

УДК 621.791

Д. И. Якубович, И. А. Лисовая, И. М. Лужанская

СНИЖЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ И ПОВЫШЕНИЕ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОКРЫТИИ ЭЛЕКТРОДОВ

UDC 621.791

D. I. Yakubovich, I. A. Lisovaya, I. M. Luzhanskaya

DECREASE IN NON-HOMOGENEITY OF WELDED JOINTS AND INCREASE OF THEIR MECHANICAL CHARACTERISTICS WHEN USING MODIFIED POWDER MATERIALS IN ELECTRODE COATING

Аннотация

Представлены результаты исследований по определению влияния модифицированных порошковых материалов на механические свойства наплавленного металла и сварного соединения при дуговой сварке покрытыми электродами. Проанализированы металлографические исследования, показывающие снижение неоднородности наплавленного металла сварных швов.

Ключевые слова:

дуговая наплавка; композиционные наплавочные материалы; модифицированные порошковые материалы; измельчение структуры зерна; снижение неоднородности наплавленного металла.

Abstract

The paper presents the results of research on the impact of modified powder materials on the mechanical properties of deposited metal and a welded joint in arc welding with coated electrodes. The metallographic studies showing a decrease in non-homogeneity of the deposited metal in welded joints have been analyzed.

Key words:

arc deposition; composite deposition materials; modified powder materials; grain structure refinement; decrease in non-homogeneity of deposited metal.

Введение

Анализируя порошковые материалы, вводимые в покрытие электродов для ручной дуговой сварки и наплавки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, можно отметить, что все многообразие используемых систем легирования сплавов на железной основе сводится к применению трех компонентов: Cr, Mn и Si, причем Cr является главным легирующим компонентом, формирующим свойства сплава.

В швах, полученных ручной дуговой сваркой покрытыми электродами,

наблюдается изменение содержания легирующих элементов как вдоль оси шва, так и от линии сплавления к центральной его части. Получение однородного сварного шва с равномерным распределением химических элементов по его сечению во многих случаях остается нерешенной задачей. Связано это с особенностями кристаллизации наплавленного металла и условиями её протекания. В ряде случаев отличия в концентрации таких элементов, как Mn, Si и Cr, могут быть очень значительными.

Порошкообразные наполнители,

полученные традиционными методами, широко применяются при изготовлении покрытия электродов. Возможности улучшения служебных свойств металлов и их прочностных характеристик при использовании в научной и практической сферах рассмотрены неплохо. Кроме этого, в теории сварочных процессов подробно описаны происходящие процессы плавления и кристаллизации компонентов, входящих в состав покрытия электродов, а также получаемые свойства наплавленного металла [1]. Однако расширение теоретических знаний и практического опыта применения в сварочных технологиях модифицированных порошковых материалов, обеспечивающих снижение уровня химической неоднородности, является перспективной и актуальной задачей.

Наряду со стандартными порошками, все более активно используются новые модифицированные композиционные порошковые материалы, полученные методом механического легирования [2–4], при котором структурообразование происходит при температурах, не превышающих линии солидуса, когда материал находится в твердой фазе. Данный процесс позволяет формировать композиции без существенных ограничений по составу и числу компонентов. В результате образуются модифицированные композиционные частицы порошка, имеющие новые фазы и химические соединения, которые при традиционных способах литья получить невозможно.

Исходя из вышесказанного, целью работы было увеличение микрохимической однородности сварных швов при дуговой сварке плавлением покрытыми электродами за счет применения модифицированных порошковых материалов.

Материалы, оборудование и методика исследований

Для проведения экспериментальной части исследований изготавливали электроды на основе стандартных электродов

марки МР-3 (ГОСТ 9466-75). В покрытие электродов дополнительно вводили порошок железа (ГОСТ 9849-86) и ферросплавов: феррокремний ФС75 (ГОСТ 1415-93), ферромарганец ФМн88А (ГОСТ 4755-91), феррохром ФХ850 (ГОСТ 4757-91). Размеры частиц всех исходных порошков находились в диапазоне от 63 до 160 мкм. Соотношения исходных компонентов в шихте составляли: FeCr – 5 %; FeMn – 0,9 %; FeSi – 1,5 %; Fe – 91,7 %.

