



с. 58

Робототехнический  
лазерный комплекс

с. 8

## [В МИРЕ НК]

НОВОСТИ.....	4
--------------	---

## [ТЕХНОЛОГИИ]

### МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ

Оценка напряжённого состояния и качества лазерных сварных соединений из стали 40ХН2МА магнитным методом.....	8
Исследование методом коэрцитивной силы напряжённого состояния электросварных труб для нефтегазопроводов в процессе их производства .....	18
Исследование методом коэрцитивной силы напряжённого состояния газопроводных труб при гидроиспытаниях.....	26
Исследование методом коэрцитивной силы напряжённо-деформированного состояния железнодорожных рельсов при испытаниях на сжатие.....	34

## [НК В ЛИЦАХ]

### СОВЕТЫ ЭКСПЕРТОВ

12 параметров, на которые следует обратить внимание при выборе рентгено-телевизионной установки.....	42
--	----

## [РАЗРАБОТКИ]

### МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ

Современные возможности магнитной структуроскопии при измерении коэрцитивной силы .....	46
Сравнительный анализ 2-х типов коэрцитиметров.....	52

## [В МИРЕ НК]

### СОБЫТИЯ

Пятый международный военно-морской салон (МВМС-2011) – одна из ведущих мировых выставок в области кораблестроения, морских вооружений и судостроения.....	58
Выставка Aerospace Testing Russia – вклад в консолидацию потенциала российского авиапрома.....	60
Специализированная выставка «NDT Самара – неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности».....	64

## [НК В ЛИЦАХ]

### ОСНОВОПОЛОЖНИКИ НК

К 85-летию со дня рождения д.т.н., профессора И.Н. Ермолова .....	66
---	----



## ТЕХНОЛОГИИ

→ МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ

### Тема статьи:

Работа посвящена комплексному исследованию качества лазерных сварных соединений магнитным методом с использованием коэрцитивной силы ( $H_c$ ). В статье представлены результаты исследований напряжённого состояния и качества лазерных сварных натурных образцов типа «вал-диск» из стали 40ХН2МА.

# ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 40ХН2МА МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

**А.Г. Игнатов,**

ЗАО «ЛазерИнформСервис», ЛРСЗЦ

**В.И. Криворотов, Р.Ч. Муратов,**

ООО «СварКон-Сервис»

**А.Н. Калинин, В.Н.Шестов**

ОАО «НТЦ «Завод Ленинец»

В последние годы лазерная сварка начинает находить всё более широкое применение для изготовления сварных металлоконструкций ответственного назначения в различных отраслях производства, в том числе на промышленно-опасных объектах. Постоянно расширяется номенклатура изделий и марочный состав свариваемых сталей (низкоуглеродистые конструкционные, средне- и высоколегированные нержавеющие и др.) [1, 2].

Стабильность процесса лазерной сварки характеризуется временем и интенсивностью взаимодействия лазерного излучения со свариваемым материалом при воздействии мощных концентрированных потоков энергии, значительно превосходящих источники, используемые при традиционных способах дуговой сварки плавлением [3, 4]. В связи с этим проведение исследований, направленных на выбор технологических



**ООО «СварКон – Сервис»**

Россия, 192029, г. Санкт-Петербург, Общественный переулок, д. 5В  
+7 (812) 336 29 52 +7 (812) 336 29 53

[www.svarcon.ru](http://www.svarcon.ru)  
e-mail: [info@svarcon.ru](mailto:info@svarcon.ru)

Компания «СварКон-Сервис» является дистрибутором таких известных брендов, как Lincoln Electric (США), PEMAMEK (Финляндия), OTC-Daihen (Япония), Migatronic (Дания), KOBE Steel (Япония), Bohler Thyssen (Германия), Kiswel (Корея). Также мы оказываем услуги по обслуживанию и ремонту сварочного оборудования, поставке оригинальных расходных материалов к нему (TBI, Binzel и аналоги).

Сформировавшиеся за годы деятельности устойчивые деловые партнерские отношения со многими производителями и поставщиками, позволяют нам сегодня предложить своим Клиентам услуги комплексного снабжения сварочным оборудованием и материалами.

#### Основные направления деятельности компании:

- Проектирование и поставка «под ключ» автоматических производственных комплексов по резке/сборке/сварке металлоконструкций различного назначения
- Поставка стандартного сварочного оборудования
- Комплексное обеспечение сварочными и расходными материалами для сварки
- Технический сервис

- Оперативное консультирование по вопросам технологии сварки
- Проведение технического аудита сварочных производств
- Разработка планов технического переоснащения производства
- Техническая поддержка при аттестации по требованиям НАКСа технологии сварки, сварочного оборудования и материалов, а также при проведении соответствующих аттестационных испытаний.

