

## ПОВЫШЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ МЕТАЛЛА КОМБИНИРОВАННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛЕГИРОВАННЫХ БЕЙНИТНЫХ СТАЛЕЙ

С. И. МОРАВЕЦКИЙ<sup>1</sup>, А. К. ЦАРЮК<sup>1</sup>, А. В. ВАВИЛОВ<sup>2</sup>, А. Г. КАНТОР<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ПАО «Турбоатом». 61037, г. Харьков, Московский просп., 199. E-mail: office@turboatom.com.ua

Сформулирован возможный подход в разработке технологии изготовления комбинированных сварных соединений бейнитных сталей применительно к ответственным сварным узлам, основанный на целенаправленном задании оптимального содержания легирующих элементов и примесей в основном и присадочном металле в рамках их марочного состава по нормативным документам и способствующий повышению их эксплуатационных характеристик. Сравнение результатов экспериментальных исследований, полученных в рамках стандартной аттестации технологии сварки, позволяет предположить об эффективности реализованного подхода. Библиогр. 9, табл. 2.

*Ключевые слова:* легированная сталь, роторная сталь, комбинированные сварные соединения, сварочные материалы, химический состав, сварка под флюсом, термическая обработка, отпускная хрупкость, ударная вязкость

В ПАО «Турбоатом» создана паровая турбина нового поколения К-325-23,5, отвечающая современным требованиям по надежности, экономичности и маневренности [1]. Для этой турбины спроектирован сварнокованный комбинированный ротор цилиндра среднего давления, работающий в высоко- и низкотемпературном режиме [2]. Часть ротора, работающая в высокотемпературном режиме (1–11 ступень), изготавливается из стали ЭИ 415 (20Х3МВФА). Часть ротора, работающая в низкотемпературном режиме (12–16 ступени), изготовлена из стали 25Х2НМФА. Эти стали принадлежат к одному структурному классу, но отличаются системой легирования. В стали ЭИ 415 содержание никеля в 2,6 раза ниже, чем в 25Х2НМФА, а хрома — в 1,5 раза выше. Кроме того, сталь ЭИ 415 содержит сильные карбидообразующие элементы ванадий и вольфрам. Благодаря указанным особенностям легирования сталь ЭИ 415 имеет более высокую фазовую стабильность при повышенных температурах, что определяет ее выбор для изготовления участка ротора, работающего в высокотемпературном режиме.

Ранее разработана технология получения комбинированного сварного соединения сталей ЭИ 415 и 25Х2НМФА (далее — соединение ЭИ 415 + 25Х2НМФА) с использованием проволоки марки Union S 3 NiMoCr (тип A-S 55 4 по ISO 26304) в сочетании с флюсом марки UV 420 TT (тип SA FB 1 65 DC по ISO 14174). В основу ее положен подход, в соответствии с которым получают однородные сварные соединения стали 25Х2НМФА: заполнение U-образной разделки постоянной ширины способом многопроходной сварки под

флюсом с предварительным подогревом основного металла до 350 °С и послесварочный высокий отпуск 40 ч при температуре 630 °С. Однако результаты исследовательской аттестации этой технологии показали, что температура отпуска, оптимальная для металла зоны сплавления шва со сталью 25Х2НМФА, оказалась недостаточной для обеспечения требуемой ударной вязкости металла зоны сплавления шва со сталью ЭИ 415 независимо от применяемых сварочных материалов [2]. Так, при температуре 20 °С среднее значение KCV металла сварного соединения шов — сталь ЭИ 415 (надрез по зоне сплавления) составило 42 Дж/см<sup>2</sup>. Это значение ниже требуемого значения ударной вязкости ( $\geq 59$  Дж/см<sup>2</sup>) для металла однородных сварных соединений стали 25Х2НМФА, установленной технической документацией на изготовление роторов турбин и априори распространенного на соединения ЭИ 415 + 25Х2НМФА.

