

УДК 621.791.042.3: 539.261  
DOI: 10.30987/2223-4608-2020-4-3-8

**К.В. Степанова**, науч. сотрудник, **П.П. Петров**, к.ф.-м.н., **А.А. Платонов**, ведущий электроник  
(Институт физико-технических проблем Севера им.В.П.Ларионова  
СОРАН – подразделение ФИЦ ЯНЦ СО РАН, 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1)  
E-mail: kseniastepanova@rambler.ru

## **Анализ внутренних напряжений методами рентгеновской дифрактометрии в наплавленном металле и околошовной зоне легированными редкоземельными элементами**

*Методами рентгеновской дифрактометрии определены величины остаточных напряжений в металле шва и околошовной зоне, полученными при ручной дуговой наплавке экспериментальными порошковыми проволоками с различным содержанием редкоземельных элементов из Томторского месторождения (Якутия, Россия). Выявлено, что в наплавленном металле и околошовной зоне (ОШЗ) с РЗМ образуются растягивающие внутренние напряжения. В металле шва и ОШЗ, наплавленном проволокой, содержащей РЗМ в количестве 0,7%, обнаружены сжимающие остаточные внутренние напряжения, которые могут служить дополнительным механизмом, сдерживающим стадию зарождения и замедляющим процесс распространения послесварочных трещин. Предложен оптимальный состав порошковых проволок с модифицирующей добавкой с РЗМ.*

**Ключевые слова:** редкоземельные элементы; порошковая проволока; ручная дуговая наплавка; микроструктура; внутренние напряжения; твердость.

**K.V. Stepanova**, Scientific assistant, **P.P. Petrov**, Can. Sc. Phys.-Math.,  
**A.A. Platonov**, Leading electronics engineer  
(Larionov Institute of Physical-Engineering Problems of North, SB of RAS – section of PIC YNC SB RAS,  
1, Oktyabrskaya Str., Yakutsk, 677980)

## **Inner stress analysis through methods of X-ray diffractometry in deposited metal and in periweld area by alloy rare-earth elements**

*Through the methods of X-ray diffractometry there are defined values of residual stresses in a weld metal and a periweld area obtained by hand arc welding deposition with experimental powder wires with the different rare-earth element composition of the Tomtorsky deposit (Yakutia, Russia). It is revealed that in the deposited metal and in the periweld area (PWA) with REM there are formed tensile inner stresses. In weld metal and in the PWA deposited with wire containing 0.7% of REMs there are revealed tensile inner residual stresses which can serve as an additional mechanism restraining a formation stage and delaying a process of post-welding cracks propagation. An optimum composition of powder wires with the modifying REM admixture is offered.*

**Keywords:** rare-earth elements; powder wire; hand arc welding deposition; microstructure; inner stresses; hardness.

### **Введение**

Процесс электрической дуговой сварки и наплавки сопровождается высоким местным нагревом небольших участков соединяемых деталей и сравнительно быстрым их охлаждением. Этот градиент температур способствует образованию внутренних напряжений, кото-

рые возникают вследствие неравномерного расширения и сжатия металла. Одними из основных причин возникновения внутренних напряжений в сварочном шве являются структурно-фазовые изменения металла, происходящие в зонах шва и зонах термического влияния. Определение внутренних (остаточных) напряжений методами рентгеновской

дифрактометрии основано на фиксации изменений межплоскостных расстояний напряженного кристаллита [1]. Современные подходы к изучению методов рентгеновской дифракции описаны в работах Hauk V.M. [2, 4], Welzel U. [3, 6] и Genzel Ch. [5].

В металлах и сплавах остаточные напряжения достигают в определенных случаях величины предела текучести и даже предела прочности и вызывают образование трещин при термомеханической обработке материала (закалка, шлифовка и т.п.). С одной стороны, растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях складываются с внешними и могут вызывать разрушение деталей в процессе эксплуатации. С другой стороны, создание на поверхности сжимающих остаточных напряжений затрудняет образование трещин и значительно увеличивает усталостную прочность деталей и узлов техники и сооружений [7, 8].