#### Основные методы работы компании:

- Технический аудит сварочного производства предприятий
  - Проведение научно-практических семинаров и «круглых столов»
  - Разработка проектов/планов технического переоснащения сварочного производства на предприятиях
  - Поставка современного сварочного оборудования
  - Поставка сварочных материалов
- Мы используем и внедряем комплексные методы продвижения прогрессивных сварочных процессов и материалов.
- Наши партнёрами являются ведущие предприятия отечественного машиностроения, нефтегазовой отрасли, судостроения.

параметров и режимов лазерной сварки, а также контроля качества сварных соединений из трудно свариваемых сталей и сталей с ограниченной свариваемостью традиционными методами сварки, представляется весьма актуальным.

Судя по результатам выполненного нами поиска литературных данных, публикации с технической информацией об особенностях традиционных процессов дуговой и лазерной сварки, а также по определению сварочных напряжений в сварных соединениях из сталей типа 40ХН2МА практически отсутствуют.

Были обнаружены лишь некоторые, весьма неполные сведения об опыте практического применения электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для получения сварных изделий из подобных сталей. Причём информация о результатах ЭЛС весьма противоречива и, в основном, содержит данные о наличии всевозможных дефектов сварки.

В связи с этим представляется целесообразным проведение комплексной оценки качества стыковых сварных соединений натурных образцов (вала и диска) из стали 40ХН2МА (ГОСТ 4543), выполненных лазерной сваркой.

Практическое значение данного исследования обусловлено тем, что нефтеперерабатывающее оборудование, работающее на открытых площадках НПЗ, а также нефтегазодобывающее оборудование, работающее в акватории прибрежного шельфа, содержит ответственные изделия, например, такие как дисковые муфты в насосных агрегатах, имеющие сборочные единицы (валы промежуточные), собранные с применением сварки из деталей, изготовленных из трудно свариваемых конструкционных легированных сталей, например 40ХН2МА.

Лазерную сварку макета вала промежуточного выполняли на роботизированном стенде Лазерного Регионального Северо-Западного Центра (ЛРСЗЦ)\* волоконным лазером мощностью 5 кВт производства НТО «ИРЭ-Полюс» (рис. 1).

Настоящая работа посвящена комплексному исследованию качества лазерных сварных соединений, в том числе оценке напряжённого состояния магнитным методом с использованием коэрцитивной силы ( $H_c$ ) в качестве первичного информационного параметра. Сам метод основан на явлении магнитострикции (эффект Э. Виллари), при котором происходит изменение намагниченности тела при его деформации.

Коэрцитивная сила – величина, обратная магнитной проницаемости, определяемая шириной петли магнитного гистерезиса. Весьма чувствительна  $H_c$



а)



б)

Рис. 1. Робототехнический лазерный комплекс (а) и момент сварки вала промежуточного (б) в ЛРСЗЦ (СПб)

к изменению физико-механических свойств металлов и сплавов. Поэтому характерно, что, являясь показателем намагниченности, коэрцитивная сила при холодной пластической деформации стальной проволоки увеличивается по сравнению с исходным значением на 323% [4].

В настоящей работе авторами использованы методические приёмы и материалы из опыта применения указанного магнитного метода неразрушающего контроля (НК) при диагностике технического состояния сварных соединений на опасных производственных объектах в судостроении, мостостроении, энергетике, металлургии и др. [5-10]. Судя по данным этих работ, методом измерений значений Нс можно достаточно надёжно оценивать параметры внутренних напряжений, определяющих напряжённое состояние (НС) сварных металлоконструкций (МК).

Оценка напряжённого состояния приобретает важность и актуальность, потому что по данным Международного Института Сварки (МИС) из всех известных катастрофических разрушений сварных конструкций в 93,4% случаев причины возникновения этих разрушений в той или иной степени связаны с остаточным напряжённым состоянием конструкций, в совокупности с воздействием прочих отрицательных факторов. Основная опасность данных разрушений состоит в том, что они могут возникать при достаточно низких уровнях действующих в процессе эксплуатации металлоконструкции напряжений (не более 0,25 предела текучести металла, из которого они изготовлены) [11].

Базовым нормативным документом магнитного метода контроля механических свойств, микроструктуры и внутренних напряжений является: ГОСТ 30415 «Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнит-

ным методом». На его основе разработаны руководящие документы по контролю потенциально опасных изделий [7-10]. Главным достоинством магнитного метода является возможность (в относительно простой, надёжной и доступной форме) осуществления оперативного контроля физико-механических характеристик металла, определяющих НС готовых изделий, конструкций, деталей методом НК, без вырезки образцов и проведения стандартных испытаний.