Поэтому дальнейшей целью было изыскание технологических возможностей для повышения KCV металла зоны сплавления на стали ЭИ 415 до требуемого значения. При этом желательно сохранить отличающийся простотой процесс сварки сталей 25Х2НМФА и ЭИ 415 между собой как однородного соединения (без предварительной наплавки на кромку основного металла, промежуточной термообработки и т. п.). Для достижения указанной цели проводился анализ ранее полученных результатов исследовательской аттестации технологии сварки соединений ЭИ 415 + 25Х2НМФА [2] в сопоставлении с конкретными условиями сварки аттестуемого контрольного сварного соединения (КСС) и известными закономерностями измене-

ния механических свойств при отпуске легированных сталей.

Результаты исследований [3–6] позволяют предположить, что наиболее вероятной причиной пониженной ударной вязкости зоны сплавления на стали ЭИ 415 является отпускная хрупкость. Известно отрицательное влияние вредных примесей, прежде всего фосфора, на склонность низко- и среднелегированных сталей к охрупчиванию. Особенно резко проявляется вредное влияние фосфора, вводимого совместно с марганцем при содержании последнего 1 % и выше. Подобно марганцу, увеличивает склонность сталей к отпускной хрупкости также и кремний, причем рост содержания кремния расширяет опасный интервал в сторону высоких температур.

Обобщенно, для большинства рассматриваемых сталей, температурным интервалом развития явлений отпускной хрупкости может считаться 250...650 °С [4–6]. Внутри этого интервала находятся температуры предварительного и сопутствующего подогрева, при которых обычно ведут сварку роторных сталей с целью получения в металле ЗТВ минимального содержания продуктов бездиффузионного распада аустенита и предупреждения замедленного разрушения сварных соединений.

При отпуске сварных соединений роторных сталей также невозможно избежать их пребывания в опасном интервале температур, поскольку для толстостенных крупногабаритных сварных узлов после выдержки при температуре отпуска возможно только медленное охлаждение с печью. Поэтому, в принципе, для любого участка сварного соединения любой роторной стали после термообработки неизбежно некоторое охрупчивание и соответствующее снижение ударной вязкости по сравнению с тем уровнем, который был бы достигим при ускоренном охлаждении роторов после отпуска.

В случае проведения отпуска сварного соединения роторной стали при оптимальной температуре (выше температурного интервала охрупчивания этой стали) конечная степень охрупчивания металла сварного соединения получается невысокой, так как определяется лишь временем выдержки в опасном интервале при остывании изделия с печью. Это подтверждает практика получения однородных сварных соединений стали 25Х2НМФА, после отпуска которых при 630 °С в течение 40 ч требование к ударной вязкости  $KCV$  ( $\geq 59$  Дж/см<sup>2</sup>) металла зоны сплавления обеспечивается с заметным запасом. В то же время для стали ЭИ 415 нижний предел рекомендуемых температур отпуска по ТУ 108-1029-81 составляет 660 °С. Поэтому можно предположить, что принятая температура отпуска соединений ЭИ 415 +

+ 25Х2НМФА (630 °С) входит в опасный интервал для стали ЭИ 415. В этом случае металл зоны сплавления на стали ЭИ 415 находится в опасном интервале на всех стадиях получения сварного соединения (предварительный и сопутствующий подогрев при сварке; транспортировка в печь; нагрев, выдержка при температуре высокого отпуска и остывание с печью). Тогда и выявляемые механическими испытаниями пониженные значения ударной вязкости металла зоны сплавления на стали ЭИ 415 в комбинированном соединении являются, по-видимому, закономерным результатом его многочасовой выдержки в широком интервале температур, в котором в стали ЭИ 415 может развиваться совокупность явлений отпускного охрупчивания различной природы.

Устранить охрупчивание стали ЭИ 415 и металла всех зон ее сварного соединения может лишь отпуск выше опасного интервала, т. е. при рекомендуемых для нее температурах ( $\geq 660$  °С). Но проведение послесварочного отпуска соединений ЭИ 415 + 25Х2НМФА при температурах  $\geq 660$  °С недопустимо, поскольку ведет к разупрочнению стали 25Х2НМФА [6], температура отпуска которой по ТУ 108-995-81 630...650 °С. При отсутствии возможности повысить температуру послесварочного отпуска комбинированного ротора остается лишь возможность воздействовать на другие факторы, определяющие склонность стали ЭИ 415 к отпускному охрупчиванию, ее химический состав и длительность пребывания металла в опасном интервале.

