

УДК 67.02

DOI:10.30987/2223-4608-2020-2021-1-34-43

И.В. Говоров, д.т.н.
(ПАО «Газпром», Санкт-Петербурга)
E-mail: i_govorov@mail.ru

Технологическое обеспечение износостойкости и контактной прочности установочных элементов технологической оснастки методом лазерного легирования

Рассмотрены технологические возможности лазерного легирования для повышения эксплуатационных свойств опорных призм станочной оснастки. Приведены сведения о применяемых технологиях: способах введения легирующих компонентов, составах обмазок, режимах лазерной обработки. Представлены результаты испытаний получаемых покрытий и рекомендации по их применению.

Ключевые слова: контактная прочность; лазерная обработка; повышение износостойкости; технологическая оснастка; упрочнение поверхности.

I.V. Govorov, Dr. Sc. Tech.
(PJ-SC "Gasprom", Sankt-Peterburg)

Technological support of wear-resistance and contact strength of production tools alignment elements by method of laser alloying

The technological potentialities of laser alloying are considered for operation properties increase of supporting prisms in machine equipment. The information on techniques used is shown: methods for alloying component introduction, a lute structure, modes of laser working are presented. Test results of coatings obtained and recommendations for their use are presented.

Keywords: contact strength; laser processing; wear resistance increase; technological equipment; surface strengthening.

Введение

В современных условиях основной целью совершенствования деятельности промышленных предприятий является обеспечение стабильного качества выпускаемой продукции при снижении ее себестоимости за счет эффективного управления издержками производства. В свою очередь качество продукции во многом определяется уровнем технологической системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка». Однако если в области совершенствования отдельных элементов этой системы достигнуты значительные успехи, то одному из важнейших ее элементов – приспособлениям – зачастую уделяется недостаточное внимание, в то время как в струк-

туре издержек предприятия доля затрат на изготовление, приобретение и эксплуатацию технологической оснастки составляет до 40 % [1].

Из комплекса вопросов, связанных с эксплуатацией приспособлений, проблема повышения их долговечности относится к числу приоритетных, так как именно недостаточная износостойкость базовых элементов, которые непосредственно контактируют с обрабатываемой заготовкой и воспринимают воздействия от внешних нагрузок (установочные и зажимные элементы, фиксаторы, направляющие), приводит к снижению их долговечности.

Для установочных элементов (опор, пластин, призм) характерной особенностью эксплуатации является многократная смена кон-

тактирующих с ними заготовок, что приводит к интенсивному изнашиванию (усталостному, абразивному, коррозионно-механическому, фреттинг-коррозионному) их рабочих поверхностей. При этом процесс изнашивания установочных элементов сопряжен с накоплением пластической деформации в зоне их контакта с обрабатываемыми заготовками.

Следует отметить, что указанные особенности контактирования оказываются наиболее выраженными у опорных призм. В процессе эксплуатации геометрическая форма поверх-

ностей касания опорной призмы с заготовкой меняется: в результате многократного нагружения на ней появляются лунки (рис. 1) глубиной до 350...500 мкм с односторонним или двусторонним расширением в сторону движения заготовки при установке или снятии [2]. При этом прогрессирующая погрешность установки заготовки, связанная с износом и пластической деформацией рабочих поверхностей призмы, часто не может быть скомпенсирована подналадкой технологической системы.

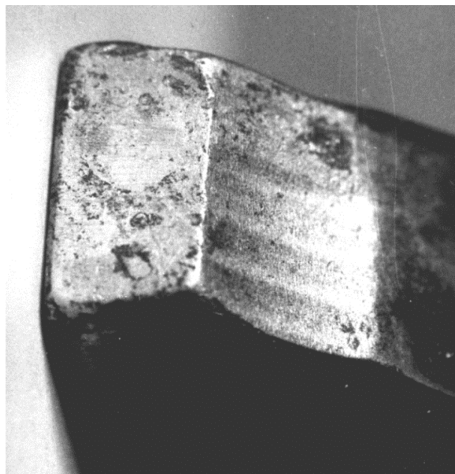


Рис. 1. Износ рабочих поверхностей призм опорных

Повысить износостойкость и контактную прочность рабочих поверхностей установочных элементов приспособлений можно путем формирования на них модифицированных слоев, обладающих более высокими эксплуатационными свойствами, по сравнению с основным материалом. Одним из эффективных и универсальных технологических методов поверхностного упрочнения, в силу хорошо известных возможностей и преимуществ [3], является лазерное легирование.

В общем случае эксплуатационные характеристики модифицированной поверхности, следовательно, и возможности выбранной технологии лазерного легирования, в большей степени определяются составом легирующих компонентов, позволяющим синтезировать в поверхностном слое определенные соединения. Основное направление развития технологий легирования поверхностного слоя деталей с использованием лазерного излучения в настоящее время связано преимущественно с многокомпонентным насыщением упрочняемых поверхностей [4]. Одной из таких перспективных комбинаций компонентов является соединение бора и хрома.

