

Научная статья
УДК 538.9:539.2:620.18:621.7:621.373.826
DOI 10.18101/2306-2363-2022-2-3-3-21

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

© **Лупсанов А. Б.**

преподаватель кафедры общей и теоретической физики,
Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а
аспирант,
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
lupsanovab@bsu.ru

© **Лысых С. А.**

младший научный сотрудник,
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
lysyh.stepa@yandex.ru

© **Южаков И. А.**

инженер, аспирант,
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
yuzhakov.0402@yandex.ru

© **Милонов А. С.**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
магистрант,
Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а
terwer81@mail.ru

© **Мишигдоржийн У. Л.**

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией физического материаловедения,
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
undrakh@ipms.bscnet.ru

© **Номоев А. В.**

доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией физики и композитных материалов,
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
профессор,
Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а
nomoevav@mail.ru

Аннотация. Показана возможность применения иттербиевого наносекундного импульсного волоконного лазера для поверхностного легирования инструментальной стали 3Х2В8Ф. Легирование осуществляли из пасты на основе карбида бора. Представлен анализ микроструктуры поперечных шлифов и рельефа обработанной поверхности. Изучены фазовый и элементный составы поверхностных слоев, полученных в результате лазерного легирования, а также распределение микротвердости в этих слоях. Проведено исследование износостойкости обработанной и необработанной поверхности. Установлена принципиальная возможность легирования карбидом бора с применением иттербиевого наносекундного импульсного волоконного лазера, а также определены структурно-фазовое состояние слоев в зависимости от параметров лазера.

Ключевые слова: инструментальная сталь, иттербиевый наносекундный импульсный волоконный лазер, лазерное легирование, карбид бора, поверхностное упрочнение, бороалитирование, бориды, наночастицы, лазерная абляция, лазерная наплавка, микротвердость, износостойкость, модуль упругости, растровая электронная микроскопия.

Благодарности

Авторы выражают признательность Центру коллективного пользования «Научные приборы» Бурятского государственного университета имени Доржи Банзарова и лично директору ЦКП «Научные приборы» С. С. Бадмаеву за сотрудничество и оказанную помощь при проведении данного исследования.

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам Лаборатории физического материаловедения Института физического материаловедения СО РАН Н. С. Улаханову за помощь с обработкой образцов и Д. Э. Дашееву за помощь в проведении РФА.

Экспериментальные исследования проводились на оборудовании ЦКП «Научные приборы» Бурятского государственного университета имени Доржи Банзарова, научной лаборатории «Физики композитных материалов» и научной лаборатории «Физического материаловедения» Института физического материаловедения СО РАН.

Исследование проводилось в рамках Государственного задания на проведение исследований № 2070-2021-0001 и № 0270-2021-0002.

Для цитирования: Трибологические свойства инструментальной стали после лазерного легирования / А. Б. Лупсанов, С. А. Лысых, И. А. Южаков [и др.] // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2022. Вып. 2–3. С. 3–21.

Введение

Невзирая на интенсивно развивающиеся технологии наплавки и легирования, с целью формирования тонкого функционального слоя поверхности на металлическом изделии из твердых веществ, в том числе из жаропрочных соединений, на сегодня проблема создания материалов с применением легких компонентов, к которым относится карбид бора и алюминий, с требуемыми высокими механическими свойствами, пластичностью, высокой адгезией к металлу, беспористостью, соответствующей морфологией поверхности и др. не решена и требует своего развития. В металлических покрытиях основными материалами в технологиях поверхностного упрочнения являются карбиды бора и вольфрама, обладающие высокой твердостью. Данные материалы имеют модуль упругости и твердость намного выше упрочняемой металлической поверхности. В сочетании с алюми-

нием или никелем такое покрытие наряду с высокой твердостью обладает пластичностью.

Бороалитирование имеет свои преимущества в сравнении с технологиями, использующими карбид вольфрама, вследствие низкой плотности и поэтому эта технология предпочтительна для отраслей промышленности, связанных с авиацией. В имеющихся технологиях бороалитирования для создания поверхности с высокими механическими свойствами на изделиях применяют в основном муфельный нагрев, при котором невозможно обеспечить быстрые изменения температуры, что затрудняет достижение требуемых механических характеристик покрытия.

Одним из наиболее перспективных способов нанесения упрочняющих покрытий является лазерная наплавка с использованием легирующих элементов сталей и сплавов. Особенно в связи с появлением недорогих устройств для быстрого и программируемого по разным траекториям управления лазерным лучом по облучаемой, легируемой поверхности — сканаторов, позволяющих в широких пределах управлять скоростью перемещения луча до 1000 мм/с и более. При этом малые размеры зоны термического воздействия излучения сводят к минимуму коробление и деформацию обрабатываемых изделий.

Предлагаемая лазерная наплавка для формирования композиционной структуры бороалитированных слоев на поверхности сталей позволит получить поверхность с повышенными механическими и теплофизическими свойствами (высокая износостойкость, пластичность, жаростойкость) и с малым количеством дефектов.

Применение наряду с лазерным облучением композитных тугоплавких частиц TiN плакированных легкоплавкими веществами (Ni) с целью повышения смачиваемости и формирования центров кристаллизации в бороалитированных покрытиях позволит получить поверхности с мелкозернистой структурой и, как следствие, с более лучшими механическими свойствами. При использовании методов лазерного синтеза для получения бороалитированных покрытий имеется технологическая проблема, требующая решения.

Карбид вольфрама и алюминия имеют температуры плавления, отличающиеся на более чем 2000 °С. Проблема может быть решена путём поиска необходимых режимов лазерного облучения и параметров синтеза. Заявленная научная проблема изучения фундаментальных и прикладных основ технологии поверхностного упрочнения стальных изделий с использованием лазерного нагрева будет решаться с применением теоретических и экспериментальных подходов. В качестве теоретического подхода в рамках проекта планируется использование термодинамических расчетов и компьютерного моделирования методом конечных разностей. Численные эксперименты позволят выявить существующие закономерности между физико-механическими свойствами получаемых бороалитированных покрытий и параметрами процесса лазерного облучения.

Особое внимание будет уделено изучению структурно-фазового состава и свойств получаемых покрытий с помощью современных методов физико-химического анализа и механических испытаний, а именно, рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа, просвечивающей и растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, атомно-силовой микроскопии, изме-

рения модуля упругости на микро- и макромасштабах, износо- и коррозионной стойкости.

