

жения, рассчитываемые по энергетической теории прочности, во многих случаях превышают пределы текучести конструкционных сталей и неизбежно вызывают эрозионное разрушение поверхностных слоев лопасти. Доминирующими являются два механизма разрушения: многократное пластическое деформирование с наклепом и растрескиванием поверхности в зоне ударного нагружения и пластическое пропахивание поверхностных слоев в зоне фрикционного скользящего контакта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chmielniak, T. Erozja pyłowa w maszynach przepływowych. Przegląd Zagadnień. / T. Chmielniak // Zagadnienia eksploatacji maszyn. – 1988. (76), № 4, С 339–458.
2. Войтехович, П. Е. Определение основных параметров ударного взаимодействия абразивных частиц с лопастями ротора-ускорителя центробежной мельницы / П. Е. Войтехович, Д. Н. Боровский, А. В. Тоболич, П. С. Гребенчук. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018, № 3, С. 12–15.
3. Крупич, Б. Проблемы обеспечения износостойкости деталей систем пневмотранспорта // Трение и износ. – 2002 (23), № 5, С. 477–482.
4. Крупич, Б. Моделирование микроконтактных взаимодействий при газоабразивном изнашивании сталей с учетом деформационного упрочнения / Б. Крупич, В. Г. Барсуков, А. И. Свириденко // Трение и износ, 2019, Том 40, № 6, С. 644–653.
5. Свириденко, А. И. Механика дискретного фрикционного контакта. / А. И. Свириденко, С. А. Чижик, М. И. Петроковец – Минск : Наука и техника, 1990. – 272 с.

УДК 621.7

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ

Мищурок О. М., Нерода М. В., Веремейчик А. И.

Брестский государственный технический университет;

г. Брест, Республика Беларусь

С 70-х годов XIX века сталь является основным конструкционным материалом. Сталь обладает высокими прочностью, вязкостью разрушения, температурой плавления и низкой теплопроводностью. Но самым важным достоинством стали как конструкционного материала является возможность улучшения ее эксплуатационно-технических свойств за счет применения термической обработки.

В настоящее время широкое распространение в промышленном и ремонтном производствах получили упрочняющие технологии, позволяющие повышать эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин и экономить материальные и трудовые ресурсы. Как правило, данные технологии ориентированы на придание повышенных физико-механических характеристик поверхностному слою при сохранении неизменными свойств основного металла детали [1].

Изменить эксплуатационные свойства поверхности в необходимом направлении можно различными способами и эти способы можно разделить на два вида:

- нанесение на поверхность нового материала с необходимыми свойствами;
- изменение состава поверхностного слоя металла, обеспечивающего изменение свойств [2].

На предприятиях РБ и стран СНГ в последние годы для изменения эксплуатационных свойств используются традиционные виды термической обработки металлов [3], которые являются энергоемкими и продолжительными процессами, осуществляемыми на дорогостоящем оборудовании. Традиционным методам термической обработки характерны: существенное коробление упрочняемых изделий; увеличение твердости поверхности с одновременным уменьшением вязкости материала и понижением сопротивляемости ударным нагрузкам; ограниченные возможности управления структурой материалов [4].

Возрастающая конкуренция и повышение требований к выпускаемой продукции вынуждают современные предприятия искать новые технологии и материалы для решения проблемы повышения срока службы изделий.

Выбор метода термической обработки зависит от многих факторов, таких как условия эксплуатации изделия, а также возможность применения данных методов, исходя из специфики применяемых материалов, подлежащих упрочнению. В каждом случае для принятия решения об использовании того или иного метода упрочнения необходимо учитывать все факторы.

Высокий уровень эксплуатационных характеристик достигается при использовании таких новых методов обработки, как плазма, ионные пучки, электронные и лазерные лучи для поверхностной обработки металлов и сплавов с целью увеличения срока службы и надежности машин и механизмов, а также придания металлическим изделиям специальных свойств [5, 6].

В настоящее время лазерные технологии поверхностной обработки зарекомендовали себя в качестве замены традиционных методов термической обработки. Применение технологических лазеров на производстве обусловлено преимуществами сфокусированного лазерного излучения: бесконтактность и локальность теплового воздействия, минимальная зона термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения, снижение уровня остаточных напряжений, сведение к минимуму коробления, повышение дисперсности структуры и т. д. [3].

Главной особенностью лазерного термического упрочнения является процесс высокоскоростного нагрева поверхности материала и его дальнейшее охлаждение со сверхкритической скоростью при окончании теплового воздействия за счет отвода тепла в окружающий материал [7].