При борхромировании в легированном слое наряду с высокопрочными, но хрупкими, бориды железа образуются также и бориды хрома, обладающие как значительной микротвердостью (до 2300 HV), так и высокой трещиностойкостью при динамических нагрузках. Поскольку бориды хрома и железа изоморфны, имеют одинаковый характер связи и близкие параметры решетки, взаимно растворимы друг в друге, а атомные диаметры хрома и железа близки по величине, при борхромировании в поверхностном слое создаются условия для образования непрерывного ряда твердых растворов. Формирующаяся при этом однородная структура, в отличие от иглообразной при борировании, способствует возникновению благоприятной эпюры остаточных напряжений для контактного нагружения [5].

Материалы и методы

В проводимых экспериментах легирование осуществлялось из обзоров, предварительно нанесенных на обрабатываемые поверхности образцов. В состав обзоров входили компоненты, непосредственно обеспечивающие на-

сыщение обрабатываемых лазером поверхностей соединениями бора и хрома, и дополнительные компоненты, которые вводились в обмазки для улучшения их поглощающей способности и жидкотекучести, а также повышения прочностных свойств и адгезии модифицированного слоя. Оптимальное количественное соотношение отдельных компонентов в составе каждой обмазки определялось в ходе предварительных экспериментов.

Подготовленная обмазка в виде мелкодисперсного (~ 20 мкм) порошка, размешанного в связующем веществе (цапонлак + ацетон), наносилась на предварительно обезжиренные поверхности образцов распылителем (толщина слоя обмазки составляла 0,1...0,15 мм при среднем расходе 0,05...0,10 г/см²).

Обработка поверхностей осуществлялась на технологической лазерной установке «Квант-18М», работающей в режиме свободной генерации, в расходящемся пучке. Для упрощения подбора режимов упрочнения площадь пятна прямоугольной формы при обработке образцов была принята постоянной (1,5 × 4,0 мм²), что позволяло изменять плотность мощности лазерного излучения в достаточных для протекания процесса легирования пределах (5,2...10,0)·10⁴ Вт/см² при «мягких» (25...36 Дж) значениях энергии и длительности импульса 6 и 8 мс.

Появление при лазерном легировании областей выгорания обмазки определяет условия выбора коэффициентов перекрытия лазерного пятна: по одной из осей координат обработка велась с наложением пятен ($k_n^x \approx 0,5$), а по другой коэффициент перекрытия принимался большим единицы ($k_n^y \approx 1,1...1,4$). Это позволяло отказаться от обработки оголенных зон, расположенных вдоль лазерного следа каждого прохода. Обработанная поверхность в этом случае представляла собой легированные полосы, разделенные необработанными участками шириной 0,4...0,6 мм.

Выбор рациональных режимов лазерного легирования (в указанных ранее границах) носит, как правило, индивидуальный характер ввиду особых свойств каждой из используемых обмазок: ее поглощательной способности, теплопроводности, теплостойкости компонентов, толщины нанесенного слоя и др.

Ввиду ресурсоемкости процесса разработки технологий лазерного легирования и последующих испытаний экспериментальное исследование

осуществлялось в два этапа.

На этапе предварительных испытаний определялись оптимальные составы легирующих обмазок и режимы их лазерной обработки. В качестве критериев оптимальности приняты максимальная поверхностная микротвердость упрочненного слоя и минимальный диаметр остаточного отпечатка от одно- и многократного удара по испытываемой поверхности твердосплавным (ВК8) индентором с различной энергией, а также отсутствие (или минимальное количество) трещин после ударного нагружения.

На этапе натуральных испытаний осуществлялась оценка износостойкости рабочих поверхностей опорных призм, легированных из обмазок, разработанных на предварительном этапе.

Для проведения экспериментальных исследований использовались цилиндрические образцы диаметром 10 мм, $h = 15$ мм (на этапе предварительных испытаний) и призмы опорные 7033-0034 по ГОСТ 12195-66 (для натуральных испытаний), изготовленные из сталей 20 (цементованной), 45 и 40Х, прошедших типовую термообработку (закалка, отпуск).

Натурные испытания опорных призм на износостойкость проводились на специальной модернизированной установке многоциклового контактного нагружения [6]. Величина абсолютного износа определялась через каждые 5000 циклов нагружения (до 50 000 циклов) по профилограммам, полученным с использованием автоматизированной измерительно-информационной системы (ИИС-1) исследования геометрических параметров поверхностного слоя деталей машин, созданной учеными Брянского государственного технического университета на базе профилографа-профилометра мод. 170311.

Результаты и обсуждение

Многочисленность сочетаний, широко распространенных в производстве бор- и хромсодержащих веществ, требует проведения индивидуальных исследований для определения возможности их использования и оптимального соотношения в разрабатываемых обмазках для лазерного легирования. Общая методология разработки базовых двухкомпонентных составов для лазерного борохромирования рассмотрена на примере обмазок, содержащих борный ангидрид (В₂О₃) и окись хрома (Cr₂О₃).

Поскольку одним из основных факторов, определяющих износостойкость упрочненной поверхности, является ее твердость, были проведены исследования влияния содержания борного ангидрида в обмазке на поверхностную микротвердость получаемого покрытия.