Лазерная микрообработка представляет особый интерес из-за высокого качества обработки и экономической эффективности. Она широко используется для обработки промышленных материалов (стали, алюминия и титана) в автомобильной и аэрокосмической индустрии [1]. Импульсные лазеры на основе иттербиевых (Yb) волоконных световодов используются для различных целей, где требуется малое фокусное пятно и высокая плотность энергии: резка материалов с высокой отражательной способностью, таких как металлы и фольги; микрообработка (резка, скрайбирование, микрофрезерование, сверление и др.); обработка поверхности (прецизионная обработка поверхности, удаление покрытия, текстурирование, абляция); однорежимная и дистанционная сварка. Такой лазер, например, используется для улучшения адгезионных свойств сплавов алюминия [2]. Лазерная абляция применяется на поверхности различных подложек из алюминиевых сплавов: листовых, литых и экструзионных. За счет такой обработки повышается прочность соединения из-за увеличения площади склеивания шероховатых поверхностей.

В работе исследователей из Франции [3] описана сварка титановых сплавов с помощью лазера с дисковым источником Yb:YAG. В ней авторами предлагается использование лазерной сварки титанового шва из сплава коммерчески чистого титана CP-Ti grade 2 и сплава Ti-6Al-4V путем создания швов с полного проплавления с определенной микроструктурой. Испытания таких сварных швов на растяжение показывают аналогичную либо немного более высокую прочность соединения по сравнению с основным металлом.

Еще один пример применения импульсного Yb волоконного лазера — это синтез наночастиц [4]. С помощью лазерной абляции на поверхности углеродистой стали в кислородной среде или в жидкостях (этанол и вода) получали наноксид Fe₃O₄. В жидкостях синтезированный магнетит имел размеры 30 нм, а в кислороде 18 нм.

Помимо Yb лазера применяются и YAG-Nd лазеры, где в качестве активной среды используется алюмо-иттриевый гранат («YAG», Y₃Al₅O₁₂), легированный ионами неодима (Nd), используются они при поверхностном легировании. Например, в работе [5] было произведено легирование стали ШХ 15 с помощью наплавки чистого порошка Ni с размером частиц 160–200 мкм слоем высотой 2 мм без связующих компонентов. В работе французских исследователей [6] поверхность нержавеющей стали X30Cr13 легировали порошком из бора или нитрида бора гексагонального h-BN и получали покрытия h-BN-α-Fe(Cr) и Fe₂B-α-Fe(Cr) с твердостью 1000 и 1450 HV соответственно. По сравнению с необработанной нержавеющей сталью данные покрытия показывали более низкий коэффициент трения и значительно лучшую износостойкость.

С помощью лазерной порошковой наплавки восстанавливают высоту пера лопатки турбостартера турбовинтового авиационного двигателя НК-12МП, изготовленного из литейного сплава ЖС6К (ХН65КМВЮТЛ) с помощью наплавки порошка самофлюсующихся припоев ВПр11-40Н и ВПр24 дисперсностью 100-250 мкм и 100-320 мкм соответственно. В ходе исследования удалось установить, что оптимальным режимом лазерно-порошковой наплавки являются режимы с гауссовой и ассиметричной формой импульса с энергией 29-30 Дж и длительно-

стью 16-20 мс, при которых сохраняется наиболее высокое качество наплавки (отсутствие внутренних дефектов и высокая твердость (47-52 HRC) [7].

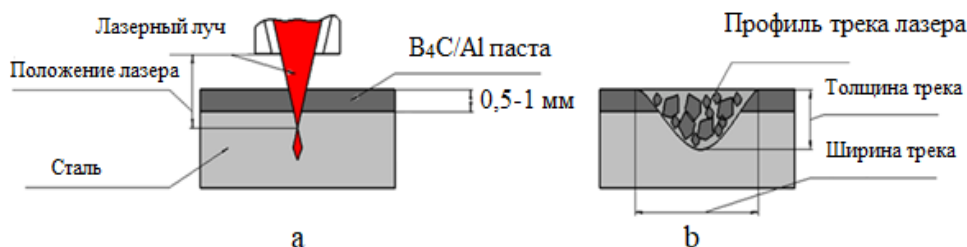


Рис. 1. Схема лазерного легирования:
а — лазерная обработка; б — полученная структура [11]

Покрытия на основе бора нашли широкое применение благодаря своим высоким характеристикам. По технологическим особенностям получения таких покрытий методы борирования в печи можно классифицировать на газовое, электролизное, жидкое безэлектролизное, порошковое, а также борирование из паст или суспензий [8]. В перечисленных методах покрытие получается с игольчатой либо зубчатой структурой, которая является довольно хрупкой. Для борьбы с этим недостатком разработан ряд методов интенсификации диффузионного насыщения. Одним из перспективных направлений такого насыщения является использование высококонцентрированных потоков энергии, таких как лазер или электронный луч [9]. Такой вид обработки можно разделить на четыре процесса: переплав, легирование, плакирование и диспергирование [10]. В последнем процессе при нагреве поверхностного слоя лазером или электронным лучом подбирается такой режим, при котором основной материал нагревается выше температуры плавления, а легирующие материалы обрабатывается ниже их температур плавления. В результате легирующие материалы диспергируются в виде частиц в ванне расплава (рис. 1) [11].

Цель работы — улучшение эксплуатационных свойств инструментальной стали при горячем деформировании путем создания на ее поверхности покрытий, содержащих В/Al, с помощью иттербиевого наносекундного импульсного волоконного лазера.

Материалы и методы исследования

Для исследования возможности поверхностного легирования инструментальной стали с помощью лазера были взяты прямоугольные (размеры 20×15×20 мм и 10×12×20 мм) и цилиндрические (d 15×10 мм) образцы из стали 3Х2В8Ф (рис. 2). Полный химический состав образцов стали приводится в табл. 1. Данная высококачественная инструментальная штамповая сталь легирована ванадием, хромом и вольфрамом. Используется такая сталь для изготовления тяжело нагруженных прессовых инструментов (мелкие вставки окончательного штампового ручья, матрицы и пуансоны для выдавливания и т. д.) при горячем деформировании легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов, пресс-формы литья под давлением медных сплавов [12].



