

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онохов А. П., Резниченко В. В., Яковлева Н. С. Лазерная обработка оптических поверхностей // Оптич. журн. 1995. № 1. С. 68—71.
2. Буркат Т. М., Добычин Д. П., Онохов А. П., Пак В. Н., Пальтиель Л. Р. Влияние лазерной обработки на структуру и оптические свойства поверхности полированного кварцевого стекла // Физика и химия стекла. 1991. Т. 17, № 6. С. 908—913.
3. Вейко В. П., Шахно Е. А., Яковлев Е. Б. Гидродинамические процессы на поверхности стекла при лазерной обработке // Изв. РАН, сер. физическая. 1997. Т. 61, № 8. С. 1513—1518.
4. Кислота кислотная/ Вконтакте [Электронный ресурс]: <<http://vk.com/kislotakislotnay>>.
5. Электронная химическая энциклопедия/ ГНУ ЦНСХБ Россельхозакадемии [Электронный ресурс]: <<http://www.cnsheb.ru/AKDiL/0048/default.shtm>>.

Сведения об авторах

- Анастасия Валерьевна Струсевиц** — студент; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения, Санкт-Петербург;
E-mail: darkness595@mail.ru
- Юрий Александрович Полтаев** — студент; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения, Санкт-Петербург;
E-mail: yurka.poltaev@yandex.ru
- Дмитрий Андреевич Синева** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения, Санкт-Петербург;
E-mail: sinev_dm@mail.ru

Рекомендована
Программным комитетом
симпозиума

Поступила в редакцию
14.12.13 г.

УДК 621.375.826

М. В. ВОЛКОВ, А. А. КИШАЛОВ, В. Ю. ХРАМОВ

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ЗАКАЛКИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

Приведены результаты экспериментов по закалке резьбовых соединений насосно-компрессорных труб (НКТ) при помощи иттербиевого волоконного лазера, работающего в непрерывном режиме. В качестве образцов использовались участки НКТ из стали 38Г2С. Приведены режимы обработки, микрошлифы резьбовых участков, а также результаты испытаний износостойкости образцов.

Ключевые слова: лазерная закалка, волоконный лазер.

Насосно-компрессорные трубы (НКТ) применяются при эксплуатации и ремонте нефтяных, газовых, нагнетательных и водозаборных скважин. Это бесшовные трубы диаметром 27—114 мм [1] и длиной обычно 8—10,5 м, с обеих сторон оканчивающиеся участком внешней резьбы. При работе в условиях скважины трубы соединяются посредством муфт. Следовательно, предъявляются высокие требования к качеству резьбовых соединений НКТ, так как негерметичность или поломка резьбового соединения ведет к остановке и длительному ремонту скважины, а в некоторых случаях — и к потере скважины. Один цикл работы — спускоподъемная операция (СПО) — соответствует одной операции свинчивания—развин-

чивания резьбового соединения НКТ. Обычно НКТ с неупрочненной резьбовой частью выдерживает 5—6 СПО, после чего подлежит ремонту.

В настоящей работе исследовался метод лазерной закалки резьбовой части НКТ для повышения ее износостойкости.

Мерой износостойкости резьбового соединения целесообразно считать число циклов свинчивания—развинчивания без потери герметичности резьбового соединения. Для повышения износостойкости резьбового соединения НКТ предлагалось провести его лазерную закалку. Основным недостатком закалки классическими лазерами — чрезвычайно низкая энергетическая эффективность: КПД СО₂-лазера не превышает 10 % от полной потребительской мощности, а коэффициент поглощения излучения металлами не превышает 10 %, так что эффективность процесса закалки составляет порядка 1 % [2]. Для твердотельных лазеров, работающих на длине волны ~1 мкм, коэффициент поглощения может достигать нескольких десятков процентов при том, что их КПД обычно составляет не более 5 %.

Поэтому для проведения экспериментов был выбран иттербиевый волоконный лазер серии YLR, КПД которого от полной потребительской мощности составляет 24 %, длина волны 1,07 мкм. Волоконные лазеры отличаются чрезвычайно высоким сроком службы (30 000 ч) и практически не нуждаются в обслуживании, что делает перспективным внедрение данной технологии в промышленности.

