

УДК 621.791.72

Ю. В. ОРСА¹, В. М. НЕСТЕРЕНКОВ¹, Ю. А. МАРЧЕНКО², И. А. ПЕТРИК²,
П. Д. ЖЕМАНИЮК², А. А. СКРЕБЦОВ³¹ *Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина*² *АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина*³ *Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина*

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИФфуЗОРА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

В работе рассмотрена и обоснована принципиальная возможность изготовления диффузора центробежного компрессора методом электронно-лучевой сварки. Разработана последовательность технологических операций, включающая подготовку, сборку и сварку опытного образца детали прорезными швами. Материал изделия - титановый сплав марки ОТ4-1. Технология сварки прорезными швами предусматривает нанесение базовых точек на торец лопаток, с сохранением координат положения электронно-лучевой пушки относительно заданной точки в управляющей программе установки. Применение разработанной технологии позволило уменьшить коробления детали после сварки, обеспечить удовлетворительное качество сварных соединений и высокую точность совмещения электронного пучка с контуром каждой из лопаток диффузора.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, диффузор, прорезные швы, геометрические размеры, усадка, параметры режима, остаточные деформации, сборочно-сварочное приспособление, глубина провара, титановые конструкции.

Введение

Технологии производства современных газотурбинных двигателей (ГТД), в отдельных случаях, предусматривают выполнение операции сварки на заключительной стадии изготовления деталей. Отсутствие припуска на механическую обработку после сварки, не всегда положительно сказывается на геометрических размерах готовых узлов. Применение высококонцентрированных источников нагрева, в сочетании с использованием жесткой фиксирующей оснастки и последующей термической обработки, в значительной степени позволяет сохранить геометрию детали после сварки и обеспечить высокое качество выпускаемых изделий.

К методам сварки высококонцентрированными источниками нагрева относится электронно-лучевая сварка (ЭЛС) [1]. Использование средств числового программного управления, для технологического процесса ЭЛС, вывело эту технологию в разряд лидирующих благодаря возможностям прецизионного управления как траекторией движения электронного пучка при сварке, так и его энергетикой, включая регулировку общей величины мощности и формы распределения этой мощности в пространстве [2].

Существующая технология изготовления диффузора центробежного компрессора, предусматри-

вает сборку в приспособлении стенки передней со стенкой задней, путем совмещения шипов имеющих на торце лопаток, с отверстиями в стенке задней (рис. 1). После сборки, выполняется аргонодуговая сварка выступающей части шипа лопатки по контуру. Недостатком данной технологии является значительное коробление деталей после сварки. Коробления устраняются путем последующей термической обработки (термофиксации) детали в жестком сборочно-сварочном приспособлении, а также с использованием других технологических приемов, (припуск на механическую обработку по торцу детали, наличие технологических упорных буртов и др.). При этом, получение размера по высоте канала на входе и выходе лопаточного диффузора с допуском $\pm 0,05$ мм, требуемого по чертежу, проблематично (размер А,Б, рис. 2).

По результатам анализа испытаний двигателя с различными лопаточными диффузорами служебного компрессора, определено, что при уменьшении на $\pm 0,1$ мм высоты канала на входе и выходе, запасы газодинамической устойчивости (ГДУ) служебного компрессора недопустимо малы, это приводит к неустойчивой работе двигателя и невозможности обеспечения самолета сжатым воздухом. При раскрытии на $\pm 0,1$ мм высоты канала, избыточный воздух, сжатый в компрессоре, потребует увеличения

частоты вращения газогенератора и приведет к более раннему срабатыванию ограничений по температуре газа за турбиной. Повышение частоты вращения газогенератора не позволит обеспечить самолет сжатым воздухом с нужными параметрами.