Для определения влияния модифицированных композиционных материалов на свойства сварного шва изготовили две партии электродов. В первую партию к стандартному электродному покрытию добавили 15,8 и 27,4 % порошка без какой-либо обработки; во вторую партию – порошки, подвергнутые механическому легированию [1, 5–8] в том же процентном отношении.

Перед добавлением в шихту обмазки электродов первой партии порошки подвергали смешиванию в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 2 ч, размеры частиц порошков после смешения не изменялись.

Получение композиционного порошка второй партии осуществляли в механореакторе гирационного типа [1, 5] с объемом помольной камеры 1 дм³. В качестве размалывающих тел использовали стальные шары с твердостью поверхности 62 HRC. Размеры гранул после обработки находились в интервале от 10 до 90 мкм.

Электроды изготавливали методом прессования в металлических полуформах. Данный выбор обусловлен тем, что для первоначальных научных исследований, где необходима оперативность в проведении экспериментальной части, требуется небольшое количество разных по химическому составу электродов. Использовать оборудование и технологии массового производства в данном случае нецелесообразно. Изготовленные полуформы обеспечивали за-

крепление и центровку металлического стержня, а также равномерное распределение необходимого объема обмазочной массы по длине электрода с целью дальнейшего её обжарки. Покрытие электрода формировалось требуемого диаметра без эксцентриситета.

В процессе сварки полученными

электродами на токах 70...110 А после их естественной сушки при 18...25 °С в течение 24 ч дуга горела неустойчиво, с крупнокапельным переносом электродного металла и чрезмерным разбрызгиванием. Покрытие на оплавленном конце электрода вспучивалось или частично отделялось от стержня (рис. 1).

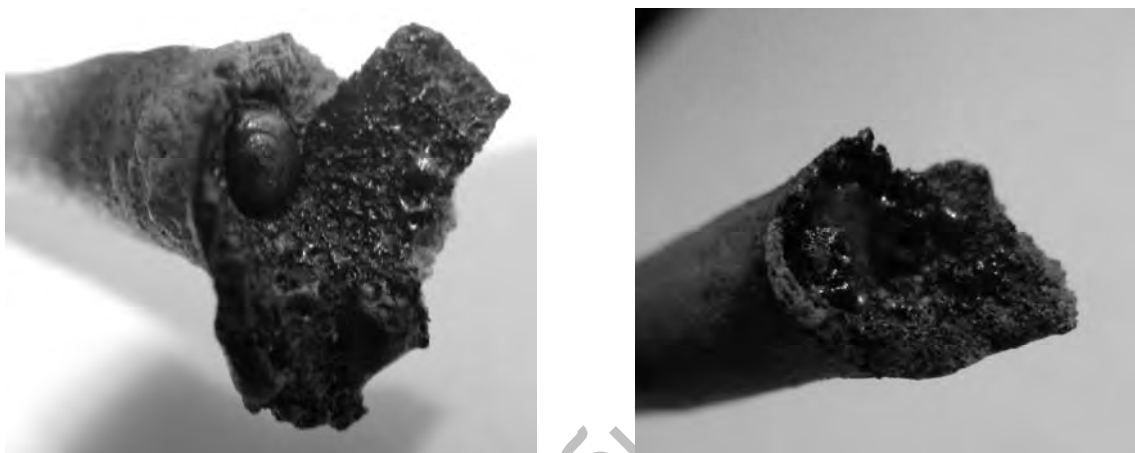


Рис. 1. Внешний вид оплавленной части сварочного электрода

Получить стабильное горение дуги и качественное формирование сварного шва не удалось. Прокалка сварочных электродов при 160...180 °С в течение 1,5 ч позволила полностью устранить данные недостатки. Размеры сварных швов стали соответствовать требованиям ГОСТ 5264-80.

Влияние модифицированных порошковых материалов на механические свойства наплавленного металла определяли на образцах, выполненных при помощи дуговой наплавки на специализированной установке и ручной дуговой сварки покрытыми электродами.