Химический состав стали марки 40ХН2МА (ГОСТ 4543) [12]), а также результаты расчётного и экспериментального определения значений Нс представлены в Таблице 1.

Первичная связь между химическим составом и значениями Нс вполне закономерна. Устойчивость такой связи обусловлена кристаллическим строением металлов и сплавов, обладающих ферромагнитными свойствами. Процесс намагничивания (размагничивания) представляет собой ориентацию векторов спонтанной намагниченности или смещения доменных границ под воздействием внешних факторов. Поэтому на значение Нс влияет также, через зависящие от него параметры доменной структуры, размер зерна поликристалла. Измельчение зерна обуславливает увеличение числа доменов и, следовательно, количества доменных границ (ДГ), а это влечёт изменение характера распределения и увеличения плотности дислокаций и других дефектов микроструктуры, в объёме смещающихся через зёरна единичных (или суммарной ДГ), что приводит к увеличению Нс поликристалла [13, 14].

**Таблица 1. Сравнение значений коэрцитивной силы исследованных деталей, полученных расчётным методом, и измерениями коэрцитивной силы**

Образец/ вид анализа	Содержание элементов, % (*)						Средние значения Нс, А/см	
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Расчётн.	Эксперим.
Сталь (**) 40ХН2МА (ГОСТ 4543)	0,37-0,44 0,405	0,17-0,37 0,27	0,5-0,8 0,65	0,6-0,9 0,75	1,25-1,65 1,45	0,15-0,25 0,2	12,7	-
Поковка (сертификат)	0,38	0,28	0,71	0,72	1,6	0,21	12,7	-
Вал (хим. анализ)	0,38	0,25	0,75	0,83	1,38	0,21	12,2	11,3***
Диск (хим. анализ)	0,38	0,32	0,78	0,9	1,65	0,21	13,2	13,3***

Примечание: \*) Содержание меди в стали составляет:

Cu = 0,3% по ГОСТ 4543;

Cu = 0,16% по данным сертификата и химического анализа.

\*\*) При расчёте Нс использованы средние значения содержания элементов, приведенные в знаменателе.

\*\*\*) По данным измерений Нс на четырёх образцах.

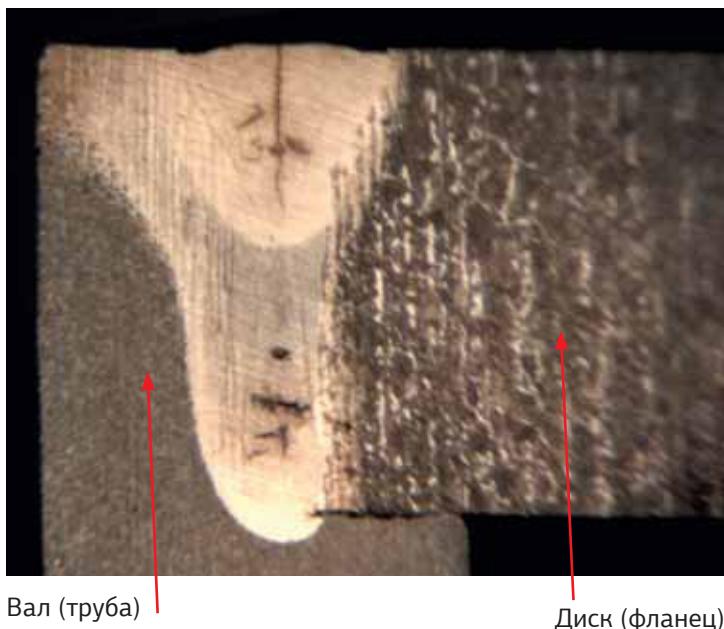


Рис. 2. Макрошлиф сварного соединения «вал-диск»

Расчётные значения Нс по данным определения химического состава стали 40ХН2МА выполняли по формулам, предложенным автором работы [5].

Для экспериментального определения значений коэрцитивной силы применяли хорошо себя зарекомендовавший и достаточно надёжный магнитный структуроскоп-коэрцитиметр КРМ-Ц-К2М разработки научно-производственной фирмы СНР (Украина, г. Харьков). Измерения и анализ результатов измерений

выполняли в соответствии с требованиями Руководства по эксплуатации прибора КРМ-Ц-К2М.

Результаты измерений коэрцитивной силы структуроскопом по беспроводной связи передаются в карманный персональный компьютер (КПК). Программное обеспечение КПК позволяет получить в процессе работы псевдоцветовую магнитограмму коэрцитивной силы в контролируемом объекте и гистограмму распределения Нс.