В связи с возрастающим интересом в мире к легированию металла шва редкоземельными элементами, вопрос оценки остаточных напряжений в шве и околошовной зоне приобретает крайне важное значение. Как известно, редкоземельные элементы, такие как иттрий, церий, лантан, празеодим и др. влияют на процесс кристаллизации и формирование первичной структуры шва при сварке и наплавке различных сталей [9 – 14]. Следовательно, вопрос изучения механизмов влияния РЗМ в различных концентрациях в шве на возникновение внутренних напряжений способствует управлению рядом свойств металла сварного соединения, таких как прочность, твердость, ударная вязкость и коррозионная стойкость.

Целью данной работы является оценка величины остаточных напряжений в металле шва и околошовной зоне (ОШЗ), полученных при наплавке порошковыми проволоками с различным содержанием редкоземельных элементов из Томторского месторождения (Якутия, Россия), и выбор оптимального состава порошковых проволок с модифицирующей добавкой с РЗМ для формирования шва с повышенными прочностными свойствами при пониженном напряженно-деформированном состоянии.

### Материал и методы исследования

Для исследований были наплавлены валики на пластины толщиной 12 мм из стали марки 09Г2С. Экспериментальные наплавочные материалы, изготовленные по типу порошковых

проволок диаметром 5 мм, представлены 10-ю составами с содержанием редкоземельного материала в количестве 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 % от общей массы наполнителя проволоки. Состав композиций представлен в табл. 1. В качестве основного материала наполнителя выбрана шихта сварочного электрода УОНИ 13/55, предназначенного для ручной электродуговой сварки особо ответственных конструкций из низкоуглеродистых, среднеуглеродистых и низколегированных сталей, работающих при знакопеременных нагрузках и отрицательных температурах до -50 °С. Коэффициент заполнения экспериментальных проволок – 15 %. Для сравнения результатов работ приготовлены такие же образцы, наплавленные электродом УОНИ 13/55 при тех же режимах наплавки.

Наплавочные работы выполнялись сварочным выпрямителем ВД-306Э, предназначенным для ручной дуговой сварки малоуглеродистых, низколегированных и коррозионно-стойких сталей при силе тока 180 А и напряжении 40 В.

Рентгенодифракционные спектры для всех образцов регистрировались на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV (Япония) с высокоточным горизонтальным гониометром. Образец в гониометре закрепляется горизонтально и сканируется генератором рентгеновского излучения и датчиком, представляющим собой сцинтилляционный счетчик, расположенным на рычаге гониометра с вращением по вертикальной площади.

Съемка дифракционного спектра проводилась в схеме  $\Theta - 2\Theta$  сканирования с фокусировкой по Брэггу-Брентано в интервале углов  $123^{\circ} \dots 125^{\circ}$  в излучении  $\text{CoK}_{\alpha}$  (длиной волны  $\lambda = 0,179020$  нм) с использованием во вторичном пучке графитового монохроматора. Ширина щели, ограничивающей падающий пучок по горизонтали, – 10 мм, по вертикали  $0,5^{\circ}$ ; щели Соллера на падающем и дифрагированном пучке –  $5^{\circ}$ ; ширина щели, ограничивающей дифрагированный пучок по вертикали перед приемной щелью –  $0,5^{\circ}$ , а ширина самой приемной щели – 0,3 мм. На образец падает луч прямоугольной формы размером  $1,0 \times 0,2$  мм. Рабочий режим:  $U = 40$  кВ;  $I = 40$  мА; скорость сканирования –  $0,1 \text{ deg./min.}$ ; шаг –  $0,01 \text{ deg.}$ ;  $\text{scanaxis} - 2\theta/\theta$ . Для расшифровки дифрактограмм использовалась международная база дифракционных данных PDXL – 2.