Рис. 2. Образцы из стали 3Х2В8Ф

Таблица 1

Химический состав стали 3Х2В8Ф, вес. %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	W	V	Fe
0.3-0.4	0.15-0.4	0,15-0.4	до 0.03	до 0.03	2.2-2.7	до 0.5	до 0.35	до 0.03	7.5-8.5	0.2-0.5	~87

В ходе исследования использовался наносекундный импульсный иттербиевый волоконный лазер (импульсный Yb: волоконный лазер) YLP-V2-1-100-100-100 (IPG Photonics, Россия) (рис. 3). Данный тип лазеров используется для гравировки, маркировки, микрообработки, прецизионной поверхностной обработки и т. д. Излучение проходит по оптоволоконному кабелю длиной до 6 метров. Выходной коллиматор снабжен оптическим изолятором для предотвращения обратного отражения. Центральная линия генерации лежит в диапазоне 1060-1070 нм. Питание осуществляется постоянным током с напряжением 24 В, имеется воздушное охлаждение посредством встроенных вентиляторов.



Рис. 3. YLP-V2-1-100-100-100 Иттербиевый импульсный волоконный лазер [11]

Использовались следующие параметры работы лазера: длина волны 1070 нм, выходная мощность 50-90 Вт, энергия импульса излучения 1 мДж, длительность

импульса 100 нс, диапазон частот импульсов от 50 кГц до 90 кГц. Были протестированы два режима обработки (4 мин и 10-20 сек.) и два положения лазера с целью изменения фокусировки (выше и ниже).

На обработанную поверхность стальных образцов с помощью клея БФ-6 наносилась паста толщиной 1–3 мм. Использовались два вида паст: паста 100 % В₄С или предварительно смешанная паста 78 % В₄С + 18 % Al + 4 % NaF (вес. %).

Для определения структурного состояния, элементного и фазового состава полученных лазерных треков использовались методы оптической микроскопии, РЭМ, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) и рентгенфазового анализа. Для этих целей использовались оптический микроскоп Olympus VX43, РЭМ JEOL JSM-6510LV с системой микроанализа INCA Energy 350 и двумерный рентгеновский дифрактометр Bruker Phaser D2.

Определение показателя микротвердости выполнялось по методу Виккерса с помощью микротвердомера ПМТ-3М. Расчет микротвердости проводился по методу восстановленного отпечатка (ГОСТ 9450-76) на программном комплексе Nexsys ImageExpert MicroHardness 2. Испытание на микротвердость проводилось вдавливанием по методу восстановленного отпечатка, которое заключается в нанесении на испытуемую поверхность изделия (образца) отпечатка под действием статической нагрузки в 50 г, приложенной к алмазному наконечнику четырехгранной пирамиды с квадратным основанием в течение определенного времени. После удаления нагрузки и измерения параметров полученного отпечатка число микротвердости определяют делением приложенной к алмазному наконечнику нормальной нагрузки на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка.

Формула для определения числа микротвердости [13]:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{0,102 \times 2F \sin \frac{D}{2}}{D^2} = 0,189 \frac{F}{D^2} \quad (1)$$

где F — это нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, выраженная в ньютонах; S — это условная площадь боковой поверхности полученного отпечатка в мм²; D — это среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, выраженное в мм.

Промеры проводились с шагом в 50 мкм и с отступом от поверхности в 50 мкм.

После отработки параметров обработки были изготовлены 3 образца из стали 3Х2В8Ф для исследования износостойкости (рис. 4). Размеры образцов составляли 15x12x3...5 мм, что соответствует размерам образцедержателя машины трения (рис. 5).



Рис. 4. Легированные образцы из стали 3X2B8Ф

Метод исследований на износостойкость заключался в определении потери массы исследуемых образцов, а именно в периодическом взвешивании. В роли контртела выступал закаленный диск из стали 45, диаметром 50 мм (рис. 6). Частота вращения контртела составляла 60 об/мин. Скорость скольжения составляла 1 м/с. Нагрузка равнялась 64 кг. Измерения массы образцов фиксировались каждые 5 мин на аналитических весах A&D Weighting Galaxy HR-100A. Температуру контртела и образцов определяли с помощью бесконтактного инфракрасного термометра AR 872A. Элементный микроанализ проводился на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JCM-6000 с элементным дисперсионным анализом. Исследования проводились с использованием детектора вторичных и отраженных электронов в режиме высокого вакуума, ускоряющее напряжение равнялось 15 кВ.

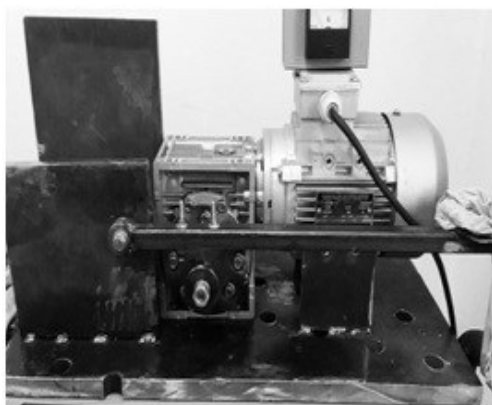


Рис. 5. Машина трения

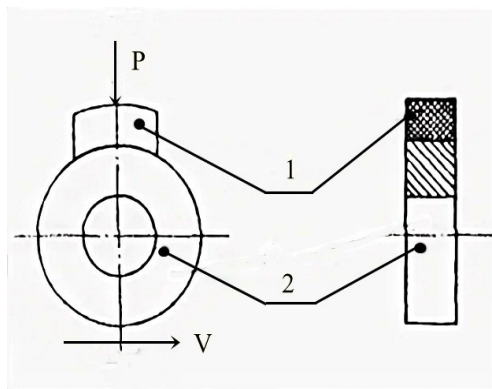


Рис. 6. Схема «диск-плоскость»:
1 — исследуемый образец, 2 — контртело

Результаты исследования и их обсуждение

На поперечном разрезе образца 1, при обработке которого использовалась паста с содержанием алюминия, видно, что толщина модифицированной поверхности составляет 25-30 мкм (рис. 7а). В то же время в микроструктуре основного металла в зоне термического воздействия выявлено значительное укрупнение зерен. В результате лазерной обработки наблюдается значительное изменение микрорельефа поверхности, а в микроструктуре трека видны такие дефекты, как пористость, включения и трещины (рис. 7б).