Из данных Таблицы 1 следует, что расчётные и экспериментальные значения Нс имеют весьма близкие значения. Их различие не превышает 7,5% (по валу) и 0,8% (по диску), что вполне допустимо для решения практических задач. Наши расчёты показывают, что это позволяет достаточно надёжно определять значения Нс для большинства конструкционных сталей, что и было установлено ранее [5].

Исследования выполняли на натурных образцах, в количестве четырёх штук. Внешний вид натурного образца вала промежуточного в момент сварки представлен на рис. 16.

На рис. 2 представлена типичная макроструктура исследуемого сварного соединения.

В соответствии с ОСТ 5 Р.96092-92 исследуемые стыковые соединения относятся к типу С5, а согласно ГОСТ 2601-84 - к угловому типу соединений (при отсутствии конструктивного непровара и смещении шва ближе к наружной поверхности вала/трубы, в сторону диска будет обеспечен угловой тип соединения). Это сварное соединение характеризуется достаточной сложностью

**Таблица 2. Результаты измерений значений Нс исследуемых образцов**

Элементы образца	Средние значения измерений Нс, А/см						№ об-разца	
	До сварки		После сварки					
	Основной металл	Вдоль	Поперёк	Вдоль	Поперёк	$\Delta = H_{cB} - H_{cP} / H_{cB} + H_{cP}$		
Диск	12,7	12,2	10,7	10,4	0,014	9,2	1	
Вал	12,2	-	12,0	-	-	-		
Диск	11,4	11,3	10,5	10,5	0,00	8,5	2	
Вал	13,7	-	14,5	-	-	-		
Диск	14,7	14,4	14,0	13,0	0,037	27,2	3	
Вал	9,65	-	10,3	-	-	-		
Диск	14,7	14,6	15,5	13,9	0,051	27,1	4	
Вал	9,8	-	10,5	-	-	-		
Среднее: - по диску = 13,3 - по валу = 11,3		Среднее: - по диску = 12,3 - по валу = 11,8				Средн. сварн. швов: - с трещиной = 8,8 - без трещины= 27,15		

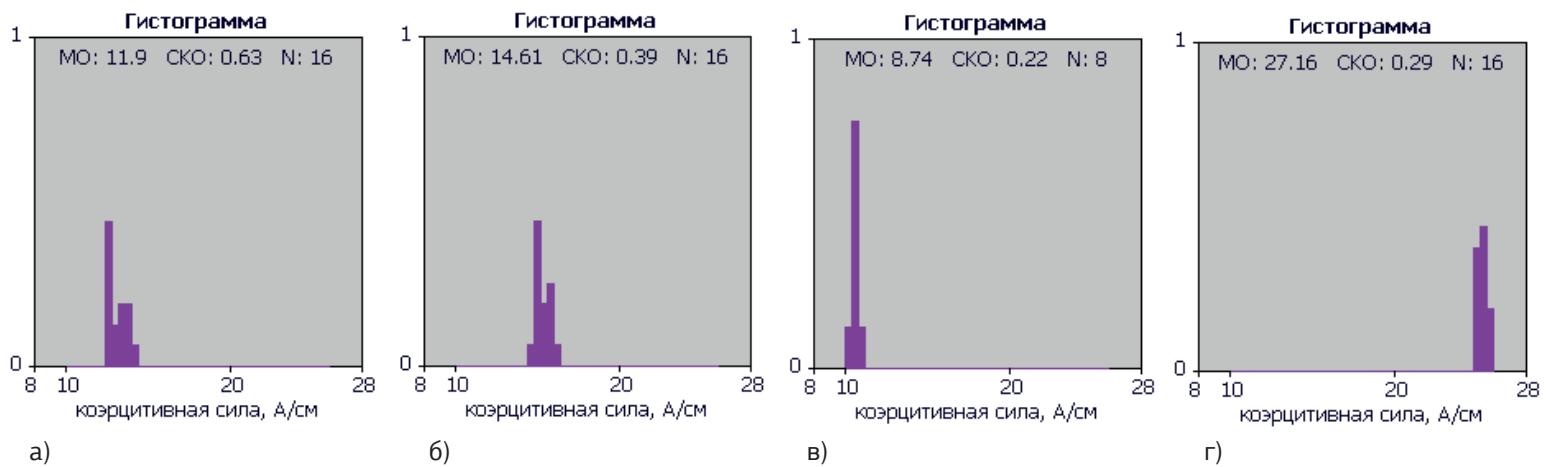


Рис. 3. Гистограммы коэрцитивной силы (A/cm), построенные по результатам измерений Нс основного металла диска образцов №1 и №2 (а, б) и №3 и №4 (в, г) до сварки (а, б) и металла шва после лазерной сварки (в, г), соответственно

выполнения, т.к. требует повышенной точности сборки под сварку (зазор до 0,1 мм при толщине свариваемой детали 5 мм). Следует также обратить внимание на наличие технологического непровара в горизонтальной плоскости свариваемого стыка (см. рис. 2).