С целью получения профиля рентгеновской линии, отвечающей плоскостям с задними уг-

лами отражения, выбрана плоскость с  $hkl = 220$ . Полную ширину дифракционного пика определяли на половине высоты (с учетом эталона).

Инструментальное уширение регистрировалось экспериментально с помощью съемки в тех же условиях эталонного образца, в котором физическое уширение близко к нулю ( $D > 0,15$  мкм;  $\rho < 10^8$  см<sup>-2</sup>). Эталон изготовлен из материала рабочих образцов проведением рекристаллизационной обработки.

Известно, что если остаточные напряжения характеризуются однородным сжатием или растяжением (деформацией в упругой области) кристаллической решетки металлов и сплавов, то они приводят к однородному изменению межплоскостных расстояний  $d$  на величину  $\Delta d$ , а, следовательно, к смещению рентгеновской интерференции на угол  $\Delta\theta$  [15]. Исходя из этого соотношения, для одноосного растяжения величина упругих определяется формулой [16]:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\nu) \cdot \sin^2 \psi} * \frac{\Delta d}{d} = - \frac{E}{(1+\nu)} * \operatorname{ctg} \theta_0 * \frac{\Delta \theta}{\sin \psi}$$

$$= - \frac{E}{2(1+\nu)} * \operatorname{ctg} \theta_0 * \Delta 2\theta,$$

где  $E = 2,17 \cdot 10^5$  МПа – модуль Юнга;  $\nu = 0,3$  – коэффициент Пуассона;  $d$  – межплоскостное расстояние;  $\Delta d$  – величина изменения межплоскостного расстояния деформированного образца;  $\theta_0$  – положение дифракционной линии, в отсутствие деформации;  $\theta$  – положение дифракционной линии, отвечающее деформированному образцу;  $\Delta\theta$  – смещения положения дифракционного максимума деформированного образца относительно эталона.

Микроструктурные исследования проводились на металлографических оптических микроскопах «Альтами Поляр 312» (Россия) и «МЕТАМ РВ 21» (Россия). Для травления поверхности шлифов при выявлении структуры металла использован спиртовой раствор азотной кислоты: 4 см<sup>3</sup> HNO<sub>3</sub> на 100 см<sup>3</sup> C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH.

Для определения твердости наплавленного металла применялся ультразвуковой твердомер «МЕТ У1» (Россия). Принцип работы твердомера основывается на методе ультразвукового контактного импеданса.

### Результаты и обсуждение

Как показывает многолетний опыт, в наплавочных материалах самыми уязвимыми зонами являются сам наплавочный шов (точка

№1) и нижняя граница наплавки (точка №2) (рис.1).

Из рассмотренных 10 составов порошковых проволок с разной массовой долей содержания РЗМ, наиболее высокими прочностными свойствами обладает состав №4, где твердость достигает 183 единиц по шкале НВ, а также наблюдаются минимальные размеры сегрегаций на границе сплавления, достигающих 76 мкм относительно других составов (табл. 2). Вместе с тем, величины остаточных растягивающих напряжений в зоне наплавочного шва и в нижней границе наплавки достигают 112,4 МПа и 104,4 МПа – соответственно, что повышает уровень напряженно-деформированного состояния (НДС) наплавленного материала. Необходимо отметить, что в наплавленном металле экспериментальных проволок во всех образцах среднее элементное содержание празеодима варьируется в пределах 0,12...0,36 %; неодима – 3...0,23 %; церия – 0,01...0,16 % [17].

