

УДК 621.002.3

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА – ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТА

С.А. АСТАПЧИК, В.С. ГОЛУБЕВ,
А.Г. МАКЛАКОВ, Л.И. ПРОЦКЕВИЧ

(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск)

Рассмотрены возможности поверхностного упрочнения методами лазерной закалки и легирования ряда деталей и инструмента, изготовленных из различных материалов. Приведены примеры их производственных испытаний.

Введение. Лазерная технология несомненно до сих пор относится к разряду новых технологий, что видно как из фактов ее расширяющихся применений, так и из ее очевидных преимуществ. Мировые тенденции развития научно-технического прогресса обуславливают насыщение лазерной техникой и технологией в первую очередь машиностроительных отраслей современной промышленности. Использование мощного лазерного излучения позволяет осуществлять плавление, испарение или раскалывание конструкционных материалов, применяемые в современном производстве для изготовления деталей и узлов, улучшения их эксплуатационных характеристик. В Республике Беларусь имеется серьезный задел в развитии этого направления [1].

Одним из перспективных технологических процессов повышения износостойкости различного рода деталей и инструмента является обработка рабочих поверхностей высококонцентрированными потоками лазерного излучения. Лазерная термообработка (закалка) позволяет значительно повысить микротвердость, теплостойкость, а также коррозионную стойкость упрочняемых изделий, а наличие программного управления лазерным лучом дает возможность упрочнять детали любой конфигурации.

Цель данной работы – проведение исследований по разработке способов упрочнения некоторых видов деталей и инструмента на основе лазерной закалки и легирования.

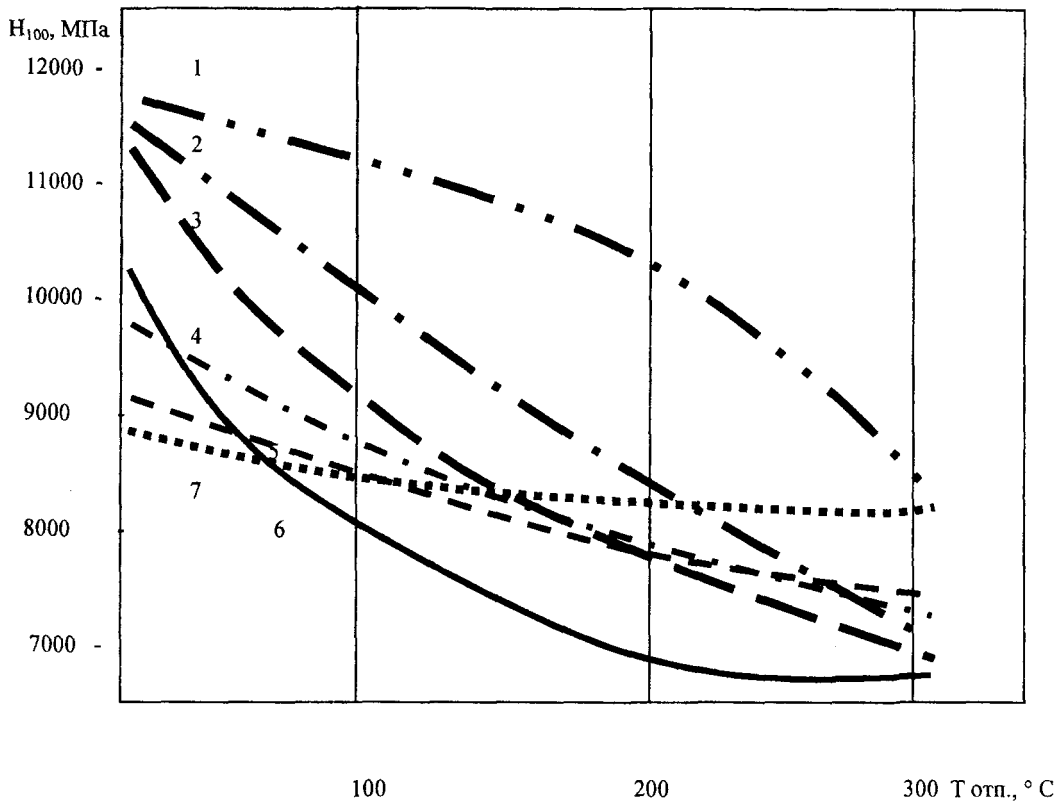
Лазерная обработка рабочих поверхностей производилась с использованием технологических лазерных комплексов на базе непрерывного CO₂-лазера «Комета-2» и импульсной установки «Квант-18М». Мощность излучения CO₂-лазера (P) плавно регулировалась в диапазоне 200...1200 Вт, энергия в импульсе (W_И) установки «Квант-18М» в диапазоне 10...70 Дж.