Особенностями стали ЭИ 415, выбранной для изготовления высокотемпературной части комбинированного ротора паровой турбины К-325-23,5 для Углегорской ТЭС, в отличие от стали, использованной в ранее аттестуемом КСС [2], было весьма низкое содержание фосфора и сведенное к минимуму содержание кремния (табл. 1).

Длительность пребывания металла комбинированного сварного соединения в наиболее опасной области интервала охрупчивания стали ЭИ 415 сокращена установлением жестких требований к температуре сопутствующего подогрева, контролю во время сварки температуры основного металла в окрестности разделки и активному ее регулированию за счет изменения мощности нагревательного устройства с целью предотвращения перегрева. Как правило, назначают нижний предел температуры предварительного и сопутствующего подогрева комбинированного сварного соединения ЭИ 415 + 25Х2НМФА — 350 °С. При положительной температуре окружающей среды в ходе непрерывной автоматической сварки кольцевого соединения температура металла вследствие автоподогрева довольно скоро начина-

ет превышать назначенную. Ввиду представления о требуемой температуре предварительного подогрева стали ЭИ 415 (400...500 °С), которое давно сложилось в практике сварки однородных соединений этой стали [7, 8], эффект автоподогрева металла соединения ЭИ 415 + 25Х2НМФА до сих пор не считался нежелательным. Поэтому в процессе заполнения глубокой разделки температура сопутствующего подогрева металла шва и прилегающих к нему участков основного металла могла длительно составлять 400...450 °С или выше. Главным образом это касается натурной модели ротора, содержащей КСС ЭИ 415 + 25Х2НМФА, на котором воспроизводят аттестуемый процесс сварки. Различия в массогабаритных показателях и теплоемкости ротора и его натурной модели способствуют особенно сильному перегреву последней (до максимальных значений указанного выше интервала температур).

Между тем, с точки зрения известных фактов, выдержка металла свариваемого соединения легированных сталей в этом интервале может вести к нежелательным последствиям. Во-первых, он входит в интервал обратимой отпускной хрупкости сталей 375...575 °С [5]. Во-вторых, вследствие чрезмерно низкой скорости охлаждения  $w_{6/5}$  и завышенной температуры распада аустенита могут происходить неблагоприятные изменения состава продуктов распада. Стабилизируется  $\gamma$ -фаза и растет содержание остаточного аустенита. Кроме бейнита и маргенсита также может появляться феррит [9]. Это означает не что иное, как повышение степени микрохимической (фазовой) неоднородности металла участка перегрева и отрицательно сказывается на его механических свойствах и склонности к замедленному разрушению.

Поэтому в рамках производственной аттестации технологии (перед сваркой ротора для Углегорской ТЭС) в ходе сварки КСС ЭИ 415 + 25Х2НМФА измерение температуры сопутствующего подогрева сочетали с изменением мощности пламени газово-

го нагревателя (по мере необходимости). Благодаря регулированию мощности газового нагревателя все значения температуры предварительного и сопутствующего подогрева металла КСС, измеренные во время многопроходной сварки, находились в интервале 316...365 °С.

Таким образом, все изменения в ранее разработанной технологии сварки соединений ЭИ 415 + 25Х2НМФА заключались лишь в указанном ограничении сверху интервала температур сопутствующего подогрева и различиях в химическом составе основного металла стали ЭИ 415 в аттестуемых КСС, представленных в табл. 1. Другие условия и параметры технологии сварки, методы исследования механических свойств металла КСС, схемы вырезки образцов для испытаний на ударный изгиб оставались неизменными и подробно описаны в работе [2].

Результаты оценки ударной вязкости участков металла КСС, полученного в ходе производственной аттестации измененной технологии сварки, приведены в табл. 2 в сравнении с аналогичными результатами исследовательской аттестации [2]. Совокупное влияние изменения температуры сопутствующего подогрева и содержания кремния и фосфора в основном металле стали ЭИ 415 оказалось достаточно эффективным. Среднее значение ударной вязкости металла сварного соединения (надрез по зоне сплавления шва и стали ЭИ 415) повысилось почти в два раза. Разницу в содержании фосфора и особенно марганца в металле шва КСС, аттестуемого по измененной технологии, в сравнении с аналогичными значениями по результатам исследовательской аттестации (табл. 1) можно считать пренебрежимо малой. Тогда отмеченное повышение на 68 % среднего значения *KCV* металла шва (надрез по высоте шва) можно объяснять почти исключительно за счет благоприятного влияния измененного теплового режима многопроходной сварки.