Особенности лазерной закалки резьбовых участков НКТ. В качестве образцов для эксперимента по лазерной закалке использовались патрубки НКТ диаметром 73 мм и толщиной 5,5 мм, на конце которых была нанесена резьба. Длина резьбового участка 60 мм, шаг резьбы 2,54 мм. Патрубки изготовлены из стали 38Г2С, относящейся к классу легированных конструкционных сталей. Состав стали приведен в таблице.

Состав стали 38Г2С

38Г2С	Содержание химических элементов, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
Образец	0,38	1,65	0,49	0,012	0,05	<0,01	0,017	0,009
Согласно ОСТ14-21	0,37—0,41	1,60—1,80	0,40—0,70	≤0,25	≤0,25	≤0,20	≤0,035	≤0,035

Видно, что для стали 38Г2С содержание как марганца, так и кремния незначительно изменяет температуру аустенизации. Кроме того, кремний, содержащийся в стали, повышает, а марганец — понижает эту температуру [3]. Таким образом, можно считать, что легирующие элементы не оказывают существенного влияния на температуру аустенизации. В данном случае справедливо считать ее равной температуре аустенизации (820 °С) нелегированной стали, содержащей 0,38 % углерода.

Необходимо отметить, что в случае лазерной закалки скорость нагрева и остывания материала настолько высока, что диффузионные процессы перестройки решетки ОЦК феррита в решетку ГЦК аустенита могут не успеть завершиться, в этом случае имеет место сдвиг температуры превращения феррита в аустенит в область более высоких температур [4]. Этот факт необходимо учитывать при выборе режима лазерной закалки.

В процессе операции свинчивания—развинчивания НКТ основная нагрузка приходится на вершину и боковые поверхности зуба, это можно определить по внешнему виду резьбовой части после нескольких циклов СПО. Кроме того, после нанесения резьбы во впадинах сосредоточивается наибольшее количество микродефектов материала и растягивающих напряжений. После закалки существенно повышается твердость материала, а следовательно и хрупкость. Таким образом, повышение твердости впадины может отрицательно сказаться на надежности резьбового соединения, вызвав трещины в резьбовой части трубы и ее выход из строя.

Исходя из сказанного представляется целесообразным осуществить закалку вершины и боковых поверхностей зуба, оставив впадину незакаленной. Для этого были выбраны два режима обработки:

1) сканирование лазерным лучом по боковым поверхностям зуба резьбы. Диаметр пучка выбирался близким к ширине боковой поверхности зуба, а мощность лазерного излучения и скорость сканирования такими, чтобы достичь максимальной температуры на поверхности материала, не вызвав его оплавления;

2) сканирование лазерным лучом по всей поверхности резьбы. При таком способе обработки материал на вершине зуба охлаждается медленнее, чем во впадине, вследствие меньшего теплоотвода в глубь материала. Соотношение мощности и скорости лазерного излучения выбиралось так же, как и в первом случае. Таким образом, температура на вершине зуба получалась существенно выше температуры во впадине, что вызывало неравномерное распределение закаленного слоя по сечению резьбы.

Описание эксперимента. Для экспериментов по лазерной закалке резьбовой части НКТ был использован одномодовый волоконный лазер серии YLR (ЛС-2), работающий в непрерывном режиме. Длина волны излучения 1,07 мкм, максимальная мощность излучения 2 кВт, диаметр транспортного волокна 50 мкм. Для фокусировки излучения использовалась оптическая вариосистема с переменным фокусным расстоянием, формирующая гауссово распределение излучения. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки: *а* — сканирование по боковой поверхности зубца резьбы, *б* — сканирование по всей поверхности резьбы (*1* — образец). Для перемещения луча (2) по поверхности резьбы фокусирующая система (3) с закрепленным в ней коллиматором волоконного лазера (4) могла перемещаться в горизонтальной плоскости, а патрубок с резьбой был установлен во вращающем устройстве. Скорость перемещения фокусирующей системы и скорость вращения патрубка задавались программно. Кроме того, фокусирующая система могла заклоняться в горизонтальной плоскости (рис. 1, *а*).

