытия, армированного частицами TaV, в зависимости от условий лазерного переплава:

а – минимальные значения параметров; *б* – максимальные значения параметров

Присутствие боридов тантала делает покрытие более чувствительным к особенностям лазерного оплавления. При изменении условий теплообмена при нагреве лазерным лучом, бориды хрома разрушаются, количество γ -Fe и комплекса V, Cr, V₄C карбидов возрастает, и тантал частично появляется в свободном состоянии.

Лазерное легирование MoV влияет на фазовый состав покрытия следующим образом (рис. 6).

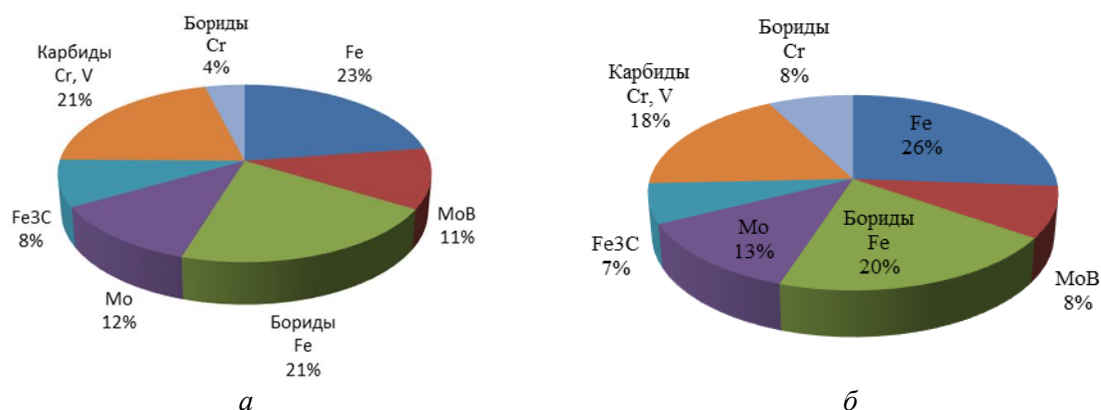


Рис. 6. Фазовый состав покрытия, армированного частицами MoV в зависимости от условий лазерного переплава:

а – минимальные значения параметров; *б* – максимальные значения параметров

Присутствие боридов молибдена делает покрытие более чувствительным к особенностям лазерного оплавления. Во время нагрева лазерным лучом, происходит изменение условия теплообмена, и протекают химические реакции, которые приводят к увеличению количества железа и боридов хрома, и молибден переходит в свободное состояние.

Легирование V_4C приводит к следующему изменению фазового состава получаемых покрытий (рис. 7).

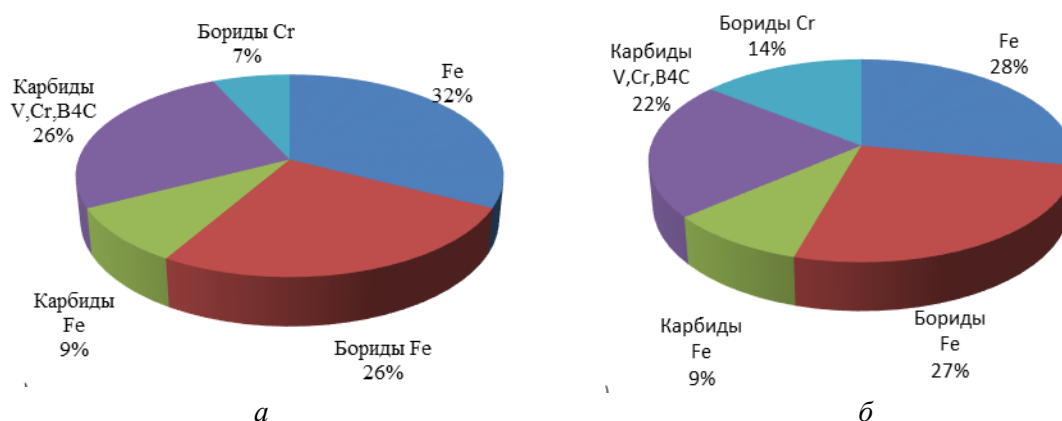


Рис. 7. Фазовый состав покрытия армированного частицами V_4C в зависимости от условия лазерного переплава:

а – минимальные значения параметров; б – максимальные значения параметров.

Как видно из рис. 7 лазерное легирование V_4C приводит к изменению фазового состава покрытий. При легировании V_4C количество пластичной составляющей, состоящей из α и γ железа уменьшилось с 36–40 % в покрытиях без модифицирования, до 28–32 % в легированных.

Лазерное легирование влияет положительно на процентное содержание упрочняющей фазы повышая концентрацию: боридов железа с 10–11 % до 26–27 %; карбидов железа с 5 до 9 % боридов хрома 9–10 % до 7–14 %.