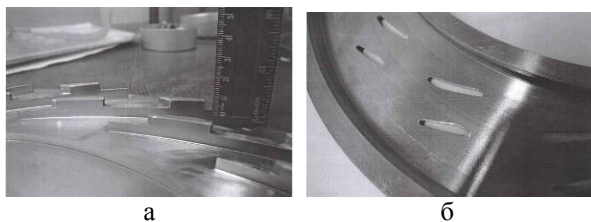


Рис. 1. Входящие детали диффузора центробежного компрессора:

а – стенка задняя, б – стенка передняя

Ранее проведенные работы по ЭЛС выступающей части шипа лопатки по контуру признаны неудовлетворительными, из-за невозможности обеспечения требуемого зазора в месте соединения шип-лопатка в пределах от 0,05 мм до 0,1 мм.

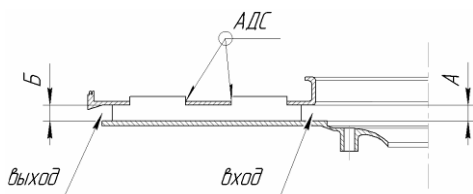


Рис. 2. Эскиз существующей конструкции диффузора: размер А - $5,4 \pm 0,05$ мм, размер Б - $7,5 \pm 0,05$ мм

Цель работы - разработать технологию изготовления сварной конструкции диффузора, позволяющую снизить коробления детали после сварки и обеспечить допустимое отклонение высоты канала на входе и выходе в пределах требуемого по чертежу.

Для достижения поставленной цели, были определены следующие задачи:

- отработать технологию электронно-лучевой сварки элементов диффузора прорезными швами по заданной траектории, предварительно удалив шипы на торцевой поверхности лопатки;

- запроектировать и изготовить технологическую оснастку, для точного взаимного позиционирования и фиксации элементов диффузора при сборке под сварку и в процессе сварки;

- определение критериев оценки качества сварки и требований по сборке и точности позиционирования.

Работы проводились на опытном образце диффузора центробежного компрессора. Особенностью прототипа сварной конструкции, является стенка передняя, имеющая 17 фрезерованных лопаток переменной высоты (без шипов), соединяемая со стенкой задней толщиной 2 мм прорезными швами по

замкнутому контуру, геометрически подобному профилю каждой из лопаток (рис. 3).

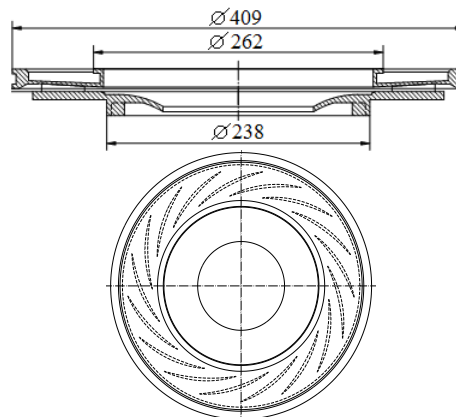


Рис. 3. Эскиз прототипа опытной сварной конструкции

1. Экспериментальная часть

Исследования выполнялись на установке для электронно-лучевой сварки типа УЛ-209, имеющей рабочую камеру с внутренними размерами 2500x2500x3750 мм (рис. 4).



Рис. 4. Внешний вид лабораторной установки УЛ - 209

Установка оснащена манипулятором, обеспечивающим линейное перемещение сварочной пушки вдоль координат X, Y и Z. Для поворота технологической оснастки с изделием в очередное, исходное для ЭЛС положение, применялся вращатель с вертикальной осью вращения. Мощность высоковольтного источника питания составляла 30 кВт при усредненном напряжении 60 кВ. Эмиссионная система сварочной пушки обеспечивала ток электронного пучка величиной до 500 мА. Для совмещения электронного пучка со свариваемым стыком использовалась базовая система наблюдения во вторичных электронах типа РАСТР.

Материал детали по чертежу - титановый псевдо α -сплав марки ОТ4-1. Химический состав сплава приведен в таблице 1.

Таблица 1
Химический состав сплава

Массовая доля элементов, %						
Al	Mn	V	C	O ₂	N ₂	H ₂
3,50	1,50	-	0,09	0,15	0,017	0,0033

На стадии разработки технологии, важным является определение оптимальных параметров режима сварки, обеспечивающих минимальное тепловложение за один проход, а также использование необходимой оснастки для закрепления и жесткой фиксации собираемых и свариваемых элементов.

