

УДК 621.791.7

**В. М. НЕСТЕРЕНКОВ<sup>1</sup>, Л. А. КРАВЧУК<sup>1</sup>, Ю. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ<sup>1</sup>,  
И. А. ПЕТРИК<sup>2</sup>, Ю. А. МАРЧЕНКО<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев,*

<sup>2</sup> *АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина*

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРЕССИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ, НА ПРИМЕРЕ НАРУЖНОЙ ЧАСТИ КОРПУСА ПЕРЕДНЕГО КСД**

*Рассмотрены последовательность и содержание операций изготовления крупногабаритных корпусных деталей методом электронно-лучевой сварки на примере наружной части корпуса переднего КСД газотурбинного двигателя. Материал детали - литейный титановый  $\alpha$ -сплав ВТ5Л. Конструкция детали предусматривает электронно-лучевую сварку отдельных стоек, имеющих окончательно обработанные поверхности, в цельный корпус. Применение компьютерного управления технологическим процессом сварки в значительной мере снижает трудоемкость изготовления детали и позволяет получить высокое качество сварных швов. Приведены схемы и режимы сварки наружных и внутренних стыков стоек переменной толщины в диапазоне  $\delta_m = 5 \dots 26$  мм, обеспечивающие бездефектное формирование лицевого и обратного валиков шва при сквозном проплавлении металла.*

**Ключевые слова:** *электроннолучевая сварка, электронный пучок, сквозное проплавление, лицевой и обратный валик шва, выводные планки, прихватки, переменная толщина, схема сварки, пористость, макроструктура, компьютерное управление, видеоконтрольное устройство, программа сварки.*

### **Введение**

Разработки конструктивных решений и технологических процессов в производстве газотурбинных двигателей в авиационной промышленности показали, что повышение технологичности конструкций, коэффициента использования металла, снижения трудоемкости и энергоемкости изделий возможны путем применения сварных конструкций.

Известно, что электроннолучевая сварка широко применяется в зарубежной авиационной и космической промышленности при производстве элементов авиационных двигателей.

В настоящей работе приведены последовательность и содержание операций изготовления цельносварной наружной части корпуса переднего КСД, состоящего из стоек и лопаток, методом электроннолучевой сварки (ЭЛС). В соответствии с техническими требованиями, лопатки и стойки из литейного титанового сплава ВТ5Л после сборки в жестком сборочно-сварочном приспособлении должны быть сварены между собой по внутренним и наружным бандажным полкам с обеспечением требуемого взаимного расположения лопаток и стоек относительно оси двигателя. Количество лопаток и стоек – 34 шт., суммарное количество сварных швов по внутреннему и наружному диаметру – 68 шт., наружный диа-

метр корпуса переднего КСД в сборочно-сварочном приспособлении не превышает  $\varnothing 1390$  мм. Процесс ЭЛС должен обеспечивать полный провар кромок переменного сечения по всей длине стыка с гарантированным формированием лицевого и обратного валиков шва без подрезов и занижений, а также защиту пера лопатки и прилегающих поверхностей от повреждения электронным пучком.

Материал лопаток и стоек выбран из литейного среднепрочного  $\alpha$ -сплава ВТ5Л, химический состав которого согласно ГОСТ 19807-74 включает, масс. %: 4,3...6,2 Al;  $\geq 0,8$  Mo. Регламентированные примеси имеют следующее содержание, масс. %: 0,20 [O<sub>2</sub>]; 0,05 [N<sub>2</sub>]; 0,015 [H<sub>2</sub>]. Сплав ВТ5Л применяется для деталей, работающих длительно при температуре до +350°C, и упрочняющей термообработке не подвергается.

### **1. Экспериментальная часть**

Первоначальную отработку режимов ЭЛС сплава ВТ5Л осуществляли на пластинах-образцах размером 100x250 мм на установке УЛ-209М конструкции Института электросварки им. Е. О. Патона, обеспечивающей компьютерное управление параметрами процесса сварки. Толщина пластин соответствовала толщине буртов наружной и внутренней

бандажной полки детали.

