

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ МНОГОИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ

В настоящее время в технологических целях используются три типа лазеров: это газовые, твердотельные и волоконные. Газовые СО<sub>2</sub>-лазеры мощностью более 1кВт, надежные в эксплуатации, с автоматизированной системой управления технологического комплекса, широко применяются для различных технологических операций, в том числе для термической обработки. Однако высокая стоимость таких комплексов и их низкая производительность ограничивают применение таких лазеров. Твердотельные лазеры на алюмоиттриевом гранате (Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазеры) имеют по сравнению с газовыми ряд преимуществ. Они более компактны, имеют более высокие значения коэффициента полезного действия. Одновременно с этим YAG-лазеры являются более дорогими и требуют больших эксплуатационных расходов. Для термической обработки используются YAG - лазеры мощностью 1...5 кВт, работающие как в непрерывном, так и в импульсном режиме.

На сегодняшний день наиболее перспективными технологическими инструментами являются волоконные лазеры. К числу преимуществ волоконных лазеров следует отнести высокую эффективность (до 50%), что ведет к более низким эксплуатационным расходам; небольшие размеры позволяют легко встраивать их в существующие системы производства. Однако их стоимость пока остаётся очень высокой, что также не позволяет говорить об их широком использовании.

Несмотря на преобладающее мнение [1, 2] о том, что непрерывный режим более подходит для проведения термической обработки, можно предположить, что использование импульсного излучения позволит снизить мощность используемых лазерных устройств. Малая длительность импульсов и возможность фокусировки излучения в пятно малого диаметра позволяют создавать плотности мощности, достаточные для нагрева обрабатываемой поверхности до температур выше фазовых превращений. Ранее было показано [3], что применение импульсных режимов позволяет проводить термическую обработку с помощью YAG – лазера со средней мощностью всего 5...10 Вт, при этом на

всех режимах наблюдалось оплавление и вспенивание металла в зоне нагрева.

Целью настоящей работы является разработка режимов упрочнения поверхности деталей и инструмента с использованием YAG-лазеров малой мощности. Лазерное упрочнение проводилось с использованием лазера мощностью 5 Вт. Основным варьируемым параметром была длительность импульса. В работе были исследованы два режима: обработка одиночными импульсами длительностью 0,1...0,4 мс и многоимпульсная обработка короткими (30...70 мкс) импульсами.

В качестве параметра контроля свойств упрочненного слоя была выбрана микротвердость. Испытания микротвёрдости чаще всего проводят на приборе ПМТ-3 путём вдавливания стандартной 136-градусной алмазной пирамиды с квадратным основанием и нагрузками 2, 5, 10, 20, 50, 100 и 200 г. [4]. Большим преимуществом прибора является прямое нагружение индентора, обеспечивающее высокую точность и стабильность величин прикладываемых нагрузок. Общее увеличение микроскопа прибора ПМТ-3 при визуальных наблюдениях и измерениях 40-кратным эпиобъективом ОЭ-6 с апертурой  $A=0,65$  (фокусное расстояние  $F=6,16$ ) и винтовым окулярным 15-кратным микрометром АМ9-3 равно 485-487.

Технология измерения длины диагонали отпечатка достаточно трудоёмка, а вероятность внесения погрешности, особенно при измерении отпечатков небольших размеров, весьма существенна. В работе [5], разработана методика исследования микротвердости с наноточностью. Комплекс для исследований совмещает микротвердомер ПМТ-3 и персональный компьютера. Измерение микротвёрдости производится вдавливанием четырёхгранной пирамиды, а изображение отпечатка передаётся при помощи видеокамеры на экран монитора. На экране изображение может быть увеличено до любых размеров, то есть самый маленький отпечаток может быть увеличен до размеров, которые позволяют его измерять с самой высокой точностью. Длина диагонали рассчитывается автоматически. Измерения длин диагоналей могут повторяться многократно. Значения длин диагоналей заносятся автоматически в таблицу в программе Excel и производится расчёт среднего значения микротвёрдости.

Неоспоримым достоинством данной методики является возможность не только измерять микротвердость, но и фотографировать исследуемые объекты. Ширина упрочненной дорожки оценивалась на микроскопе МБС-9.

Исследования проводились на инструментальных сталях: углеродистой У12 и быстрорежущей Р6М5. Стали подвергали стандартной термической обработке: У12 – закалке и низкому отпуску,

Р6М5 – закалке и трёхкратному отпуску. Шероховатость образцов составляла  $Rz=20\mu\text{м}$ , поэтому меры по уменьшению отражательной способности поверхности не предпринимались.

В табл. 1 приведены результаты расчётов плотности мощности в зависимости от длительности импульса для многоимпульсной обработки.