Известно, что закрепление изделий в приспособлениях эффективно лишь в отношении временных перемещений и тех искажений формы, которые от них возникают при постановке прихваток или в процессе сварки. В этом случае положительный результат может быть достигнут за счет жесткости сборочно – сварочного приспособления. Остаточные же деформации свариваемых конструкций при закреплении их в приспособлениях уменьшаются незначительно, их снижение, как правило, производят при помощи термической обработки [3].

Как уже отмечалось ранее, основные преимущества электронно-лучевой сварки заключаются в высокой удельной мощности пучка, надежной вакуумной защите металла шва, сравнительно небольших величинах тепловложений в свариваемое изделие, а следовательно, и остаточных деформаций.

При проектировании сборочно – сварочной оснастки следует учитывать, что одновременно с жесткой фиксацией элементов детали в процессе ЭЛС, она также должна обеспечивать точную сборку тонкостенного изделия с минимальными (не более 0,05мм) зазорами.

Конструкция сборочно-сварочного приспособления для ЭЛС диффузора (рис. 5), состоит из цилиндрической оправки, обеспечивающей взаимное центрирование стенки задней со стенкой передней диффузора имеющей лопатки. Плотное и равномерное прижатие тонкостенного верхнего диска по его внутреннему диаметру к торцевой поверхности лопаток обеспечивается за счет достаточного количества прижимных болтов, расположенных по окружности на жестком накидном фланце, соединенном через стойки с оправкой. Обжатие сборки диффузора по внешнему диаметру производится при помощи 17 съемных струбцин. Чтобы исключить возможное отклонение электронного пучка, вызванное остаточной намагниченностью оснастки, все массивные ее детали были изготовлены из немагнитных материалов (аустенитная нержавеющая сталь, алюминевый сплав). Внешний вид опытного диффузора центробежного компрессора, собранного под сварку в приспособлении, приведен на рис. 6.

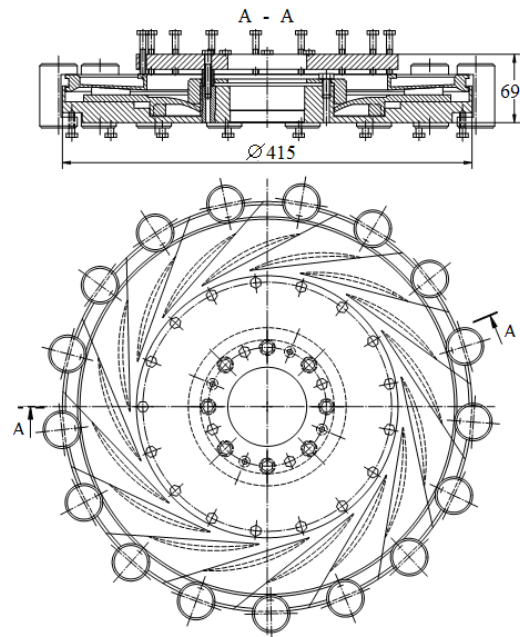


Рис. 5. Конструкция сборочно-сварочной оснастки, предназначенной для ЭЛС элементов диффузора прорезными швами

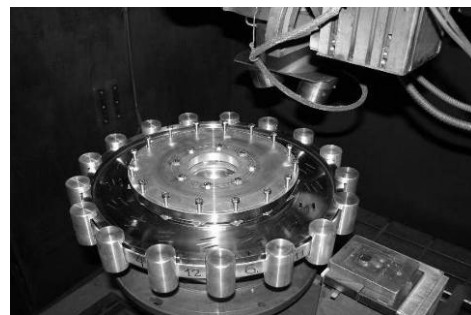


Рис. 6. Внешний вид прототипа опытного диффузора, собранный под сварку в приспособлении

Параметры режима ЭЛС уточнялись на образцах-имитаторах таврового соединения путем наложения прямолинейных швов. Величина смещения оси шва от края стенки тавра, имитирующей боковую поверхность лопатки, составляла 1,0 мм. Параметры режима сварки были установлены исходя из условий получения узкого шва с хорошим внешним формированием, глубиной проплавления не менее 6мм и отсутствия корневых дефектов. Оптимальный режим выполнения ЭЛС двумя прорезными швами через полку-пластину толщиной 2,5 мм приведен в таблице 2.