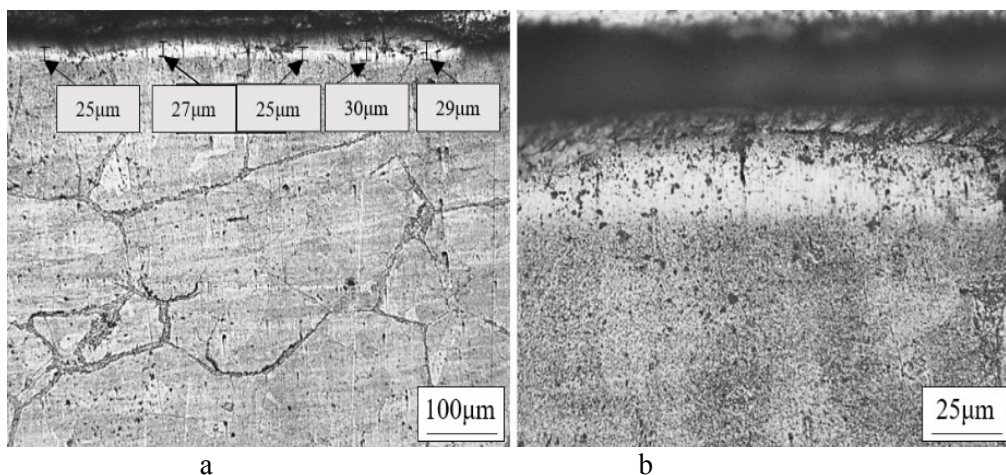


Рис. 7. Микроструктура поперечного сечения образца 1, обработанного V₄C+Al, при увеличении ×100 (а) и ×400 (б)

Морфология поверхности выявила трещины, что подтверждается данными оптической микроскопии. Вероятно, что их наличие обусловлено остаточными сжимающими напряжениями в лазерном треке.

ЭДС анализ выявил области с высокой концентрацией бора до 42,51 % весовых (рис. 8, табл. 2). Вероятнее всего, что температура при разогреве лазером была недостаточной для слияний частиц карбид бора, который имеет высокую температуру плавления, равную 2763 °С. В то же время концентрация алюминия не превышала 0,34 % весовых, которой оказалось недостаточно для создания соединений на основе алюминия. Известно, что ЭДС-детекторы имеют ограничения в эффективности обнаружения при низких энергиях (ниже 600 эВ) [14]. Так как для углерода характеристический пик составляет 277 эВ, а для бора 183 эВ, то в автоматическом режиме программного обеспечения комплекса ЭДС углерод не был обнаружен из-за частичного перекрытия пика углерода пиком бора. Следует отметить, что Al был обнаружен только в областях с высокой концентрацией бора. В спектре 5 присутствие бора в количестве 15.45 % в весовых может говорить о наличии соединения борида железа Fe₂B, хотя такая концентрация немного превышает показательную [15]. Это может говорить о том, что вблизи частиц V₄C происходили диффузионные процессы, которые привели к образованию дополнительного соединения.

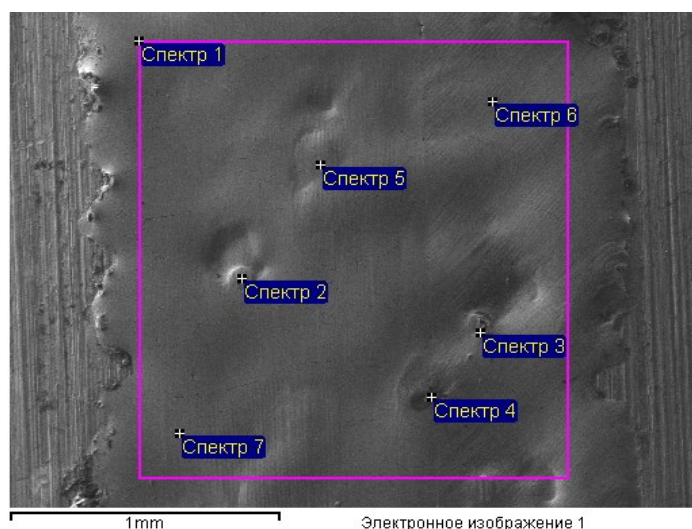


Рис. 8. Изображения поверхности облученного образца, обработанного V_4C+Al и области энергодисперсионного анализа

Рентгеноструктурный анализ образца 1 подтвердил присутствие ранее описанных Fe_2B , Al и Fe (рис. 9). Кроме того, были обнаружены карбиды W_3C и CrC , которые являются характерными примесями для данного типа стали.

С целью улучшения растворимости карбида бора и уменьшения количества кислорода в наплавляемом слое проведены эксперименты с пастой V_4C без примесей и с повышенной мощностью лазерного излучения 75-90 Вт. Скорость сканирования луча по поверхности образца равнялась 800 мм/с. В ходе исследования получены модифицированные поверхности в виде квадратов в результате сканирования лазерного луча. В зависимости от времени облучения и скорости перемещения луча на образцах наблюдаются ограниченные по периметру квадрата области, облученные лазером (рис. 10). С увеличением продолжительности обработки облученные поверхности становятся более ровными, лазерные треки — невидимыми, а поверхность образца 2 — блестящей. Мощность оказалась достаточной, чтобы переплавить поверхность образца без заметного испарения.

Таблица 2

Концентрация элементов на поверхности лазерного трека, показанного на рис. 8, вес. %.

№ спектра	B	C		Al	V	Cr	Fe	W	Всего
Спектр 1		5.03		0.21	0.40	2.23	79.37	12.76	100.00
Спектр 2		14.03		0.25	0.45	2.13	73.85	9.30	100.00
Спектр 3	28.39	12.73		0.15	0.41	1.78	52.06	4.48	100.00
Спектр 4	42.51	10.02		0.34	0.19	1.72	42.42	2.81	100.00
Спектр 5	15.45	4.16		0.08	0.51	1.88	65.68	12.24	100.00
Спектр 6		6.52		0.08	0.58	1.93	75.92	14.96	100.00
Спектр 7		16.42		0.11	0.49	2.02	68.22	12.74	100.00

