

УДК 621.791.92

# АНАЛИЗ ОСНОВ УПРОЧНЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И ВЫБОР СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МНОГОДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 17Г1С-У

©Дерябкина Е. С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про автора:

Дерябкіна Євгенія Станіславівна: ORCID: 0000-0002-5531-0124; 216464g@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Проанализированы сведения о внедрении низколегированных сталей повышенной и высокой прочности при сооружении магистральных трубопроводов, что является эффективным путем снижения расхода металла. Обобщены данные исследований о влиянии химического состава на механические свойства, структуру сталей и склонность их к трещинообразованию. Показано влияние термического цикла сварки, состава сварочных материалов и других параметров сварки на склонность к образованию холодных трещин, которая обусловлена совокупностью металлургических, технологических и конструктивных факторов.

Представлены результаты исследований ударной вязкости металла шва на низколегированной стали повышенной прочности марки 17Г1С-У в интервале температур от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $-60^{\circ}\text{C}$ , наплавленного сварочными проволоками, легированными марганцем, молибденом, хромом, никелем. Приведены скорости распространения трещин, критические скорости деформации металла шва, анализ которых позволил рекомендовать сварочные проволоки Св-08ГМ и Св-08ХМ при двухдуговой сварке под флюсом АН-60 для обеспечения равнопрочности с основным металлом и высокой сопротивляемости металла шва образованию и распространению трещин без проведения предварительного подогрева перед сваркой, что способствует расширению применения стали 17Г1С-У для производства сварных труб большого диаметра.

**Ключевые слова:** низколегированные стали; холодные трещины; ударная вязкость; металл шва; скорость распространения трещин; критическая скорость деформации.

**Дерябкіна Е. С.** «Аналіз основ змінення низьколегованих сталей і вибір зварювальних матеріалів для багатодугового зварювання під флюсом труб із сталі 17Г1С-У».

Проаналізовано відомості про впровадження низьколегованих сталей підвищеної та високої міцності при спорудженні магістральних трубопроводів, що є ефективним шляхом зниження витрати металу. Узагальнено дані досліджень про вплив хімічного складу на механічні властивості, структуру сталей і схильність їх до утворення тріщин. Показано вплив термічного циклу зварювання, складу зварювальних матеріалів і інших параметрів зварювання на схильність до утворення холодних тріщин, яка обумовлена сукупністю металургійних, технологічних і конструктивних факторів.

Представлені результати досліджень ударної в'язкості металу шва на низьколегованої сталі підвищеної міцності марки 17Г1С-У в інтервалі температур від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $-60^{\circ}\text{C}$ , наплавленого зварювальними дротами, легованими марганцем, молібденом, хромом,

нікелем. Наведено швидкості поширення тріщин, критичні швидкості деформації металу шва, аналіз яких дозволив рекомендувати зварювальні дроту Св-08ГМ і Св-08ХМ при дводуговому зварюванні під флюсом АН-60 для забезпечення рівноміцності з основним металом і високій опірності металу шва утворенню та поширенню тріщин без попереднього підігріву перед зварюванням, що сприяє розширенню застосування сталі 17Г1С-У для виробництва зварних труб великого діаметру.

**Ключові слова:** низьколеговані сталі; холодні тріщини; ударна в'язкість; метал шва; швидкість поширення тріщин; критична швидкість деформації.

**Deryabkina E.** “Analysis of the bases of low-steel steel strengthening and selection of welding materials for multi-welded welding under the flux of pipes from steel 17G1S-U”.

The information on the introduction of low-alloy steels of high and high strength during the construction of main pipelines and other metal structures operating at negative temperatures is analyzed, which is an effective way to reduce metal consumption. Data on the effect of the chemical composition on the mechanical properties, the structure of the steels, and their propensity to cracking are generalized. The influence of the thermal cycle of welding, the composition of welding materials and other technological parameters of welding on the propensity to form cold cracks is shown, which is caused by a combination of metallurgical, technological and constructive factors.

The results of studies of the toughness of weld metal on low-alloy steel of high strength grade 17G1S-U in the temperature range from minus 20<sup>0</sup>C to minus 60<sup>0</sup>C, welded with welding wires doped with manganese, molybdenum, chromium, and nickel are presented. The propagation rates of cracks and the critical strain rate of weld metal are given, the analysis of which allowed recommending the welding wires Sv-08GM and Sv08MM for two-arc welding under the AN-60 main flux to ensure equal strength with the base metal and high resistance of weld metal to formation and propagation of cracks without preliminary Preheating before welding, which contributes to the expansion of the use of 17G1S-U steel for the production of welded pipes of large diameter.