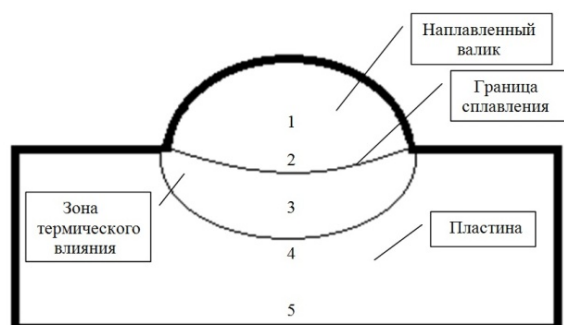
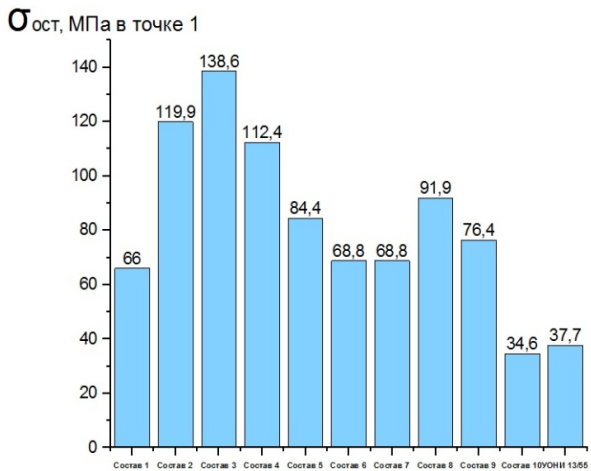


Рис.1. Эскиз образца с местами проведения рентгеноструктурных съемок

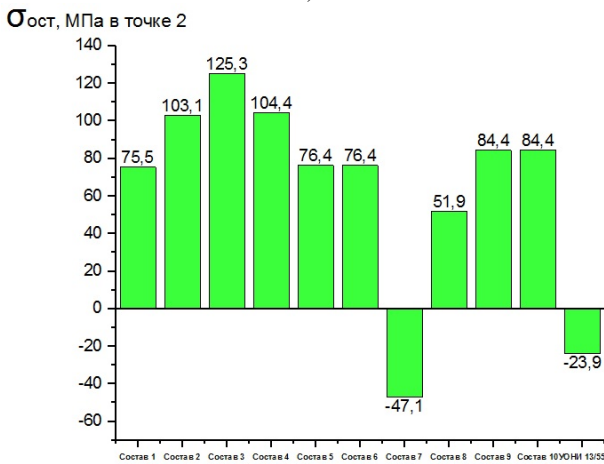
Твердость наплавленного металла состава №7 достигает 170 НВ, что соответствует среднему показателю для всех составов, также величины остаточных напряжений в зоне наплавочного шва и в нижней границе наплавки зафиксированы на уровне 68,8 МПа и 47,1 МПа (рис. 2 а, б). Поскольку результаты рентгенограммы подтверждают преобладание сжимающих напряжений в образце, то можно говорить о пониженном уровне напряженно-деформированного состояния во всех точках образца.

По результатам рентгеноструктурного анализа в составе №7 наблюдаются незначительные искажения параметра кристаллической решетки железа ( $\Delta a$ ), которые достигают  $0,00112 \text{ \AA}$  в зоне наплавочного шва и  $-0,00081 \text{ \AA}$  в зоне нижней границы наплавки, тогда как при наплавке электродом серийного выпуска УОНИ 13/55 величина  $\Delta a = 0,00061 \text{ \AA}$

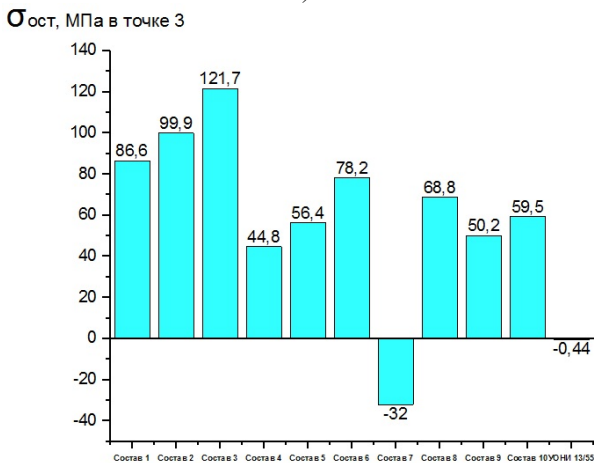
в зоне наплавочного шва и  $\Delta\alpha = -0,00038\text{Å}$  в нижней границе наплавки.