Фокусировка электронного пучка на поверхности свариваемых пластин, совмещение электронного пучка со стыком, визуализация процесса ЭЛС при выполнении чистки околошовной зоны маломощным острогофокусированным электронным пучком и короткими прихватками осуществляли автоматически по программе с помощью системы «РАСТР» во вторично-эмиссионном изображении [1], которая обеспечивала точность совмещения не хуже 0,1 мм и увеличение объекта наблюдения в 5 раз. Контроль фокусировки по четкости изображения на мониторе системы «РАСТР» проверяли визуально по яркости свечения круговой развертки электронного пучка диаметром  $d_{\text{круг}} \cong 5$  мм с током пучка  $I_{\text{п}} \cong 10$  мА на медной пластине. Расхождение сравниваемых значений тока фокусировки при рабочем расстоянии от среза пушки до пластины  $l_{\text{раб}} = 250$  мм составило  $\pm 1$  мА на уровне  $I_{\text{ф}} = 620$  мА, что вполне приемлемо для практического применения.

Для установки, фиксации и вращения детали относительно электроннолучевой пушки в составе установки УЛ-209М предусмотрены вращатель с вертикальной осью вращения и вращатель с горизонтальной осью вращения. Диаметр планшайбы на обоих вращателях составил 1200 мм.

Выбор схемы сварки сплава ВТ5Л толщиной в диапазоне  $\delta_{\text{м}} = 5 \dots 26$  мм со сквозным проплавлением за один проход и бездефектного формирования лицевого и обратного валиков шва является отправной точкой исследований. Принцип бездефектности ответственных конструкций из титановых сплавов в авиационной и космической промышленности подразумевает получение качественных сварных соединений, формируемых при ЭЛС без пор и подрезов по обеим сторонам шва. Упомянутые дефекты не допустимы, поскольку приводят к снижению работоспособности сварных соединений. Устранение подрезов на установке УЛ-209М может быть достигнуто повторным косметическим проходом, а также выбором схемы ЭЛС горизонтальным электронным пучком с перемещением электронной пушки вниз по координате Z-Z [2]. Горизонтальное расположение сварочной ванны облегчает дегазацию жидкого металла и его рафинирование, что в свою очередь снижает пористость металла шва и требования к чистоте свариваемого металла.

Выбор оптимального значения скорости сварки определяется, с одной стороны, условием минимальной интенсивности гидродинамических возмущений в сварочной ванне [3], а с другой, условием минимальной ширины шва для снижения деформаций, повышения трещиностойчивости, сохранения концентрации и легкоиспаряющихся легирующих элементов в металле шва. Если первое условие тре-

бует уменьшения скорости сварки, то второе – ее повышения. Уточнение величины скорости сварки для конкретных сплавов и толщин с целью получения необходимых свойств металла сварного соединения играет первостепенную роль при разработке технологии сварки. Применительно к установке УЛ-209М, с учетом переменной толщины свариваемых кромок из титанового сплава ВТ5Л в диапазоне  $\delta_{\text{м}} = 5 \dots 26$  мм, а также обеспечения тока электронного пучка  $I_{\text{п}} = 0 \dots 500$  мА, скорость сварки была выбрана неизменной по всей длине стыка и составила  $V_{\text{св}} = 12$  мм/с.

Воспроизводимость качественных швов может быть обеспечена множеством аппаратных разработок, гарантирующих стабилизацию и воспроизводимость геометрии электронного пучка [4 - 6]. Узкие и глубокие швы с параллельными стенками литой зоны получают благодаря использованию электронного пучка с малыми ( $\leq 5 \cdot 10^2$  рад) углами сходимости [6, 7], развертке его по круговой или эллиптической траектории [4, 5, 8]. Из всех видов разверток нами была применена круговая развертка, так как обеспечивала одинаковые условия формирования сварных швов при наклонном стыке между стойками относительно направления перемещения электроннолучевой пушки сверху вниз по координате Z-Z.

Основной дефект металла шва при ЭЛС титана и его сплавов – пористость. Для предупреждения пор необходимо обеспечить удаление с поверхности свариваемых кромок адсорбированной влаги и жировых пленок, а также создать условия для максимальной дегазации сварочной ванны. С этой целью перед ЭЛС была произведена чистка прилегающей зоны стыка от остатков загрязнений и окислов с помощью сфокусированного на поверхности металла электронного пучка: в режиме ( $U_{\text{уск}} = 60$  кВ,  $I_{\text{п}} \cong 10$  мА,  $V_{\text{св}} = 10$  мм/с,  $d_{\text{круг}} \cong 10$  мм) выполняется проход по всей длине стыка [1].

