

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ СВАРКЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТОАНИЗОТРОПНОГО И РЕНТГЕНОДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

© 2021 г. В.Е. Никулин^{1,*}, С.Г. Паршин^{1,**}, А.М. Левченко^{2,***}

¹ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Россия 195251
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

²ООО «УНТЦ Сварка» Национального Агентства Контроля Сварки, Россия 194292, Санкт-Петербург,
3-й Верхний переулок, 1, корп. 3, лит. С

E-mail: * v.e.nikulin@ya.ru; ** parshin@spbstu.ru; *** info@rszmas.ru

Поступила в редакцию 06.05.2021; после доработки 01.06.2021

Принята к публикации 18.06.2021

Рассмотрена возможность оценки остаточных сварочных напряжений с помощью магнитоанізотропного и рентгенодифрактометрического методов. С помощью метода магнитной анизотропии обнаружена степень неоднородности остаточных напряжений в образцах с наплавкой, выполненных порошковой проволокой и покрытым электродом на воздухе и под водой. Применение двух методов неразрушающего контроля позволили определить и сравнить величины остаточных сварочных напряжений.

Ключевые слова: мокрая подводная сварка, сварочные напряжения, напряженно-деформированное состояние, магнитоанізотропный метод, метод рентгеновской дифракции.

DOI: 10.31857/S0130308221080042

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий подводной мокрой сварки морских конструкций из низколегированных сталей связано с решением проблемы мониторинга остаточных сварочных напряжений для достижения оптимального напряженно-деформированного состояния (НДС) сварных соединений. Особенно важным является контроль НДС после подводной мокрой сварки высокопрочных сталей из-за риска появления холодных трещин, развития дефектов, коррозионных процессов и деформаций. Уровень механических напряжений определяется технологией подводной сварки и зависит от погонной энергии, состояния микроструктуры, рабочих нагрузок и коррозионных процессов [1—4]. Градиент температур, быстрые скорости охлаждения и развитие микроструктурной неоднородности оказывают влияние на рост остаточных сварочных напряжений [5—8].

Из-за высоких скоростей охлаждения при подводной мокрой сварке вдоль сварного соединения образуются высокие растягивающие напряжения, близкие к пределу текучести материала. Появление дефектов при подводной сварке дополнительно снижает надежность и ресурс эксплуатации сварных металлоконструкций [9]. Уменьшение остаточных сварочных напряжений и контроль НДС сварных конструкций позволяют предупредить разрушение морских конструкций, увеличить их надежность и ресурс эксплуатации.

Подводная сварка широко применяется в мире [10—14] при монтаже и ремонте трубопроводов, нефтегазодобывающих платформ, надводных и подводных кораблей, грузовых портов, причалов и прибрежных защитных сооружений. Развитие подводных технологий, освоение арктического и каспийского шельфа связано с широким применением морских конструкций из высокопрочных сталей, что обуславливает актуальность исследований в области подводной сварки, разработке сварочного оборудования и материалов [9, 15].

Для снижения остаточных напряжений применяются оптимизация термического цикла сварки путем изменения химического состава присадочного материала и использования термообработки. Таким образом можно управлять процессом распада аустенита и образованием мартенсита для релаксации растягивающих напряжений [16]. Применение термообработки приводит к снижению содержания водорода в сварном шве на 35 % от исходного значения, к снижению твердости шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Положительный эффект могут оказать также электромагнитное перемешивание сварочной ванны [17], низкочастотная виброобработка [18—20], проковка валиков [21].

Для контроля НДС применяются разрушающие и неразрушающие методы [22, 23]. Разрушающие методы основаны на разрезании, травлении, высверливании, электроэрозионной обработке.

Основной принцип заключается в «высвобождении» остаточных напряжений и измерении величины деформации с помощью тензометрических датчиков и оптических систем. В мировой практике широко применяется метод сверления глухих отверстий с использованием тензорезистивных датчиков, согласно ASTM E837-13a и ГОСТ 21616—91.

Среди неразрушающих способов контроля НДС широкое применение находит метод рентгеновской дифракции (XRD — X-Ray diffraction) (BS EN 15305:2008, ASTM E2860-12). Метод не требует калибровки под конкретный материал, однако требуется наличие эталона нулевого напряжения, согласно стандартам E915—16 и DIN EN 15305-2009. Метод XRD предъявляет строгие требования к подготовке поверхности контроля, а глубина проникновения рентгеновских лучей составляет менее 0,03 мм [23]. Применение XRD позволяет оценить степень деформации кристаллической решетки по смещению дифракционных пиков и их ширине дифракционных пиков, что имеет прямую связь с остаточными напряжениями первого и второго рода.

К магнитным методам контроля НДС относят измерение коэрцитивной силы путем намагничивания материала, определение магнитной анизотропии — магнитоанизотропный метод [24] и метод измерения шумов Баркгаузена [25]. В условиях упругого нагружения металлоконструкции точность корреляции НДС с измеряемой величиной коэрцитивной силы зависит от наличия остаточных пластических деформаций [26, 27].

Магнитоанизотропный метод (ММА) основан на принципе измерения ЭДС, наводимой в измерительных катушках датчика слабым переменным магнитным полем [24]. Разработки оборудования, использующие подобный тип преобразователей для определения напряженного состояния, ведутся также и за рубежом [28—31]. ММА требует наличия калибровки под конкретную марку стали. На характер калибровочной зависимости могут оказывать влияние наличие пластической деформации, остаточная намагниченность, фазовый состав и структура материала. К преимуществам данного метода можно отнести глубину проникновения сигнала до нескольких миллиметров, а также высокую точность корреляции с заданным уровнем механических напряжений при упругой деформации [32].

В ГОСТ Р 52891 представлен интерферометрический метод контроля, основанный на оптической регистрации нормальных перемещений кромок засверленного глухого отверстия [33]. Основными преимуществами данной измерительной системы является отсутствие калибровки и низкая стоимость в сравнении с применением тензорезистивных датчиков.

Использование различных аппаратных средств измерения механических напряжений затрудняется из-за отсутствия метрологического обеспечения [34]. Оценка остаточных сварочных напряжений при подводной сварке сталей осуществляется на основе моделирования тепловых полей, что требует валидации и экспериментального подтверждения моделей [35]. Это обуславливает актуальность настоящего исследования.

Целью исследования являлось экспериментальное определение остаточных сварочных напряжений при подводной мокрой наплавке покрытыми электродами и порошковой проволокой.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения остаточных сварочных напряжений при подводной сварке использовали образцы 300×200×12 мм из судостроительной стали повышенной прочности D32 по ГОСТ Р 52927—2015, с модулем упругости $E = 200\ 000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,29$ (табл. 1, 2).