Результаты и их обсуждение. В области лазерной закалки исследовалось влияние основных параметров лазерного воздействия на структурно-фазовое состояние поверхности углеродистых сталей и ряда инструментальных материалов. Определено влияние основных параметров (плотность мощности, диаметр пятна фокусировки лазерного луча (d), скорость сканирования) лазерного излучения на глубину зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) и их связь с конечной получаемой структурой. Установлено, что максимальное упрочнение достигается при получении определенной структуры поверхностного слоя, а именно при получении структуры однородного мартенсита с повышенным содержанием углерода, измельчении зерна и образовании минимального количества остаточного аустенита. Это достигается определенными соотношениями между плотностью мощности и скоростью обработки и, как правило, данное соотношение является индивидуальным для каждой марки стали.

В общем случае максимальное упрочнение стали в большинстве случаев достигается при частичном растворении исходных карбидов и образовании в облученном слое большого количества зон с микрхимической неоднородностью твердых растворов. Регулировать этот процесс можно как режимами лазерной обработки, так и подбором исходных структур.

Все это в конечном итоге и будет определять эксплуатационные свойства (износостойкость, теплостойкость и т.д.) того или другого вида инструмента. На рисунке приведены результаты лазерного упрочнения стали 9ХС после ее различной термообработки. Образцы данной стали предварительно закаливались в масле (860 °С), а затем отпускались при температуре 200...600 °С.

Обнаружено, что микротвердость в зоне термического влияния стали 9ХС составляла 10000...12000 МПа для образцов с температурой предварительного отпуска до 400 °С. В зоне расплава при небольших скоростях сканирования лазерного луча микротвердость была такой же, как и в ЗТВ. С повышением скоростей сканирования твердость в зоне расплава снижалась до 8000...10000 МПа. У образцов, подвергнутых закалке после лазерной обработки, твердость также сохранялась на уровне 11500...12000 МПа. Лазерная обработка отожженных образцов из стали 9ХС приводила к повышению микротвердости до 9000...10000 МПа, глубина упрочненной зоны не превышала 400...500 мкм.



Теплостойкость стали 9ХС после непрерывной лазерной обработки
 (исходная термообработка: 1 – закалка + отпуск 400 °С; 2 – закалка; 3 – закалка + отпуск 300 °С;
 4 – закалка + отпуск 500 °С; 5 – закалка + отпуск 200 °С;
 6 – закалка + отпуск 600 °С; 7 – без лазерной обработки)

При импульсной лазерной обработке данной стали микротвердость упроченного слоя также может достигать высоких значений. Максимальная твердость 10000 МПа достигалась для предварительно закаленных и отпущенных ($T = 200$ °С) образцов, тогда как для закаленных, нормализованных и отожженных образцов микротвердость не превышала соответственно 8500, 9000 и 7000 МПа.

Несколько сложнее обстоит дело с лазерной закалкой высоколегированных инструментальных сталей. Диффузионная подвижность углерода здесь уменьшается настолько, что трудно осуществить лазерную закалку при оптимальной степени аустенизации, т.е. с достаточным насыщением твердого раствора и минимальным растворением карбидной фазы. При малой мощности излучения может не достигаться насыщение аустенита и при закалке образуется малоуглеродистый мартенсит и остаточный аустенит. При большой энергии излучения возможно пересыщение аустенита за счет растворения карбидов и после охлаждения образуется большое количество остаточного аустенита, что приводит к снижению твердости. Следовательно, для высоколегированных сталей существует очень узкий интервал режимов, при которых мартенсит содержит достаточное количество углерода, а растворение карбидов находится в начальной стадии. В наибольшей степени это относится к сталям с повышенным содержанием хрома, и особенно к быстрорежущим сталям (Х6ВФ, Х12, Х12М, Р6М5, Р18).

В связи с тем, что контроль всех взаимосвязанных здесь параметров в условиях обработки больших партий инструмента достаточно сложен, было предложено использовать для таких сталей метод комбинированной обработки – лазерной закалки и криогенной обработки. Последующая криогенная обработка позволит уменьшить содержание остаточного аустенита в поверхностном слое, устраняя ошибки при лазерной закалке. Такая обработка выполняется непосредственно после лазерного воздействия охлаждением всей детали в среде жидкого азота или иного криоагента, обеспечивающего охлаждение данной марки стали до температуры ниже конца мартенситного превращения. Применение криогенной обработки не приводит к растрескиванию деталей после извлечения из жидкого азота, а также в процессе испытаний. Режимы упрочнения ряда сталей представлены в таблице.