Таблица 1. Расчет плотности мощности для многоимпульсной обработки.

Режим	Длительность импульса, мкс	40	50	60	70	400 (0,4 мс)
	Энергия в импульсе, Дж	0,7	1,45	2,38	3,55	0,25
	Плотность мощности $q$ , Вт/м <sup>2</sup>	$7,3 \cdot 10^8$	$12,1 \cdot 10^8$	$16,5 \cdot 10^8$	$21,1 \cdot 10^8$	$8,8 \cdot 10^9$

Видно, что с увеличением длительности импульса значения плотности мощности возрастают. Для сравнения приведено одно из значений плотности мощности для одноимпульсной обработки. Видно, что в этом случае плотность мощности на порядок выше. Эти данные хорошо согласуются с анализом поверхности упрочнённых образцов. Все исследованные режимы вызывают нагрев обрабатываемой поверхности выше температуры плавления. Однако при обработке одиночными импульсами наблюдается не только плавление, но и вспенивание металла, а после кристаллизации на поверхности образуются микротрещины.

Использование многоимпульсной обработки хоть и приводит к плавлению, что в ряде случаев не желательно, всё же обеспечивает более высокое качество поверхности.

Результаты исследований микротвёрдости представлены на рис.1. Сравнение двух режимов показывает, что при обработке сериями коротких импульсов микротвёрдость стали У12 выше, чем при обработке одиночными импульсами. Можно предположить, что при многоимпульсной обработке вследствие малого времени воздействия лазерного излучения на материал и большой скорости отвода тепла, диффузионные процессы, связанные с растворением карбидов при плавлении не успевают завершиться в полном объёме. Поэтому вторичный цементит сохраняется, происходит дальнейшее измельчение зерна, повышение плотности дислокаций, что приводит к росту уровня внутренних напряжений, и, как следствие – повышению твёрдости.