На рис. 7 приведен макрошлиф поперечного сечения образца, имитирующего сварное соединение стенки передней со стенкой задней диффузора.

Заметное увеличение глубины проплавления второго прорезного шва (на фото – правый) вызвано

подогревом узкого тела лопатки при наложении первого шва. Для компенсации влияния подогрева при ЭЛС опытного образца диффузора, ток электронного пучка для второго, замыкающего контур лопатки, шва устанавливался на 2 мА меньше, чем для первого.

Таблица 2
Режим выполнения ЭЛС образцов соединения

Ток пучка I_b , мА	Ток фокусирующей линзы I_f , мА	Скорость сварки V_w , мм/сек
23	$I_{f0}+5$	20

Примечание: I_{f0} соответствует острой фокусировке электронного пучка на свариваемой поверхности. Величина рабочего расстояния – 165 мм

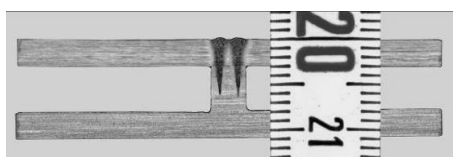


Рис. 7. Фото макрошлифа таврового соединения, полученного на титановом сплаве двумя прорезными швами

Для надежной фиксации деталей диффузора, собранных в оснастке, необходимо выполнить сварочные прихватки. Прихватки выполнялись при движении пушки по составленной программе вдоль оси каждой из лопаток короткими прорезными швами. Каждая последующая прихватка устанавливалась на корпусе изделия диаметрально противоположно предыдущей. Режим выполнения прихваток приведен в Таблице 3. Длина каждой прихватки составляла: 5мм - ввод тока, 15мм - основной участок и 10мм – вывод тока. Внешний вид фрагмента опытного диффузора после выполнения прихваток приведен на рис. 8.

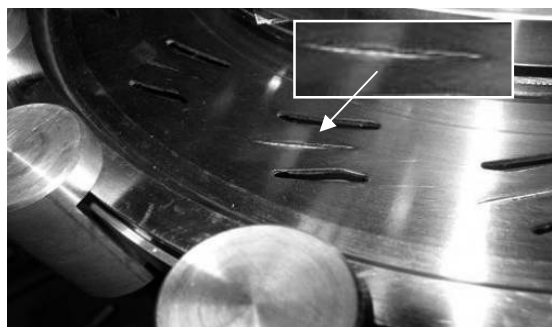


Рис. 8. Внешний вид прихваток

На заключительном этапе выполнялся сварочный проход по контуру, геометрически подобному профилю лопатки.

Следует отметить, что особенностью формы лопаток является их переменная высота вдоль профиля.

Таблица 3

Режим выполнения прихваток

Ток пучка I_b , мА	Ток фокусирующей линзы I_f , мА	Скорость сварки V_w , мм/сек
18	$I_{f0}+7$	20

Примечание: I_{f0} соответствует острой фокусировке электронного пучка на свариваемой поверхности. Величина рабочего расстояния – 165 мм

Постоянство рабочего расстояния при выполнении ЭЛС необходимо поддерживать путем одновременного перемещения сварочной пушки по заданному контуру в горизонтальной плоскости и по вертикали. Режим выполнения сварочного прохода для каждой из 17 лопаток приведен в таблице 4.