Таблица 1

Химический состав стали PC D32, %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
0,09	0,22	0,95	0,005	0,013	0,05	0,03
As	N	Al	Mo	Nb	V	Cu
0,003	0,005	0,037	0,005	0,025	0,029	0,06

Для наплавки на воздухе и под водой использовали покрытые электроды для ручной подводной мокрой сварки Э38-ЛКИ-1П-3,0-УД (ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург) и самозащитную порошковую проволоку ППС-АПЛ2 (ООО «УНТЦ Сварка», г. Санкт-Петербург) для автома-

Таблица 2

Физико-механические свойства стали D32

Предел прочности σ_b , не менее, МПа	Предел текучести σ_r , не менее, МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость при $t = 20$ °С, Дж/см ²
490	400	30	169

Таблица 3

Режимы сварки при наплавке на воздухе и под водой

Способ наплавки	Сила тока I , А	Напряжение U , В	Мощность дуги P , Вт	Скорость сварки v , м/мин	Погонная энергия дуги Q , кДж/мм
Порошковая проволока на воздухе	188	32	6016	0,235	1,23
Порошковая проволока под водой	198	32	6336	0,229	1,32
Покрытый электрод на воздухе	147	27	3969	0,186	1,07
Покрытый электрод под водой	141	28	3948	0,186	0,99

тической сварки. Источником тока являлся сварочный аппарат «Сварог MIG 3500» (ООО «ИНСВАРКОМ», г. Санкт-Петербург) с режимами наплавки (табл. 3).

Для контроля остаточных напряжений применялись магнитоанизотропный и рентгенодифрактометрический методы. Для МAM использовали прибор «Stressvision LAB» (ООО «Феррологика», г. Санкт-Петербург). Для XRD был применен прибор «HePKA» (ООО «РаДиаТех», г. Гатчина). Характеристики приборов указаны в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика приборов «Stressvision LAB» и «HePKA»

Характеристика	Stressvision LAB	HePKA
Минимальная площадь контроля	$\approx \varnothing 20$ мм	2×2 мм
Глубина контроля	до 3 мм	до 10 мкм
Вывод результатов измерений	Графический	Численный
Точность измерений	± 10 у.е. (по результатам стендовых испытаний для стали PC D32)	± 25 МПа
Скорость измерения	1 с	Не менее 30 с
Особенность измерительной системы	4-полюсной магнитоанизотропный преобразователь с крестообразным магнитопроводом	Двухлучевой способ определения смещения углов дифракции в плоскости α -Fe (211)
	Обмотка на одном плече отвечает за намагничивание, на другом с поворотом на 90° — измерительная обмотка	Максимальный диапазон определения брэгговских углов $2\theta = 148$ — $158,5^\circ$ 2 хромовых анода под углами 90 и 52° к поверхности образца

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вид образцов после наплавки на воздухе и под водой показан на рис. 1.

При расчете погонной энергии сварочной дуги под водой КПД принималось равным 0,8 [36]. Расчет погонной энергии сварочной дуги в процессе сварки проводился по формуле:

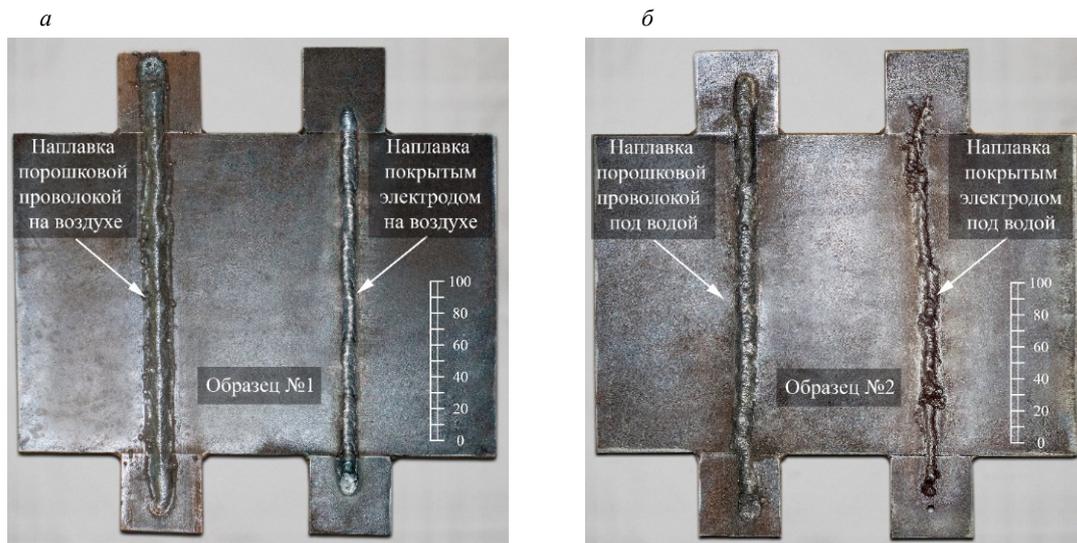


Рис. 1. Образцы № 1 и № 2 с наплавкой на воздухе (а) и под водой (б).

$$Q = \eta IU / v = \eta P / v, \quad (1)$$

где I — сила тока, А; U — напряжение, В; P — мощность дуги, Вт; v — скорость сварки мм/мин. На рис. 2 представлен график распределения погонной энергии при дуговой наплавке по длине шва $L = 200$ мм.

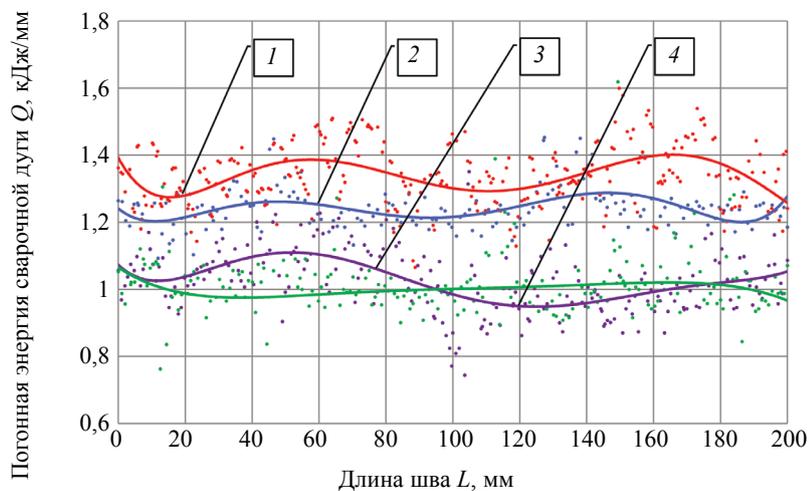


Рис. 2. Распределение погонной энергии Q при наплавке по длине шва:
1 — наплавка порошковой проволокой на воздухе; 2 — наплавка порошковой проволокой под водой; 3 — наплавка покрытым электродом на воздухе; 4 — наплавка покрытым электродом под водой.