Важным фактором является существенное различие макроструктуры основного металла свариваемых между собой деталей вала (трубы) и диска (фланца).

Макроструктура диска – грубозернистая, без следов нормализующей термической обработки, идентична литой структуре видманштеттового типа, беспорядочно (хаотически) организована с отсутствием четко выраженной фрагментации зёрен по форме и размерам, что делает затруднительным оценку ориентации кристаллитов относительно оси сварного шва.

Макроструктура вала, наоборот, отличается достаточно высокой однородностью, достигнутой в результате деформации и последующей термической обработки (улучшения, нормализации и др.).

Измерения Нс выполняли по поверхности диска и вала. Во время измерений Нс диска двухполюсной магнитный преобразователь располагали в диаметрально противоположных, произвольно выбранных направлениях: вдоль и поперёк, при измерениях Нс на валу – только вдоль, по направлению образующей цилиндрической поверхности. Результаты измерений представлены в Таблице 2.

Гистограммы, построенные по результатам измерений Нс образцов в исходном, до сварки, состоянии и после лазерной сварки представлены на рис. 3.

Из гистограмм на рис. 3 следует, что среднеквадратичное отклонение (СКО) измерений составляет 0,22 - 0,63, что говорит с 90% вероятностью о высокой достоверности полученных результатов при выполнении количестве измерений.

Анализ результатов измерений Нс до и после лазерной сварки показывает, что изменение значений Нс в элементах исследуемой конструкции весьма неоднозначно.

Различие значений Нс по поверхности вала до и после сварки составляет всего 4,4%. Это свидетельствует о том, что лазерная сварка практически не оказывает влияния на изменение Нс вала, а, значит, можно ожидать, что и сварочные напряжения в этом элементе конструкции минимальные или практически отсутствуют. Поскольку существует статистически значимая корреляция между размером зерна и коэрцитивной силой феррито-перлитных сталей [14], можно предположить, что однородная, термически обработанная структура вала в исходном перед сваркой состоянии способствовала такому незначительному изменению коэрцитивной силы в окколошовной зоне после лазерной сварки.

Различия значений Нс диска до и после сварки (по крайней мере, в окколошовной зоне) также невелики и составляют около 7,5%, несмотря на наличие исходной грубозернистой структуры металла диска. Это в очередной раз показывает, что зона термического влияния (ЗТВ) сварных соединений, выполненных лазерной сваркой, значительно менее развита (см. рис. 2) по сравнению с тем, что получается при традиционных способах дуговой сварки плавлением [1-4].

При анализе данных измерений значений Нс в сварном шве на диске также получены неоднозначные результаты. Прежде всего, это существенное отличие значений Нс непосредственно в сварном шве и в окколошовной зоне, где оказывается влияние основного металла. При визуальном осмотре образцов №1 и №2 после лазерной сварки, оказалось, что они имеют

круговые трещины, расположенные приблизительно по центру шва. Наличие трещин внутри сварного соединения подтверждено металлографическим микроструктурным анализом. На образцах №3 и №4 таких, видимых невооруженным глазом трещин, не обнаружено (рис. 4). Это позволило передать образцы №3 и №4 на стендовые испытания в условиях, приближённых к условиям эксплуатации, которые характеризуются сложным напряжённым состоянием.

По поводу такого неоднозначного изменения значений  $Hc$  в металле шва диска после лазерной сварки можно сказать следующее: известно, что в результате воздействия циклических нагрузок в сварных соединениях можно ожидать падение значений  $Hc$  по сравнению с исходными, полученными до испытаний [15]. Автор работы [15] объясняет это накоплением усталостных повреждений, возникающих в сварных соединениях при циклических нагрузках. При этом снижение значений  $Hc$  наблюдается во всех зонах сварного соединения: основном металле, ЗТВ и металле шва [15].

Снижение (по сравнению с исходным) значений  $Hc$  в металле шва после лазерной сварки можно объяснить, в том числе, возникновением видимых невооружённым глазом трещин в металле шва. Образование трещин, несомненно, сопровождается процессами релаксации напряжений, что и отражается снижением значений  $Hc$ .

Предполагается, что увеличение значений  $Hc$  формируется за счёт задержки необратимого смещения доменных границ, а также увеличения числа и объёмов локальных напряжённых областей, обусловленных краевыми и винтовыми дислокациями и другими дефектами кристаллического строения [14].