Представленные на рис. 2 кривые имеют экстремум, зависящий от характера плазмохимических реакций в зоне лазерной обработки, величина которого может являться оптимумом при обеспечении твердости. Точный анализ таких реакций затруднен, однако сущность процессов, происходящих в рассматриваемом случае, будет сводиться к следующему: под действием лазерного облучения происходит расплавление оксидов и на некоторую глубину находящейся под ними стальной

основы. Снижение температуры плавления для смеси оксидов, а, соответственно, и эффективность лазерного легирования, зависят от процентного содержания обоих компонентов в смеси.

Оставшаяся часть световой энергии расходуется на частичную или полную термодиссоциацию оксидов до образования активных ионов и атомов хрома и бора, а также газообразных окислов углерода. За счет интенсивного нагрева происходит образование карбидов, боридов и оксикарбонитридов хрома и железа. В конечном итоге после затвердевания образуется покрытие, представляющее собой поверхностный слой из относительно вязкой железной матрицы, легированной в избытке твердыми соединениями.

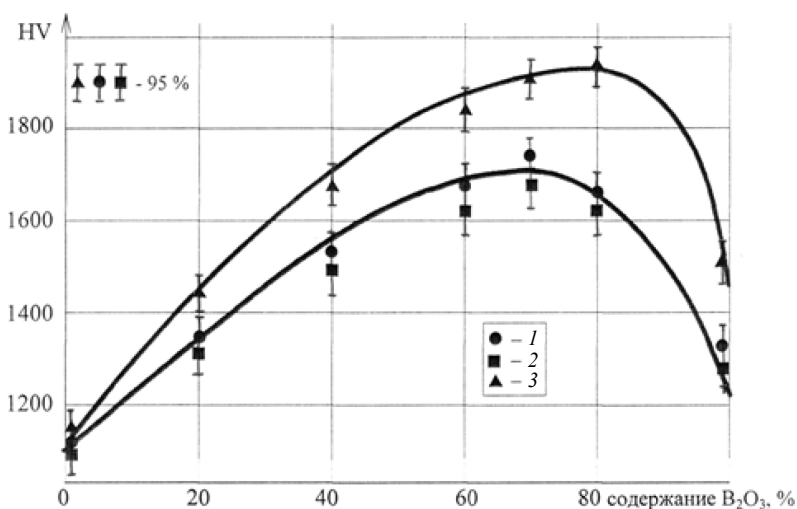


Рис. 2. Поверхностная микротвердость лазерных покрытий на основе окиси хрома и борного ангидрида:

1 – сталь 45; 2 – сталь 20; 3 – сталь 40X

Из представленных на рис. 2 данных видно, что микротвердость покрытий, получаемых в результате лазерного хромирования (100 % Cr₂O₃) составляет около 1100 HV. С увеличением содержания борного ангидрида в обмазке ее величина растет до некоторого экстремального значения, что связано с интенсификацией процессов образования боридов хрома и железа. Для сталей 20 и 45 максимальная величина микротвердости (1700 HV) достигается при содержании В₂O₃ около 70 %. Для стали 40X экстремальная точка (1950 HV) оказывается смещенной в область большей (около 82 %) концентрации борного ангидрида. Это может быть объяснено присутствием хрома в качестве легирующей добавки в самой стали.

Причиной последующего снижения микротвердости упрочненного слоя во всех случаях

является недостаточное для активного образования боридов хрома содержание Cr₂O₃ в обмазке, что приводит к превалированию процессов борирования стали.

Результаты многоцикловых ударных испытаний полученных покрытий представлены на рис. 3. Установлено, что скорость накопления деформаций для борохромированной поверхности меньше, чем для хромированной и еще меньше, чем для борированной. Не менее важными являются морфологические особенности деформируемых поверхностей. При числе циклов нагружения более 500 на хромированной поверхности появляются трещины, что связано с наличием в легированном слое карбидов хрома, проявляющих большую хрупкость в условиях ударного воздействия. На борированной поверхности такие трещины не появляются, однако величина остаточной

деформации на базе 5000 циклов более чем на 55 % превышает величину деформации для борохромированного слоя. Борохромированный слой, полученный из обмазки, содержа-

щей 30 % Cr_2O_3 и 70 % V_2O_5 , и после 10 000 циклов нагружения не имеет следов видимых поверхностных трещин.

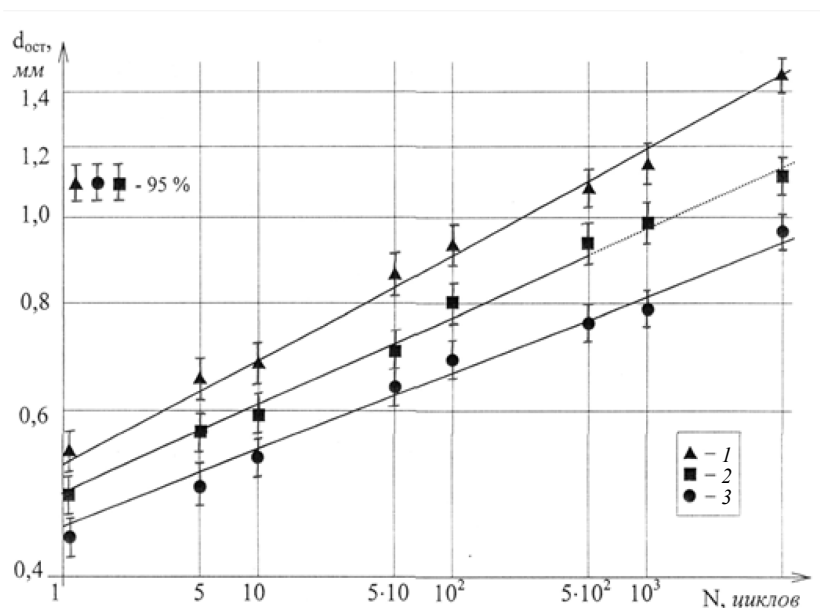


Рис. 3. Зависимость остаточной деформации от числа циклов контактного нагружения образцов из стали 45 при различных вариантах лазерного легирования:

1 – борирование (100 % V_2O_5); 2 – хромирование (100 % Cr_2O_3); 3 – борохромирование (70 % V_2O_5 + 30 % Cr_2O_3)

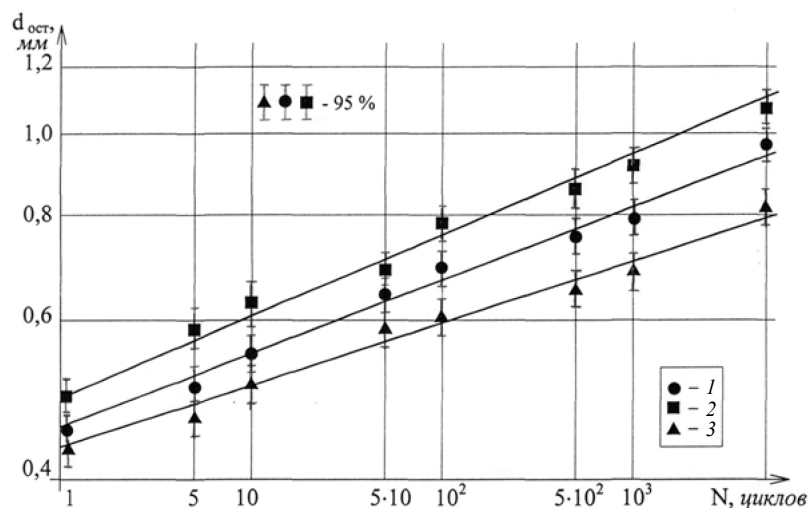


Рис. 4. Зависимость остаточной деформации от числа циклов контактного нагружения стальных образцов, подвергнутых лазерному борохромированию:

1 – сталь 45 (состав обмазки: 70 % V_2O_5 + 30 % Cr_2O_3);

2 – сталь 20 (состав обмазки тот же); 3 – сталь 40X (состав обмазки: 82 % V_2O_5 + 18 % Cr_2O_3)

Рассматривая динамику роста остаточной деформации от многоциклового нагружения сталей (рис. 4), поверхности которых легированы из обмазок, обеспечивающих их максимальную поверхностную микротвердость (см. рис. 2), следует заметить, что несмотря на

близкие значения микротвердости упрочненного слоя для сталей 20 и 45, последняя имеет более высокую поверхностную прочность: диаметр остаточного отпечатка на 8...10 % меньше, чем для образцов из стали 20, во всем диапазоне циклов нагружения. Очевидно, это

связано с повышенным содержанием углерода в цементированном слое стали 20, который сдерживает диффузию хрома и бора в глубину упрочняемого материала и, кроме того, способствует протеканию преимущественно процессов образования карбидов. Это подтвер-

ждается крайне неравномерным распределением микротвердости по глубине легированного слоя (рис. 5), что в свою очередь и приводит к интенсивному накоплению остаточной деформации.

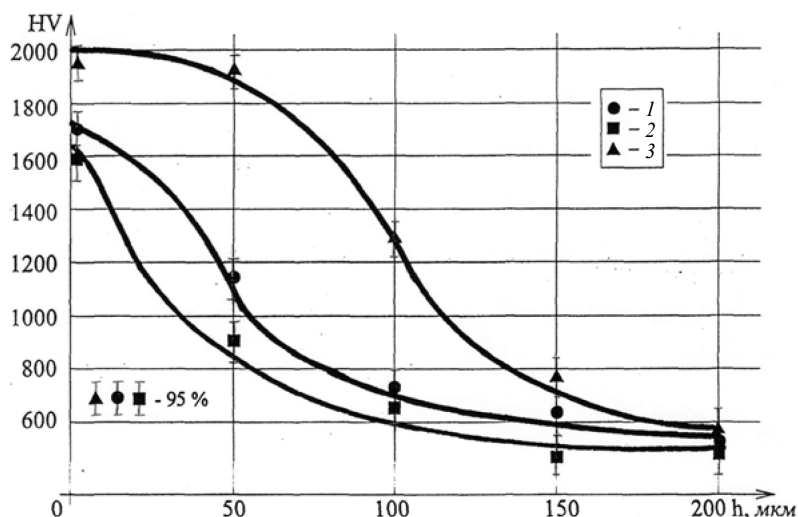


Рис. 5. Изменение микротвердости по глубине борохромированного слоя (см. рис. 4)

Более плавный градиент микротвердости по глубине упрочненного слоя для образцов из стали 40X связан с наличием в ней равномерно распределенного хрома, атомы которого оказываются своеобразными центрами образования боридов хрома, обеспечивая их равномерное распределение и усиливая диффузию бора в легируемую поверхность. Получаемый легированный слой толщиной 180...200 мкм обладает достаточно высокими прочностными свойствами, характеризующимися минимальной, по сравнению со всеми исследуемыми материалами, скоростью накопления остаточной деформации при многоцикловом нагружении.