а)



б)



в)

**Рис. 2. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  по образцам, наплавленным разными составами проволок и УОНИ 13/55:**

а – в точке 1; б – в точке 2; в – в точке 3

Благодаря высокой термодинамической активности, РЗМ в основном образуют мелкодисперсные тугоплавкие соединения в виде

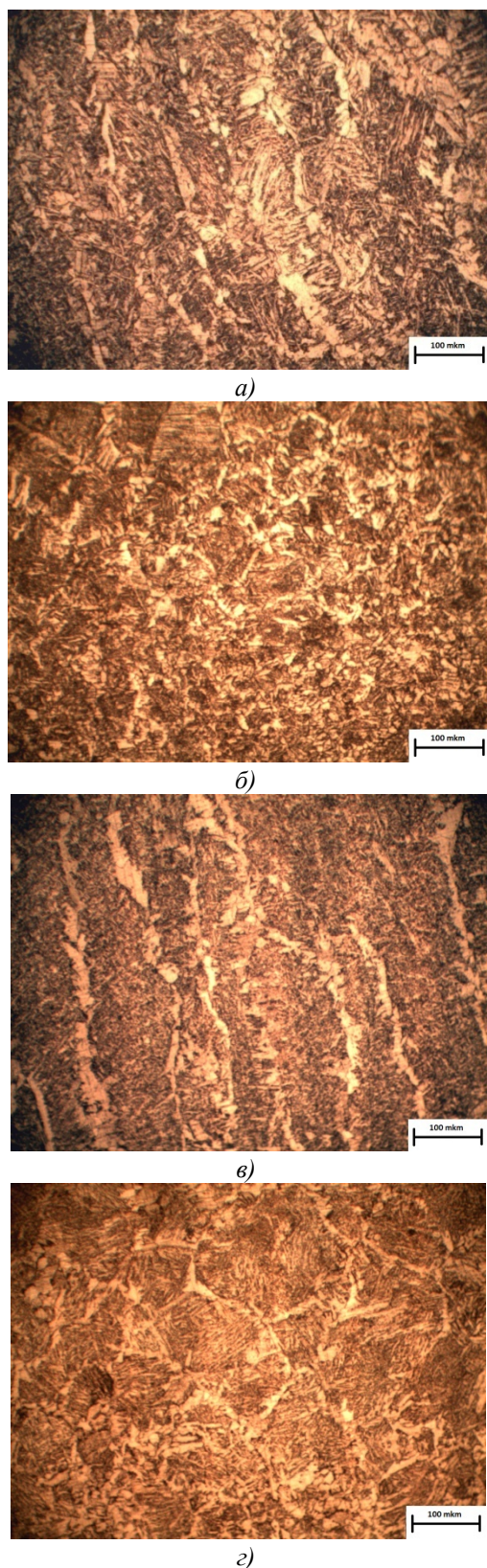
сульфидов, силикатов, оксидов и карбидов. Небольшая часть РЗМ растворяется в твердом растворе [18], формируя интерметаллические соединения. Образование в зоне сплавления интерметаллидов железа с РЗМ в приграничной зоне ферритных зерен в виде химических соединений способствует его упрочнению. Причем, чем мельче зерно феррита, тем выше его прочность, обусловленная зернограничным упрочнением полигонизованной субструктуры.