**Key words:** low-alloy steels; cold cracks; impact strength; weld metal; crack propagation velocity; critical strain rate.

## **1. Актуальність**

Снижение удельного расхода металла на изготовление сварных конструкций обеспечивается при применении низколегированных сталей, упрочняемых легированием их углеродом (до 0,25 %), марганцем (1,1-1,8 %), кремнием (до 0,8 %), хромом (до 0,9 %), медью (до 0,3 %) [1]. При повышении содержания этих легирующих элементов снижается ударная вязкость и хладостойкость стали, ухудшается свариваемость низколегированных сталей феррито - перлитной структуры, затруднено обеспечение свойств металла шва и металла зоны термического влияния (ЗТВ) равноценных основному металлу, образованию холодных трещин при сварке. Повысить прочность и свариваемость низколегированных сталей удается при комплексном микролегировании их небольшим количеством бора, молибдена, ванадия, ниобия титана, образующих стойкие карбиды (NbC, TiC, VC), выделяемые в виде мелких частиц внутри зерна феррита, приводя к его упрочнению.

## **2. Постановка проблеми и анализ последних исследований**

Добавление азота в сталь вместе с карбидообразующими элементами способствует образованию прочных карбонитридов и измельчению зерна. К мелкозернистым стальям

карбидного и карбонитридного упрочнения относятся стали 14Г2АФ, 15Г2СФ, 16Г2АФ, 18Г2АФ и классов прочности X-60, X-65, X-70 (табл. 1), используемые согласно стандарту США API5LX для труб магистральных трубопроводов [2].

Проблеме холодных трещин при ручной дуговой сварке этих сталей посвящено много работ [2-5], но практически отсутствуют рекомендации для их автоматической сварки под флюсом.

Улучшение свойств низколегированных сталей достигается путем термической, термомеханической обработки, а также уменьшением её загрязненности путем рафинирующих переплавов, обработки синтетическими шлаками, добавления редкоземельных элементов [6].

Изготовление сварных конструкций из высокопрочных низколегированных сталей обуславливает необходимость строгого соблюдения технологии сборки и сварки из-за их повышенной чувствительности к воздействию термомеханического цикла сварки, приводящего к образованию закалочных структур и возникновению холодных трещин, уменьшение склонности к которым обеспечивается применениемстыковых сварных соединений и подбором сварочных материалов с обязательной прокалкой, постоянного тока обратной полярности и введение предварительного и сопутствующего подогрева свариваемых элементов [7].

### 3. Цель исследований

Цель настоящей работы состояла в детальном анализе влияния химического состава стали на свойства, структуру и склонность металла шва к образованию холодных трещин, исследовании влияния легирования металла шва на стойкость против образования холодных трещин при многоэлектродной сварке низколегированной стали повышенной прочности марки 17Г1С-У.

### 4. Основной материал

В зависимости от системы легирования и кинетики превращений различают стали мартенситного или при введении молибдена - бейнитного класса, обладающие лучшей свариваемостью по сравнению с мартенситными [8].

Одна из причин повышения склонности к образованию холодных трещин низколегированных сталей повышенной и высокой прочности - увеличение содержания водорода в металле сварного соединения. Наибольшее количество водорода в наплавленном металле содержится при сварке широко применяющимися электродами с покрытием органического типа. Значительно меньше водорода в металле шва при сварке электродами с покрытием основного типа и автоматической сварке под флюсом, особенно после высокотемпературной прокалки материалов. Наименьшее количество водорода содержится в металле, наплавленном в  $\text{CO}_2$ .