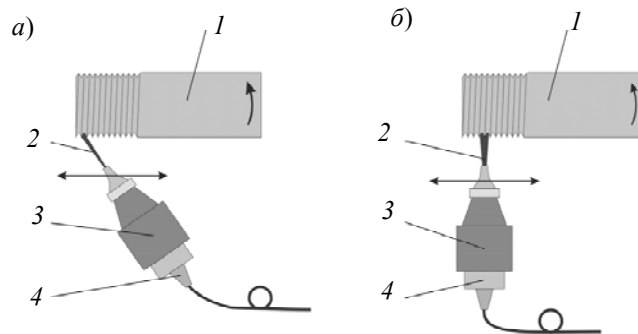


Рис. 1

При сканировании лучом по боковой поверхности зуба фокусирующая система заклонялась на угол 30° относительно нормального положения, скорость ее перемещения была синхронизована со скоростью вращения образца так, чтобы за время одного оборота фокусирующая система смещалась на шаг резьбы. Упрочнение осуществлялось в два прохода: по одной и по другой стороне зубца. Скорость перемещения луча по поверхности образца выбиралась из соображений, представленных выше, и в итоге составила 200 мм/с. Диаметр пятна составлял 1,5 мм, мощность лазерного излучения 2 кВт, плотность мощности излучения $1,1 \cdot 10^5$ Вт/см². Суммарное время обработки составило 60 с (рис. 1, *а*).

При сканировании лучом по всей поверхности резьбы был выбран диаметр пятна 4 мм. Скорость перемещения фокусирующей системы была синхронизирована со скоростью вращения образца так, что за время одного оборота система смещалась на диаметр пучка. Скорость перемещения луча по поверхности образца составила 60 мм/с, мощность излучения 2 кВт, плотность мощности излучения $1,6 \cdot 10^4$ Вт/см². Время обработки составило 45 с (рис 1, *б*).

Плотность мощности $1,6 \cdot 10^4$ Вт/см² для этого случая являлась пороговой, поскольку при ее увеличении начиналось локальное подплавление материала. На рис. 2 представлено распределение температуры при закалке резьбы лазерным излучением, полученное конечноразностным методом (*a* — по боковой поверхности зубца, *б* — по всей поверхности резьбы).

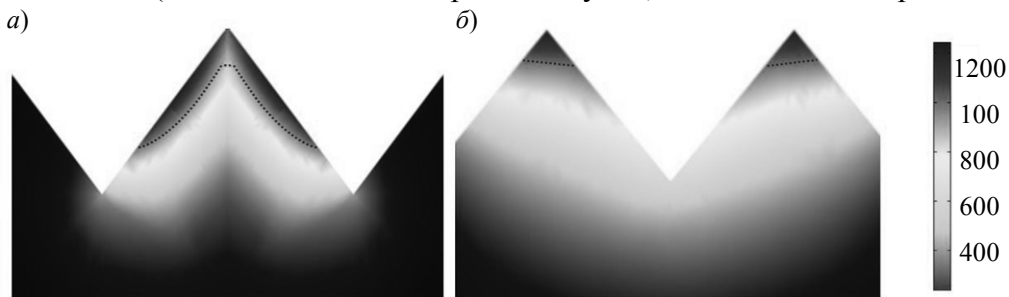


Рис. 2

Результаты экспериментов. Были подготовлены образцы патрубков НКТ для дальнейшего изготовления микрошлифов и проведения испытаний на скручивающей машине. Микрошлифы представлены на рис. 3 (*a* — упрочнение сканированием луча по боковой поверхности, *б* — по всей поверхности резьбы). На обоих микрошлифах хорошо виден упрочненный мартенситный слой на вершине зубца, а также феррито-перлитная структура основного материала.