Рассмотренная последовательность разработки состава обмазки для лазерного борохромирования использована и для других двухкомпонентных (базовых) систем (B + Cr₂O₃, V₄C + Cr₂O₃, V₄C + феррохром и др.).

Задача выбора рациональных режимов лазерной обработки в совокупности с определением необходимого соотношения компонентов в обмазке, обеспечивающих определенные прочностные свойства легированной поверхности, оказывается достаточно трудоемкой, поэтому при обработке результатов испытаний были разработаны математические модели, адекватно описывающие процесс лазерно-

го борохромирования исследуемых сталей из двухкомпонентных обмазок различных составов. Указанные модели в дальнейшем могут быть использованы для одноступенчатого решения соответствующих технологических задач [7].

Наличие данных о потенциальных возможностях повышения прочностных свойств поверхностей сталей при лазерном борохромировании из базовых составов позволило продолжить работы в направлении подбора компонентов, включение которых в обмазки повысило бы эффективность упрочнения. Для этого исследовались следующие возможности:

- увеличения глубины легированного слоя при равномерном распределении микротвердости;
- интенсификации процессов вытеснения упрочняющих элементов из соответствующих соединений и образования новых высокопрочных композиций.

Увеличение глубины легирования может быть достигнуто применением нераздражающих под действием световой энергии компонентов, обладающих небольшой температурой плавления, а поэтому высокой жидкотекучестью. В этом случае эффект упрочнения будет сопровождаться более интенсивным процессом кавитационного перемешивания составляющих лигатуры в расплавленном по-

верхностном слое упрочняемого материала. Указанное предположение было реализовано в виде состава для лазерного легирования на основе окиси хрома (Cr_2O_3) и карбида бора (B_4C) с дополнением ферросилиция (ФС 80).

Количество карбида бора выбиралось из условий достижения максимальной микротвердости поверхности за счет насыщения ее образующимися в процессе лазерной обработки боридами, карбидами и карбоборидами хрома. Этому способствуют образующиеся при разложении карбида бора за счет световой энергии активные атомы бора и углерода, которые восстанавливают окись хрома до карбидов и боридов. Количество окиси хрома определялось в соответствии с количеством карбида бора в составе таким образом, чтобы достичь максимальной микротвердости поверхности за счет насыщения ее боридами и карбоборидами хрома в процессе лазерной обработки. При количестве менее 15 % эффект упрочнения выражен слабо из-за недостаточного количества образующихся боридов хрома, а при содержании ее в составе более 28 % снижается поглотительная способность обмазки, и не образуется также достаточного количества упрочняющих соединений.

Ферросилиций (6...12 %) вводился в состав для достижения максимальной глубины легированного слоя. Входящий в него в достаточном количестве (не менее 80 %) кремний за счет относительно невысокой температуры плавления (около 1400 °С) и высокой жидкотекучести обеспечивает равномерное проплавление состава и достижение большой глубины проплавления легированного слоя, а содержащееся в нем железо позволяет дополнительно за счет сродства добиться хорошей адгезии легированного слоя к основному материалу.

Упрочнение поверхностей сталей 20 и 45 с использованием этой обмазки обеспечивает глубину модифицированного слоя до 290 мкм при его поверхностной микротвердости 2200 HV и снижении диаметра остаточного отпечатка от ударного нагружения твердосплавным индентором на 10...15 %, по сравнению с базовым составом.

Известно, что высокими прочностными свойствами обладают слои на основе карбида кремния, благодаря его повышенной микротвердости (3200 HV) и тепловой устойчивости, практически исключая разложение соединения под действием концентрированных источников тепловой энергии. Однако различие в теплофизических свойствах карби-

да кремния и железа приводит к тому, что при непосредственном легировании сталей карбидом кремния не происходит равномерное распределение его в расплавленной лучом лазера железной матрице. Результатом является неравномерное распределение микротвердости по упрочненной поверхности.

Устранить данную проблему без существенного снижения прочностных свойств покрытия удается совместным насыщением поверхности стали карбидом кремния и бором. При небольших удельных нагрузках боросилицирование незначительно повышает износостойкость, по сравнению с борированием, при увеличении же нагрузок этот эффект более ощутим, что связано с устранением игольчатого строения боридных слоев и увеличением их микротвердости до 2100...2300 HV.

В целях повышения микротвердости и трещиностойкости борохромированных слоев, а также ликвидации пористости, свойственной силицированным покрытиям, рассматривалась возможность создания обмазки, включающей соединения бора (B_2O_3), хрома (феррохром ФХ70) и карбид кремния (SiC).