Полученные значения *KCV* с надежным запасом удовлетворяют требование к ударной вяз-

Таблица 1. Содержание элементов в стали ЭИ 415 (ТУ 108-1029-81) в составе КСС ЭИ 415 + 25Х2НМФА и металле их швов, мас. %

| Объект контроля                               | C           | Si     | Mn          | Ni     | Cu     | Cr          |
|---|-------------|--------|-------------|--------|--------|-------------|
| Сталь ЭИ 415 по ТУ 108-1029-81                | 0,17...0,24 | ≤ 0,40 | 0,25...0,60 | ≤ 0,50 | ≤ 0,25 | 2,40...3,30 |
| Сталь ЭИ 415 в КСС, аттестуемом в 2011 г. [2] | 0,22        | 0,27   | 0,32        | 0,30   | 0,12   | 3,14        |
| Сталь ЭИ 415 в КСС, аттестуемом в 2014 г.     | 0,23        | 0,059  | 0,35        | 0,38   | 0,15   | 2,71        |
| Металл шва в КСС, аттестуемом в 2011 г. [2]   | 0,088       | 0,32   | 1,61        | 2,31   | -      | 0,44        |
| Металл шва в КСС, аттестуемом в 2014 г.       | 0,088       | 0,37   | 1,41        | 2,31   | -      | 0,72        |

Продолжение табл. 1.

| Объект контроля                               | Mo          | V           | W           | S       | P       |
|---|-------------|-------------|-------------|---------|---------|
| Сталь ЭИ 415 по ТУ 108-1029-81                | 0,35...0,55 | 0,45...0,70 | 0,30...0,50 | ≤ 0,022 | ≤ 0,025 |
| Сталь ЭИ 415 в КСС, аттестуемом в 2011 г. [2] | 0,40        | 0,66        | 0,40        | 0,010   | 0,012   |
| Сталь ЭИ 415 в КСС, аттестуемом в 2014 г.     | 0,41        | 0,50        | 0,32        | 0,003   | 0,005   |
| Металл шва в КСС, аттестуемом в 2011 г. [2]   | 0,60        | -           | -           | 0,009   | 0,022   |
| Металл шва в КСС, аттестуемом в 2014 г.       | 0,50        | 0,018       | -           | 0,012   | 0,017   |

Таблица 2. Результаты испытаний\* на ударный изгиб при температуре 20 °С металла КСС ЭИ 415 + 25Х2НМФА, Дж/см<sup>2</sup>

| Место выполнения острого надреза        | Технологические условия получения сварного соединения ЭИ 415 + 25Х2НМФА   |   |
|---|---|---|
|   | Сталь ЭИ 415 среднестатистического марочного состава, сварка с предварительным подогревом до 350 °С и последующим длительным перегревом выше 365 °С | Ограничение Si и P в стали ЭИ 415 (согл. табл. 1) и температуры сопутствующего подогрева (не выше 365 °С) |
| По зоне сплавления шва со сталью ЭИ 415 | <u>23,6; 64,5; 37,5</u><br>41,9   | <u>70,2; 72,7; 105,4</u><br>82,8  |
| По высоте шва                           | <u>64,7; 61,8; 51,1</u><br>59,2   | <u>89,6; 136,1; 74,0</u><br>99,9  |

\* Испытания проводили на трех образцах.

кости ( $\geq 59$  Дж/см<sup>2</sup>) металла комбинированного сварного соединения роторных сталей при комнатной температуре. Все остальные характеристики механических свойств любого участка КСС ЭИ 415 + 25Х2НМФА, полученного по измененной технологии, также соответствуют установленным требованиям.