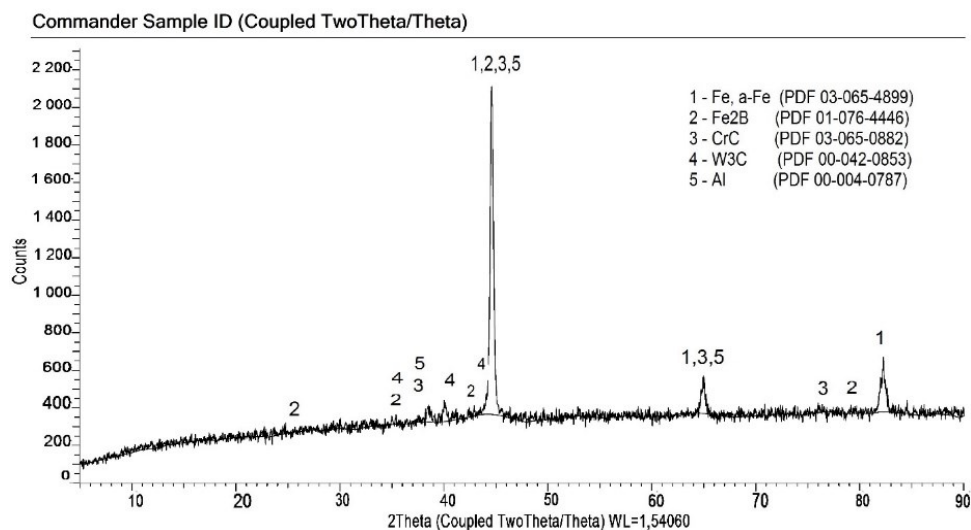


Рис. 9. Рентгенограмма поверхности на образце 1

Поперечный разрез образца 2 показал, что толщина, полученного наплавленного слоя, достаточно равномерна и составляет в среднем 77 мкм (рис. 11). Концентрация бора более равномерна по сравнению с первым образцом и варьируется в пределах от 3.14 до 6.55 % в весовых соответственно, что соответствует FeB и Fe₂B [15].

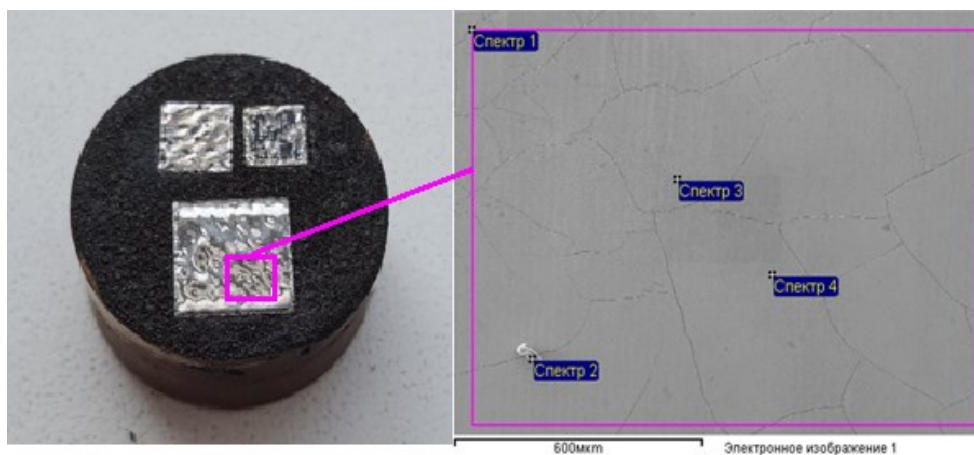


Рис. 10. Изображения поверхности облученного образца 2, обработанного W₃C, и области ЭДС анализа

Таблица 3
Концентрация элементов на поверхности, показанной на рисунке 10, вес. %.

№ спектра	C	O	Na	S	V	Cr	Fe	Ni	W	Всего
Спектр 1	4.84	4.05		0.30	0.43	2.58	77.32	0.44	10.04	100.00
Спектр 2	18.72	6.29	0.40	0.25	0.47	2.22	64.20		7.44	100.00
Спектр 3	4.75				0.53	2.69	79.36	0.45	12.23	100.00
Спектр 4	7.51	3.83			0.49	2.66	74.13	0.53	10.86	100.00

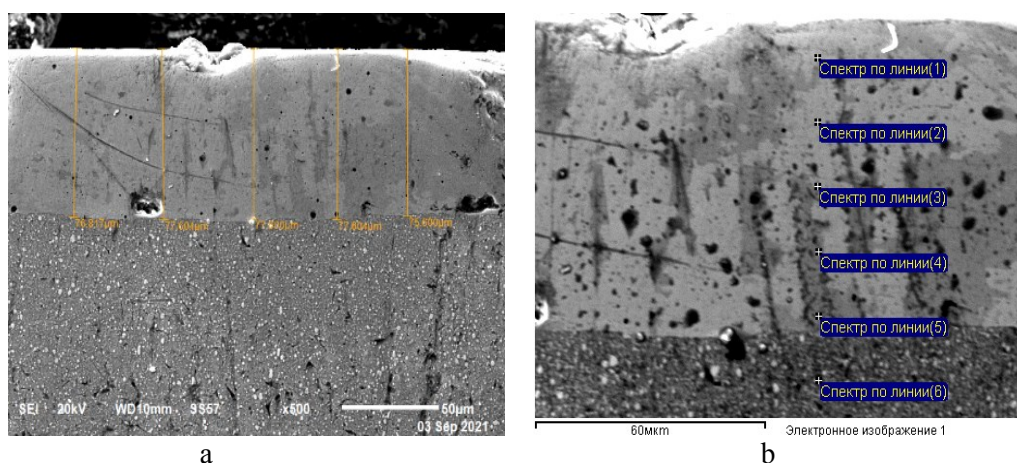


Рис. 11. Микроструктура поперечного сечения образца 2, обработанного V₄C

Таблица 4
Концентрация элементов на поверхности, показанной на рисунке 11b, вес. %.