**Таблица 1 – Химический состав и механические свойства низколегированных сталей**

| Марка стали | C         | Si          | Mn      | Cr  | Ni       | Cu  | V           | N    | $\sigma_b$ | $\sigma_t$ | $\delta, \%$ |
|-------------|-----------|-------------|---------|-----|----------|-----|-------------|------|------------|------------|--------------|
|             |           |             |         |     | Не более |     |             |      | МПа        |            |              |
| 17ГС        | 0,14-0,2  | 0,4-0,6     | 1,0-1,4 | 0,3 | 0,3      | 0,3 | -           | -    | 520        | 350        | 23           |
| 15Г2СФ      | 0,12-0,18 | 0,4-0,7     | 1,3-1,7 | 0,3 | 0,3      | 0,3 | $\leq 0,10$ | -    | 560        | 350        | 18           |
| 14Г2АФ      | 0,12-0,18 | 0,3-0,6     | 1,2-1,6 | 0,4 | 0,3      | 0,3 | $\leq 0,12$ | 0,02 | 550        | 400        | 20           |
| 16Г2АФ      | 0,14-0,2  | 0,3-0,6     | 1,3-1,7 | 0,4 | 0,3      | 0,3 | $\leq 0,14$ | 0,02 | 600        | 450        | 20           |
| 18Г2АФпс    | 0,14-0,22 | $\leq 0,17$ | 1,3-1,7 | 0,3 | 0,3      | 0,3 | $\leq 0,15$ | 0,03 | 600        | 450        | 19           |
| 14Х2ГМР     | 0,1-0,16  | 0,2-0,4     | 0,9-1,2 | 1,7 | 0,3      | -   | $\leq 0,3$  | -    | 600        | 700        | 14           |
| 12Г2СМФ     | 0,09-0,15 | 0,4-0,7     | 1,3-1,7 | 0,3 | 0,3      | -   | $\leq 0,15$ | -    | 600        | 700        | 14           |
| 15ГСХМФР    | 0,12-0,18 | 0,4-0,7     | 1,3-1,6 | 0,5 | 0,3      | -   | $\leq 0,12$ | -    | 600        | 700        | 15           |
| 15ХГ2СФР    | 0,12-0,18 | 0,4-0,7     | 1,5-1,8 | 0,7 | -        | -   | $\leq 0,10$ | -    | 600        | 700        | 14           |
| 5ХГ2СФМР    | 0,12-0,18 | 0,4-0,7     | 1,5-1,8 | 0,7 | -        | -   | $\leq 0,10$ | -    | 700        | 850        | 12           |

## Технологія машинобудування

---

Тепловой режим на практике регулируют изменением погонной энергии сварки  $g/v$ , предварительным и сопутствующим подогревом, воздействуя посредством указанных параметров технологии на основные параметры термического цикла сварки  $t > A_{c3}$ , и скорости охлаждения при температурах  $550$  и  $300$  °C –  $W_{550}^0$  и  $W_{300}^0$  [2].

На практике в качестве критериев выбора технологического варианта сварки иногда применяют эквивалент углерода основного металла  $C_e$  и максимальную твердость HV в околосшовной зоне, что, по существу, сводится к попытке на основе результатов рассмотрения только структурного фактора прогнозировать образование трещин.

Предложено большое число формул для определения  $C_e$ , различающихся как содержанием тех или иных элементов, так и коэффициентами при этих элементах. При попытке учета влияния на сопротивляемость трещинам водорода и напряжений 1 рода путем введения в формулу  $C_e$  показателей водорода и толщины свариваемого металла с постоянными коэффициентами вносятся дополнительные условности, так как зависимости сопротивляемости сталей образованию холодных трещин от содержания водорода и значений напряжений 1 рода, жесткости конструкции не носят линейного характера.

На основе практического опыта в отдельных работах [2] предлагается установить максимальные твердости HV в зоне термического влияния (HV 380-480), при которых не должны образовываться холодные трещины. Часто твердость ограничивают значениями  $HV \leq 350$ . Для гарантированного ограничения допустимой твердости  $HV \leq 350$  необходимо иметь  $C_e \leq 0,35$ , что практически исключает возможность сварки без подогрева большинства низколегированных сталей на типовых режимах.

Сталь 17Г1С-У нормализованная повышенной хладостойкости и прочности широко применяется при изготовлении труб большого диаметра. При сварке по существующей технологии (с использованием электродной проволоки Св-08ГА и флюса АН-60, без последующей термообработки) металл шва экспандируемых труб из этих сталей имеет низкую вязкость по сравнению с основным металлом. Поэтому необходимо изыскать такие сварочные материалы, которые повысили бы механические свойства металла шва до уровня основного металла трубы. Кроме того, металл шва должен обладать достаточной стойкостью против трещин, так как многодуговая сварка на повышенных скоростях сталей повышенной прочности усугубляет опасность появления трещин.