Процесс сварки покрытым электродом под водой проходил нестабильно, что ухудшило формирование и плотность наплавленного металла. Наплавка порошковой проволокой имела высокую стабильность с небольшим образованием пор под водой, но на воздухе образование пор шло более интенсивно. Макрошлифы представлены на рис. 3.

После наплавки был проведен рентгенографический контроль образцов с применением цифрового плоскопанельного детектора с использованием аппаратно-программного комплекса «БЕРКУТ» (ООО «РаДиaТех», г. Гатчина). Результаты рентгеновского контроля представлены на рис. 4.

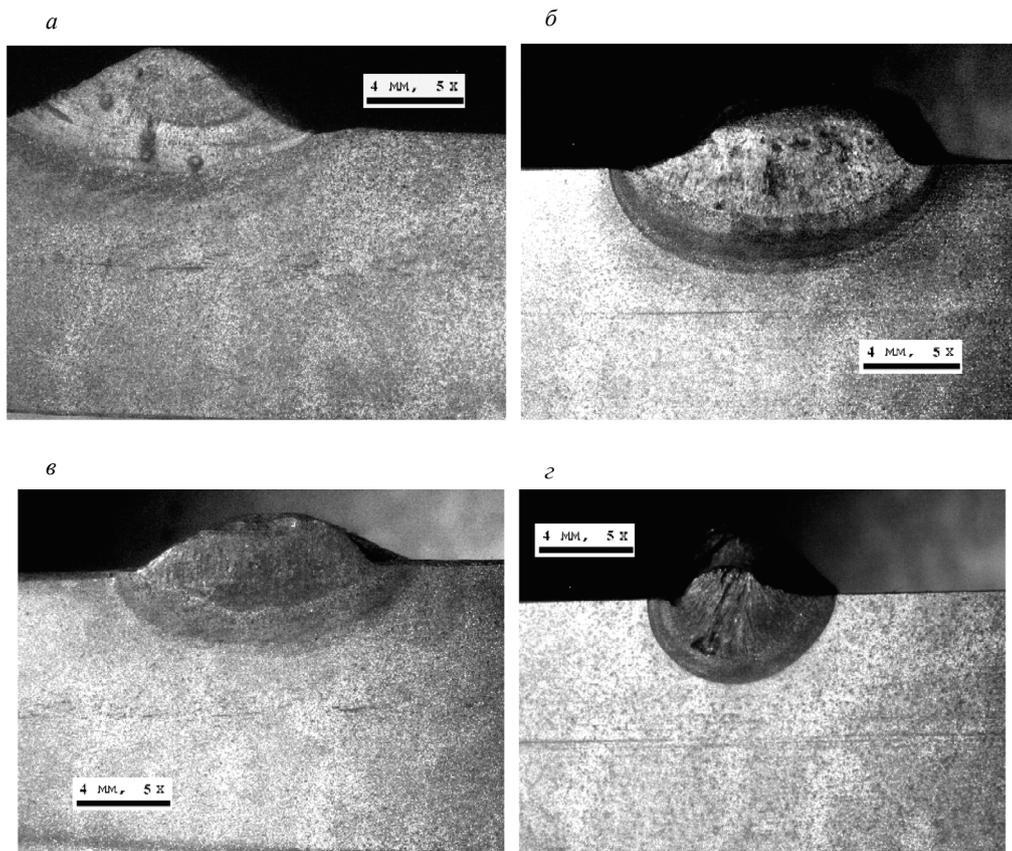


Рис. 3. Макрошлифы для образцов с наплавкой:
a — покрытым электродом на воздухе; *б* — покрытым электродом под водой; *в* — порошковой проволокой на воздухе; *г* — порошковой проволокой под водой.

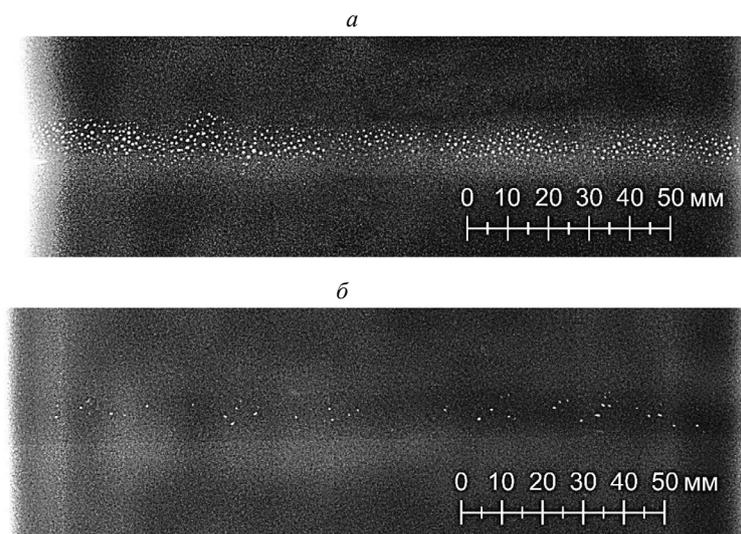


Рис. 4. Рентгенограммы для наплавки, полученной порошковой проволокой:
a — на воздухе; *б* — под водой.

Измерение остаточных напряжений с помощью МАМ

Для прибора Stressvision LAB была получена калибровочная зависимость при испытании на растяжение образца из стали PC D32 из того же листа металлопроката, что и образцы с наплавкой

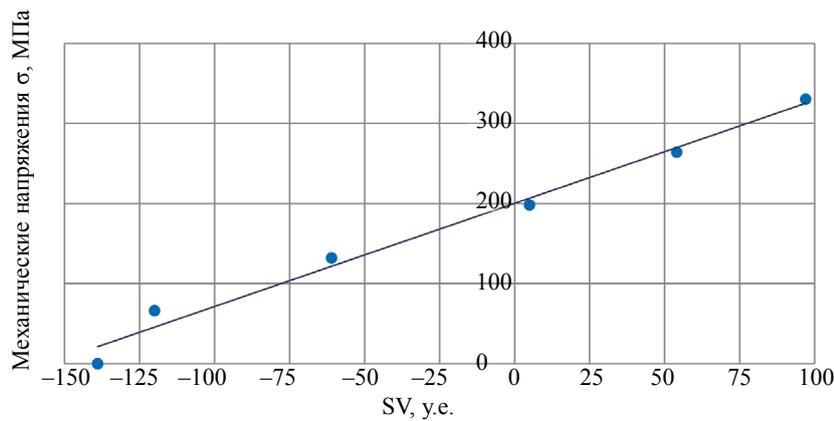


Рис. 5. Калибровочная зависимость для «Stressvision LAB» при растяжении образца из стали PC D32.

№ 1 и № 2. Результатом калибровки является зависимость величины заданных механических напряжений от показаний прибора в условных единицах (рис. 5).

По результатам испытаний на упругое растяжение была получена зависимость для конвертации результатов измерений прибором «Stressvision LAB» из условных единиц в механические напряжения МПа для одноосного напряженного состояния:

$$\sigma = 1,287 \cdot SV + 200, \quad (2)$$

где SV — результат измерений прибором «Stressvision LAB» в у.е.