№ спектра	B	C	Cr	Fe	W	Всего
Спектр 1	6.55	0.99	8.86	77.53	6.06	100.00
Спектр 2	3.85	0.93	7.24	81.14	6.84	100.00
Спектр 3	4.44	1.17	10.55	78.43	5.42	100.00
Спектр 4	3.14	5.73	8.78	77.41	4.94	100.00
Спектр 5	4.08	2.70	10.97	77.36	4.90	100.00
Спектр 6		3.68	7.66	84.59	4.07	100.00

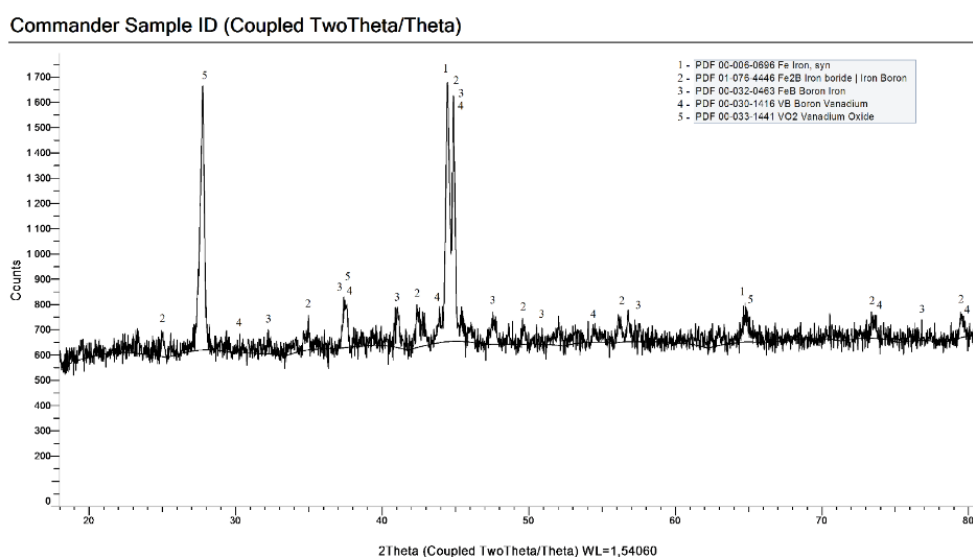


Рис. 12. Рентгенограмма поверхности на образце 2

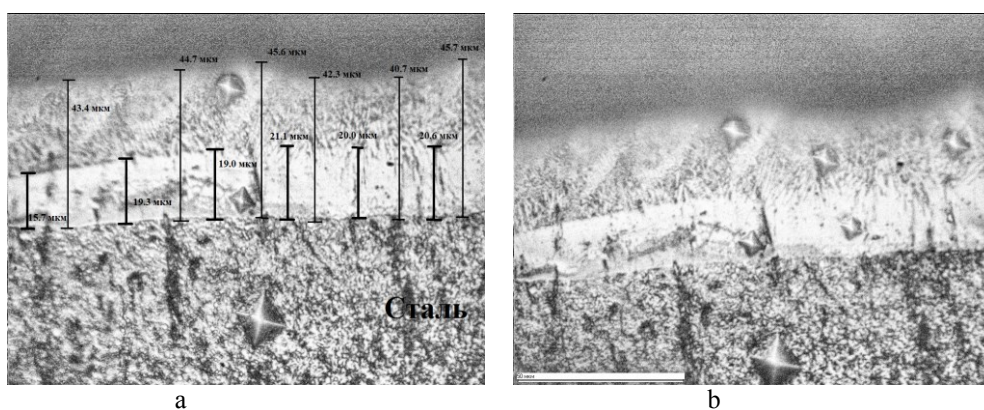


Рис. 13. Изображения поперечного слоя образца стали 3X2B8Ф с отпечатками алмазного наконечника

При измерении микротвердости образца, легированного с пастой V_4C без примесей, на снимке (рис. 13а) помимо границы между сталью и наплавленным покрытием, средняя толщина которого составляет 43.7 мкм, отчетливо просматривается промежуточный (переходный) слой, средняя толщина которого составляет 19.3 мкм.

Средний показатель микротвердости этого промежуточного слоя составляет 1477.6 HV, что превышает средний показатель микротвердости верхнего (внешнего) наплавленного слоя, который составляет 955.8 HV. Средний показатель микротвердости стали 3X2B8Ф в необработанном месте по результатам пяти промеров составляет 227.7 HV. Показатель микротвердости вырос в 4.2 раза во внешнем слое и в 6.5 раз в промежуточном слое по сравнению с необработанной сталью 3X2B8Ф.



Рис. 14. График распределения показателя микротвердости

Для проведения исследования на износостойкость были изготовлены три образца (рис. 4), покрытия которых наплавлились при различных режимах работы лазера (табл. 5) со смешанной пастой.

Таблица 5

Режимы работы лазера при проведении легирования образцов из стали 3Х2В8Ф

№ образца	Мощность излучения, %	Количество проходов лазерного излучения
1	50	10
2	100	10
3	75	10

Процесс трения образцов и контртела сопровождался массивным отделением мелких абразивных частиц (рис. 15) с образованием контактной лунки (рис. 16). Результаты исследования модифицированных образцов на износостойкость сведены в табл. 6, на их основе построен график (рис. 17).



Рис. 15. Отделение абразивных частей во время работы машины трения

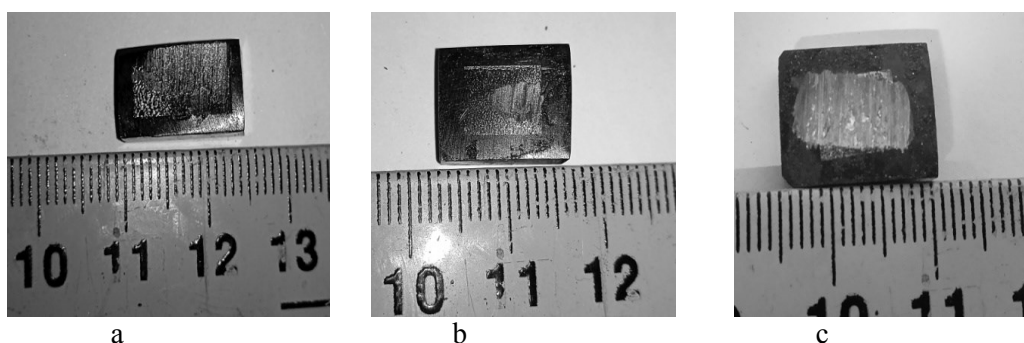


Рис. 16. Контактные лунки на поверхности образцов из стали 3Х2В8Ф после износа: а, b, с — образцы № 1, № 2, № 3 соответственно

По данным результатов рентгеноспектрального анализа поверхности контактных лунок (рис. 18), сведенных в таблицу 7, на поверхности стали 3Х2В8Ф обнаружен бор в количестве 5.65-7.01 вес. %, углерод 36.8-42.1 вес. % и др. элементы. Стоит отметить, что после проведения экспериментов по износостойкости, на поверхности образца обнаружены различные оксиды, а именно Al_2O_3 , Cr_2O_3 , MnO , FeO , NiO , CuO и MoO_3

Таблица 6.