При ЭЛС титана и его сплавов для получения качественных швов требуется точная сборка изделия под сварку и строгое соблюдение допустимых размеров зазора между свариваемыми кромками деталей. Как показано в работе [9], при толщине свариваемых стыков  $\delta_{\text{м}} = 5$  мм допустимая величина зазора не должна превышать 0,07 мм, а при  $\delta_{\text{м}} = 26$  мм – 0,17 мм.

Перед созданием программ ЭЛС внутренних и наружных стыков на стойках из литейного титанового сплава ВТ5Л были выполнены замеры толщины свариваемых кромок по длине стыка сложного контура. Установили, что имеет место несколько характерных толщин разной длины: для геометрии торцевой поверхности наружного стыка – 5 мм, 14 мм, 17 мм; для геометрии торцевой поверхности

внутреннего стыка – 5 мм, 17 мм, 19 мм, 26 мм. При обработке режимов ЭЛС наружных стыков стоек горизонтальным электронным пучком по схеме сверху вниз, скорости сварки  $V_{св} = 12$  мм/с, рабочем расстоянии  $l_{раб} = 250$  мм, без локальной развертки пучка ( $d_{круг} = 0$  мм) и с круговой разверткой пучка ( $d_{круг} = 1,2$  мм) были выполнены сквозные проплавления на плоских образцах с формированием лицевого и обратного валиков шва за один проход. Для бездефектного формирования обратного валика шва значение тока электронного пучка устанавливали в диапазоне  $I_{п} = (1,75 \dots 2,0) I_0$ , где  $I_0$  – ток пучка, при котором появляются первые признаки сквозного проплавления [10].

## 2. Анализ полученных результатов

Проведенный металлографический анализ сварных соединений сплава ВТ5Л со сквозным проплавлением плоских образцов позволил выявить некоторые особенности. Как показано на рис. 1, формирование лицевого и обратного валиков шва на всех имеющихся толщинах происходит регулярно по всей длине без подрезов; при необходимости лицевой валик шва заглаживается повторным косметическим проходом.

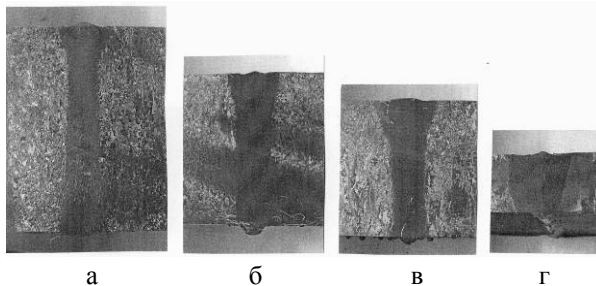


Рис. 1. Макроструктура сварных соединений литейного титанового сплава ВТ5Л различной толщины и формирование лицевого и обратного валиков шва при ЭЛС со сквозным проплавлением наружных стыков стоек горизонтальным электронным пучком: а –  $\delta_m = 26$  мм; б –  $\delta_m = 17$  мм; в –  $\delta_m = 14$  мм; г –  $\delta_m = 5$  мм

Начиная с толщины свариваемых кромок  $\delta_m = 14$  мм, сварной шов формируется практически с параллельными стенками литой зоны в случае применения круговой развертки электронного пучка амплитудой  $d_{круг} = 1,2$  мм, а ширина шва в корневой части колеблется в диапазоне 2,4...2,6 мм. Такие результаты по геометрии проплавления позволяют заключить, что уход сварочного электронного пучка от стыка на величину 0,1 мм не скажется на качестве сварного шва.

Полученные данные по сварке плоских образцов горизонтальным электронным пучком были

применены при разработке программы сварки наружных стыков на стойках-образцах из литейного титанового сплава ВТ5Л, конфигурация стыка которых в месте сварки соответствует серийным деталям. В программе сварки при постоянной скорости сварки  $V_{св} = 12$  мм/с величины тока сварки  $I_{п}$  и тока фокусировки  $I_{ф}$  в переходных местах изменения рабочего расстояния и толщины свариваемых кромок изменяют по линейному закону [11]. Как показано на рис. 2, сварной шов формируется без дефектов по всей длине стыка, обратный валик шва может быть использован для контроля качества сварки.