Таким образом, РЗМ снижают диффузионную подвижность элементов шва путем взаимодействия на электронном уровне с элементами матрицы, способствуя равномерному распределению дислокаций с понижением их плотности. По результатам рентгеноструктурного анализа, величина скалярной плотности дислокаций в образцах с редкоземельными элементами оказалась меньшей, чем в образцах, полученных при использовании серийного электрода УОНИ-13/55. Так, например, в образцах, наплавленных порошковой проволокой с содержанием РЗЭ 0,1... 1% по массовой доле, величина скалярной плотности дислокаций в зоне сплавления составила  $0,66 \cdot 10^{14} \dots 1,77 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ , а в случае наплавки УОНИ-13/55 равна  $2,0 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ . Упрочнение металла шва и зоны термического влияния объясняется повышением межатомных и межкристаллитных связей при введении соединений редкоземельных металлов в сварочную ванну при ручной дуговой наплавке.

Микроструктурные снимки наплавленного валика и околошовной зоны образцов, наплавленных порошковой проволокой с содержанием РЗМ 0,7% и электродом УОНИ 13/55, представлены на рис. 3. В структуре шва образца состава №7 столбчатые образования неравномерные, шириной 98 мкм, преобладают смешанные участки игольчатого феррита (рис. 3, а). Околошовная зона характеризуется зернами размером 96 мкм (рис. 3, б). Ширина ЗТВ – 2,96 мм. Среднее значение твердости наплавленного металла – 170 НВ.

Микроструктура металла наплавленного участка и околошовной зоны образца, полученного с помощью электрода УОНИ 13/55, приведена на рис. 3, в, г. В ходе остывания сварочной ванны сформировались крупные, равномерные столбчатые образования, расстояние между ферритными оторочками – 95 мкм (рис. 3, в). В зоне прилегания металла наплавленного слоя к основному металлу произошел рост зерен со средним размером 123 мкм (рис. 3, г), перлитные выделения окантованы

ферритными прослойками. Ширина ЗТВ – 3,60 мм. Среднее значение твердости наплавленного металла – 163 НВ.



**Рис. 3. Микроструктурные снимки образца состава №7 (содержание РЗМ 0,7 %):**  
*а*– наплавленный слой; *б* – зона сплавления и УОНИ 13/55; *в* – наплавленный слой; *з*– зона сплавления,  $\times 300$

Таким образом, микроструктурные исследования показали, что при наплавлении экспериментальной порошковой проволокой с содержанием в шихте 0,7 % рудного материала с РЗМ в зоне сплавления образуется структура с размерами зерен на 22 % меньше размеров зерен, формирующихся при наплавлении электродами УОНИ 13/55. Наблюдается тенденция уменьшения ширины зоны термического влияния во всех образцах по сравнению с шириной ЗТВ образцов, наплавленных УОНИ 13/55.

### Заключение

1. В результате исследований, проведенных методами рентгеновской дифрактометрии, выявлено, что в наплавленном металле и ОШЗ, полученными при наплавлении экспериментальными порошковыми проволоками с РЗМ, образуются растягивающие внутренние напряжения. Вместе с тем, в металле шва и ОШЗ, наплавленном проволокой состава №7 (РЗМ 0,7 %) обнаружены сжимающие внутренние напряжения, которые могут служить дополнительным механизмом, сдерживающим стадию зарождения и замедляющим процесс распространения послесварочных трещин. Образованные зернограницные интерметаллические включения на границе сплавления способствуют упрочнением полигонизованной субструктуры.

2. Оптимальным с точки зрения уровня напряженно-деформированного состояния (НДС) выбран состав порошковой проволоки №7 (РЗМ 0,7 %), поскольку при пониженном НДС сформирован металл с измельченной структурой и повышенным значением твердости. Однако необходимо помнить, что возникновение напряженного состояния в шве и ОШЗ зависит также от выбранных режимов наплавки, прокатки сварочно-наплавочных материалов и ряда других факторов.