Режимы упрочнения импульсным лазерным излучением

Материал	W_E , Дж	d, мм	Глубина зоны упрочнения, мкм	Микротвердость после лазерной закалки, МПа	Микротвердость после криогенной обработки, МПа
У8	55...60	4×4	150...200	9700...9900	Не используется
У10	55...60	4×4	200...250	9900...10500	Не используется
ХВГ	55...60	4×4	200...250	9500...10000	10300...11000
Х6ВФ	55...60	4×4	150...200	9300.. 10000	10500...11200
Р6М5	55...60	4×4	150...200	10000...10300	10500...11400

Апробация полученных результатов проводилась на примере дереворежущего инструмента и ряда деталей.

Производственные испытания проводились при использовании концевых фрез для обработки фанеры толщиной 40 мм, дисковых фрез – фанеры толщиной 20 мм, ножей строгальных, дисковых пил – древесных материалов. Результаты испытаний показали, что разработанные способы модификации поверхностей инструментальных материалов с использованием лазерного излучения, позволяют значительно повысить стойкость инструмента для обработки древесины. Установлено, что стойкость до перезаточки дереворежущих инструментов, подвергнутых лазерной обработке, повышается:

- фреза концевая (Р6М5) – в 2,2...2,5 раза;
- фреза дисковая (Х6ВФ) – в 2,0...2,3 раза;
- нож строгальный (8Х6НФТ) – в 2,0...2,5 раза;
- пила дисковая (У8) – в 1,8...2,6 раза.

Были проведены стойкостные испытания дереворежущего инструмента, оснащенного твердосплавными вставками. Испытания проводились при обработке данным инструментом древесностружечных плит. Установлено, что после лазерной обработки стойкость инструмента повышается:

- ножи твердосплавные – 1,5...1,6 раз;
- концевые фрезы – в 1,5...1,6 раз;
- пилы дисковые – в 1,8...1,9 раз.

Предложенные схемы обработки в ряде случаев допускают многократную переточку инструмента. Криогенная обработка, применяемая после лазерной обработки, например, концевых фрез для глухого фрезерования и другого инструмента, способствует уменьшению содержания остаточного аустенита в поверхностном слое и приводит к дополнительному увеличению твердости.

Технология лазерного упрочнения нами апробирована также применительно к осям подшипников конечной передачи тракторов МТЗ, изготовленных из стали ШХ15. Твердость на поверхности достигает 63...64 ед. HRC по сравнению с 59...60 ед. HRC при стандартной термообработке, толщина слоя 0,4...0,5 мм. Отметим, что, повышая твердость на поверхности, у нас имеется возможность предварительной термообработкой варьировать твердость основы и таким образом не снижать усталостные свойства конкретной детали. В этом плане интерес представляет проводимая нами работа для завода «Автогидроусилитель» (г. Борисов). В данном случае удалось на деталях типа вал-золотник при исходной твердости 40 ед. HRC довести поверхностную твердость в необходимых местах до 58...60 ед. HRC. В настоящее время заводом готовится опытная партия деталей для проведения производственных испытаний в узле рулевого управления.

Испытания прессоштамповой оснастки (матрица-штамп, сталь 9ХС) при холодной штамповке деталей из нержавеющей стали толщиной 0,8 мм, проведенные на ЗАО «Атлант», показали увеличение стойкости в 3...4 раза. Стойкость пуансонов из стали У10 в самых жестких условиях работы на КЗТШ при пробивке отверстий (диаметром 20 мм, толщиной 14 мм) в дисках колес автомобиля МАЗ возросла до 2 раз. В настоящее время на заводе проходит испытания партия пуансонов из стали 60С2А для пробивки отверстий в лонжеронной группе деталей.

Анализ условий работы многих деталей и инструментов показывает, что для них также перспективно применение метода лазерного легирования. Данный метод [1] позволяет насыщать поверхностные слои металлов простыми и сложными материалами, формировать широкий спектр легированных поверхностных структур.

В проведенных экспериментах при лазерном легировании поверхностей деталей (сталь 40Х, 35ХГСА) использовались порошковые керамические материалы: карбиды, бориды, нитриды и др. На поверхность легирующий компонент (порошок) наносился в виде шликерной обмазки, толщина слоя составляла примерно 0,1 мм. Лазерное оплавление данных покрытий осуществлялось в защитной среде гелия или аргона, причем влияние их на структуру и качество легированных слоев может быть весьма неоднозначным.