Таблица 4

Режим выполнения сварочного прохода по контуру лопатки диффузора

Ток пучка I_b , мА	Ток фокусирующей линзы I_f , мА	Скорость сварки V_w , мм/сек
23 (первый шов контура)	$I_{f0}+5$	20
21 (второй шов контура)	$I_{f0}+5$	20

Примечание: I_{f0} соответствует острой фокусировке электронного пучка на свариваемой поверхности. Величина рабочего расстояния – 165 мм

Необходимым требованием для реализации предложенной технологии ЭЛС элементов диффузора является изготовление лопаток стенки передней на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ), обеспечивающим полную идентичность профиля и высокую точность расположения на диске каждой из 17 лопаток. При таком способе изготовления значительно упрощается процедура составления программы сварки. Позиционирование изделия перед наложением очередного прорезного шва по замкнутому контуру, может быть выполнено путем поворота вращателя на угол соответствующий расположению каждой из лопаток. Обучение траектории перемещения пушки при составлении программ прихватки и сварки первой лопатки производилось со снятым покрывным диском диффузора по тонким рискам, нанесенным острым инструментом на торцевую поверхность лопатки согласно рис. 9.

На рис. 10 приведен внешний вид опытного диффузора после выполнения ЭЛС прорезными швами покрывного диска с каждой из 17 лопаток.

2. Анализ полученных результатов

Контроль геометрических размеров детали выполнялся на этапе сборки под сварку и после сварки. Результаты контроля приведены в табл. 5

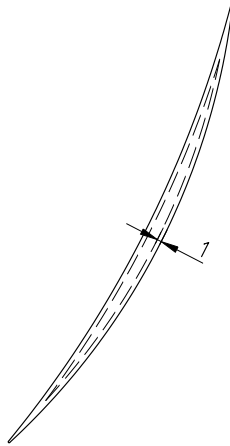


Рис. 9. Схема нанесения рисок на торцевую поверхность лопатки



Рис. 10. Внешний вид опытного диффузора после выполнения ЭЛС

Таблица 5
Результаты контроля геометрических размеров детали

Замеры	Фактическое значение		Размер по чертежу	
	А, мм	Б, мм	А, мм	Б, мм
До сварки	5,35...5,37	7,45...7,54	5,4±0,05	7,5±0,05
После сварки	5,37...5,47	7,51...7,58		
Отклонение	0,02	0,03		

Как видно из таблицы, коробления детали после электронно-лучевой сварки прорезными швами не превышают 0,03 мм.

Ввиду того, что по условиям эксплуатации деталь не требует термической обработки после сварки, а остаточные напряжения в узле незначительны, можно утверждать, что применение технологии электронно-лучевой сварки прорезными швами позволит исключить операцию термофиксации изделия, для обеспечения требуемых геометрических размеров.

По результатам металлографического исследования поперечных макрошлифов сварных соединений, полученных на образце опытного диффузора, определено что:

- поверхностных дефектов в местах сварки в виде подрезов, прожогов, пор, раковин, свищей и др. не обнаружено;

- внутренних дефектов (трещин, непроваров, расслоений, пустот, металлических и неметаллических включений) в сварных швах не обнаружено;

- ширина шва в зоне соединения составила 0,8 мм, а глубина провара - 4,1 мм и 4,5 мм для первого и второго швов контура соответственно.

Заключение

Таким образом, разработанная технология изготовления диффузора центробежного компрессора с применением метода ЭЛС прорезными швами, позволила снизить коробления детали после сварки и обеспечить допустимое отклонение высоты канала на входе и выходе в соответствии с требованиями чертежа.

Определено, что критерием обеспечения качественных сварных соединений, на этапе реализации данной технологии, является точное изготовление входящих деталей на фрезерных станках с числовым программным управлением и наличие зазоров под электронно-лучевую сварку не превышающих 0,05 мм.