В рассматриваемом составе обмазки в условиях лазерной обработки борный ангидрид взаимодействует с железом и хромом с образованием соответствующих боридов, обладающих высокой объемной прочностью и твердостью. Феррохром (28...44 %), благодаря сродству входящего в него железа с материалом подложки, повышает адгезию покрытия с основой. В то же время, хром в процессе лазерной обработки вступает в реакцию с бором с образованием твердых и прочных боридов хрома.

Карбид кремния, как уже указывалось, обладает высокой теплостойкостью и не разлагается при лазерной обработке, что обуславливает повышение твердости покрытия. Кроме того, карбид кремния повышает поглотительную способность состава. Увеличение содержания карбида кремния свыше 20 % значительно снижает трещиностойкость, а содержание менее 10 % не обеспечивает достаточной твердости покрытия.

Анализ результатов испытаний показывает, что использование предлагаемого состава позволяет существенно (до 2500 HV) повысить микротвердость упрочняемой поверхности, по сравнению с базовым двухкомпонентным составом (ФХ70 + B_2O_3), при уменьшении диаметра остаточного отпечатка от ударного нагружения индентором на 8...12 % и сокращении количества трещин в 5 – 6 раз.

Результаты натурных испытаний на износостойкость опорных призм, рабочие поверхности которых обработаны лазером с применением оптимальных составов обмазок, представлены на рис. 6 – 8.

Как видно из приведенных графических зависимостей, наибольшему износу при равных условиях нагружения подвергаются призмы из стали 45 (рис. 7), наименьшему – из стали 40Х (рис. 8, а). Меньший по сравнению с образцами из стали 45 износ призм из стали 20 объяс-

няется наличием на их поверхностях цементированного слоя, прочностные свойства которого незначительно уступают прочности инструментальных сталей, обладающих достаточно высокой износостойкостью. Лазерная обработка функциональных поверхностей призм оказывается равноэффективной для всех исследуемых сталей (кривые 2 на рис. 6, 7 и 8, а): износ снижается в среднем на 8... 13 %, что указывает на единообразие механизмов упрочнения в этих случаях.

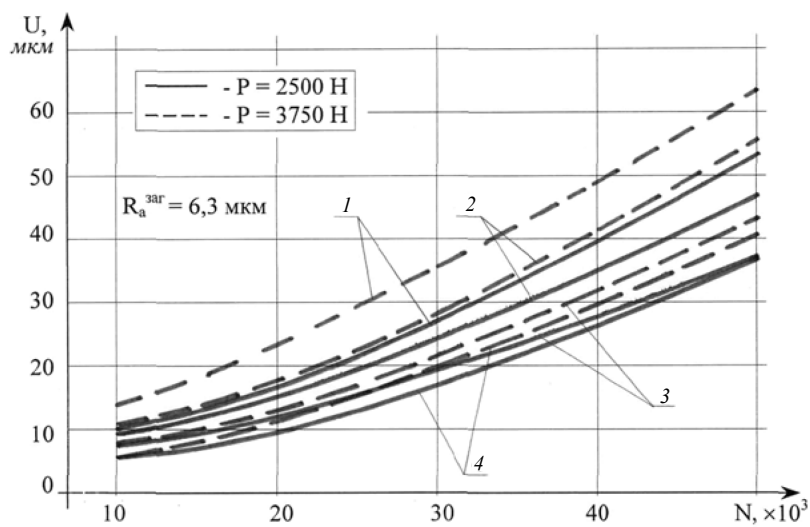


Рис. 6. Изменение величины абсолютного износа рабочих поверхностей призм из стали 20:

- 1 – цементированных; 2 – упрочненных лазером;
- 3 – подвергнутых лазерному легированию из обмазки $V_2O_3 + Cr_2O_3$;
- 4 – подвергнутых лазерному легированию из обмазки $V_4C + Cr_2O_3 +$ ферросилиций ФС 80

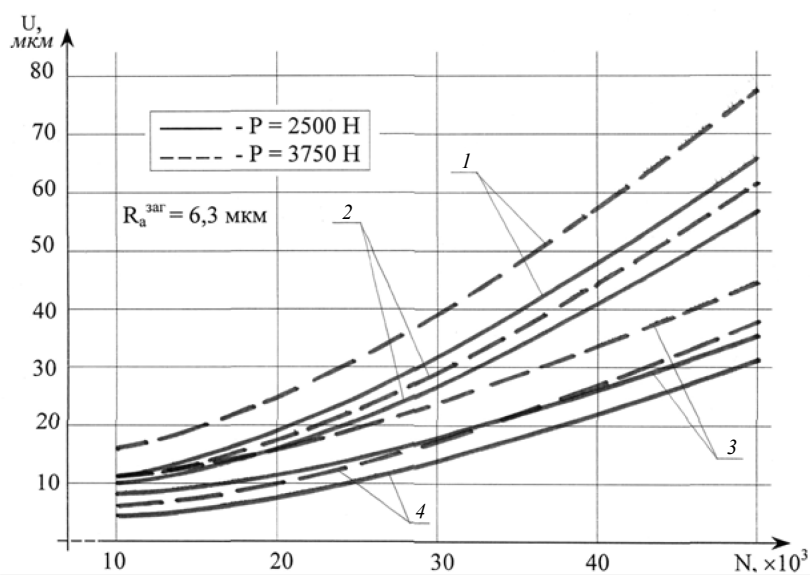


Рис. 7. Изменение величины абсолютного износа рабочих поверхностей призм из стали 45:

- 1 – закаленных; 2 – упрочненных лазером; 3 – подвергнутых лазерному легированию из обмазки $V_2O_3 + Cr_2O_3$;
- 4 – подвергнутых лазерному легированию из обмазки $V_4C + Cr_2O_3 +$ ферросилиций ФС 80

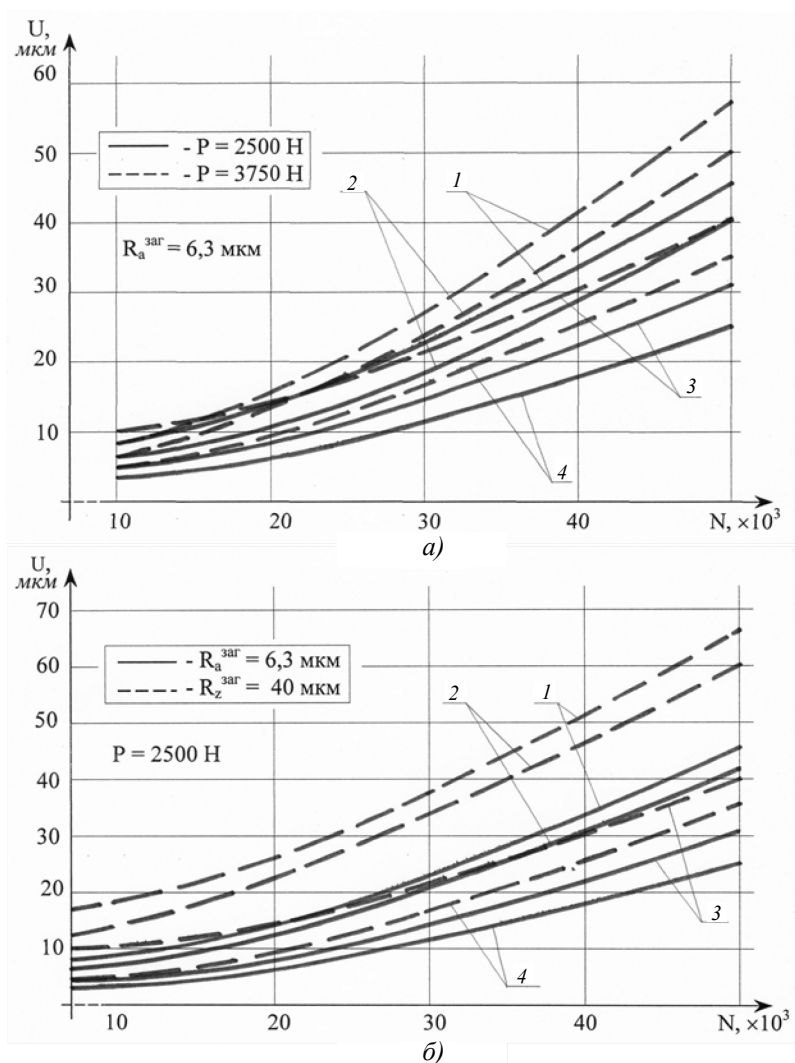


Рис. 8. Изменение величины абсолютного износа рабочих поверхностей призм из стали 40X в зависимости от приложенной нагрузки (а) и шероховатости устанавливаемых заготовок (б):

1 – закаленных; 2 – упрочненных лазером; 3 – подвергнутых лазерному легированию из обмазки $\text{V}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$; 4 – подвергнутых лазерному легированию из обмазки $\text{V}_2\text{O}_3 + \text{SiC} + \text{феррохром ФХ 70}$

Для призм из стали 20 лазерное борохромирование (кривые 3 и 4 на рис. 6) позволяет снизить износ в 1,5 раза. При этом следует отметить, что результаты легирования из двухкомпонентных и комплексных составов обмазок оказываются достаточно близкими, хотя предварительные исследования показали существенное повышение прочностных свойств и глубины легирования при использовании комплексной обмазки с ферросилицием. Лазерное борохромирование образцов из сталей 45 и 40X при использовании обмазки с добавкой карбида кремния (SiC) оказывается более эффективным, по сравнению с двухкомпонентным легированием (из обмазки $\text{V}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$). Абсолютный износ призм при этом снижается в 2 – 2,2 раза для стали 45 (рис. 7) и 1,8 – 2 раза для стали 40X (рис. 8, а).

Отмеченные особенности изнашивания опорных призм из различных конструкцион-

ных сталей характерны для всего диапазона используемых при проведении исследований нагрузок.

На рис. 8, б показано влияние шероховатости устанавливаемых заготовок на износ функциональных поверхностей призм из стали 40X. Легко заметить, что увеличение шероховатости заготовки примерно в 2 раза существенно интенсифицирует процесс изнашивания: износ опор возрастает на 45 % для образцов, прошедших только типовую термическую обработку, и на 37 % для борохромированных с использованием лазерной энергии образцов. Примерно такое же соотношение наблюдается для образцов, изготовленных из сталей 20 и 45.