Результаты исследования на износостойкость легированных образцов из стали 3Х2В8Ф

№ образца	$M_{нач.}$ (гр.)	Время трения (мин.)	$M_{кон.}$ (гр.)	ΔM (гр.)
1	7.0082	40	6.9966	0.0116
2	7.6642	70	7.6435	0.0207
3	7.8389	40	7.4315	0.4074

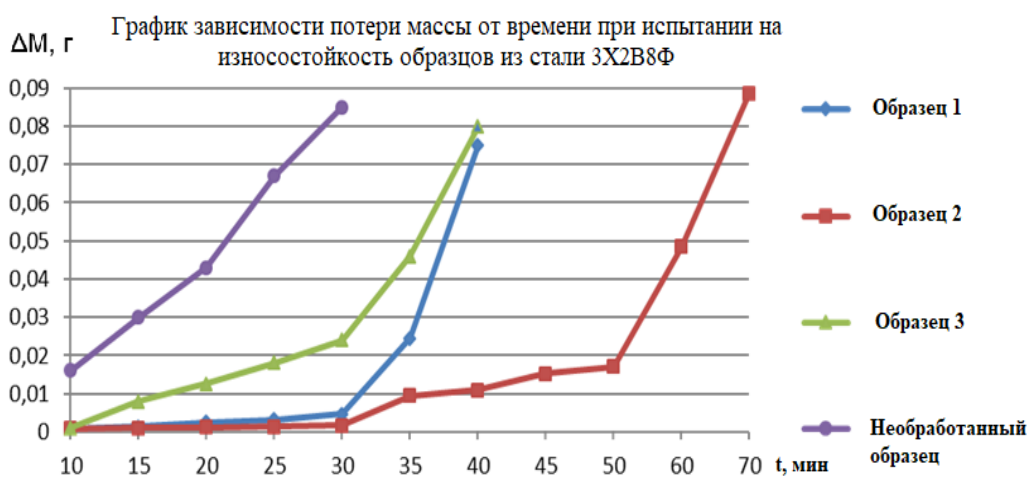


Рис. 17. График зависимости потери массы от времени

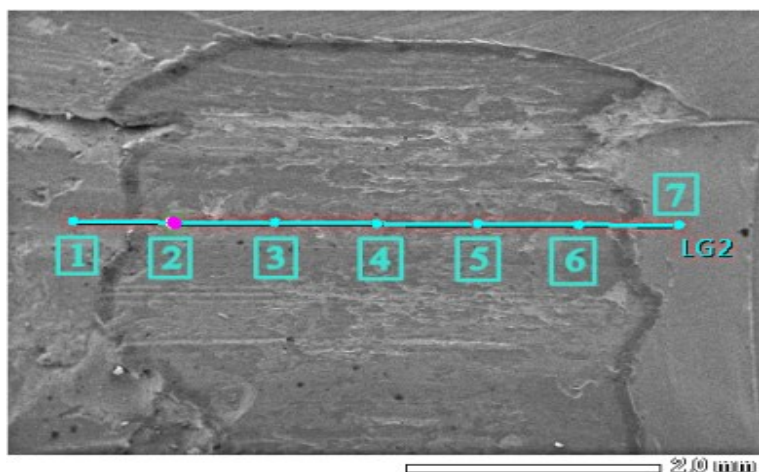


Рис. 18. Точки спектра лунки после износа

Таблица 7
Концентрация элементов на поверхности, показанной на рисунке 16, вес, %

№ спек- тра	Химические элементы, вес. %									
	B	C	O	Al	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
1	5.64	36.8	4.68	1.11	0.03	0.99	50.012	0.28	0.038	0.42
2	2.12	42.1	5.11	-	0.09	-	50.309	0.12	0.011	0.14
3	0.65	37.91	3.88	0.76	0.08	0.32	56.192	0.03	-	0.25
4	-	20.16	38.88	-	0.01	-	40.67	-	-	0.28
5	-	38.25	3.26	-	2.99	-	55.076	0.03	0.02	0.374
6	-	41.08	1.13	-	-	-	57.638	0.02	0.012	0.12
7	7.01	39.64	4.36	0.72	0.77	-	47.328	0.02	0.032	0.12

Выводы и обсуждения

Исследование показало возможность улучшения механических свойств инструментальной стали 3Х2В8Ф при лазерном легировании пастой на основе карбида бора импульсным иттербиевым волоконным лазером.

Повышение мощности лазерного облучения до 75-90 Вт позволило получить поверхности толщиной около 70 мкм, не содержащих окислы и с равномерно распределенными соединениями.

При легировании порошком, состоящим полностью из частиц B_4C , на поверхности образуется двойной слой: внешний — толщиной порядка 20 мкм, с микротвердостью 956 HV, что дает увеличение этого показателя в 4.2 раза по сравнению с необработанной сталью; и внутренний слой — примерно той же толщины, где наблюдается более качественное сплавление карбида бора со сталью, показатель микротвердости составляет уже 1477 HV, а это уже дает увеличение в 6.5 раз.

При легировании порошком на основе карбида бора с примесями алюминия образуется износостойкое покрытие. Относительное увеличение износостойкости составило от 250 % до 350 %, причем износостойкость росла по мере приближения границы трения к более твердому промежуточному слою.