Результатом контроля, полученного с помощью «Stressvision LAB», являются картограммы распределения разности нормальных напряжений, действующих на поверхности образцов. Позиционирование магнитоанизотропного преобразователя осуществляется по узлам координатной сетки вдоль оси сварного шва. Для построения координатной сетки использовали шаг 20 мм при отступе от края шва 20 мм. Общее количество узлов контроля для образцов с наплавкой составило 117 (рис. 6).

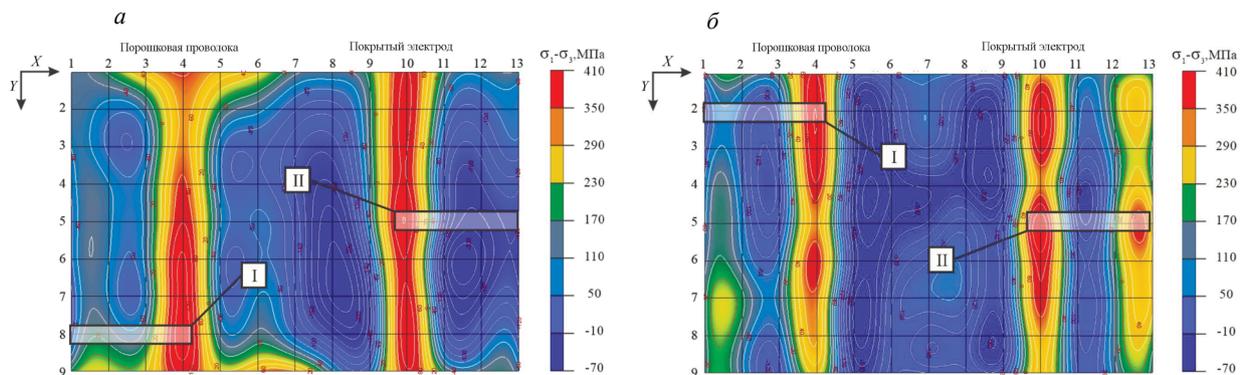


Рис. 6. Картограммы распределения остаточных напряжений для образцов с наплавкой на воздухе (а); под водой (б).

Обнаружено, что наиболее однородным с точки зрения распределения остаточных напряжений по всей длине шва является бездефектная наплавка, полученная с помощью покрытого электрода на воздухе. В то же время, наибольшие напряжения выявлены в наплавке покрытым электродом под водой, в зоне обрыва сварочной дуги.

По результатам контроля остаточных напряжений для каждой из наплавки выявлено расположение наиболее высоких значений механических напряжений. Величина напряжений и их расположение в данных точках представлено в табл. 5. Последующее применение рентгеновской дифракции проводилось в этих точках и прилегающих областях, отмеченных римскими цифрами I и II рис. 6.

Таблица 5

Максимальные остаточные напряжения, выявленные МАМ

Величина разности напряжений	Порошковая проволока на воздухе	Порошковая проволока под водой	Покрытый электрод на воздухе	Покрытый электрод под водой
$\sigma_1 - \sigma_3$, МПа	370	353	352	376
Расположение в координатах X;Y	4;8	4;2	10;5	10;5

Измерение остаточных напряжений с помощью рентгеновской дифракции

Измерение межплоскостного расстояния лежит в основе применения XRD для определения остаточных напряжений. При работе с прибором «НеРКА» использование хромовых анодов позволяет определять положение и смещение дифракционных пиков, полученных при отражении рентгеновского излучения от плоскости поверхности (211) для α -Fe. Дифракция от упругого рассеяния рентгеновского излучения на кристалле описывается законом Брэгга—Вульфа:

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda, \quad (3)$$

где d_{hkl} — межплоскостное расстояние, Å; θ — брэгговский угол; n — порядок дифракционного максимума, $n = 1$; λ — длина волны, для хромового анода $\lambda_{CrK\alpha} = 2,2897$ Å.

Для плосконапряженного состояния в условиях упругой деформации сферического элемента объема изотропного тела, его удлинение $\varepsilon_{\psi,\varphi}$ в любом направлении удобно описать уравнением для эллипсоида деформации:

$$\varepsilon_{\psi,\varphi} = \varepsilon_1 \sin^2 \psi \cos^2 \varphi + \varepsilon_2 \sin^2 \psi \sin^2 \varphi + \varepsilon_3 \cos^2 \psi, \quad (4)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ — главные удлинения (рис. 7).

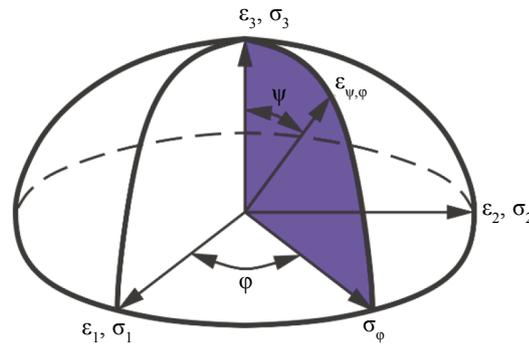


Рис. 7. Эллипсоид деформации и напряжений.

Главные удлинения $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ связаны с главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ через закон Гука следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = (1/E)(\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)) \\ \varepsilon_2 = (1/E)(\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)) \\ \varepsilon_3 = (1/E)(\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)) \end{cases} \quad (5)$$

Подставив значения $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ из уравнения (5) в выражение (4), получим:

$$\varepsilon_{\psi,\varphi} = \frac{1-\nu}{E} (\sigma_1 (\sin \psi \cos \varphi)^2 + \sigma_2 (\sin \psi \sin \varphi)^2 + \sigma_3 \cos^2 \psi) - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (6)$$

При рассмотрении влияния рентгеновского излучения на глубину его проникновения, составляющую несколько микрометров, можно считать главное напряжение $\sigma_3 \approx 0$, однако $\varepsilon_3 \neq 0$.

Величина деформаций ε_3 определяется так же, как и в случае линейного напряженного состояния через относительное изменение межплоскостных расстояний для плоскостей, почти параллельных поверхности образца:

$$\varepsilon_3 = \frac{(d_{\perp} - d_0)}{d_0} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2), \quad (7)$$

где d_{\perp} — межплоскостное расстояние при перпендикулярном излучении к плоскости кристалла, Å; d_0 — межплоскостное расстояние для недеформированного и свободного от остаточных напряжений кристалла, Å.

Определение величины отдельных компонент нормальных напряжений с помощью «НеРКА» осуществляется при одновременном использовании съемки под углами $\psi_1 = 0^\circ$ и $\psi_2 = 38^\circ$.