При реализации варианта наплавки равномерность объема наплавленного металла по длине шва особенно важна при рассмотрении влияния легирующих элементов на механические свойства металла. В этом случае небольшие от-

личия по ширине или высоте выпуклости наплавленного слоя могут привести к неоднородности химического состава. Добиться постоянства данных параметров при ручном способе наплавки сложно или невозможно. Колебания руки сварщика могут повлечь за собой отклонение ширины шва до 1 мм, а в отдельных случаях и более. Неравномерность скорости движения электрода вдоль оси шва приводит к таким же последствиям.

С целью минимизации изменения габаритных размеров сварного шва по его длине применили наплавку штучными наклонными электродами [9–12] на специально разработанной установке, состоящей из электрододержателя, каретки и стойки (схема представлена на рис. 2).

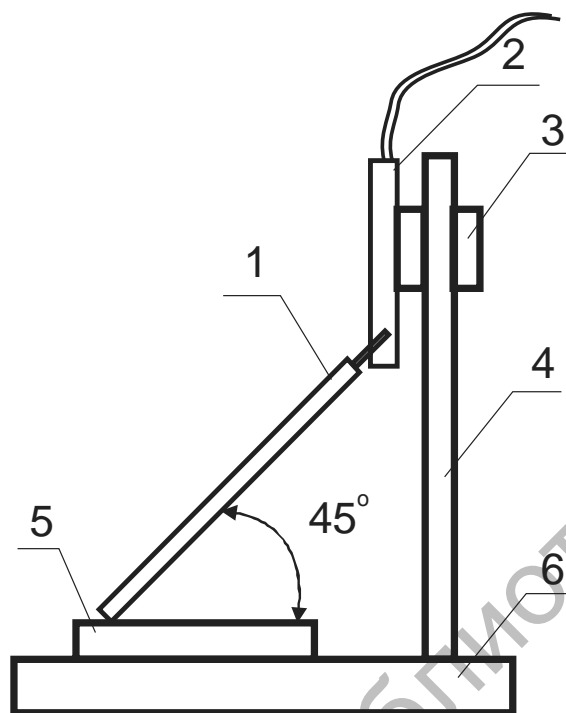


Рис. 1. Схема сварки наклонным электродом: 1 – электрод; 2 – электродержатель; 3 – каретка; 4 – стойка; 5 – изделие; 6 – основание

Одностороннюю наплавку производили по принципу падающего электрода с углом наклона электрода к изделию 45° , зажав держак на подвижной каретке, которая обеспечивала его вертикальное перемещение. Стойку крепили неподвижно к основанию, на котором располагалось изделие. Такой подход позволил автоматизировать процесс наплавки и обеспечил постоянную скорость плавления и перемещения электрода вдоль оси шва по мере его плавления. Формирование наплавленного слоя происходило с постоянными геометрическими размерами валика на всей его протяженности.

Для определения влияния модифицирующих добавок на механические свойства закристаллизовавшегося металла наплавку образцов осуществляли на пластины из стали 09Г2С размером 100×150 мм и толщиной 5 мм на следующих режимах: сила сварочного тока $I_{св} = 75 \dots 85$ А, скорость сварки $V_{св} = 12 \dots 13$ м/ч, диаметр электрода

$d_3 = 3$ мм. В процессе горения дуги кончик покрытия электрода опирался на изделие, что обеспечивало постоянную длину дуги. В качестве источника питания использовали источник питания Minarc-220.

На поверхности наплавленного слоя всех полученных образцов измеряли твердость по методу Бринелля твердомером ТБ 5004 с диаметром металлического шарика 5 мм и усилием нагрузки 7355 Н.

Для проведения металлографических исследований использовали сканирующий микроскоп TESCAN-LSH с приставкой для энергодисперсионного микроанализа INCA-ENERGY и оптический микроскоп Metam PB-21.

Контрольные образцы для испытаний на растяжение выполняли ручной дуговой сваркой покрытыми электродами традиционным способом без применения специально разработанной установки. Сваривали две пластины между собой (угол скоса кромок $\beta = 25^\circ$) на

следующих режимах: сила сварочного тока $I_{св} = 75...85$ А, скорость сварки $V_{св} = 8...9$ м/ч, длина дуги $l_d = 3...4$ мм. Сварной шов формировался за два прохода: первый шов обеспечивал заварку корня шва, второй – заполнение разделки кромок. Размеры полученных сварных швов соответствовали требованиям ГОСТ 5264-80. Из каждого сварного соединения вырезали по три контрольных образца. Испытания сварного соединения на статическое растяжение осуществляли по ГОСТ 6996-66 на разрывной машине МУП-50.