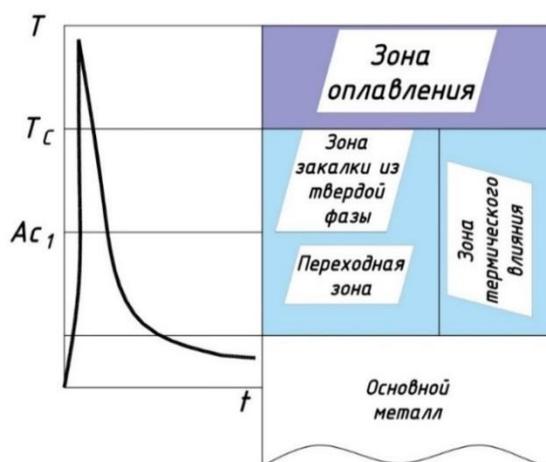


Рисунок 1 – Строение зоны лазерного воздействия

Сверхскоростной нагрев и малое время влияния температуры оказывают влияние на процессы образования и формирования структур. При лазерном термоупрочнении сталей, как и при обычных видах закалки, на этапе нагрева материала происходит формирование структуры аустенита и дальнейшее превращение ее в мартенситную структуру на этапе охлаждения. В процессе лазерной закалки поверхностные слои металла нагреваются до различных температур. Это объясняет слоистое строение зоны лазерного воздействия (ЗЛВ). При лазерном упрочнении на поверхности обрабатываемого металла формируются три зоны (рисунок 1):

- Зона оплавления – формируется при закалке из жидкого состояния. Строение – ячеисто-дендритное, кристаллы – вытянутые по направлению теплоотвода. Основная структура – мартенсит, отличающийся большей дисперсностью, чем при упрочнении объемной закалкой. При лазерном упрочнении без оплавления данная зона отсутствует.

- Зона закалки из твердого раствора – образуется при закалке без оплавления. В данной зоне есть структура как полной, так и неполной закалки – нижняя граница зоны определена нагревом до критической точки A_{c1} . В этом слое наблюдается неоднородность по глубине: ближе к поверхности есть мартенсит и остаточный аустенит, а ближе к основному материалу – мартенсит и фазы исходной микроструктуры: феррит в доэвтектоидной стали и цементит в заэвтектоидной стали.

- Зона отпуска (переходная зона) – при нагреве ниже критических температур. Если материал прошел предварительную объемную термообработку, то в этом слое наблюдается снижение микротвердости [8].

Авторы работы [9] считают, что лазерно-упрочненному слою помимо высокой твердости характерна и высокая вязкость, повышающая способность материала сопротивляться усталостным разрушениям и разрушениям при перегрузках. Разрушению слоистой структуры лазерно-упрочненного поверхностного слоя характерны три максимума нагрузки (рисунок 2). Первый и второй максимумы (P_1 , P_2) нагрузки соответствуют моментам зарождения трещины в поверхностном упрочненном слое и зоне отпуска. Третий максимум (P_3) нагрузки наблюдается при образовании трещины в подслоной зоне металла с исходной структурой. Появление трех максимумов нагрузки свидетельствует о замедлении роста трещины при ее распространении в структурно-неоднородных зонах металла. Это подтверждают и экспериментальные исследования.

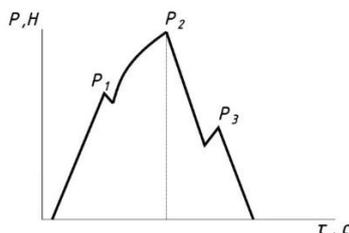


Рисунок 2 – Оциллограмма процесса разрушения при ударном нагружении образцов после лазерного упрочнения

При использовании лазерного излучения для поверхностной обработки с целью упрочнения материалов возможно протекание одного из трех основных процесса нагрева:

- нагрев поверхности материала до температуры выше температуры критических точек, но не выше, чем температура плавления, выдержка при заданной температуре и дальнейшее охлаждение материала;

- нагрев материала до температур выше, чем температура плавления, его дальнейшая кристаллизация и охлаждение расплава;
- нагрев материала свыше температуры его испарения, пластическая деформация за счет ударной волны, нагрев поверхностного слоя плазмой, образующейся при взаимодействии лазерного излучения с материалом [10, 11].

По мнению авторов [8] эти процессы лазерного нагрева и сопровождающие их физико-химические процессы в материале являются основой для исследования методов поверхностного упрочнения. Важнейшим показателем, который определяет тот или иной процесс, является температурное поле в зоне лазерного излучения. По данному показателю возможно осуществить оценку текущей температуры в разных точках зоны термического влияния (ЗТВ) в различные моменты времени, скорости нагрева и охлаждения, а по итогу микроструктуру и фазовый состав поверхностного слоя обрабатываемого материала. Для осуществления оценки теплового состояния материала при лазерном облучении широко применяются методы математического моделирования процесса теплопередачи.