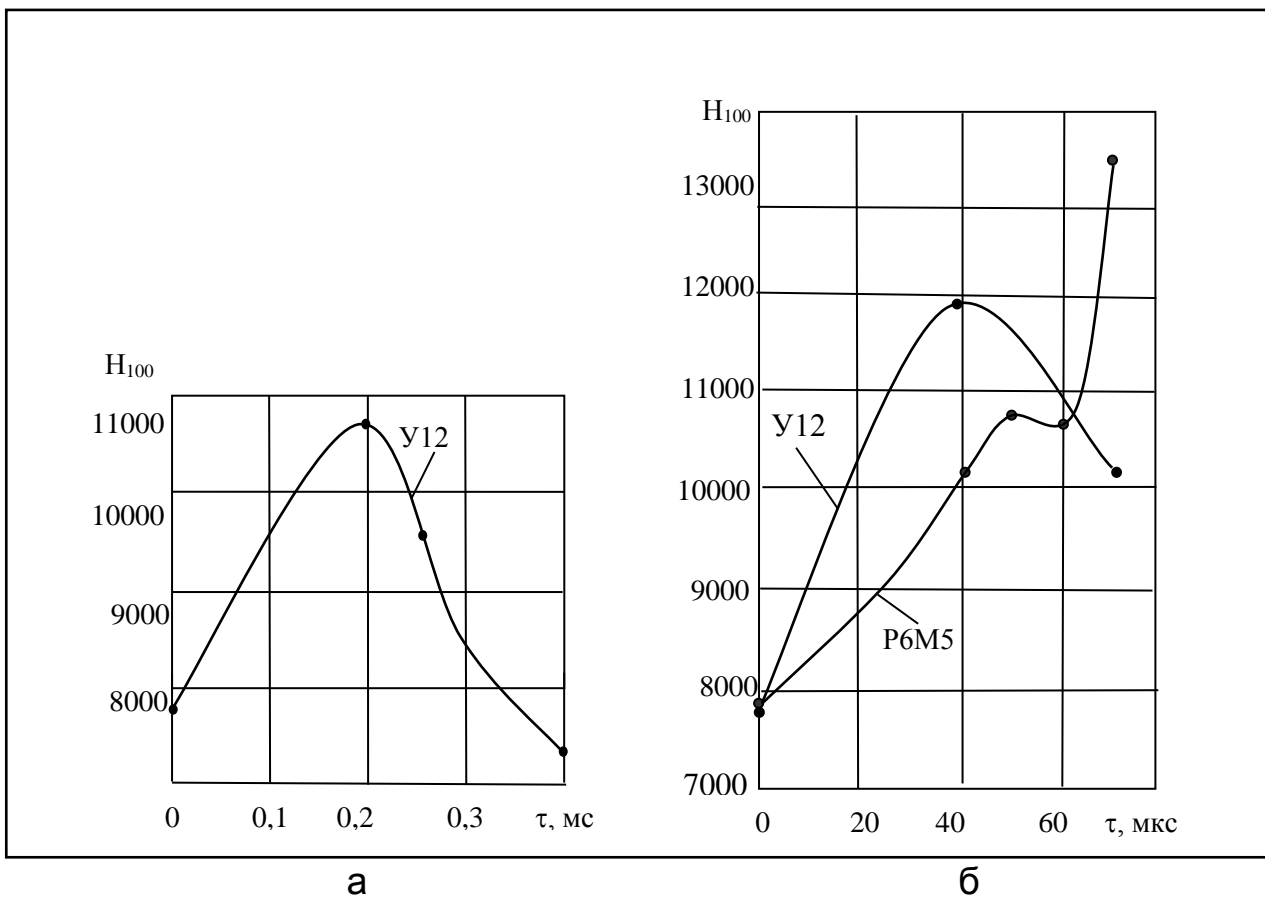


Рисунок 1. Зависимость микротвердости от длительности импульса: а – обработка одиночными импульсами, б – многоимпульсная обработка.

Для стали У12 оптимальное значение длительности импульса составляет 40 мкс. Для стали Р6М5 в рассматриваемом временном интервале наблюдается почти монотонное возрастание твёрдости. Можно предположить, во-первых, что проведение исследований с большей длительностью импульса позволит разработать оптимальный режим лазерного упрочнения для стали Р6М5. Во-вторых, увеличение оптимальной длительности импульса для стали Р6М5 по сравнению со сталью У12 связано с её особыми теплофизическими свойствами: более высокой теплоёмкостью и значительно более низким коэффициентом теплопроводности по сравнению с углеродистой сталью.

На рис.2 представлена структура зоны лазерного воздействия. Четко различимы зоны плавления, закаленная (светлая), переходная, основного металла.

Зона плавления на стали Р6М5 (рис. 3) значительно меньше, чем для стали У12. Глубина закаленной зоны составляет примерно 150 мкм, что является весьма хорошим результатом для импульсного режима.

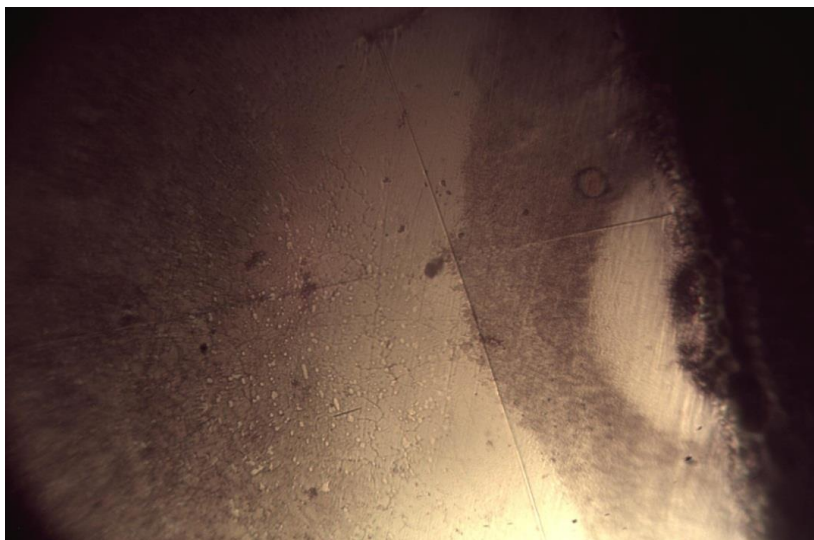


Рисунок 2 Сталь У12, многоимпульсная обработка, длительность импульса 40 мкс



Рисунок 3 Сталь P6M5, многоимпульсная обработка, длительность импульса 60 мкс.

Измерение микротвердости в переходной зоне не фиксирует разупрочнения – микротвердость переходной зоны ниже, чем в закаленной зоне, но выше микротвердости основного металла.

В целом результаты данной работы неплохо согласуются с результатами работ [1, 2], где значения микротвердости исследованных сталей в ряде случаев даже меньше полученных нами, однако мощность используемой лазерной установки в нашем случае значительно ниже. В ряде работ [1, 2, 6] не рекомендуется проводить закалку с оплавлением для стали P6M5, т.к. такой режим приводит к растворению карбидов и увеличению количества

остаточного аустенита. По мнению авторов, высокая твердость может быть обеспечена только при лазерной закалке быстрорежущей стали в твердом состоянии, без оплавления поверхностных слоев. Несмотря на то, что все рассмотренные нами режимы приводят к оплавлению поверхности, снижение твердости стали Р6М5 не наблюдалось, что объясняется сохранением карбидов при кратковременном воздействии. Вместе с тем необходимо продолжить исследования режимов стали Р6М5 с целью оптимизации длительности импульса и поиска параметров импульсной закалки, не вызывающей оплавления. Последнее особенно важно для инструмента и деталей, для которых необходимо сохранять геометрические параметры поверхности.