Результаты исследований и их обсуждение

При добавлении в стандартное покрытие электродов марки МР-3 порошка в количестве 15 и 27,3 %, не подверг-

нутого модифицированию, в обоих случаях (образцы 1 и 2) среднее значение твердости на поверхности наплавленного шва составило 167 и 168 НВ соответственно. Результаты измерений представлены в табл. 1.

С добавлением модифицированных порошков в тех же процентных отношениях (образцы 3 и 4) твердость составила в среднем 180 и 184 НВ, а ее увеличение – 8...10 %. Такой эффект связан с использованием модифицированного порошка, что вызвало изменение процессов кристаллизации и структуры наплавленного металла.

Применение модифицирующих добавок оказало воздействие на размеры наплавленного шва и зоны термического влияния.

Табл. 1. Размеры зоны термического влияния (ЗТВ), сварных швов и их твердость

Номер образца	Количество модифицирующего порошка, %	Ширина шва, мм	Глубина проплавления, мм	Ширина ЗТВ, мм, лицевая	Высота выпуклости, мм	Ширина ЗТВ, мм, обратная	Твердость шва, НВ
1	15	7,8	1,2	10,8	2,0	7,1	165...169
2	27,4	7,6	1,2	11,3	2,0	6,8	166...170
3	15	7,6	1,3	13,5	1,5	11,6	178...182
4	27,4	7,1	1,3	11,6	1,7	8,5	181...187

В швах, выполненных электродами второй партии с добавлением 15 и 27,4 % порошка, глубина проплавления сварного шва увеличилась на 0,1 мм. Ширина шва и высота выпуклости уменьшились на 0,2...0,4 и 0,3...0,5 мм соответственно. В результате произошло уменьшение объема наплавленного металла с одновременным увеличением глубины проплавления. Такие изменения размеров были вызваны возрастанием тепловыделения в системе дуга-ванна жидкого металла.

Дополнительное выделение тепла связано с изменением металлургических процессов плавления модифицированных порошковых материалов и процес-

сов кристаллизации сварочной ванны. Предположительно, увеличение глубины проплавления произошло за счет протекания экзотермических реакций в объеме расплавленного металла. Такой эффект связан с тем, что в процессе модификации частицы порошка подвергаются значительному пластическому деформированию, приводящему к созданию напряженного состояния в них. В результате внутри композиционных частиц образуется запас энергии, который высвобождается при расплавлении порошка в сварочной ванне. Следовательно, возникает дополнительная теплота, изменяющая параметры наплавленного шва. Подтверждением данной

теории может служить увеличение зоны термического влияния с лицевой стороны шва на 1,5...2,5 мм, с обратной – на 1,5...4,5 мм.

С целью выявления изменений процесса кристаллизации наплавленные швы подвергали металлографическому анализу. В связи с тем, что максимальные отличия в размерах полученных швов и их твердости наблюдались при добавлении в покрытие электродов 27,4 % порошковых материалов, металлографические исследования проводили

на данных образцах. Анализ микроструктуры показал, что применение модифицированных порошковых материалов позволило образовать четко выраженные границы кристаллов (рис. 2).

При рассмотрении тела зерна можно отметить, что в образцах, выполненных с применением первого варианта электродов, направленность кристаллизации происходит от границ к центру (рис. 3, а) с появлением в центральной части внутризеренной микрохимической неоднородности.