Система компьютерного управления процессом ЭЛС на установке УЛ-209М позволяет выполнять в едином технологическом цикле также точечные, короткие и сплошные прихватки. Точечные прихватки на стыке выводной планки и стойки производятся с целью исключения образования кратеров.

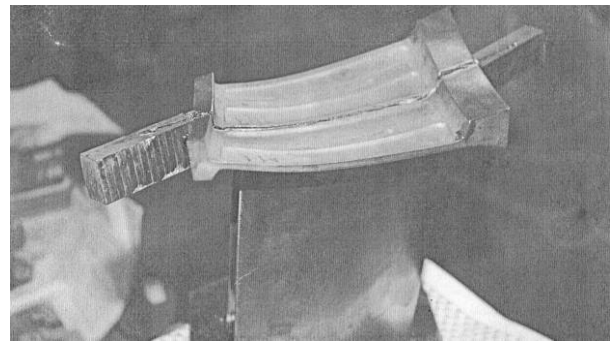


Рис. 2. Формирование лицевого валика шва на стойках-образцах, при ЭЛС горизонтальным электронным пучком:

Уиск = 60 кВ,  $V_{св} = 12$  мм/с,  $l_{раб} = 250$  мм

Следует отметить, что все сваренные образцы и макеты изделий из сплава ВТ5Л со сквозным проплавлением горизонтальным электронным пучком прошли рентгеновский контроль. Дефектов в виде пустот, пор, подрезов и несплавлений не обнаружено.

После фиксации выводных планок из титанового сплава ВТ5Л на внутренних и наружных стыках стоек с помощью аргонодуговой сварки (АДС) установили соосно-наружную часть корпуса переднего КСД на планшайбе вращателя с вертикальной осью вращения (см. рис. 3), выставили электронно-лучевую пушку в горизонтальное положение ( $VG = 0^\circ$ ) на расстоянии от изделия  $l_{раб} = 250$  мм, совместили ось пушки с одним из 34-х стыков, обнулили значение координаты вращателя и подготовили установку к выполнению ЭЛС наружных стыков стоек по программе.

Получив рабочий вакуум в сварочной камере и электроннолучевой пушке, составили с помощью

видеоконтрольной системы «РАСТР» новую программу ЭЛС на первом стыке стойки при перемещении пушки сверху вниз по координате Z-Z или откорректировали программу ЭЛС на стойках-образцах. Циклограмма изменений токов сварки и фокусировки с привязкой к характерным точкам приведена на рис. 4. После поворота корпуса переднего КСД на 180° по координате вращателя W выполнили ЭЛС второго стыка стойки.

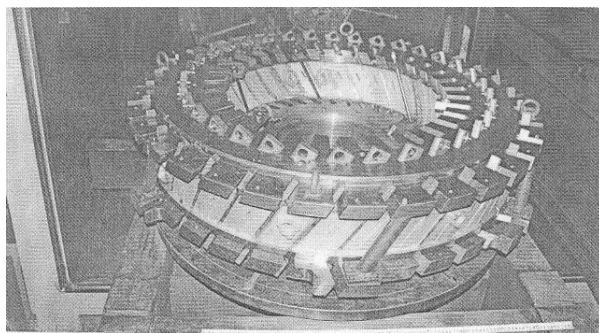


Рис. 3. Деталь с выводными планками, установленная на вращатель с вертикальной осью вращения для ЭЛС наружных стыков стоек.