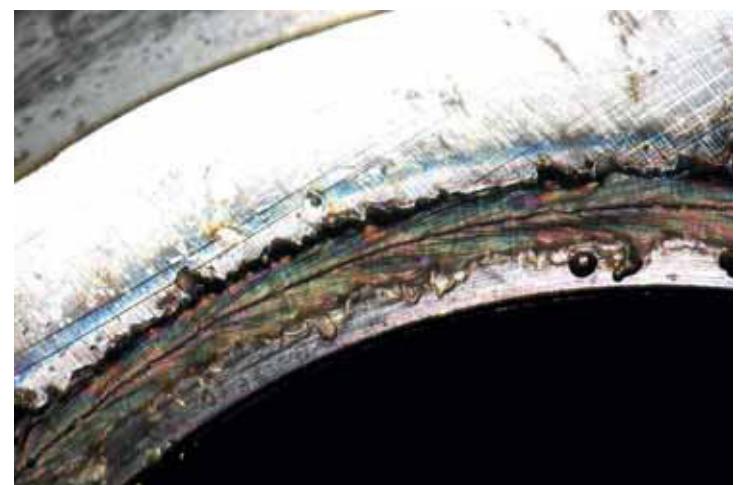
Увеличение средних значений  $Hc$  в диске с 8,8 А/см (до сварки) до 27,15 А/см (после сварки), полученное в настоящем исследовании, очевидно и характерно ещё и потому, что при лазерной сварке особенно больших значений достигают деформации сдвига [4].

Различия в средних исходных значениях  $Hc$  диска образцов №1 и №2 ( $Hc = 11,9$  А/см) по сравнению с образцами №3 и №4 ( $Hc = 14,6$  А/см) достаточно хорошо согласуются с данными, полученными в результате металлографических исследований (рис. 5).

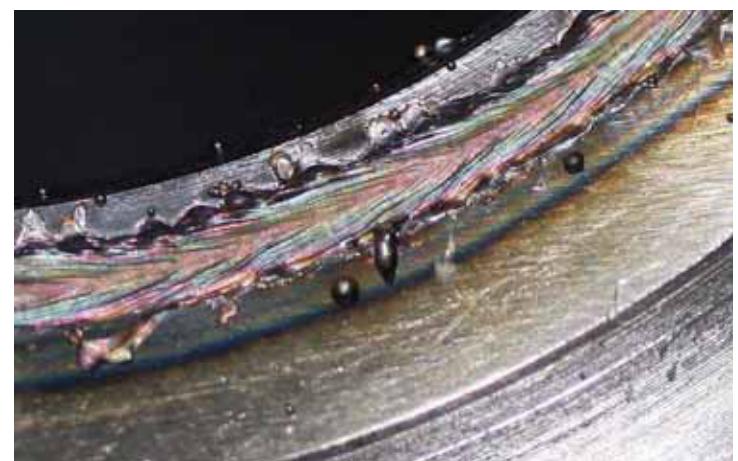
Микроструктура диска образцов №1 и №2 крупнозернистая, неупорядоченная, состоящая из зёрен перлита, окаймлённых (светлые участки) матричной ферритной сеткой (рис. 5а).

Микроструктура вала всех четырёх образцов мелкозернистая, с наличием неравноосной (игольчатой) структуры сорбитообразного типа (рис. 5б).

Микроструктура лазерного сварного шва наиболее мелкозернистая, представляет собой мелкоиголь-



а)



б)

Рис. 4. Внешний вид сварных швов образца №1 (а) и образца №4 (б) после лазерной сварки

чатый мартенсит, являющийся типичной закалочной структурой, образующейся при ускоренном охлаждении сталей с повышенным содержанием углерода (рис. 5в).

Микроструктура диска образцов №3 и №4 вблизи линии сплавления (рис. 5г) заметно отличается от микроструктуры образцов №1 и №2 (рис. 5а) в положительную сторону, так как в соответствии с известным соотношением Петча-Холла-Лоу мелкозернистая структура металла обеспечивает наиболее благоприятное сочетание его прочностных и вязкопластических механических свойств [14].