Для плосконапряженного состояния при $\sigma_3 \approx 0$ из (6) следует, что

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} = \frac{1-\nu}{E}(\sigma_1(\sin \psi \cos \varphi)^2 + \sigma_2(\sin \psi \sin \varphi)^2) - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2). \quad (8)$$

Определим разность деформаций:

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3 = \frac{(1-\nu)\sin^2 \psi}{E}(\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi). \quad (9)$$

Выражение $\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi$ есть напряжение σ_{φ} в направлении φ при $\psi = 90^\circ$, действующее в плоскости образца.

Преобразовав (9), получим:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\nu)\sin^2 \psi}(\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3). \quad (10)$$

Если обозначить $d_{\psi, \varphi}$ как межплоскостное расстояние для той же плоскости, что и d_0 , d_{\perp} , то получим:

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3 = \frac{d_{\psi, \varphi} - d_0}{d_0} - \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0} = \frac{d_{\psi, \varphi} - d_{\perp}}{d_0}. \quad (11)$$

С достаточной степенью приближения можно считать, что

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3 = \frac{d_{\psi, \varphi} - d_{\perp}}{d_{\perp}}. \quad (12)$$

Из этого выражения следует:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\nu)\sin^2 \psi} \frac{d_{\psi, \varphi} - d_{\perp}}{d_{\perp}}. \quad (13)$$

При изменении межплоскостного расстояния для плоскостей hkl на величину $\Delta d = d_{\psi, \varphi} - d_{\perp}$ происходит смещение линии hkl на угол $\Delta \theta = \theta_{\psi, \varphi} - \theta_0$, где индекс 0 относится к свободному от макронапряжений материалу. Дифференцируя выражение Вульфа—Брэгга (3):

$$\Delta d \sin \theta_0 + d_0 \cos \theta_0 \Delta \theta = 0. \quad (14)$$

Из (14) следует, что

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3 = \frac{\Delta d}{d_{\perp}} = -\operatorname{ctg} \theta_0 (\theta_{\psi, \varphi} - \theta_0) = \operatorname{ctg} \theta_0 (\theta_0 - \theta_{\psi, \varphi}). \quad (15)$$

При известном угле φ или при известном направлении действия главных напряжений при $\varphi = 0$ для съемки двулучевым способом можно определить отдельные компоненты нормальных напряжений σ_1 и σ_2 по смещению угла θ , опираясь на (15):

$$\sigma_{\varphi=0} = \frac{E \operatorname{ctg} \theta_0 (\theta_0 - \theta_{\psi, \varphi})}{(1 + \nu) \sin^2 \psi}. \quad (16)$$

В качестве калибровки измерительной системы для «НеРКА» проводят анализ расположения дифракционных пиков на порошке карбонильного железа, предполагая отсутствие в данном материале остаточных напряжений. Пример дифракционных пиков для порошка карбонильного железа представлен на рис. 8.

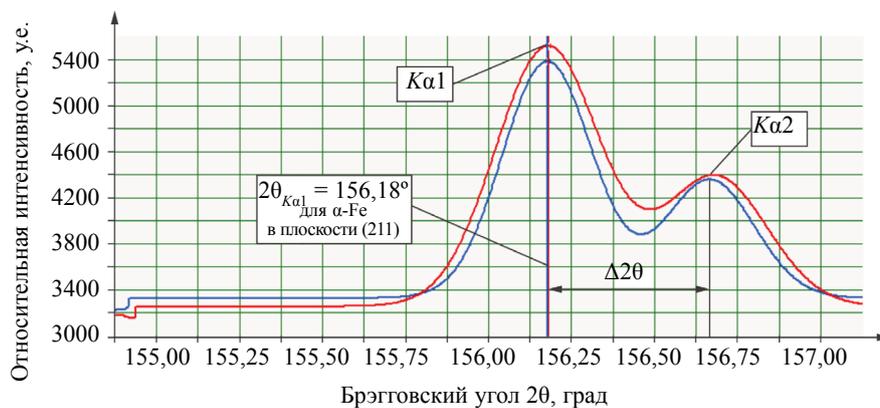


Рис. 8. Дифракционные спектры для порошка карбонильного железа.

Дифракционные пики, представленные на рис. 8 синим цветом, получены от пучка рентгеновского излучения, падающего под углом 90° к поверхности образца $\psi_1 = 0^\circ$. Красным цветом получен спектр от пучка рентгеновского излучения, падающего под углом 52° к поверхности образца $\psi_2 = 38^\circ$. На спектрах отчетливо видны вклады от $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$ -переходов, $2\theta_1 = 156,18^\circ$ и междупиковое расстояние для данного угла дифракции составило $\Delta 2\theta = 0,94^\circ$, что соответствует расположению дифракционных пиков для плоскости (211) α -Fe, согласно базе порошковых дифракционных стандартов COD (crystallography open data base), PDF-2 (Powder Diffraction File).

Разделение сигнала на 2 энергетических перехода характеризует наличие механической однородности для остаточных напряжений второго рода и отсутствие микрповреждений кристаллической решетки. Совпадение дифракционных пиков, полученных при падении на плоскость кристалла рентгеновского излучения под двумя различными углами, свидетельствует о нулевых остаточных напряжениях первого рода и отсутствии деформаций кристаллической решетки.

Определение остаточных сварочных напряжений на образцах № 1 и № 2 с помощью рентгеновского дифрактометра проводилось после шлифовки и электрохимического травления поверхности сварного соединения и основного металла в областях, указанных на рис. 6. Электрохимическое травление поверхности образцов проводилось в 10 % растворе NaCl в течение 3 мин при 12 В и 3,5 А.

Время экспозиции на одно измерение составило 90 с. Измерения проводились в двух направлениях: вдоль шва и поперек шва, что позволило определить продольные σ_1 и поперечные σ_3 остаточные сварочные напряжения и остаточные напряжения в основном металле. Предполагается, что измерения дифрактометром продольных и поперечных сварочных напряжений соответствуют измерениям нормальных напряжений в направлении угла $\varphi = 0^\circ$. При этом рентгеновское излучение падает на плоскость поликристалла под углами $\psi_1 = 0^\circ$ и $\psi_2 = 38^\circ$ к нормали. На рис. 9, 10 показаны дифракционные пики для продольных напряжений в сварных швах.

Результаты анализа остаточных сварочных напряжений XRD методом в выбранных областях (см. рис. 6) представлены на графиках (рис. 11).