Как один из результатов приобретенного опыта сварки комбинированных соединений роторных сталей, уместно отметить роль и обобщить реализованный выше подход, который, по-видимому, в ряде случаев может быть весьма продуктивным как при самостоятельном применении, так и в сочетании с другими технологическими мероприятиями. Это подход, в соответствии с которым поиск резервов для приближения контролируемой характеристики к требуемому значению проводится в допускаемых нормативными документами интервалах содержания легирующих элементов и примесей в сталях [6]. Этот путь может быть наиболее рациональным для совершенствования технологии получения комбинированных сварных соединений двух бейнитных сталей, например, когда интервалы оптимальных температур их отпуска не совпадают и проведением послесварочного отпуска обеспечить соответствие отдельных характеристик требуемым значениям не удастся, а степень несоответствия невелика. Реализация указанного подхода должна состоять в том, что послесварочный отпуск комбинированного соединения «сталь 1 + шов + сталь 2» проводится при температуре, гарантирующей надлежащие механические свойства всех участков сварного соединения стали 1. При этом на основе общих знаний о влиянии легирующих элементов и примесей на контролируемую характеристику устанавливается наиболее благоприятный химический состав стали 2 (но в пределах ее нормативного марочного состава) и проводится согласование более жестких требований к содержанию одного или нескольких элементов с изготовителем этой стали.

То же может касаться и наплавленного металла, и в этом случае проводится согласование особых требований к содержанию легирующих элементов с изготовителем сварочных материалов. Имеется положительный опыт такого согласования, в ходе которого предприятие-поставщик сварочной проволоки

марки Union S 3 NiMoCr выразило готовность обеспечить ее химический состав в рамках ISO 26304, но в требуемых более узких пределах.

### Выводы

1. Сформулирован технологический подход, который может быть полезным при совершенствовании технологии получения комбинированных сварных соединений бейнитных сталей. При невозможности послесварочного отпуска комбинированного сварного соединения указанных сталей при температуре выше интервала охрупчивания одной из этих сталей уменьшить склонность к отпускному охрупчиванию и обеспечить соответствие ударной вязкости металла зоны сплавления этой стали требуемым значениям можно путем ограничения в этой стали содержания кремния и (или) марганца в рамках нормативного марочного состава стали, а также фосфора.

2. Предварительный подогрев металла комбинированных сварных соединений сталей ЭИ 415 и 25Х2НМФА до температуры 350 °С и недопущение его перегрева при многопроходной сварке под флюсом выше 365 °С (сварка при температуре сопутствующего подогрева существенно ниже той, которая до сих пор считалась необходимой для стали ЭИ 415) оказывает благоприятное влияние на ударную вязкость участка перегрева на стали ЭИ 415.

3. Результаты исследований в рамках производственной аттестации технологии сварки под флюсом комбинированного соединения сталей ЭИ 415 и 25Х2НМФА подтвердили пригодность аттестованной технологии для изготовления комбинированного ротора цилиндра среднего давления паровой турбины К-325-23,5 для тепловых электростанций.

### Список литературы

1. Суботін В. Г., Левченко Є. В., Швецов В. Л. та ін. (2009) *Створення парових турбін нового покоління потужністю 325 МВт*. Харків, Фоліо.
2. Царюк А. К., Скульский В. Ю., Моравецкий С. И. и др. (2012) Создание сварно-кованого комбинированного ротора среднего давления паровой турбины мощностью 325 МВт. *Автоматическая сварка*, **8**, 39–44.
3. Гольдштейн Я. Е. (1963) *Низколегированные стали в машиностроении*. Москва–Свердловск, МАШГИЗ.

4. Браун М. П. (1965) *Комплекснолегированные конструкционные стали*. Киев, Наукова думка.
5. Новиков И. И. (1978) *Теория термической обработки металлов*. Учебник. Изд. 3-е, испр. и доп. Москва, Металлургия.
6. Земзин В. Н., Шрон Р. З. (1978) *Термическая обработка и свойства сварных соединений*. Ленинград, Машиностроение.
7. Тимофеев М. М., Васильченко Г. С. (1962) Создание дисков из разнородных сталей для газовой турбины ЭГТУ 1000. *Вопросы сварки в энергомашиностроении*. Сборник ЦНИИТМАШ, книга 104. Яровинский Л. М. (ред.). Москва, МАШГИЗ, сс. 100–109.
8. Герман С. И. (1972) *Электродуговая сварка теплоустойчивых сталей перлитного класса*. Москва, Машиностроение.
9. Шоршоров М. Х., Белов В. В. (1972) *Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке*. Атлас. Москва, Наука.