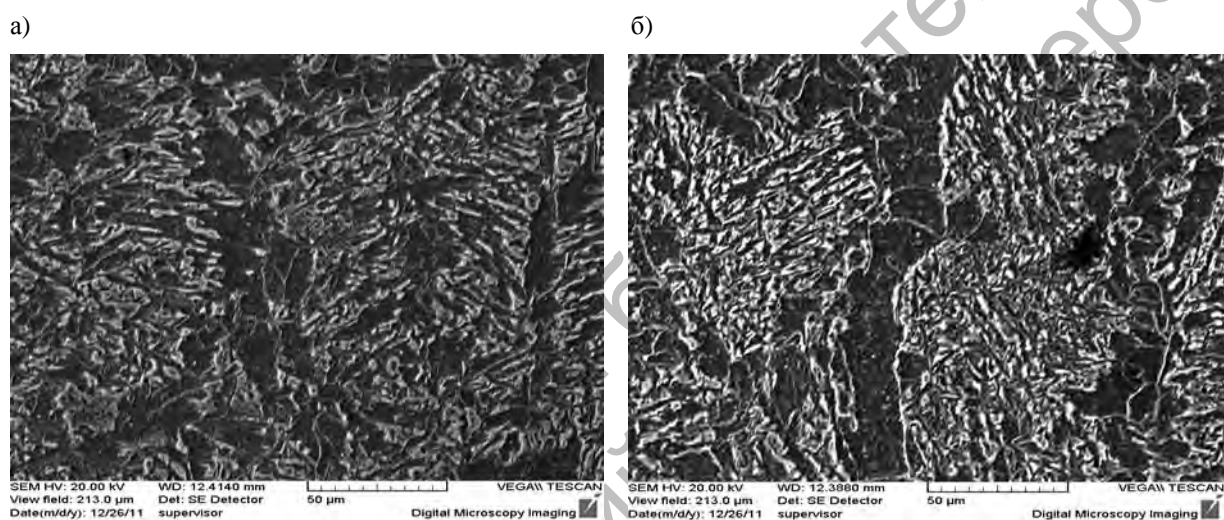


Рис. 2. Микроструктура наплавленных швов, $\times 1000$: а – выполненных с применением порошковых материалов, не подвергнутых модифицированию; б – выполненных с применением порошковых материалов, подвергнутых модифицированию

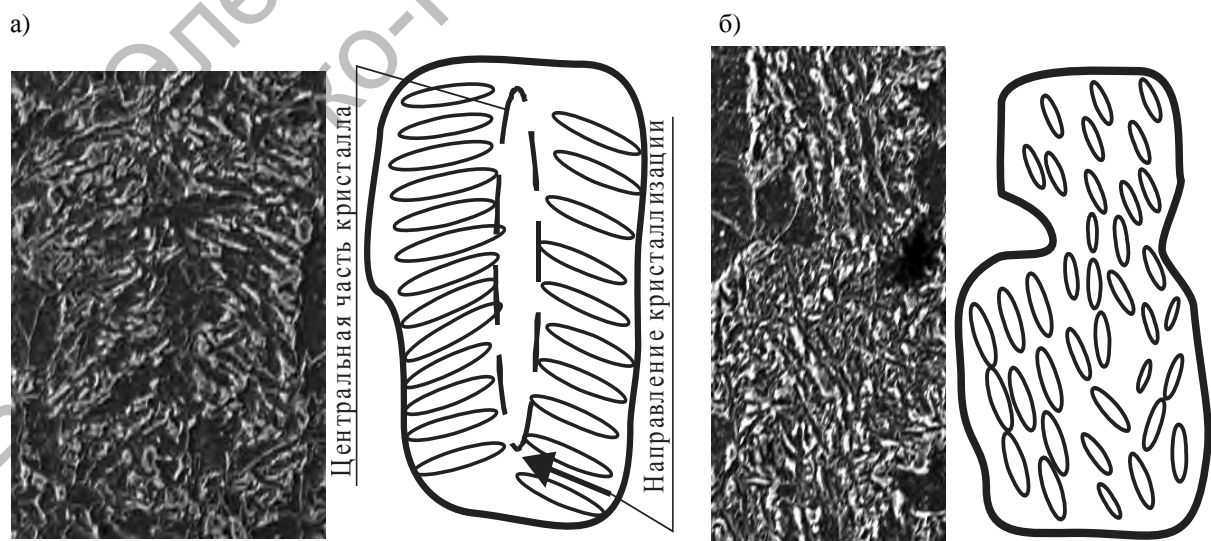


Рис. 3. Микроструктура зерен

В образцах, выполненных с применением второго варианта электродов, таких участков не наблюдается (рис. 3, б). В них имеется однородная структура по всей площади зерна.

Определение влияния модифицированных материалов на прочностные характеристики сварного соединения производилось на образцах, полученных дуговой сваркой двух пластин. Изменение прочностных свойств швов, сваренных электродами с 15-процентным добавлением порошка как без модифицирования, так и с модифицированием, не выявлено. Предположительно, это связано с небольшим количеством легирующих элементов, которые не смогли оказать воздействие на структурные изменения в процессе кристаллизации шва.