### Выводы

1. Твёрдость стали зависит от длительности импульса лазерного излучения.
2. Для каждой стали существует оптимальное значение длительности импульса, обеспечивающее максимальную твёрдость.
3. Величина оптимальной длительности импульса определяется теплофизическими свойствами стали.

### Литература:

1. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера/ В.С. Коваленко, Л.Ф.Головки, В.С.Черненко.– К.: Техника, 1990. – 192с.
2. Основы лазерного термоупрочнения сплавов/ А.Г.Григорьянц, А.Н.Сафонов; Под ред. А.Г.Григорьянца.– М.: Высшая школа, 1988. – 159с.
3. Применение импульсных лазеров малой мощности для поверхностной закалки сталей. Ю.П. Мачехин, О.В. Афанасьева, Н.А. Лалазарова, Е.Г. Попова. Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сборник научных трудов.- Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», 2009. Вып.3 (59), с.97-101.
4. Григорович В.К. Твёрдость и микротвёрдость металлов. М.: «Наука», 1976. -230 с.
5. В. И. Мощенок, Н. А. Лалазарова, О. Н. Тимченко Измерение микротвердости с наноточностью/Вестник ХНАДУ, 2008.-вып.42,с.83-85
6. Сафонов А.Н. Структура и микротвердость поверхностных слоев железоуглеродистых сплавов после лазерной закалки// Металловедение и термическая обработка металлов. 1996. №2. С.20-25.

УДК 620.178.151.6

Целью настоящей работы является разработка режимов упрочнения поверхности деталей и инструмента с использованием YAG-лазеров малой мощности. Лазерное упрочнение проводилось с использованием импульсного лазера мощностью 5 Вт. Исследования проводились на инструментальных сталях: углеродистой и быстрорежущей. Стали подвергали стандартной термической обработки. Основным варьируемым параметром была длительность импульса. В работе были исследованы два режима: обработка одиночными импульсами длительностью 0,1...0,4 мс и многоимпульсная обработка короткими (30...70 мкс) импульсами. В качестве параметра контроля свойств упрочненного слоя была выбрана микротвердость. Было показано, что для каждой стали существует оптимальное значение длительности импульса, обеспечивающее максимальную твердость.

ИМПУЛЬСНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ЛАЗЕРНАЯ ЗАКАЛКА СТАЛИ, МИКРОТВЕРДОСТЬ, ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСА, МНОГОИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА

Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

Метою даної роботи являється розробка режимів зміцнення поверхні деталей та інструментів з використанням YAG-лазерів малої напруги. Лазерне зміцнення проводилось з використанням імпульсного лазера напругою 5 Вт. Дослідження проводились на інструментальних сталях: вуглецевій та швидкоріжучій після стандартної термічної обробки. Головним змінним параметром була тривалість імпульсу. В роботі були досліджені два режими: обробка одиночними імпульсами тривалістю 0,1...0,4 мс і багатоімпульсна обробка короткими (30...70 мкс) імпульсами. В якості параметру контролю якостей зміцненого шару було обрано микротвердість. Було показано, що для кожної сталі існує оптимальне значення тривалості імпульсу, що забезпечують максимальну твердість.

ИМПУЛЬСНЕ ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЛАЗЕРНЕ ЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ, ТВЕРДОТІЛЬНИЙ ЛАЗЕР, ТРИВАЛІСТЬ ИМПУЛЬСУ, МИКРОТВЕРДІСТЬ

Ил. 3. Табл. 1. Бібліогр.: 6 назв.

The aim of this work is to develop modes of surface hardening of parts and tools using YAG-lasers with low capacity. Laser hardening was carried out using a pulsed laser of 5 watts. Investigations were carried out on tool steels: carbon and high speed. Steels subjected to standard heat treatment. The main variable parameter was the duration of the pulse. We studied two modes: treatment with single pulses of 0.1 ... 0.4 ms

multipulse processing of short (30 ... 70 ms) pulses. The parameter controls the properties of the hardened layer was chosen microhardness. It was shown that for each steel there exists an optimum value of pulse duration, which provides maximum hardness.

PULSED LASER RADIATION, LASER HARDENING OF STEEL,  
SOLID STATE LASERS, PULSE WIDTH, THE MICROHARDNESS

Fig. 3 Table. 1. Bibliogr.: 6 sources