Легирование металла шва такими элементами, как хром, молибден, ванадий, ниобий, никель и др. дает возможность уменьшить его склонность к хрупкому разрушению. Влияние легирования на механические свойства металла шва изучали при сварке различными электродными проволоками, сопоставлялись свойства производимой промышленностью стали 17Г1С-У. Пластины 120x30x1,2 см соединяли двухдуговой сваркой под флюсом АН-60 при  $v_{cb}=150$  м/час. При выполнении первого шва удельное тепловложение составляло  $6500 \div 7000$  кал/см, второго  $-7400 \div 7800$  кал/см.

Стойкость против хрупкого разрушения оценивается по ударной вязкости, равной  $3,5$  Дж/см<sup>2</sup> при  $-60$  °C. Испытания проводились на образцах Гагарина, изготовленных из металла второго шва и стали 17Г1С-У. Равнопрочность металла шва и нормализованной стали 17Г1С-У с содержанием элементов на верхнем пределе марочного состава обеспечивает почти все электродные проволоки, за исключением Св-08ГА (табл. 2).

**Таблиця 2 – Хіміческий склад і механічні властивості дослідженого матеріалів**

| Матеріал      | Содержання, % |      |      |      |      |      |   |       |       | $\sigma_b$ ,<br>МПа | $\sigma_t$ ,<br>МПа | $\Delta_s$ ,<br>% | $\Psi$ ,<br>% |
|---------------|---------------|------|------|------|------|------|---|-------|-------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------|
|               | C             | Mn   | Si   | Cr   | Ni   | Mo   | V | S     | P     |                     |                     |                   |               |
| 17Г1С-У       |               |      |      |      |      |      |   |       |       |                     |                     |                   |               |
| нормалізована | 0,19          | 1,36 | 0,54 | 0,24 | 0,10 | -    | - | 0,026 | 0,024 | 620                 | 420                 | 286               | 620           |
| Св-08ГА       | 0,09          | 1,48 | 0,49 | 0,20 | 0,09 | -    | - | 0,023 | 0,023 | 571                 | 407                 | 278               | 640           |
| Св-12М        | 0,11          | 1,28 | 0,56 | 0,24 | 0,10 | 0,16 | - | 0,022 | 0,023 | 629                 | 476                 | 265               | 566           |
| Св-10НМА      | 0,09          | 1,29 | 0,43 | 0,22 | 0,48 | 0,12 | - | 0,023 | 0,022 | 652                 | 507                 | 259               | 572           |
| Св-08ГМ       | 0,11          | 1,37 | 0,58 | -    | -    | 0,24 | - | 0,024 | 0,029 | 747                 | 681                 | 208               | 501           |
| Св-08ХМ       | 0,12          | 1,34 | 0,55 | 0,46 | 0,10 | 0,16 | - | 0,020 | 0,023 | 653                 | 495                 | 250               | 583           |
| Св-08Г1НМА    | 0,13          | 1,30 | 0,40 | 0,20 | 0,56 | -    | - | 0,020 | 0,021 | 635                 | 465                 | 262               | 580           |
| Св-06Н3А      | 0,11          | 1,30 | 0,40 | 0,20 | 1,09 | -    | - | 0,024 | 0,021 | 646                 | 504                 | 281               | 602           |

Склонність основного металла і шва к хрупкому розриву визначали на ударних образцах типу VI (ГОСТ 6996-66). Надріз наносили со сторони другого шва, по його центральній осі. Результати показали, що для металла шва це вимірювання можна виконати при використанні проволок типів Св-12М, Св-08ХМ, Св-08ХМФА, Св-08ХМФБ, Св-10НМА і Св-06Н3А (табл. 3).