Вопрос образования растягивающих напряжений при наплавке проволоками с РЗМ других составов требует дальнейшего более детального изучения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Taylor, A. X-ray metallography. – New York, London: John Wiley and sons, 1961. – 993 p.
2. Hauk, V. Structural and residual stress analysis by non-destructive methods: Evaluation – Application – Assessment. – Amsterdam: Elsevier, 1997. – 655 p.
3. Welzel, U. Diffraction analysis of residual stress. – Stuttgart: Universitat Stuttgart, 2002. – 169 p.

4. **Hauk, V.** Structural and residual stress analysis by X-ray diffraction on polymeric materials and composites // *Adv. X-ray Anal.* – 2000. – V.42. – pp. 540-554.

5. **Genzel, Ch.** X-ray stress analysis in presence of gradients and texture // *Adv. X-ray Anal.* 2001. – V.44. – pp.247-256.

6. **Welzel, U.** Stress analysis of polycrystalline thin films and surface regions by X-ray diffraction / U. Welzel, J. Ligot., P. Lamparter et al. // *Appl. Crystallogr.* – 2005. – V. 38. – pp. 1-29.

7. **Дударев, Е.Ф.** Микроскопическая деформация и предел текучести поликристаллов / Е.Ф. Дударев. – Томск. ТГУ, 1988. – 256 с.

8. **Иванова, В.С.** Механика и синергетика усталостно-го разрушения // *Физика, химия и механика материалов.* – 1986. – Т.22. – №1. – С. 62-68.

9. **Лазько, В.Е., Борисов, М.Т., Ковальчук, В.Г., Макаров, Э.Л.** Влияние церия на замедленное разрушение высокопрочного сварного шва // *Автоматическая сварка.* – 1981. – №2. – С.27-29.

10. **Ефименко, Н.Г.** Применение редкоземельных металлов в покрытиях сварочных электродов // *Сварочное производство.* – 1980. – № 7. – С.28-29.

11. **Cai, Y.C.** Influence of Y on microstructures and mechanical properties of high strength steel weld metal / Y.C. Cai, R.P. Liu, Y.H. Wei, Z.G. Cheng // *Mater. Des.* - 2014. - Vol. 62. - P. 83-90.

12. **Zhang, Z.** Effect of CeO<sub>2</sub> on the microstructure and wear behavior of thermal spray welded NiCrWRE coatings / Z. Zhang, Z. Wang, B. Liang, H.B. Dong, S.V. Hainsworth // *Wear.* - 2007. - Vol. 262. - P. 562-567.

13. **Li, P.** Welding performance of several new rare earth tungsten electrodes / P. Li, J.C. Yang., Y. Li // *Materials Science Forum.* - 2017. - Vol. 898. - P. 1117-1122.

14. **Kashchenko, D.A.** Development of electrodes for welding transmission pipelines and marine equipment made of high-strength low-alloy cold-resistant steels / D.A. Kashchenko, Y.D. Brusnitsyn, A.V. Baranov, V.L. Russo, I.G. Karpov // *Welding International.* - 2017. - Vol. 31, Issue 12. - P. 938-944.

15. **Уманский, Я.С.** Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков, А.Н. Иванов, Л.Н. Расторгуев. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.

16. **Горелик, С.С.** Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. – М.: МИСиС, – 1994. – 328 с.

17. **Степанова, К.В., Слепцов, О.И., Эверстов, М.М., Степанов, В.Е., Аргунова, А.А.** Микроструктурный анализ и исследование твердости наплавленного металла, модифицированного редкоземельными элементами // *Сварочное производство.* – 2019. – №9. – С. 3-9.

18. **Ефименко, Н.Г.** Комплексная оценка влияния иттрия на свойства сварных швов сталей // *Автоматическая сварка.* – 2003. – №8. – С. 24-27.

2. **Hauk, V.** *Structural and residual stress analysis by non-destructive methods: Evaluation – Application – Assessment.* – Amsterdam: Elsevier, 1997. – 655 p.