Увеличив точность определения входных параметров (мощности лазерного излучения, подаваемого непосредственно на обрабатываемый материал, площади и формы пятна фокусирования лазерного излучения, зона распределения интенсивности по пятну фокусирования, поглощательной способности обрабатываемой поверхности), можно повысить эффективность применения этих методов при управлении процессом лазерного упрочнения.

У лазерного поверхностного упрочнения есть две различные схемы, это излучение импульсами или сериями импульсов (импульсная закалка) и закалка путем непрерывного излучения.

При импульсной закалке средняя глубина упрочненного слоя на сталях 0,08–0,15 мм, достигается при плотности мощности несколько ниже критической (происходит легкое оплавление). Если же импульсную закалку проводить при плотности мощности $2 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ Вт/см² (с оплавлением), то глубина лазерного упрочнения в сталях увеличивается до 1 мм.

Схемы непрерывного излучения имеет значительно более высокую производительность процесса. При данной схеме идет перемещение облучаемой детали относительно луча с постоянной линейной скоростью. При этом на изделии получают поверхностные зоны в виде полос шириной от 0,5 до 10 мм. При этом максимальная глубина упрочненного слоя при излучении без оплавления на сталях достигает 0,5–2,0 мм. При обработке с оплавлением глубина становится больше, но заметно ухудшается качество поверхности, а на некоторых марках сталей происходит снижение твердости [8].

Возможности современной лазерной техники позволяют увеличить срок службы изделий и снизить себестоимость упрочнения, благодаря исключению характерных традиционным методам термообработки существенного коробления упрочняемых деталей, возможности улучшения структуры материала, применению менее дорогостоящих материалов и сокращению времени обработки. Эффективность лазерного упрочнения зависит от тщательности исследований и проработки технологии упрочнения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нерода, М. В. Исследование механических и пластических свойств стали марки 10КП с покрытиями, сформированными методом ионно-плазменного азотирования. / М. В. Нерода [и др.] // Вест. Брест. гос. техн. ун-та. – 2019. – № 4 : Машиностроение. – С. 2–4.
2. Лахтин, Ю. М. Химико – термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.
3. Голубев, В. С. Использование лазерных технологий упрочнения в сельскохозяйственном машиностроении / В. С. Голубев [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / Гос. науч. учреждение "Физико-технич. ин-т НАН Беларуси" ; редколлегия: А. В. Белый (главный редактор) [и др.]. – Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – Минск, 2018. – Кн. 2. – С. 58–65.
4. Девойно, О. Г. Эффективность использования лазерной закалки для увеличения прочности зубчатых колес / О. Г. Девойно [и др.] // Лучевые технологии в сварке и обработке материалов : сб. трудов восьмой междунар. конф., Киев, 11–15 сентября 2017 г. / Международная Ассоциация «Сварка». – Киев, 2017. – С. 83–86.
5. Андрияхин, В. М. Расчет поверхностной закалки железоуглеродистых сплавов с помощью технологических СО₂-лазеров непрерывного действия / В. М. Андрияхин, В. С. Майоров, В. П. Якунин // Поверхность: Физика, химия, механика. – 1983. – № 6. – С. 140–147.
6. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвиевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки : междунар. сб. науч. тр. / Бел. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.
7. Чудина, О. В. Механизмы упрочнения железа при лазерном легировании и азотировании / О. В. Чудина, Л. Г. Петрова // Металловедение и термическая обработка металлов – 2002. – № 4. – С. 21–26.
8. Братухин, А. В. Повышение износостойкости инструментальных сталей при изготовлении авиационного крепежа с использованием лазерного термического упрочнения : дис. кандидата техн. наук : 05.16.01 / А. В. Братухин – Нижний Новгород, 2020. – 160 л.
9. Тескер, Е. И. Современные методы повышения несущей способности высоконагруженных зубчатых передач трансмиссий и приводов / Е. И. Тескер, С. Е. Тескер // Теория и практика зубчатых передач – 2014 : Междунар. симпозиум. – Ижевск, 2014 г. – С. 316–323.
10. Семенцев, А. М. Повышение эффективности лазерной обработки деталей из железоуглеродистых сплавов, основанное на установленном механизме массопереноса легирующих элементов в зоне лазерного воздействия: дис. кандидата техн. наук / А. М. Семенцев – Брянск: Изд-во БГТУ, 2008. – 235 л.
11. Великих, В. С. Влияние лазерной закалки на механические свойства стали / В. С. Великих, В. К. Гончаренко, А. В. Романенко – М. : Металлургия, 1986. – 215 с.

УДК 621.92

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЗЕРЕН ЭЛЕКТРОШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Нерода М.В., Холодарь Б.Г.

Брестский государственный технический университет; г. Брест, Республика Беларусь

Одним из перспективных процессов механической обработки является шлифование электропроводящим абразивным кругом, при котором в зону резания