**Таблиця 3 – Ударна вязкість (KCV) і уделна робота ( $a_p$ ) металла шва**

| Матеріал           | KCV (Дж/см <sup>2</sup> ) при температурах |                  |                    |                    |                    | $a_p$ (Дж/см <sup>2</sup> ) при температурах |                  |                    |                    |                    |
|--------------------|--|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                    | +20 <sup>0</sup> C                         | 0 <sup>0</sup> C | -20 <sup>0</sup> C | -40 <sup>0</sup> C | -60 <sup>0</sup> C | +20 <sup>0</sup> C                           | 0 <sup>0</sup> C | -20 <sup>0</sup> C | -40 <sup>0</sup> C | -60 <sup>0</sup> C |
| 17Г1С-У            |  |                  |                    |                    |                    |  |                  |                    |                    |                    |
| нормалі-<br>зована | 87   | 80               | 69                 | 52                 | 50                 | 35   | 28               | 21                 | 18                 | 13                 |
| Св-08ГА            | 111  | 91               | 73                 | 51                 | 19                 | 47   | 27               | 17                 | 14                 | 10                 |
| Св-12М             | 101  | -                | 62                 | 56                 | 39                 | 55   | -                | 33                 | 23                 | 20                 |
| Св-10НМА           | 99   | 90               | 77                 | 62                 | 56                 | 52   | 41               | 33                 | 28                 | 17                 |
| Св-08ГМ            | 98   | 69               | 66                 | 58                 | 45                 | 32   | 30               | 34                 | 25                 | 20                 |
| Св-08ХМ            | 80   | 71               | 60                 | 56                 | 48                 | 37   | 33               | 29                 | 29                 | 46                 |
| Св-08Г1НМА         | 99   | 81               | 71                 | 64                 | 48                 | 43   | 31               | 25                 | 24                 | 17                 |
| Св-06Н3А           | 90   | 71               | 68                 | 45                 | 45                 | 42   | 32               | 27                 | 16                 | 16                 |

Болільшу ударну вязкість при негативних температурах має металла шва, зварений проволокою Св-10НМА. В процесі технологічного передела металла деформується, поєтому ударна вязкість металла шва на трубі буде нижчою, ніж у шва на пластині.

Ударна вязкість є інтегральною характеристикою, яка не дає повного представлення про окремі етапи руйнування. Болільш показателевими характеристиками хрупкості сталі є уделна робота  $a_p$  і швидкість розширення тріщин  $v_{tr}$ . На рис. 1 зображені залежності середньої швидкості розширення тріщин  $v_{tr}$  в зразку від температури металла шва і нормалізованої сталі 17Г1С-У, а на рис. 2 -  $v_{kp}$  до  $v_{kp,tr}$ . Кінетичкий критерій склонності металла до хрупкого руйнування  $v_{tr}$  більш тісно пов’язаний з легуванням металла шва, ніж енергетичний критерій  $a_p$ . Резке зростання величини  $v_{tr}$  говорить про переход металла зразка в хрупке стан. Це підтверджується більшою сопротивляемістю розширенню тріщин металла швів, зварених проволоками Св-08ХМ і Св-08ГМ під флюсом АН-60.

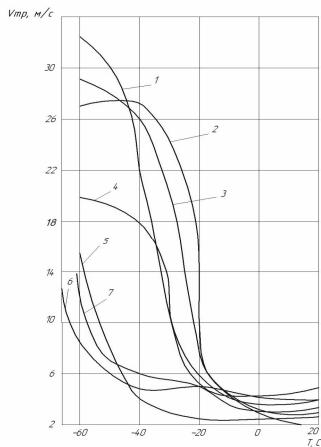
### Выводы

Виконано аналіз впливу хіміческого складу сталі на механічні властивості, структуру і склонність до утворення холодних тріщин металла шва низколегізованих сталей з підвищеною і високою міцністю.

Для забезпечення рівноміцності з основним металлом і високою сопротивляемістю металла шва сталі 17Г1С-У утворенню і розширенню тріщин, без проведення попереднього подогріву перед зваркою під флюсом АН-60, рекомендовано зварювальні

## Технологія машинобудування

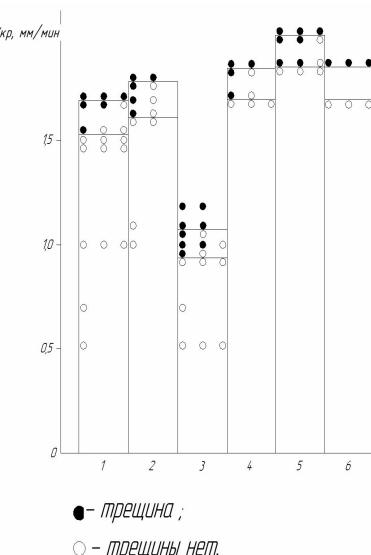
проволоки Св-08ГМ и Св-08ХМ. Применение которых позволит снизить скорость распространения трещин и возможно увеличить критическую скорость деформации.



