

УДК 620.378.325

О.В. Афанасьева, канд. техн. наук,  
Н.А. Лалазарова, канд. техн. наук,  
Е.Г. Попова, канд. техн. наук,  
Т.Ю. Свергун

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ МНОГОИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ

В настоящее время в технологических целях применяют три типа лазеров: газовые, твердотельные и волоконные. Газовые  $\text{CO}_2$ -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 низкая производительность ограничивают их применение. Твердотельные лазеры на алюмоиттриевом гранате ( $\text{Nd}^{3+}$ :YAG-лазеры) имеют по сравнению с газовыми ряд преимуществ. Они более компактны, имеют более высокие значения коэффициента полезного действия. Одновременно с этим YAG-лазеры имеют высокую стоимость и требуют больших эксплуатационных расходов. Для термической обработки используются YAG-лазеры мощностью 1...5 кВт, работающие как в непрерывном, так и импульсном режимах.

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, позволяющие 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 наблюдались 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. Измерения микротвёрдости чаще всего проводят на приборе ПМТ-3 путём вдавливания стандартной 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 объективом 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 компьютер. Измерение микротвёрдости проводится вдавливанием четырёхгранной пирамиды, а изображение отпечатка передаётся с помощью 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 длины диагоналей могут повторяться многократно. Значения длины диагоналей заносятся автоматически в таблицу в программе Excel и проводится 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  $R_z=20$  мкм, поэтому меры по уменьшению отражательной способности поверхности не предпринимались.

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

## 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>		$7,3 \cdot 10^8$	$12,1 \cdot 10^8$	$16,5 \cdot 10^8$	$21,1 \cdot 10^8$	$8,8 \cdot 10^9$

На основании проведенных измерений можно сделать вывод о том, что с увеличением длительности импульса значения плотности мощности возрастают. Для сравнения приведено одно из значений плотности мощности для одноимпульсной обработки. В этом случае плотность мощности на порядок выше. Эти данные хорошо согласуются с макроанализом 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 хотя и приводит к плавлению, что в ряде случаев нежелательно, всё же обеспечивает более высокое качество поверхности.

Результаты исследований микротвёрдости приведены 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, рост уровня внутренних напряжений, что и приводит к повышению твёрдости.

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.