Различия в средних значениях  $Hc$  сварного шва диска образцов №1 и №2 ( $Hc = 8,74$  А/см) по сравнению с образцами №3 и №4 ( $Hc = 27,16$  А/см) после лазерной сварки также хорошо согласуются с результатами металлографических исследований (рис. 5) и

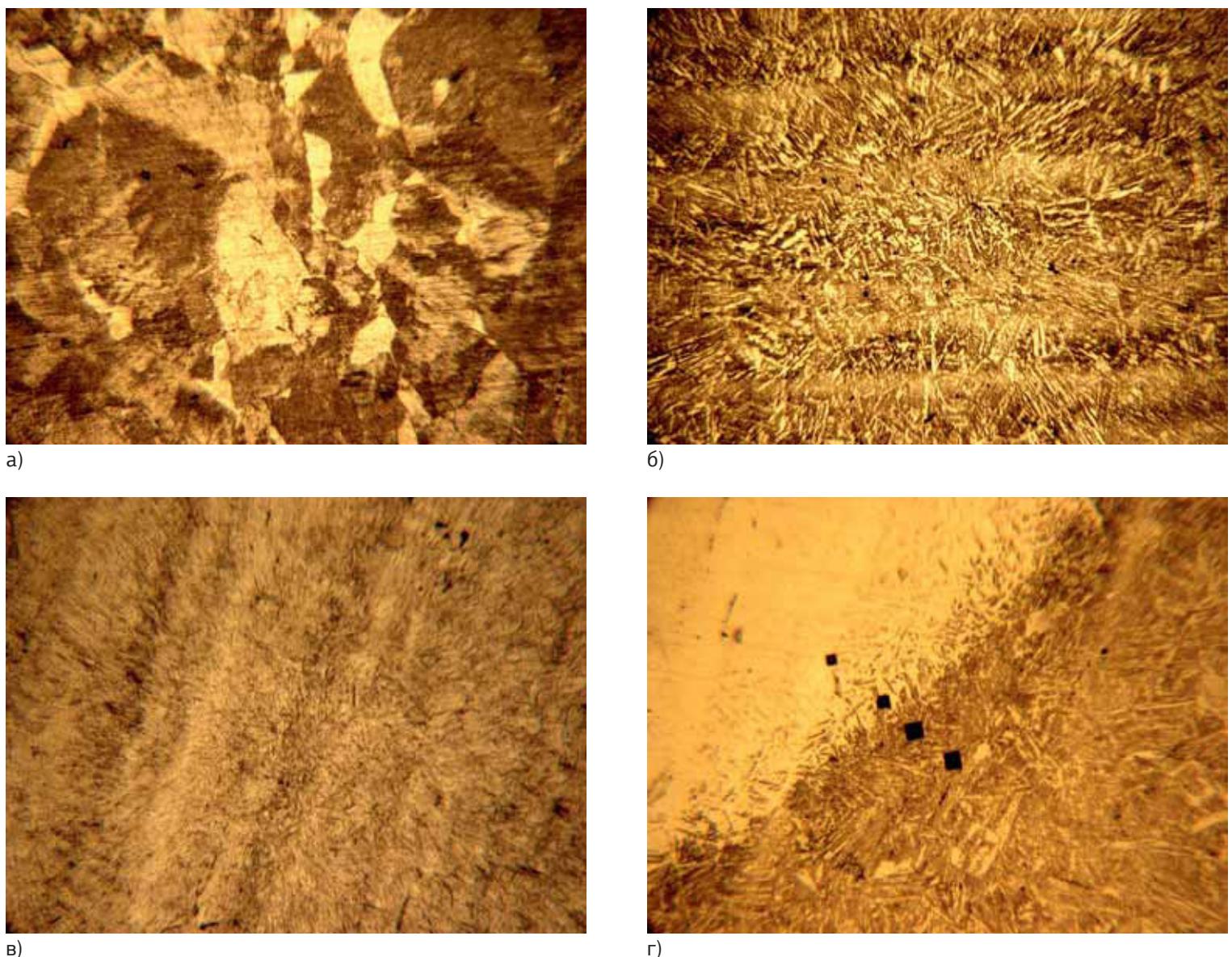


Рис. 5. Типичная микроструктура основного металла диска (а) и вала (б) образцов №1 и №2, лазерного сварного шва (в), а также околошовной зоны вблизи линии сплавления вал - шов образцов №3 и №4 с отпечатками пирамиды индентора прибора ПМТ-3 (г), (Х100)

данными по оценке макронеоднородности сварного соединения методом микротвёрдости, выполненно-го по широко известной методике с использованием прибора ПМТ-3 [16].

Основной причиной возникновения трещин в сварном соединении при лазерной сварке трудно сва-риваемой стали марки 40ХН2МА с грубозернистой ис-ходной структурой можно считать затруднённые усло-вия дегазации сварочной ванны в соединениях дан-ного типа (без сквозного проплавления), использова-ние металла диска с низкой степенью рафинирования по содержанию неметаллических включений, газов и вредных примесей и др.