Металл шва наплавленний на сталь 17Г1С-У под флюсом АН-60 сварочными проволоками: 1 – Св08ГА, 2 – Св-Г2М, 3 – Св-10НМА, 4 – Св-08ГМ, 5 – Св-06Н3А, 6 – Св-08Г1НМА, 7 – Св-06Н3А

**Рис. 1** – Скорость распространения трещин

Разработка рациональной технологии сварки способствует расширению применения низколегированных сталей повышенной и высокой прочности (вместо углеродистых и не упрочненных низколегированных сталей) для изготовления сварных металлических конструкций, что обеспечит снижение их металлоемкости на 25-35%.



**Рис. 2** – Критическая скорость деформации до появления трещины

### Список использованных источников:

1. Касаткин Б. С. Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций / Б. С. Касаткин, В. Ф. Мусиаченко. - Киев: Техника, 1990.-188с.
2. Чабуркин В. Ф. Холодные трещины при сварке низколегированных сталей повышенной и высокой прочности / В. Ф. Чабуркин. - М.: Машиностроение, 1986.- 72с.
3. Касаткин Б. С. Особенности процесса образования холодных трещин в сварных соединениях низколегированных высокопрочных сталей / Б. С. Касаткин, В. И. Бреднев // Автоматическая сварка. – 1985. – № 8. – С. 1-6, 18.
4. Влияние водорода на склонность к образованию трещин в ЗТВ с концентратором напряжений / Б. С. Касаткин, О. Д. Смиян, В. Е. Михайлов [и др.] // Автоматическая сварка. – 1986. – № 11. – С. 20-23.
5. Neues in derschweisstechnik 1998 / E. H. Herold, M. Zinke. H. Zwickert et al. // Schweissen und Schneiden. – 1999. – № 5. - S.266-288.
6. Счастливцев В. М. Влияние режимов термомеханической обработки на структуру и механические свойства листового проката из низколегированных сталей / В. М. Счастливцев, Т. И. Табатчикова // Вопросы материаловедения. - 2005. - №3(43).-С.13-23.
7. Бреднев В. И. Удельная работа образования очагов холодных трещин при сварке низколегированных сталей / В. И. Бреднев // Автоматическая сварка. – 1988. – № 11. – С. 3-8,11.
8. Мотовилина Г. Д. Влияние структуры на хладостойкость низколегированной стали / Г. Д. Мотовилина, В. В. Орлов, Е. И. Хлусова // Вопросы материаловедения. – 2005. – №3(43).-С.5-13.

### References

1. Kasatkin, B & Musiachenko, V 1990, *Nizkolegirovannyye stali vysokoi prochnosti dlia svarnykh konstrukcii*, Tekhnika, Kiev.
2. Chaburkin, V 1986, *Kholodnyye treshchiny pri svarke nizkolegirovannykh stalei povyshennoi i vysokoi prochnosti*, Mashinostroyeniye, Moskva.
3. Kasatkin, B & Brednev, V 1985, 'Osobennosti protcessa obrazovaniia kholodnykh treshchin v svarnykh soyedineniiaakh nizkolegirovannykh vysokopropochnykh stalei', *Avtomatischeeskaya svarka*, no. 8, pp. 1-6, 18.
4. Kasatkin, Smiian, O & Mikhailov, V 1986, 'Vliianiye vodoroda na sklonnost k obrazovaniu treshchin v ZTV s kontcentratorom napriazhenii', *Avtomatischeeskaya svarka*, no. 11, pp. 20-23.
5. Herold, E, Zinke, M & Zwickert, H 1999, 'Neues in derschweisstechnik', *Schweissen und Schneiden*, no. 5, pp. 266-288.
6. Schastlivtcev, V & Tabatchikova, T 2005, 'Vliianiye rezhimov termomekhanicheskoi obrabotki na strukturu i mekhanicheskiye svoistva listovogo prokata iz nizkolegirovannykh stalei', *Voprosy materialovedeniia*, no. 3(43), pp.13-23.
7. Brednev, V 1988, 'Udelnaia rabota obrazovaniia ochagov kholodnykh treshchin pri svarke nizkolegirovannykh stalei', *Avtomatischeeskaya svarka*, no. 11, pp. 3-8, 11.
8. Motovilina, G, Orlov, V & Khlusova, E 2005, 'Vliianiye struktury na khladostoikost nizkolegirovannoi stali', *Voprosy materialovedeniia*, no. 3(43), pp. 5-13.

Стаття надійшла до редакції 03 квітня 2017 р.