Добавление 27,4 % порошка в покрытие электродов позволило обозначить отличия в прочностных характеристиках. В сварных соединениях, выполненных электродами первой партии, среднее временное сопротивление на разрыв составило 580 МПа. Применение электродов второй партии повысило временное сопротивление на разрыв до 632 МПа. Прочность металла увеличилась на 7...11 %, что говорит о положи-

тельном влиянии механически легированных порошковых материалов на механические свойства сварного соединения. Такой эффект наблюдается в результате уменьшения размеров и количества мелких составляющих на линии срастания кристаллов, что повышает межкристаллитную микрохимическую однородность данного участка. Кроме этого, влияние оказала более плотная и однородная структура зерен закристаллизовавшегося металла.

Выводы

Применение модифицированных порошковых материалов при изготовлении покрытых электродов позволило снизить неоднородность структуры по границам и в теле зерна сварных швов.

Снижение степени микрохимической неоднородности повысило механические свойства сварного соединения, твердость на 8...10 % и временное сопротивление на разрыв на 7...11 % за счет уменьшения неоднородности наплавленного металла.

Результаты исследований позволяют говорить о появлении нового направления в повышении качества сварного соединения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория сварочных процессов : учебник для вузов / А. В. Коновалов [и др.] ; под ред. В. М. Неврного. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 752 с.
2. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина ; под ред. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
3. **Фудзивара, М.** Тенденции в разработке дисперсно-упрочненных оксидами сплавов на основе Fe / М. Фудзивара // *Metals and Technol.* – 1992. – Vol. 62, № 5. – С. 16–20.
4. **Кузнецов, М. А.** Нанотехнологии и наноматериалы в сварочном производстве / М. А. Кузнецов, Е. А. Зернин // *Сварочное производство.* – 2010. – № 12. – С. 23–26.
5. **Ловшенко, Ф. Г.** Теоретические и технологические основы создания порошковых механически легированных алюминиевых и медных материалов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.06 / Ф. Г. Ловшенко. – Минск, 1998. – 44 с.
6. **Ловшенко, Ф. Г.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе никеля / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск : БНТУ, 2012. – 279 с.
7. Применение композиционных механически легированных порошковых материалов при дуговой наплавке / Д. И. Якубович [и др.] // *Вестн. Брян. гос. техн. ун-та.* – 2012. – № 4. – С. 50–53.
8. **Якубович, Д. И.** Применение мелкодисперсных порошковых материалов при ручной дуговой сварке покрытыми электродами / Д. И. Якубович // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, апрель.* – Могилев, 2013. – С. 189–190.

9. **Банов, М. Д.** Сварка и резка материалов : учеб. пособие / М. Д. Банов, Ю. В. Казаков, М. Г. Козулин ; под ред. Ю. В. Казакова. – 2-е изд., стер. – М. : Академия, 2002. – 400 с.
10. **Чернышов, Г. Г.** Справочник электрогазосварщика и газорезчика : учеб. пособие / Г. Г. Чернышов. – 4-е изд., стер. – М. : Академия, 2010. – 400 с.
11. **Акулов, А. И.** Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки : учебник для вузов / А. И. Акулов. – 2-е изд. – М. : Машиностроение, 2003. – 560 с.
12. **Хренов, К. К.** Сварка, резка и пайка металлов / К. К. Хренов. – 4-е изд., стер. – М. : Машиностроение, 1973. – 408 с.

Статья сдана в редакцию 17 марта 2015 года

Дмитрий Иванович Якубович, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: D.I.Yakubovich@mail.ru.

Ирина Александровна Лисовая, канд. биол. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: lisovaya-irina@list.ru.

Ирина Михайловна Лужанская, канд. хим. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: irina_luzhanskay@mail.ru.

Dmitry Ivanovich Yakubovich, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: D.I.Yakubovich@mail.ru.

Irina Aleksandrovna Lisovaya, PhD (Biology), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: lisovaya-irina@list.ru.

Irina Mikhailovna Luzhanskaya, PhD (Chemistry), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: irina_luzhanskay@mail.ru.