Литература

1. Rumsey Ann M., Jahan M. P. Micromachining of Aluminum Alloys, in «Encyclopedia of Aluminum and Its Alloys», V. 2. P. 1557-1591, Editors George E. Totten, Olaf Kessler and Murat Tiryakioglu, Taylor and Francis, 2018.
2. Zhu C., Wan H., Min J., Mei Y., Lin J, Carlson B. E. and Maddela S. Application of pulsed Yb: Fiber laser to surface treatment of Al alloys for improved adhesive bonded performance // Optics and Lasers in Engineering. 2019. 119. P. 65-76
3. Beguin J. D., Gazagne V., Balcaen Y., Alexis J. and Andrieu E. Laser Welding of Titanium Alloys with an Yb: YAG Disk Source // Materials Science Forum. 2018. 941. P. 845–850
4. Хартаева Э. Ч., Номоев А.В., Бардаханов С. П. и др. Получение, характеристика и применения магнитных наночастиц созданных лазерной абляцией // Вестник БГУ. 2018. Вып. 2–3. С. 3–14. Текст: непосредственный.
5. Гусев А. А., Гусева Г. В. Наплавка чистого металлического порошка импульсным лазерным излучением // Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14, № 6. С. 254–259. Текст: непосредственный.
6. Avril L., Courant B. and Hantzpergue J. Tribological performance of α -Fe(Cr)-Fe₂B-FeB and α -Fe(Cr)-h-BN coatings obtained by laser melting // Wear. 2006. 260(4–5). P. 351–360.
7. Климов В. Г., Жаткин С. С., Щедрин Е. Ю., Когтева А. В. Особенности восстановления геометрии пера лопатки газотурбинного двигателя методом лазерной порошковой наплавки // Изв. Самарского научного центра РАН, 2015. Т. 17, № 2(4). С. 782–788. Текст: непосредственный.
8. Лабунец В. Ф., Ворошнин Л. Г., Киндарчук М. В. Износостойкие боридные покрытия. Киев: Тэхника, 1989. 158 с. Текст: непосредственный.
9. Крукович М. Г., Прусаков Б. А., Сизов И. Г. Пластичность борированных слоев. Москва: ФИЗМАТЛИТ. 2010. 384 с. Текст: непосредственный.
10. Schneider M. F. Laser Cladding With Powder / Ph.D. Thesis University of Twente, Enschede (The Netherlands). 1998. 177 p. Текст: непосредственный.
11. Mishigdorzhijn U. L., Ulakhanov N. S., Nomoev A. V., Lupsanov A. B. Ytterbium impulse laser for surface modification of tool steel with B₄C-Al powders // Journal of Physics: Conference Series, 2021. J. Phys.: Conf. Ser. 2064 P. 012102 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012102>
12. Roberts G. A., Kraus G. and Kennedy R. L. Tool Steels (Ohio: ASM International) 1998. 364 p.
13. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников (с Изменениями № 1, 2) ГОСТ 9450-76. (СТ СЭВ 1195-78) / Разработчики Р. М. Матвеевский, д-р техн. наук (руководитель темы); Е. С. Беркович, канд. техн. наук; Р. Н. Рыньков, канд. техн. наук. Москва: Изд-во стандартов, 1993. 331 с. Текст: непосредственный.
14. Ross J. Microelectronics Failure Analysis Desc Reference. Sixth Edition (USA: ASM International) 2011. 705 p.
15. Krukovich M. G., Prusakov B. A. and Sizov I. G. Plasticity of Boronized Layers (Switzerland: Springer International Publishing). 2016. 369 p.

Статья поступила в редакцию 9.09.2022; одобрена после рецензирования 14.10.2022; принята к публикации 17.10.2022

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF TOOL STEEL AFTER LASER ALLOYING

Lupsanov A. B.

Lecturer

Department of General and Theoretical Physics

Banzarov Buryat State University

670000, Ulan-Ude, st. Smolina, 24a

Postgraduate Student

Institute of Physical Materials Science SB RAS

670047, Ulan-Ude, st. Sakhyanova, 6

lupandrey@yandex.ru, lupsanovab@bsu.ru

Lysykh S. A.

Junior Researcher

Institute of Physical Materials Science SB RAS

670047, Ulan-Ude, st. Sakhyanova, 6

lysyh.stepa@yandex.ru

Yuzhakov I. A.

Engineer, Postgraduate Student

Institute of Physical Materials Science SB RAS

670047, Ulan-Ude, st. Sakhyanova, 6

yuzhakov.0402@yandex.ru

Milonov A. S.

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

Institute of Physical Materials Science SB RAS

670047, Ulan-Ude, st. Sakhyanova, 6

Graduate Student

Banzarov Buryat State University

670000, Ulan-Ude, st. Smolina, 24a

Mishigdorzhijn U. L.

Candidate of Technical Sciences

Head of the Laboratory of Physical Materials Science

Institute of Physical Materials Science SB RAS

670047, Ulan-Ude, st. Sakhyanova, 6

druh@mail.ru, undrakh@ipms.bscnet.ru

Nomoev A. V.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Head of the Laboratory of Physics of Composite Materials

Institute of Physical Materials Science SB RAS

670047, Ulan-Ude, st. Sakhyanova, 6

Professor

Banzarov Buryat State University

670000, Ulan-Ude, st. Smolina, 24a

nomoevav@mail.ru

Abstract. The paper shows the possibility of using an ytterbium nanosecond pulsed fiber laser for surface alloying of 3Kh2V8F tool steel. Alloying was carried out from a boron

carbide paste. The analysis of the microstructure of cross sections and the relief of the processed surface are presented. The phase and elemental compositions of the surface layers obtained as a result of laser alloying, as well as the distribution of microhardness in these layers, have been studied. The fundamental possibility of alloying with boron carbide using an ytterbium nanosecond pulsed fiber laser was established, and the structural-phase state of the layers was determined as a function of the laser parameters.

Keywords: tool steel, ytterbium nanosecond pulsed fiber laser, laser alloying, boron carbide, surface hardening, boron aluminizing, borides, nanoparticles, laser ablation, laser cladding, microhardness, wear resistance, modulus of elasticity, scanning electron microscopy.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Center for Collective Use «Scientific Instruments» of Banzarov Buryat State University and personally to the director of the Center for Collective Use «Scientific Instruments» S. S. Badmaev for their cooperation and assistance in carrying out this study.

The authors are grateful to N. S. Ulakhanov, research associates of the Laboratory of Physical Materials Science of the Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, for assistance with sample processing and D. E. Dasheev for assistance in XRF.

Experimental studies were carried out on the equipment of Central Collective Use Center «Scientific Instruments» of Banzarov Buryat State University, the scientific laboratory «Physics of Composite Materials» and the scientific laboratory «Physical Materials Science» of the Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

The study was conducted within the framework of the State Task for conducting research No. 2070-2021-0001 and No. 0270-2021-0002

For Citation

Lupsanov A. B., Lysykh S. A., Yuzhakov I. A., Milonov A. S., Mishigdorzhijn U. L., Nomoev A. V. Tribological properties of tool steel after laser alloying // Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics. 2022; 2–3:3–21 (In Russ.)

The article was submitted 9.09.2022; approved after reviewing 14.10.2022; accepted for publication 17.10.2022