Таким образом, применяя метод измерения зна-чений Нс в сварных соединениях до и после сварки,

можно оценить показатели качества процесса лазерной сварки. Поскольку контроль качества данного сварного соединения (рис. 2) неразрушающими методами (УЗД и рентгенографическим и др.) по выявлению дефектов типа трещин и несплавлений весьма затруднён из-за конструктивных особенностей данного сварного со-единения, высокой трудоёмкости и низкой достовер-ности, рассматриваемый метод коэрцитивной силы предста-вляется по сравнению с указанными наиболее целесообразным и перспективным.

Однако многое остаётся неясным. В частности, ввиду отсутствия достоверных тарировочных графиков для стали 40ХН2МА, учитывающих сложные схемы на-гружения подобных изделий при эксплуатации, пока не предста-вляется возможным с высокой степенью веро-

ятности определить уровень напряжений в изделии по данным измерений значений Нс его элементов.

Поэтому представляется необходимым проведение в дальнейшем комплекса стандартных и специальных испытаний натурных образцов при сложном напряжённом состоянии, в том числе на кручение, а также ресурсных испытаний макетных образцов.

## **Выводы:**

1. Впервые в отечественной практике выполнена оценка напряжённого состояния и качества лазерных сварных соединений из стали 40ХН2МА методом коэрцитивной силы. Оценка качества сварных соединений подобного типа представляет определённую сложность для существующих методов неразрушающего контроля. Установлено, что данный метод НК является целесообразным и перспективным, в том числе, при выявлении дефектов типа трещин, несплавлений и др.
2. Для получения лазерной сваркой равнопрочных сварных соединений, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства по долговечности и функциональной надёжности изделия, необходимо строго следить за соблюдением требований к качеству металлопроката, исключающих использование металла с грубозернистой структурой. При использовании заготовок диска с мелкозернистой структурой, а также соблюдении требований при выполнении заготовительных операций и режимов сварки, получены сварные швы достаточно высокого качества, лишённые указанных ранее дефектов.
3. Необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на установление достоверных зависимостей между значениями Нс и изменением напряжённого состояния лазерных сварных соединений подобного типа с построением тарировочных графиков для конкретных марок сталей, учитывающих сложные схемы нагружения в условиях эксплуатации, а также проведение ресурсных испытаний.

## **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Игнатов А.Г., Суздалев И.В. Состояние и перспективы применения лазерного технологического оборудования // Судостроительная промышленность. Серия: СВАРКА.-1989, вып.7 – С.3-18.
2. Игнатов А.Г., Криворотов В.И., Миргородский В.А. Лазерные сварные соединения из коррозионно-стойких сталей. / «Фотоника», №2(20), 2010, с. 18-21.
3. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения – М.: Мир.-1974. – 468 с.
4. Технологические основы обеспечения качества машин. Под ред. К.С. Колесникова. М.: «Машиностроение».- 1990. -254 с.
5. Богачёва Н.Д. Расширение возможности применения метода коэрцитивной силы. Ж. «В мире неразрушающего контроля». №2(28), июль, 2005, с.8-10.
6. Попов Б.Е., Безлюдько Г.Я., Ёлкина Е.И., Соломаха Р.Н. Контроль усталости металла коэрцитиметрическим методом как объективная первооснова диагностики оборудования и конструкций. Ж. «В мире неразрушающего контроля». №2(44), июнь, 2009, с.26-29.
7. ГОСТ 30415-96 «Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом».
8. РД ИКЦ "КРАН"- 007-97/02. «Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследования и техническом диагностировании (экспертизе промышленной безопасности)».
9. РД ИКЦ "КРАН" 009-99. "Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением, при проведении экспертизы промышленной безопасности".
10. РД – 12-411-01. Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов. – СПб.: Издательство ДЕЛАН, 2002.- 96 с.
11. Копельман Л.А. Основы теории прочности сварных конструкций. – СПб.: Издательство «Лань», 2010.- 464 с.
12. Марочник сталей и сплавов.- М.:Машиностроение.-1989 г.- 640 с.
13. Богачёва Н.Д. Применение размагничивания в технике. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. СПб, 2010. - 264 с.
14. Бида Г.В. Размер зерна и корреляция прочностных, пластических и вязких свойств с коэрцитивной силой ферритно-перлитных сталей. – «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», 2010, №4, с.40-45.
15. Прохоров А.В. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) уровня накопленных усталостных повреждений при циклических нагрузках в сварных соединениях сталей 09Г2С и ВСт3сп5. – Уфимский государственный нефтяной технический университет. Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал.
16. Глазов В.М., Вигдорович В.Н. Микротвёрдость металлов и полупроводников. М., «Металлургия», 1969.