Это говорит о том, что упрочнение происходит за счет сочетания легированности матрицы и количества упрочняющей фазы.

Выводы.

1. Лазерное легирование оказывает существенное влияние на уменьшение коэффициента трения. Трение без смазочного материала при удельной нагрузке 500 Н приводит к следующим результатам: наименьший коэффициент трения был отмечен у покрытий после лазерного легирования TaV. Наибольший 0,47 получен у покрытий без легирования, оплавленных лазером и горелкой. При нагрузке в 1000 Н наименьший коэффициент трения 0,39 был отмечен у покрытий, легированных TaV, наибольший у покрытий без легирования, оплавленных лазером и горелкой. Из этого следует, что покрытия после лазерного легирования TaV могут работать в качестве твердой смазки.

2. Смазка уменьшает коэффициент трения в 3,6–4 раза. На него также оказывает влияние лазерное легирование. При нагрузке 1000 Н наименьший коэффициент трения 0,1 отмечен у покрытий, легированных MoV. Наибольший коэффициент трения у покрытий без легирования, оплавленных лазером и горелкой.

3. Газотермические покрытия на стадии оплавления, легированные TaV, MoV и V_4C могут быть рекомендованы для сухого трения и трения со смазкой.

4. При лазерном переплаве наличие частиц MoV и TaV, V_4C приводит к дополнительным химическим реакциям и фазовым изменениям в композиции покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yilbas B. S., Patel F., Karatas C. (2013): Laser controlled melting of HSLA steel surface with presence of V_4C particles. – Appl. Surf. Sci. – vol. 282, pp. 601–606.

2. Dobrzanski L. A., Bonek M., Hajduczek E. and Klimpel A. (2005): Alloying the X40CrMoV5-1 steel surface layer with tungsten carbide by the use of a high power diode laser. – Appl. Surf. Sci. - vol. 247, No. 1 – 4, pp. 328 – 332.

3. Кардаполова, М. А. Оптимизация трибологических характеристик покрытий на железной основе после лазерного модифицирования / М. А. Кардаполова, О. В. Дьяченко, Е.Э Фельдштейн // Машиностроение и техносфера XXI века: XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Донецк, 2006. – т. 2 – С. 104–107.

4. Дьяченко О. В., Кардаполова М. А., Серякова О. В. К определению влияния варьирования режимов лазерной обработки на трибологические характеристики режущего инструмента./ Дьяченко О. В., Кардаполова М. А., Серякова О.В/ Наука и техника. 2016;15(5):415–419.

5. Трение, изнашивание и смазка. Справочник В 2 кн. Кн. 2. Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. – М. Машиностроение. – 1979. – 358 с.

6. А. Ф. Аксенов Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях. М.: Машиностроение, – 1977. – 152 с.

7. Особенности влияния лазерной обработки на свойства композиционных покрытий системы Fe–Cr–B–Si / М. А. Кардаполова М. А., О. В. Дьяченко, Ю. О. Девойно, А. Г. Василенко // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь – Донецк. – 2005. – Т. 2 – С. 63–66.

8. E. Feldshtein, M. A. Kardapolova, O. Dyachenko, Int. J. Surf. Sci. Eng. 9 (5) (2015) 395–406.

Поступила 02.12.2021

УДК 621.78; 621.179.2

Кане М. М., Крайко С. Э., Раманович А. А.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫРУБНЫХ ШТАМПОВ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

В статье показана актуальность лазерного упрочнения рабочих поверхностей вырубных штампов и исследований технологических возможностей указанного процесса для различных условий его реализации и характеристик упрочненных поверхностей. К матрицам и пуансонам вырубных штампов помимо требований к их прочности на изгиб, на разрыв и на срез предъявляются требования износостойкости, твердости поверхностей рабочих элементов штампов, при лазерном упрочнении и уменьшением шероховатости поверхностей. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния плотности энергии лазерного излучения q , Дж/мм², толщины t , мкм светопоглощающего покрытия, наносимого на упрочняемые поверхности перед их лазерным упрочнением, и коэффициента перекрытия $K_{пер}$ лазерных дорожек, на параметр шероховатости R_a , мкм упрочненной поверхности.

Состояние вопроса, задачи исследования. Стоимость инструментальной оснастки составляет до 20 % от себестоимости продукции штамповки. Причем выход из строя инструментальной оснастки при штамповке из-за ее износа достигает 20 % [1].

Вырубные штампы широко используются при изготовлении различных изделий машино- и приборостроения из листового материала. В общем количестве штамповой оснастки доля вырубных и пробивных штампов составляет 70–90 %. При этом на долю стальных штампов в различных отраслях промышленности (в отличие от твердосплавных) приходится 90–95 %. Например, в ЗАО «АТЛАНТ», г. Минск при изготовлении холодильников используются около 100 наименований вырубных штампов. При средней