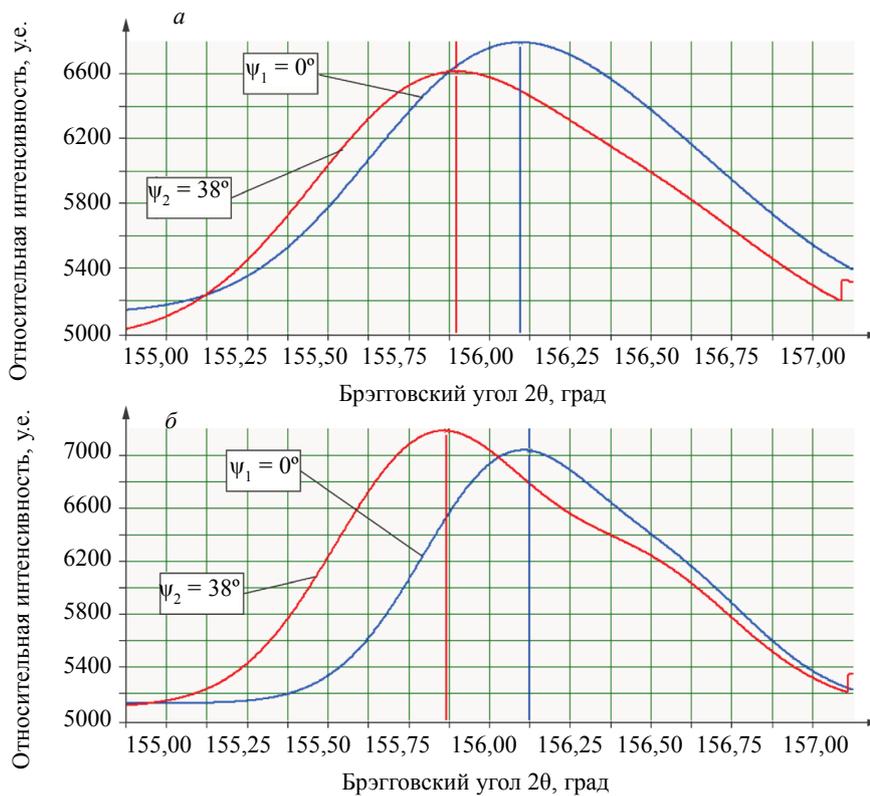


Рис. 9. Дифракционные пики на поверхности вдоль шва при наплавке порошковой проволокой на воздухе (а); под водой (б).

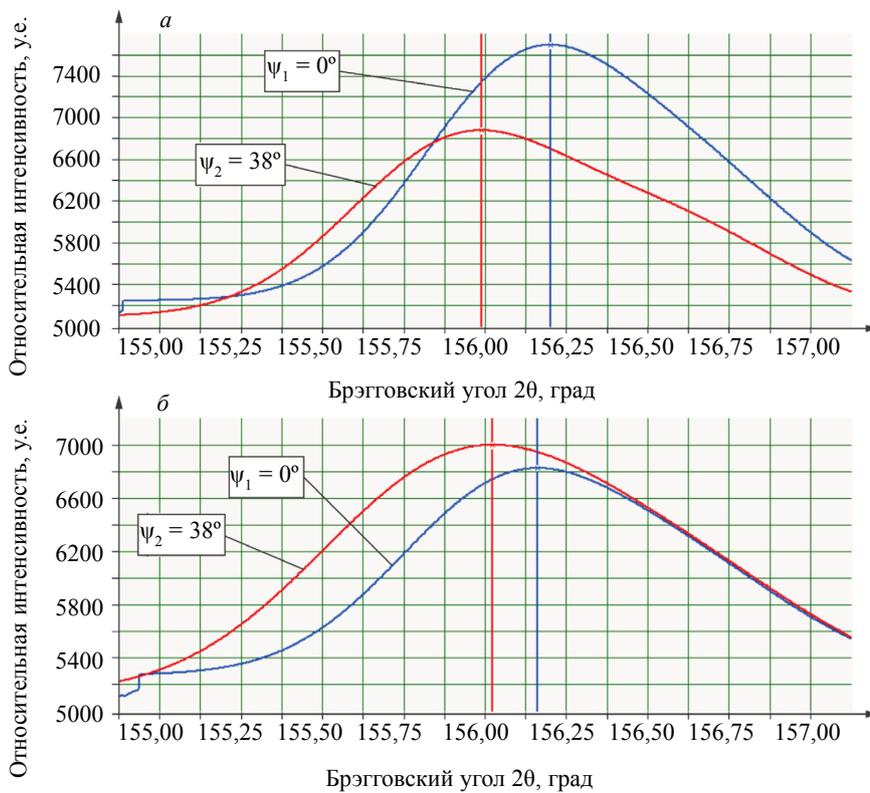


Рис. 10. Дифракционные пики на поверхности вдоль шва при наплавке покрытым электродом на воздухе (а); под водой (б).

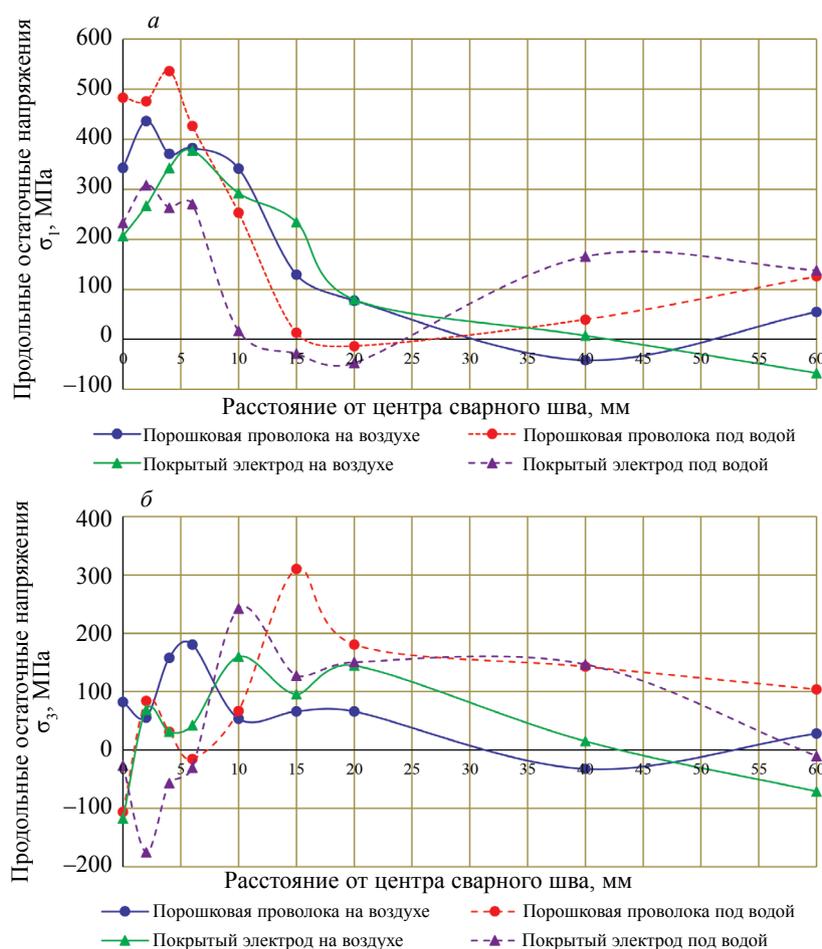


Рис. 11. Результат определения остаточных напряжений методом рентгеновской дифракции: продольные напряжения (а); поперечные напряжения (б).