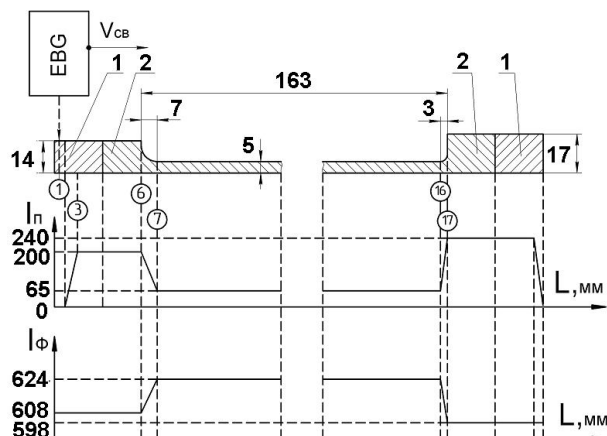


Рис. 4. Циклограмма изменений токов сварки и фокусировки при ЭЛС наружных стыков стоек детали горизонтальным электронным пучком сверху вниз с привязкой к характерным точкам: 1- выводная планка; 2- сечение стыковой поверхности стойки; EBG- электроннолучевая пушка; (1), (3), (6), (7), (16), (17) – номера строк в таблице программы ЭЛС

Приведенная последовательность операций ЭЛС выполняется до последнего стыка на стойках.

После сварки наружных стыков стоек горизонтальным электронным пучком на вращателе с вертикальной осью вращения перешли к выбору схемы сварки внутренних стыков. Рабочим вариантом оказался переход на вращатель с горизонтальной осью вращения, наклоном электроннолучевой пушки от

вертикали на угол  $VG = 35^\circ$  и перемещением пушки по координате X-X вдоль продольной оси вакуумной камеры (рис. 5). Рабочее расстояние от среза пушки до изделия составило  $I_{\text{раб}} = 330$  мм.

Необходимо отметить, что последовательность операций ЭЛС внутренних стыков по сравнению со сваркой наружных стыков не изменилась, а величину тока электронного пучка  $I_{\text{п}}$  изменять не пришлось.

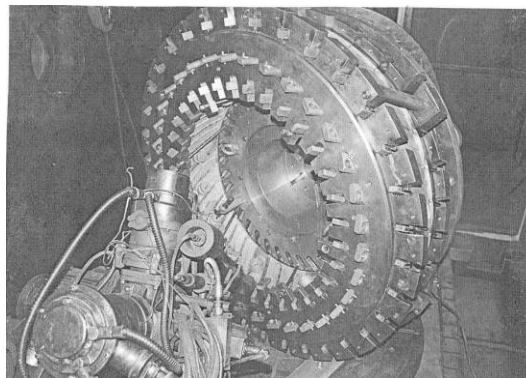


Рис. 5. Деталь с выводными планками, установленная на вращатель с горизонтальной осью вращения для ЭЛС внутренних стыков стоек

## Заключение

Таким образом, разработанная цельносварная технология ЭЛС наружной части корпуса переднего КСД и выбранные схемы сварки наружных и внутренних стыков стоек обеспечивают бездефектное формирование лицевого и обратного валиков шва при сквозном проплавлении литейного титанового сплава ВТ5Л толщиной  $\delta_m = 5 \dots 26$  мм.

## Литература

1. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия [Текст] / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков [и др.] // Автоматическая сварка. – 2004. – № 5. – С. 3-7.
2. Кравчук, Л. А. Устранение подрезов при ЭЛС со сквозным и несквозным проплавлением [Текст] / Л. А. Кравчук // Автоматическая сварка. – 2010. – № 6. – С. 26-29.
3. Нестеренков, В. М. Особенности капиллярных волн в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке металлов большой толщины [Текст] / В. М. Нестеренков // Автоматическая сварка. – 2003. – № 4. – С. 8-13.
4. Электронно-лучевая сварка [Текст] / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко [и др.]. – К. : Наук. думка, 1987. – 256 с.
5. Blakely, P. Y. The origin and effect of magnetic fields in electron beam welding [Text] / P. Y. Blakely, A. Sanderson // Welding Journal. – 1984. – № 1. – P. 42-49.