## References

1. Subotin, V.G., Levchenko, E.V., Shvetsov, V.L. et al. (2009) *Development of steam turbines of new generation of 325 MW power*. Kharkiv, Folio [in Ukrainian].
2. Tsaryuk, A.K., Moravetsky, S.I., Skulsky, V.Yu. et al. (2012) Development of forge-welded combined medium-pressure rotor for 325 MW steam turbine. *The Paton Welding J.*, **8**, 36-41.
3. Goldshhtejn, Ya.E. (1963) *Low-alloyed steels in machine-building*. Moscow-Sverdlovsk, MASHGIZ [in Russian].
4. Braun, M.P. (1965) *Complexly-alloyed structural steels*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Novikov, I.I. (1978) *Theory of heat treatment of metals: Manual*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
6. Zemzin, V.N., Shron, R.Z. (1978) *Heat treatment and properties of welded joints*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
7. Timofeev, M.M., Vasilchenko, G.S. (1962) Development of discs from dissimilar steels for gas turbine EGTU 1000. *Problems of welding in power machine-building*. In: *Transact. of TsNIITMASH, Book 104*. Yarovinsky, L.M. (ed), Moscow, MASHGIZ, 100-109 [in Russian].
8. German, S.I. (1972) *Electric arc welding of heat-resistant steels of pearlitic class*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
9. Shorshorov, M.Kh., Belov, V.V. (1972) *Phase transformations and changes of properties in welding*: Atlas. Moscow, Nauka [in Russian].

C. I. Моравецький<sup>1</sup>, А. К. Царюк<sup>1</sup>,  
О. В. Вавілов<sup>2</sup>, О. Г. Кантор<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
<sup>2</sup>ПАТ «Турбоатом». 61037, м. Харків,

Московський просп., 199.  
E-mail: office@turboatom.com.ua

## ПІДВИЩЕННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ МЕТАЛУ КОМБІНОВАНИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЛЕГОВАНИХ БЕЙНІТНИХ СТАЛЕЙ

Сформульовано можливий підхід в розробці технології виготовлення комбінованих зварних з'єднань бейнітних сталей застосований до відповідальних зварних вузлів, заснований на цілеспрямованому завданні оптимального складу легуючих елементів і домішок в основному та присадному металі у рамках їх марочного складу згідно з нормативними документами і сприяє підвищенню їх експлуатаційних характеристик. Порівняння результатів експериментальних досліджень, отриманих у рамках стандартної атестації технології зварювання, дозволяє припустити щодо ефективності реалізованого підходу. Бібліогр. 9, табл. 2.

**Ключові слова:** легована сталь, роторна сталь, комбіновані зварні з'єднання, зварювальні матеріали, хімічний склад, зварювання під флюсом, термічна обробка, відпускна крихкість, ударна в'язкість

S.I. Moravetsky<sup>1</sup>, A.K. Tsaryuk<sup>1</sup>, A.V. Vavilov<sup>2</sup>, A.G. Kantor<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kiev-150, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
<sup>2</sup>PJSC «Turboatom». 199, Moscow Ave., 61037, Kharkov,  
Ukraine. E-mail: office@turboatom.com.ua

## IMPROVEMENT OF IMPACT TOUGHNESS OF METAL OF COMBINED WELDED JOINTS OF ALLOYED BAINITE STEELS

A possible approach in the development of technology of producing combined welded joints of bainite steels was formulated as applied to critical welded units, based on the purposeful presetting the optimum content of alloying elements and impurities in the base and filler metal within their grade composition according to the standard documents and contributing to improvement of their service characteristics. The comparison of results of experimental investigations obtained within the standard certification of welding technology, allows suggesting that the implemented approach is effective. 9 Ref., 2 Tab.

**Keywords:** alloyed steel, rotor steel, combined welded joints, welding consumables, chemical composition, submerged welding, heat treatment, tempering brittleness, impact toughness

Поступила в редакцію 22.09.2017

## 1-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО СВАРКЕ И НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ 2018 1st ICWNDT-2018

22–24 октября 2018 г.

г. Афины, Греция

Адрес: WGI: Trapezountos & Digeni Akrita, Elefsina 192 00, Attikis, Greece.  
Phone (+30) 210 3630050, Fax (+30) 2103636917,  
Website: www.wgi.gr, E-mail: tzaferis@wgi.gr