На рис. 12 представлены сопоставительные результаты между МАМ и методом XRD по параметрам разности между продольными и поперечными механическими напряжениями.

Взаимосвязь между средней погонной энергией сварочной дуги и максимальной величиной остаточных продольных напряжений представлена на рис. 13.

ВЫВОДЫ

1. Подводная мокрая сварка низколегированной стали сопровождается появлением значительных остаточных сварочных напряжений, что увеличивает вероятность появления холодных трещин и может снижать работоспособность и надежность подводных сварных конструкций. Величина и распределение напряжений в продольном и поперечном направлении зависят от погонной энергии и фазовых превращений при высоких скоростях охлаждения и градиентов температур.

2. В целях снижения остаточных сварочных напряжений разработка технологий подводной мокрой сварки морских конструкций должна учитывать регулирование теплового цикла сварки для снижения скорости охлаждения и управления фазовыми превращениями в микроструктуре сварного шва и зоны термического влияния. Другим требованием является контроль напряженно-деформированного состояния сварных соединений на основе применения методов рентгеновской дифракции и магнитной анизотропии. На точность контроля напряжений оказывают влияние дефекты, которые являются концентраторами напряжений. Поэтому для учета влияния дефектов требуется разработка специальных методик контроля и стандартов для подводной мокрой сварки.

3. Применение метода рентгеновской дифракции и магнитной анизотропии позволило с высокой степенью достоверности определить величину и распределение остаточных напряжений, действующ-

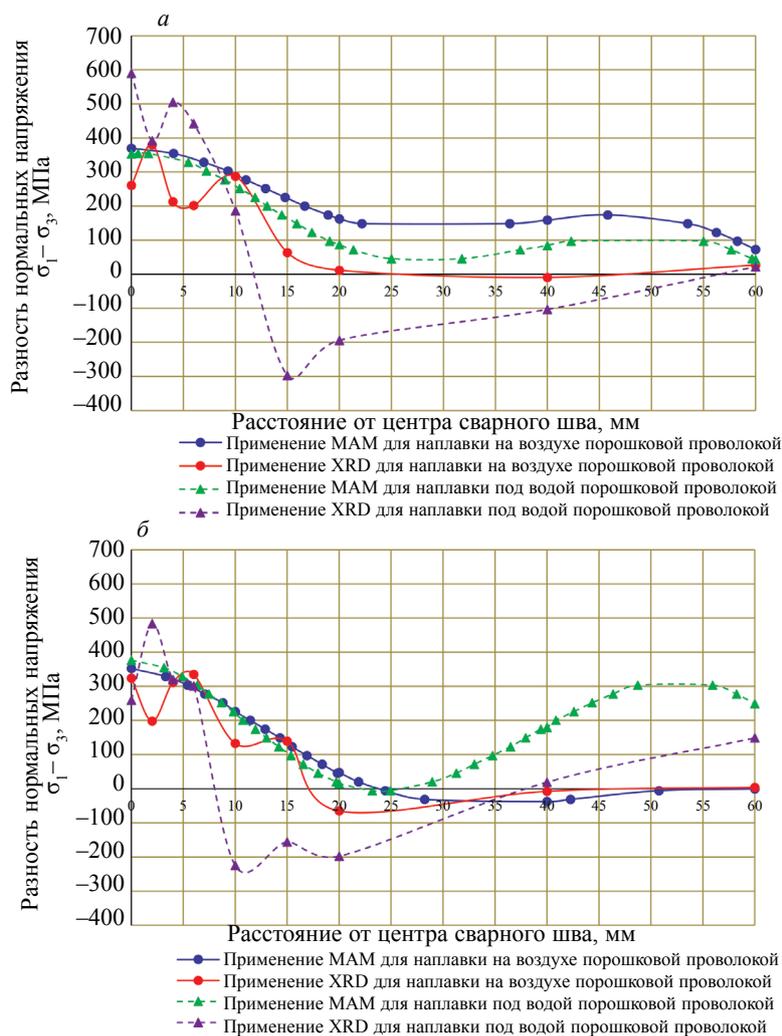


Рис. 12. Сравнение результатов магнитной анизотропии и рентгеновской дифракции при определении остаточных напряжений по параметрам разности нормальных напряжений для наплавки порошковой проволокой (а); покрытым электродом (б).

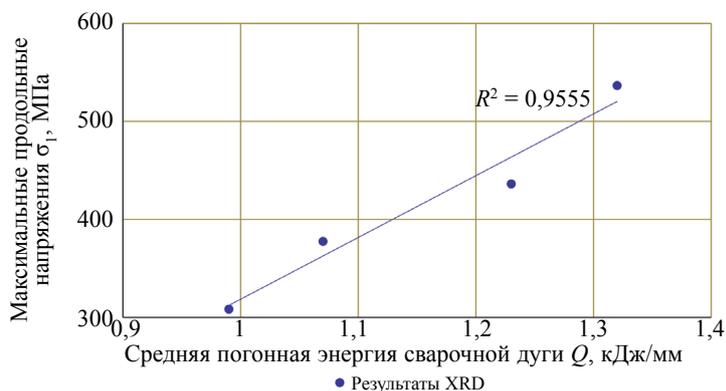


Рис. 13. Взаимосвязь между погонной энергией и максимальными остаточными сварочными продольными напряжениями с построенной линейно аппроксимацией.

щих в продольном и поперечном направлении относительно сварного шва. При мокрой наплавке порошковой проволокой в центре шва и на расстоянии 4 мм от центра шва растягивающие продольные напряжения достигают 536 и 484 МПа соответственно, что выше на 44 и 41 % по сравнению с

наплавкой на воздухе. Максимальные растягивающие поперечные напряжения при мокрой наплавке порошковой проволокой и покрытым электродом достигают 310 и 242 МПа соответственно, что выше на 71 и 51 % по сравнению с наплавкой на воздухе. Таким образом, технология подводной мокрой сварки высокопрочных сталей в целях предупреждения образования холодных трещин должна включать мероприятия по снижению уровня остаточных сварочных напряжений, включая предварительный подогрев, термическую или вибрационную обработку сварных соединений.