Основными параметрами процесса, обеспечивающими стабильность результатов, являются: $P = 0,9...1,0$ кВт; скорость перемещения 160...200 мм/мин; диаметр пятна фокусировки – 1,5 мм. Предпочти-

тельное фокусное расстояние объектива лежит в диапазонах 150...300 мм и требуется заглубливание фокуса под поверхность с нанесенным покрытием на 1...1,5 мм. Многомодовый состав излучения непрерывного лазера «Комета-2» (TEM_{21}) являлся более предпочтительным с точки зрения равномерности распределения легирующих элементов по сравнению с TEM_{00} для лазера ТЛ-1,5. Наименьшую поверхностную шероховатость имели слои, обработанные с 30 %-ным перекрытием оплавленных дорожек.

Металлографические исследования поверхностных слоев после лазерного легирования показывают, что для их качественного формирования необходимым является полное или частичное расплавление исходного слоя легирующего материала. Причем в зависимости от плотности мощности лазерного излучения и фракционного состава легирующего порошка он может по-разному перемешиваться с основой. При одной и той же мощности лазера уровень гетерогенности оказывается всегда больше для более тугоплавкого соединения. Меньшие по размеру частицы (5...20 мкм) находились на большей глубине по сечению легированного слоя, чем крупные (50...100 мкм).

Важно использовать при легировании порошковые материалы одного класса (ОМ, М, С), так как смесь частиц разного размера не позволяет получить модифицированные слои с равномерными химическим составом и свойствами. Более качественные результаты лазерной обработки достигаются при режимах, обеспечивающих полное расплавление присадочного материала.

Боридный слой, полученный на оптимальных режимах обработки (например, обзак на основе карбида бора) состоит из округлых включений, располагающихся на поверхности слоя и эвтектики. Округлые включения являются первичными кристаллами боридов с высокой твердостью. В свою очередь, округлая форма боридов определяет такую же форму кристаллов эвтектики. По сравнению с основным металлом слои имеют более низкую скорость травления, что свидетельствует об их высокой коррозионной стойкости.

При увеличении скорости перемещения лазерного луча свыше 200 мм/мин, либо при увеличении диаметра фокального пятна структура поверхностного слоя при легировании меняется. Бориды здесь имеют различную форму – ромбическую, призматическую или дендритную. На поверхности располагается сплошная светлая пленка с иглами, направленными в глубь образца, микротвердость которой составляет 12000...13000 МПа. Внутри находятся включения овальной формы. Под пленкой располагаются бориды дендритного типа и эвтектика с микротвердостью 8000...9000 МПа. Несмотря на высокую твердость тонкой пленки, она иногда имеет неудовлетворительную адгезию с основой и может скалываться. Использование борид вольфрама при увеличении скорости перемещения лазерного луча позволяет получить поверхностные слои этого борид. Слой может также содержать борид железа и вольфрама W_2FeB_2 . Однако глубина легированного слоя снижается.

Другим разработанным способом создания тонких износостойких слоев на поверхности режущего инструмента является лазерное плакирование в импульсном режиме облучения. Процесс характеризуется тем, что на поверхности создается специфический слой около 5 мкм вглубь и 10...15 мкм на поверхности с высокой твердостью и износостойкостью. Плакирование – создание на поверхности слоя практически чистого легирующего компонента. Эксперименты позволили выбрать в качестве рекомендуемых составов порошки твердого сплава ВК-10 и ряда тугоплавких боридов.

В процессе обработки образуется монолитный слой с указанными выше характеристиками. В связи с малой длительностью процесса специальных защитных сред не требуется, окисление не успевает происходить. Данный метод оказался пригодным в качестве финишной обработки различного типа инструмента, в основном это различные ножи, фильеры и др. Достигаемая здесь твердость равна твердости исходных компонентов, т.е. мы имеем дело с чистой наплавкой данных составов этим методом. Следует отметить тот факт, что данные составы невозможно оказалось наплавить в режимах непрерывного лазерного воздействия.

Предложенные методы лазерной обработки были использованы применительно к режущим горно-проходческим комбайнам ПО «Беларуськалий», ножам и фильерам для протяжки и обрезки проволоки в условиях ОАО «Мотовело». В последнем случае производственные испытания показали увеличение стойкости более чем в 5 раз.

Выводы. Лазерная обработка является эффективным методом упрочнения рабочих поверхностей деталей и инструмента весьма широкой номенклатуры. Для выбора способов упрочнения (закалка, легирование, режимы импульсного или непрерывного воздействия и т.п.) от технологов требуется достаточно грамотный подход. Эффект от применения лазерной технологии может в определенных случаях достигать до 10...20 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологии Физтех / С.А. Астапчик, В.С. Голубев, А.Г. Маклаков, В.В. Ваганов. – Мн., 1999. – С. 52 – 79.