Литература

1. *Электронно-лучевая сварка [Текст] / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. – К. : Наук. думка, 1987. – 256 с*
2. *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. 3-5.*
3. *Сварка в машиностроении [Текст] : справочник / Г. А. Николаев и др. – М. : Машиностроение, 1979. – С. 385-388.*

References

1. Nazarenko, O. K., Kaidalov, A. A., Kovbasenko, S. N. *Elektronno-luchevaya svarka* [Elektron beam welding]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 256 p.
2. Paton B. E., Nazarenko, O. K., Nesterenkov, V. M. *Komp'yuternoe upravlenie protsessom elektronno-luchevoi svarki s mnogokoordinatnymi peremeshcheniyami pushki i izdeliya* [Computer control of the electron-beam welding process with multi-coordinate movements of guns and products]. *Avtomaticheskaya svarka*, 2004, no. 5, pp. 3-5.
3. Nikolaev, G. A. *Svarka v mashinostroyenii* [Welding in engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1979, pp. 385-388.

Рецензент: д-р техн. наук, зав. кафедри технології авіаційних двигателів Запорізького національного технічного університету, проф. О. Я. Качан, г. Запоріжжє, Україна

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДИФУЗОРА
ВІДЦЕНТРОВОГО КОМПРЕСОРА З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДА
ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ**

Ю. В. Орса, В. М. Нестеренков, Ю. А. Марченко, І. А. Петрик, П. Д. Жеманюк, А. А. Скребцов

В роботі розглянута послідовність технологічних операцій підготовки, складання та електронно-променевого зварювання зразка дослідного дифузора відцентрового компресора прорізними швами. Матеріал деталі - титановий сплав марки ОТ4-1. Технологія зварювання прорізними швами передбачає нанесення базових точок на торець лопатки, зі збереженням координат положення електронно-променевої гармати щодо заданої точки в керуючій програмі установки. Застосування розробленої технології дозволило зменшити викривлення деталі після зварювання, забезпечити задовільну якість зварних з'єднань та високу точність сполучення пучка контуром кожної з лопаток дифузора.

Ключові слова: електронно-променево зварювання, дифузор, прорізні шви, геометричні розміри, усадка, параметри режиму, залишкові деформації, складально-зварювальне пристосування, глибина провару, титанові конструкції.

**PROCESS DESIGN FOR CENTRIFUGAL COMPRESSOR DIFFUSER
MANUFACTURING BY ELECTRON-BEAM WELDING**

Yu. V. Orsa, V. M. Nesterenkov, Yu. A. Marchenko, I. A. Petrik, P. D. Zhemanjuk, A. A. Srebtsov

This paper presents and proves a possibility for centrifugal compressor diffuser manufacturing by electron-beam welding. Process flow, including preparation, assembly and slot welding of the prototype part, has been developed. Product material is OT4-1 titanium alloy. Slot welding technique specifies marking of reference points on the blade tips while retaining electron-beam gun location relative to a set point in the installation executive program. Using the designed process allowed reducing part distortion after welding, ensuring satisfactory quality of welded joints and high accuracy of electron-beam alignment with outline of each diffuser blade.

Keywords: electron-beam welding, diffuser, slot welds, geometry, shrinkage, process parameters, residual deformation, assemble-welding fixture, penetration depth, titanium metal works.

Орса Юрий Викторович – вед. инж. по сварке, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: orsa@technobeam.com.ua.

Нестеренков Владимир Михайлович - чл.-кор. НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: nesterenkov@technobeam.com.ua.

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

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

Жеманюк Павел Дмитриевич - канд. техн. наук, главный инженер АО «Мотор Сич», Запоріжжє, Україна, e-mail: motor@motorsich.com.

Скребцов Андрей Андреевич - канд. техн. наук, доцент кафедры механики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжє, Україна, e-mail: nic_tz@ukr.net.

Orsa Yrii Viktorovich - lead engineer on welding Institute of Electric them. Paton NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: orsa@technobeam.com.ua.

Nesterenkov Vladimir Mihailovich - Corresponding Member. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Electric them. Paton NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: nesterenkov@technobeam.com.ua.

Marchenko Yrii Anatolievich - lead engineer of welding of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: marchenko2126@mail.ru.

Petrik Igor Andreevich - Candidate of Technical Science, chief welder of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Zhemanjuk Pavel Dmitrievich - Candidate of Technical Science, chief engineer of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: motor@motorsich.com.

Skrebtsov Andrei Andreevich - Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Mechanics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: nic_tz@ukr.net.