3. **Welzel, U.** *Diffraction analysis of residual stress.* – Stuttgart: Universitat Stuttgart, 2002. – 169 p.

4. **Hauk, V.** *Structural and residual stress analysis by X-ray diffraction on polymeric materials and composites* // *Adv. X-ray Anal.* – 2000. – V.42. – pp. 540-554.

5. **Genzel, Ch.** *X-ray stress analysis in presence of gradients and texture* // *Adv. X-ray Anal.* 2001. – V.44. – pp.247-256.

6. **Welzel, U.** Stress analysis of polycrystalline thin films and surface regions by X-ray diffraction / U. Welzel, J. Ligot., P. Lamparter et al. // *Appl. Crystallogr.* – 2005. – V. 38. – pp. 1-29.

7. **Dudarev, E.F.** *Microscopic Deformation and Polycrystal Yield Limit* / E.F. Dudarev. – Tomsk. TSU, 1988. – pp. 256.

8. **Ivanova, V.S.** Mechanics and synergetics of fatigue failure // *Physics, Chemistry and Mechanics of Materials.* – 1986. – Vol.22. – No.1. – pp. 62-68.

9. **Lazko, V.E., Borisov, M.T., Kovalchuk, V.G., Makarov, E.L.** Cerium impact upon delayed failure of high-tensile welded joint // *Automatic Welding.* – 1981. – No.2. – pp. 27-29.

10. **Yefimenko, N.G.** Rare-earth metal application in welding electrodes coatings // *Welding Production.* – 1980. – No.7. – pp. 28-29.

11. **Cai, Y.C.** Influence of Y on microstructures and mechanical properties of high strength steel weld metal / Y.C. Cai, R.P. Liu, Y.H. Wei, Z.G. Cheng // *Mater. Des.* - 2014. - Vol. 62. - P. 83-90.

12. **Zhang, Z.** Effect of CeO<sub>2</sub> on the microstructure and wear behavior of thermal spray welded NiCrWRE coatings / Z. Zhang, Z. Wang, B. Liang, H.B. Dong, S.V. Hainsworth // *Wear.* - 2007. - Vol. 262. - P. 562-567.

13. **Li, P.** Welding performance of several new rare earth tungsten electrodes / P. Li, J.C. Yang., Y. Li // *Materials Science Forum.* - 2017. - Vol. 898. - P. 1117-1122.

14. **Kashchenko, D.A.** Development of electrodes for welding transmission pipelines and marine equipment made of high-strength low-alloy cold-resistant steels / D.A. Kashchenko, Y.D. Brusnitsyn, A.V. Baranov, V.L. Russo, I.G. Karpov // *Welding International.* - 2017. - Vol. 31, Issue 12. - P. 938-944.

15. **Umansky, Ya.S.** *Crystallography, Roentgenography and Electronic Microscopy* / Ya.S. Umansky, Yu.A. Skakov, A.N. Ivanov, L.N. Rastorguev. – М.: Metallurgy, 1982. – pp. 632.

16. **Gorelik, S.S.** *Radiographic and Electronic-Optical Analysis* / S.S. Gorelik, Yu.A. Skakov, L.N. Rastorguev. – М.: MIS&A, 1994. – pp. 328.

17. **Stepanova, K.V., Sleptsov, O.I., Everstov, M.M., Stepanov, V.E., Argunova, A.A.** Micro-structural analysis and hardness investigation of deposited metal modified with rare-earth elements // *Welding Production.* – 2019. – No.9. – pp. 3-9.

18. **Yefimenko, N.G.** Complex estimate of yttrium impact upon steel welded joint properties // *Automatic Welding.* – 2003. – No.8. – pp. 24-27.

## REFERENCES

1. Taylor, A. *X-ray metallography.* – New York, London: John Wiley and sons, 1961. – 993 p.

Рецензент д.т.н. В.В. Овчинников