Как показывают результаты сравнительного анализа износостойкости опорных призм, изготовленных из исследуемых и инструментальной (У10А) сталей (рис. 9), наименьший

износ при равных условиях нагружения имеют образцы из стали 40Х после борохромирования из обмазки $V_2O_5 + \text{ФХ70} + \text{SiC}$ (в среднем на 25...30 % меньше, чем для борохромированной из наиболее рационального состава стали 20, и в 1,6 – 1,7 раза меньше, чем для стали У10А). В свою очередь борохромированные слои на сталях 20 и 45 также на 25...35 % превышают износостойкость стали У10А.

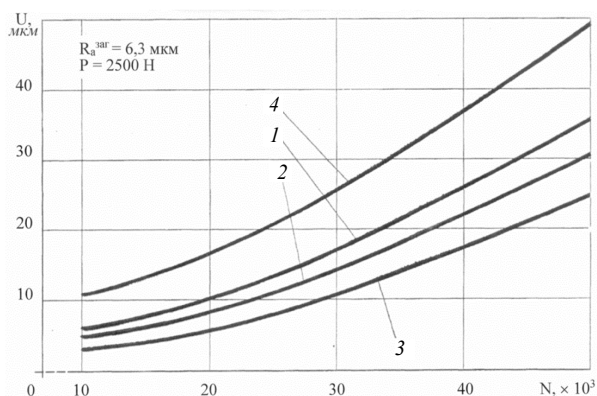


Рис. 9. Изменение величины абсолютного износа функциональных поверхностей опорных призм:
 1 – из стали 20 (легирование из обмазки $V_4C + Cr_2O_3 + \text{ферросилиций ФС80}$); 2 – из стали 45 (легирование из обмазки $V_2O_5 + \text{SiC} + \text{феррохром ФХ70}$); 3 – из стали 40Х (легирование из обмазки $V_2O_5 + \text{SiC} + \text{феррохром ФХ70}$); 4 – из стали У10А

Выводы

1. Лазерное борохромирование из предварительно нанесенных на обрабатываемые поверхности обмазок является эффективным технологическим методом повышения износостойкости и контактной прочности установочных элементов технологической оснастки в условиях их многоциклового контактного нагружения.

2. Управлять толщиной и прочностными свойствами модифицированных соединений бора и хрома слоев в определенных пределах возможно путем ввода в базовые двухкомпонентные составы обмазок для лазерного легирования дополнительных компонентов (ферросилиция, карбида кремния и др.).

3. Применение комплексных составов обмазок для лазерного борохромирования рабочих поверхностей опорных призм позволяет повысить их износостойкость в 2 – 2,2 раза, по сравнению с необработанными лазером поверхностями соответствующих сталей, и в 1,6 – 1,7 раза – с образцами из инструментальных сталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Менгес, Г., Микаэли, В., Морен, П. Как делать литьевые формы / пер. с англ. под ред. В.Г. Дувидзона и Э.Л. Калинчева. – СПб.: Профессия, 2007. – 621 с.
2. Ильицкий, В.Б., Микитянский, В.В., Сердюк, Л.М. Станочные приспособления. Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационных свойств. – М.: Машиностроение, 1989. – 208 с.
3. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
4. Суслов, А.Г. Научно-технические технологии в машиностроении/ под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, – 2012. – 528 с.
5. Минкевич, А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. – М.: Машиностроение, – 1965. – 491 с.
6. Пат. № 74200U1 Российская Федерация, МПК F99Z 99/00 (2006.01). Установка многоциклового контактного нагружения: № 2007127178/22: заявл. 16.07.2007: опубл. 20.08.2008 / Говоров И.В.; заявитель ГОУ ВПО «Брянский государственный технический университет». – 11 с.
7. Суслов, А.Г., Дальский, А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, – 2002. – 684 с.

REFERENCES

1. Menges, G., Mikaely, V., Morey, P. *How to Prepare Moulds* / translated from Engl. under the editorship of V.G. Duvidzon and E.L. Kalinchev. – S-Pb.: Profession, 2007. – pp. 621.
2. Iliytsky, V.B., Mikityansky, V.V., Serdyuk, L.M. *Machine Devices. Design-Technological Support of Operation Properties*. – М.: Mechanical Engineering, 1989. – pp. 208.
3. Grigoriyants, A.G. *Fundamentals of Material Laser Processing*. – М.: Mechanical Engineering, 1989. – pp. 304.
4. Suslov, A.G. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering/* under the editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering, - 2012. – pp. 528.
5. Minkevich, A.N. *Metal and Alloy Chemical-Thermal Treatment*. – М.: Mechanical Engineering, - 1965. – pp. 491.
6. Pat. No.74200U1 the Russian Federation, IPC F99Z 99/00 (2006.01). *Installation for Multi-cycle Contact Loading*: No. 2007127178/22: applied: 16.07.2007: published: 20.08.2008 / Govorov I.V.; applicant: SEI HVT “Bryansk State Technical University”. – pp. 11.
7. Suslov, A.G., Dalsky, A.M. *Scientific Fundamentals of Engineering Technique*. – М.: Mechanical Engineering, - 2002. – pp. 684.

Рецензент д.т.н.
 Владимир Павлович Фёдоров