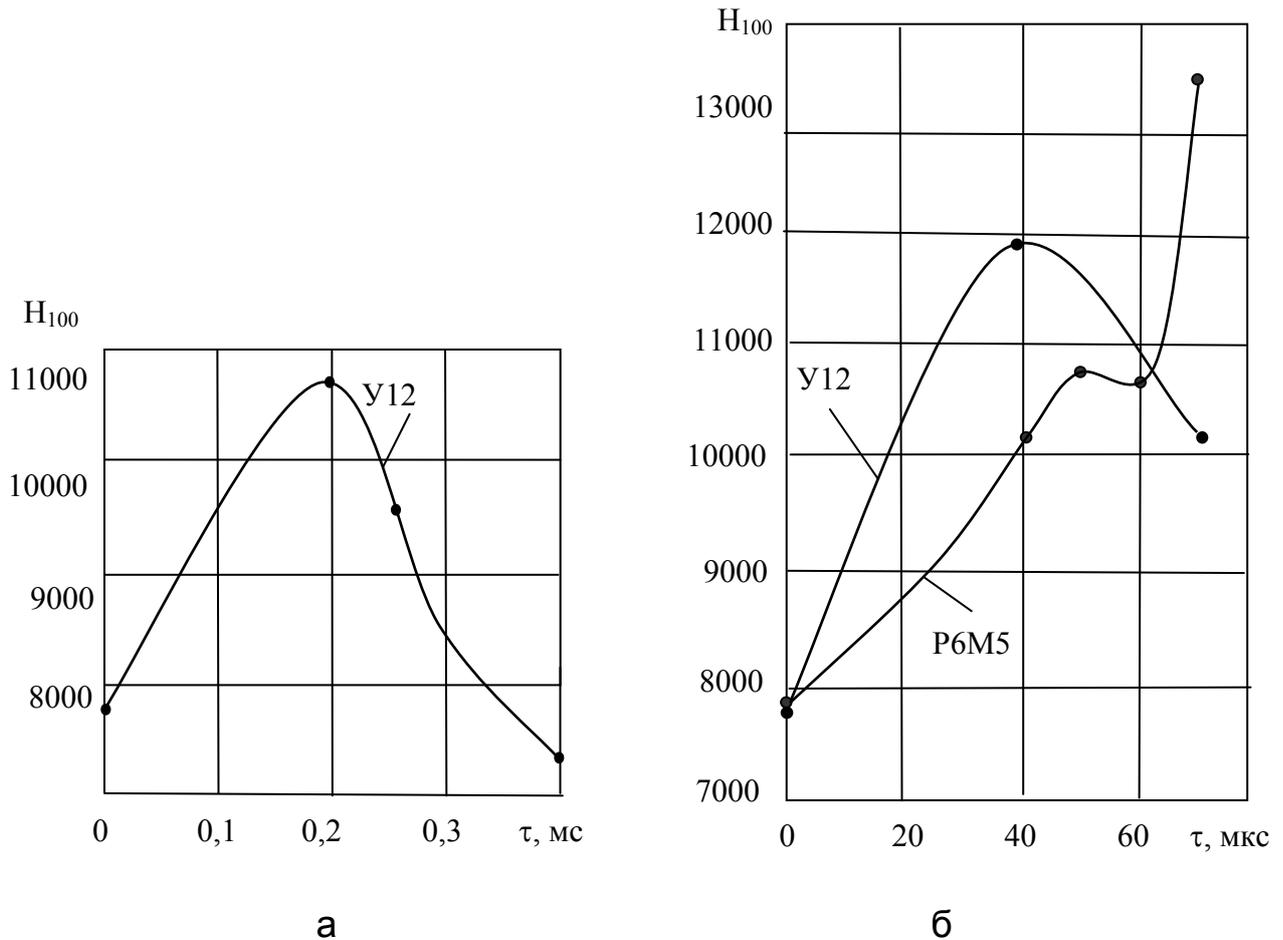


Рисунок 1 – Зависимость микротвердости от длительности импульса: а – обработка одиночными импульсами; б – многоимпульсная обработка

На рис. 2 показана структура зоны лазерной многоимпульсной обработки в образцах из стали У12. Четко различимы зоны плавления, закаленная (светлая), переходная, основного металла.

Зона плавления для стали Р6М5 (рис. 3) значительно меньше, чем для стали У12. Глубина закаленной зоны составляет около 150 мкм, что свидетельствует об эффективности импульсного режима.

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

Результаты данной работы согласуются с результатами работ [1, 2], где значения микротвердости исследованных сталей в ряде случаев даже меньше полученных в данных исследованиях, однако мощность используемой лазерной установки в этом случае значительно ниже.



Рисунок 2 – Структура зоны лазерной многоимпульсной обработки в образцах из стали У12, длительность импульса – 40 мкс



Рисунок 3 – Структура зоны лазерной многоимпульсной обработки в образцах из стали P6M5, длительность импульса – 60 мкс

В ряде работ [1, 2, 6] не рекомендуется проводить закалку с оплавлением для стали P6M5, так как этот 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 в работе режимы приводят к оплавлению поверхности, снижения 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 тех инструментов и деталей, у которых необходимо сохранять геометрические параметры поверхности.

### Выводы

1. Твердотельные YAG-лазеры малой мощности можно использовать для термоупрочнения стали.
2. Твёрдость стали зависит от длительности импульса лазерного излучения.
3. Для каждой стали существует оптимальное значение длительности импульса, обеспечивающее максимальную твёрдость.
4. Величина оптимальной длительности импульса определяется теплофизическими свойствами стали.

### Список использованных источников

1. Коваленко, В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера [Текст] / В.С. Коваленко, Л.Ф. Головкин, В.С. Черненко – К.: Техника, 1990. – 192 с.
2. Григорьянц, А.Г. Основы лазерного термоупрочнения сплавов [Текст] / А.Г. Григорьянц, А.Н.Сафонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 159 с.
3. Применение импульсных лазеров малой мощности для поверхностной закалки сталей [Текст] / Ю.П. Мачехин, О.В. Афанасьева, Н.А. Лалазарова, Е.Г. Попова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – Вып. 3(59). – Х., 2009. – С. 97–101.
4. Григорович, В.К. Твёрдость и микротвёрдость металлов [Текст] / В.К. Григорович. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
5. Мощенок В.И. Измерение микротвердости с наноточностью [Текст] / В.И. Мощенок, Н.А. Лалазарова, О.Н. Тимченко // Вестник ХНАДУ. – 2008. – Вып. 42. – С. 83-85.
6. Сафонов, А.Н. Структура и микротвердость поверхностных слоев железоуглеродистых сплавов после лазерной закалки [Текст] / А.Н. Сафонов // Металловедение и термическая обработка металлов. –1996. – №2. – С. 20-25.

*Поступила в редакцию 29.06.2011.*

*Рецензент: канд. техн. наук, проф. Н.И. Семишов,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*