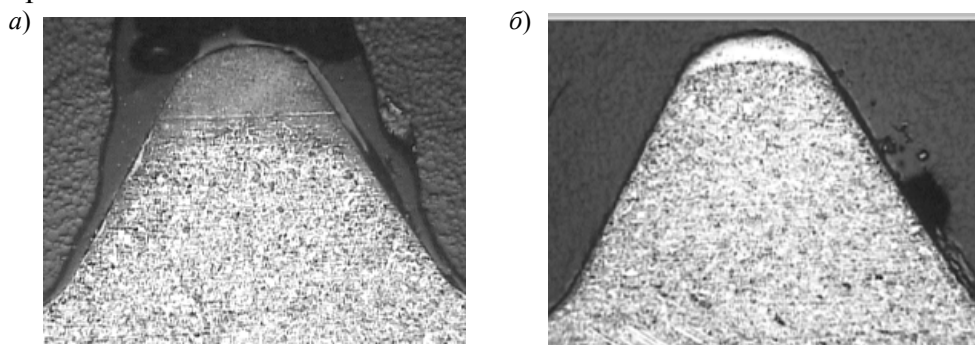


Рис. 3

При сканировании по боковой поверхности зубца резьбы закаленной оказалась не только вершина, но и часть боковой поверхности. Толщина упрочненного слоя на вершине зубца составляет 500 мкм, в середине боковой поверхности — менее 100 мкм. При сканировании по всей поверхности толщина закаленного слоя составляет 100—200 мкм. Кроме того, при сканировании по всей поверхности резьбы толщина закаленного слоя варьирует от зубца к зубцу в одном и том же образце. В некоторых случаях наблюдается несимметричное распределение закаленного слоя в пределах зубца, что обусловлено неравномерным распределением энергии в пучке, а следовательно, различной энергией, вкладываемой в разные участки витков резьбы на упрочняемом образце. Для устранения этих недостатков необходимо равномерное распределение энергии в пятне.

Измерения, проведенные по методу Викерса при нагрузке 100 г, показали, что твердость мартенситного слоя в обоих случаях составляет 630—670 *HV*, тогда как основного материала — не выше 210—240 *HV*.

Стендовые испытания показали, что резьбовое соединение, упрочненное сканированием лазерного луча по всей поверхности резьбы, выдерживает 10—12 СПО, тогда как резьбовое соединение, упрочненное сканированием пучка по боковой поверхности зуба, — свыше 20.

Выводы. Эксперименты показали, что для повышения износостойкости резьбового соединения НКТ целесообразно использовать закалку непрерывным излучением иттербиевого волоконного лазера. Были проведены эксперименты по закалке резьбы НКТ двумя методами: сканированием лучом всей поверхности трубы и сканированием боковой

поверхности зубца резьбы, которые показали, что при использовании второго метода глубина закаленного слоя и число операций свинчивания—развинчивания значительно выше. Кроме того, этот метод отличается лучшей воспроизводимостью результатов вследствие более равномерного распределения закаленного слоя по поверхности резьбы, однако обеспечивает меньшую производительность по сравнению с закалкой всей поверхности резьбы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 633-80. Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним.
2. Скрипченко А. И., Медвецкий В. М., Попов В. Так закалялась сталь или тестирование процесса закалки сталей излучением волоконных лазеров // РИТМ. 2007. Т. 29, № 10. С. 52—53.
3. Теоретические основы легирования: Конспект лекций. ПГТУ, 2008.
4. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Баумана, 2006. 238 с.

Сведения об авторах

- Михаил Владимирович Волков** — магистр; ООО „Научно-производственное предприятие волоконно-оптического и лазерного оборудования“, Санкт-Петербург; начальник лаборатории; E-mail: mvvolk@mail.ru
- Антон Александрович Кишалов** — магистр; ООО „Научно-производственное предприятие волоконно-оптического и лазерного оборудования“, Санкт-Петербург; научный сотрудник; E-mail: grinfo@mail.ru
- Валерий Юрьевич Храмов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения, Санкт-Петербург; заведующий кафедрой; E-mail: vkhramov@gmail.com

Рекомендована
Программным комитетом
симпозиума

Поступила в редакцию
14.12.13 г.