6. Frits, D. *Electron beam welding of today* [Text] / D. Frits // *Международ. конф. по электронно-лучевым технологиям «ЭЛТ-88» : сб. науч. тр., Варна, 31 мая-4 июня 1988 г. – С. 1048-1063.*

7. Sayegh, G. *State of the art of high energy density beam welding* [Text] / G. Sayegh // *Houdremont lecture. – Tokyo : IW, 1986. – 41 p.*

8. *Effects of welding parameters and prevention of defects in deep penetration EBW of heavy section steel* [Text] / T. Shida, H. Kita, H. Okamura [at all] // *Houdremont lecture. – Tokyo : IV-239-78, 1978. – 57 p.*

9. Stocker, G. *Erfahrungen beim Elektronenstrahl-schweißen dick wandiger Bauteile aus der Tstanlegung Ti6Al4V gegliht* [Text] / G. Stocker // *Schweis. und Schneid. – 1974. – № 3. – P. 91-93.*

10. *Формирование швов при электронно-лучевой сварке сплавов титана толщиной до 25 мм* [Текст] / Я. Б. Нудельман, Б. А. Задепий // *Автоматическая сварка. – 1988. – № 5. – С. 29-30.*

11. *Process control for electron beam welding* [Text] / P. Anderl, W. Scheffels // *Weld world. – 1992. – № 5-6. – P. 138-144.*

*Поступила в редакцию 19.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедры сварки М. Н. Брыков, Запорожский национальный технический университета, Запорожье, Украина.

### **РОЗРОБКА ПРОГРЕСИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КРУПНОГАБАРИТНИХ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ, НА ПРИКЛАДІ ЗОВНІШНЬОЇ ЧАСТИНИ КОРПУСУ ПЕРЕДНЬОГО КСД**

**В. М. Нестеренков, Л. А. Кравчук, Ю. О. Архангельський, І. А. Петрик, Ю. А. Марченко**

Розглянуто послідовність і зміст операцій виготовлення великогабаритних корпусних деталей методом електронно-променевого зварювання на прикладі зовнішньої частини корпусу переднього КСД газотурбінного двигуна. Матеріал деталі - ливарний титановий  $\alpha$ -сплав VT5Л. Конструкція деталі передбачає електронно-променево зварювання окремих стійок, що мають остаточно оброблені поверхні, в цілісний корпус. Застосування комп'ютерного управління технологічним процесом зварювання значною мірою знижує трудомісткість виготовлення деталі і дозволяє отримати високу якість зварних швів. Наведено схеми і режими зварювання зовнішніх і внутрішніх стиків стійок змінної товщини в діапазоні  $\delta m = 5 \dots 26$  мм, що забезпечують бездефектне формування лицьового і зворотного валиків шва при наскрізному проплавленні металу.

**Ключові слова:** електронно-променево зварювання, електронний пучок, наскрізне проплавлення, зовнішній та зворотній валик шва, вивідні планки, прихватка, змінна товщина, схема зварювання, пористість, макроструктура, комп'ютерне керування, відеоконтрольний пристрій, програма зварювання.

### **DEVELOPMENT OF THE ADVANCED MANUFACTURING PROCESS FOR LARGE CASE-SHAPED PARTS BY METHOD OF ELECTRON BEAM WELDING (CASE STUDY: MPC FRONT CASING SHELL)**

**V. M. Nesterenkov, L. A. Kravchuk, Y. A. Arhangelskii, I. A. Petrik, Y. A. Marchenko**

Consider the sequence and content of operations, the production of large body parts by electron-beam welding on the example of the outside of the housing front KSD turbine engine. Material details - cast titanium  $\alpha$ -alloy VT5L. Construction details provides an electron-beam welding of individual racks having finished surfaces, a one-piece body. The use of computer process control welding greatly reduces the complexity of manufacturing parts and allows to obtain high quality welds. Schemes and modes of external and internal welding joints racks of variable thickness in the range of  $\delta m = 5 \dots 26$  mm, providing defect-free formation of the front and back rollers during key-hole weld metal.

**Key words:** electron beam welding, electron beam, through penetration, the front and back cushion, tab piece, variable thickness, circuit welding, porosity, macrostructure, computer control, video monitoring unit, program of welding.

**Нестеренков Владимир Михайлович** – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., чл.-кор. НАН України, зав. отделом, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: nesterenkov@technobeam.com.ua.

**Кравчук Леонид Аркадиевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: admin@technobeam.com.ua.

**Архангельский Юрий Алексеевич** – мл. науч. сотр., Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: xenon1981@bigmir.net.

**Петрик Игорь Андреевич** – канд. техн. наук, главный сварщик, АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Марченко Юрий Анатольевич** – вед. инж. по сварке, АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: marchenko2126@mail.ru.