Авторы благодарят к.т.н. Г.Н. Вострецова, И.Л. Репина (ООО «УНТЦ Сварка» Национального Агентства Контроля Сварки) за техническую поддержку при проведении исследований, к.ф.-м.н. Б.Н. Барахтина, Н.Н. Барахтину, Н.Ф. Дроздову (НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей») за консультации и техническую поддержку при проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Totten G.* Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. Ohio: ASM International, 2002. 499 p.
2. *Breidenstein B., Heikebrügge S., Schaumann P., C. Dänekas.* Influence of the Measurement Parameters on Depth-Resolved Residual Stress Measurements of Deep Rolled Construction Steel using Energy Dispersive X-ray Diffraction // HTM Journal of Heat Treatment and Materials. 2020. V. 75. P. 419—432.
3. *Farajian M., Nitschke-Pagel T., Dilger K.* Stability and Relaxation of Welding Residual Stresses // Materials Science Forum. 2011. V. 681. P. 55—60.
4. *Gurova T., Estefen S.F., Leontiev A.* Time-dependent redistribution behavior of residual stress after repair welding // Welding in the World. 2017. V. 61. P. 507—515.
5. *Radaj D.* Welding residual stress and distortion. Calculation and measurement. Düsseldorf: DVS-Verlag, 2003. 97 p.
6. *Gkatzogiannis S., Knoedel P., Ummenhofer T.* Simulation of welding residual stress — from theory to practice // Mathematical Modelling of Weld Phenomena. 2019. V. 12. P. 383—400.
7. *Goldak J.A., Akhlaghi M.* Computational welding mechanics. New York: Springer, 2005. 321 p.
8. *Копельман Л.А.* Основы теории прочности сварных конструкций / Учебное пособие. 2 изд. испр. СПб.: Издательство «Лань», 2010. 464 с.
9. *Паршин С.Г.* Металлургия подводной и гипербарической сварки. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 402 с.
10. *Bo Zhao, Ji Chen, Chuanbao Jia, Chuansong Wu.* Numerical analysis of molten pool behavior during underwater wet FCAW process // Journal of Manufacturing Processes. 2018. V. 32. P. 538—552.
11. *Максимов С.Ю., Ляховая И.В.* Мокрая подводная сварка низколегированных сталей повышенной прочности // Автоматическая сварка. 2013. № 8. С. 43—46.
12. *Gao Wen-Bin, Wang Dong-Po, Cheng Fang-Jie, Deng Cai-Yan, Xu Wei.* Underwater wet welding for HSLA steels: chemical composition, defects, microstructures, and mechanical properties // Acta Metallurgica Sinica-English Letters. 2015. V. 28. P. 1097—1108.
13. *Łabanowski J., Fydrych D., Rogalski G.* Underwater Welding — a review // Adv. Mater. Sci. Eng. 2008. V. 8. P. 11—22.
14. *Dariusz F., Grzegorz R.* Effect of shielded-electrode wet welding conditions on diffusion hydrogen content in deposited metal // Welding International. 2011. V. 25. P. 166—171.
15. *Parshin S., Levchenko A.* Technology and equipment for underwater wet welding and cutting of high strength steel arctic structures using flux-cored wires // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. No. 539. P. 1—10.
16. *Кархин В.А.* Тепловые процессы при сварке. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 572 с.
17. *Прилипко Е.А.* Процесс подводной мокрой сварки порошковой проволокой с внешним электромагнитным воздействием / Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук. Киев: Киевский Политехнический Институт, 2013. 169 с.
18. *Fatkullin M.R., Fairushin A.M., Rizvanov R.G.* Development of technology for welding repair of steel housings using a combination of ultrasonic vibrations and forced cooling // Materials Science Forum. 2020. V. 989. P. 747—752.
19. *Ebrahimi S.M., Farahani M., Akbari D.* The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019. № 102 (4). P. 2147—2158.
20. *Летуновский А.П., Антонов А.А., Стеклов О.И.* Снятие технологических остаточных напряжений в металлоконструкциях низкочастотной виброобработкой // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 8. С. 12—16.
21. *Евстратикова Я.И., Никулин В.Е.* Контроль остаточных сварочных напряжений с помощью магнитоанізотропного метода после применения ультразвуковой ударной обработки // Сварка и Диагностика. 2019. № 4. С. 38—41.

22. *Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G.* Methods of measuring residual stresses in components // *Materials and Design*. 2012. V. 35. P. 572—588.
23. *Schajer G.S.* Practical Residual Stress Measurement Methods, First Edition. John Wiley & Sons, Ltd. Published, 2013. 297 p.
24. *Могильнер Л.Ю., Скуридин Н.Н.* Лабораторные исследования магнитно-анизотропного метода контроля напряженно-деформированного состояния трубопроводов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта, нефти и нефтепродуктов*. 2021. № 11(2). С. 145—151.
25. *Горкунов Э.С., Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е., Артемьев Б.В.* К вопросу применения магнитного метода НК для определения напряженно-деформированного состояния металлоконструкций // *В мире неразрушающего контроля*. 2016. № 3 (19). С. 43—46.
26. *Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Огнева М.С. Королев А.В., Осипов А.А.* Наведенная магнитная анизотропия в пластически деформированных растяжением пластинах из низкоуглеродистой стали // *Дефектоскопия*. 2015. № 10. С. 19—23.
27. *Захаров В.А., Ульянов А.И., Горкунов Э.С.* Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжении материала // *Дефектоскопия*. 2011. № 6. С. 3—15.
28. *Dae-Sung Kim, Ji-Hyeung Yoo, Hong-Duk Moon.* Non-destructive stress measurement of civil structural steel using magnetic anisotropy sensor // *International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD)*. 2016. V. 6. P. 13—20.
29. *Uchanin V., Minakov S., Nardoni G., Ostash O., Fomichov S.* Nondestructive Determination of Stresses in Steel Components by Eddy Current Method // *Journal of Mechanical Engineering*. 2018. V. 11(64). P. 690—697.
30. *Chmielewski M., Piotrowski L., Augustyniak B.* A fast procedure of stress state evaluation in magnetically anisotropic steels with the help of a probe with adjustable magnetizing field direction // *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing. 2017. V. 28. P. 1—11.
31. *Xin Wei, Liang Lin, Ding Keqin, Zhao Yu, Wang Hongzhu.* Study on the magnetic measurement theory and method of residual stress for ferromagnetic components based on magnetic anisotropy // *Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2020. No 11. P. 137—146.
32. *Ксенофонтов Н.М.* Обеспечение безопасности и эксплуатационной надежности водно-транспортных гидротехнических сооружений путем предупреждения деградиционных отказов элементов их механического оборудования / Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 2019. 183 с.
33. *Пономарев К.Е., Стрельников И.В., Антонов А.А., Бондаренко А.А.* Применение метода лазерной интерферометрии для выбора режимов вибрационной обработки по критерию уровня остаточных напряжений // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020. № 86 (2). С. 54—60.
34. *Остривной А.Ф., Лобашев А.А.* Метрологическое обеспечение измерений механического напряжения // *В мире неразрушающего контроля*. 2017. № 3. С. 58—61.
35. *Gutiérrez P.H., Rodríguez F.C., Mondragón J.J.R., Dávila J.L.A., Mata M.P.G., Chavez C.A.G.* Thermo-mechanic and Microstructural Analysis of an Underwater Welding Joint // *Soldagem & Inspeção*. 2016. V. 21. P. 56—164.
36. *Yong Zhang, Chuanbao Jia, Bo Zhao, Jiakun Hu, Chuansong Wu.* Heat input and metal transfer influences on the weld geometry and microstructure during underwater wet FCAW // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. V. 238. P. 373—382.