

УДК 621.791.011

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПРИ СВАРКЕ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Муравьев В.И., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник,

профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» (vmuravyev@mail.ru)

Бахматов П.В., к.т.н., доцент, зав.кафедрой «Машиностроение и металлургия» (mim@knastu.ru)

Плетнев Н.О., аспирант кафедры «Машиностроение и металлургия» (Nik1111ta@mail.ru)

Дебеляк А.А., аспирант кафедры «Машиностроение и металлургия» (kts@knastu.ru)

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет
(681013, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Хабаровский край, ул. Ленина, 27)

Аннотация. Проведен анализ остаточных напряжений, вызываемых процессами технологического цикла сварки конструкций из сталей и сплавов. Установлено, что максимальные остаточные напряжения возникают в процессе охлаждения сварной конструкции. Исследованиями установлена удовлетворительная сходимость результатов математического расчета и экспериментальных значений деформации конструкции в процессе сварки на специальном стенде, что позволяет выявлять направление действия внутренних напряжений и оценить геометрию деталей по расчетной модели температурных полей при стыковой сварке стальных и титановых заготовок. Показаны возможность использования коэрцитиметра для оценки напряженного состояния материала, его дефектность, возможность прогнозирования структурного состояния и свойств сварных соединений. Проведенные исследования позволяют дать заключение о моменте возникновения и динамике протекания сварочных деформаций как о результате действия внутренних остаточных напряжений и структурных преобразований, вызванных процессом сварки.

Ключевые слова: остаточные напряжения, сварочные деформации, коробления, энергия Гиббса, коэрцитивная сила.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-4-251-255

Сварка плавлением как сталей, так и титановых сплавов сопровождается образованием химической и физической неоднородностей зоны соединения, при этом искажаются геометрические размеры конструкций из-за возникновения сварочных напряжений, в металле шва появляются поры и микротрещины, снижаются механические характеристики и другие показатели [1 – 7].

В настоящей работе исследовали сварные соединения листовых конструкций из стали СтЗсп и титанового сплава ВТ20. При сварке титановых и стальных образцов применяли автоматические способы сварки (аргонодуговую сварку и сварку в среде защитного газа CO_2). После сварки титановых заготовок проводили замеры величины прогибов (f) в пятнадцати точках с точностью 0,05 мм. Результаты замеров обрабатывали с использованием приложений Microsoft Office, Excel, строили диаграммы. Для оценки момента возникновения и динамики протекания сварочных деформаций в процессе автоматической стыковой сварки образцов из углеродистой стали был изготовлен экспериментальный стенд [8], который позволял в режиме реального времени фиксировать величину деформаций (коробления) в различных точках свариваемых заготовок как в процессе сварки, так и в процессе охлаждения сварных заготовок. Результаты, полученные на реальных стыко-

вых соединениях, сравнивали с результатами расчетов, приведенных в работе [9].

Микроструктуру определяли на металлографическом микроскопе марки «Микро-200» (Россия) в диапазоне увеличений 100 – 1000. Оцифрованные изображения в дальнейшем обрабатывали с помощью специализированной программы Image.Pro.Plus.5.1 [10, 11].

Энергия Гиббса представляет собой удельное выражение свободной энергии, которая в термодинамических процессах играет ключевую роль. Понятие свободной энергии является антиподом энтропии или диссипативной составляющей энергетического баланса. Если энтропия определяет энергию, потерянную для данной системы, которая может только рассеиваться, то свободная энергия потенциально может совершить работу. Способ определения удельной работы деформации основан на определении работы деформации при нанесении отпечатка с помощью микротвердомера: при вдавливании алмазного наконечника в материал происходит образование отпечатка определенного объема, работа вдавливания наконечника затрачивается на образование новой боковой поверхности отпечатка и на оттеснение объема материала, равного объему углубленной части конического наконечника. Таким образом, измерение энергии Гиббса в различных зонах позволяет выявить наибо-

лее напряженные области, приводящие к деформации конструкции [12]. Для определения изменения микротвердости и энергии Гиббса сварных образцов использовали микротвердомер модели НМV-2 (Shimadzu (Япония)) [13].

Химический состав металла образцов определяли методом спектрального анализа [14] на оптическом эмиссионном анализаторе марки Q4 TASMAR (BRUKER (Германия)). Замеры коэрцитивной силы (H_c) проводили цифровым полуавтоматическим коэрцитиметром марки КРМ-Ц (Россия).

Верхняя кривая на рис. 1 отражает характер деформирования образцов размером $4 \times 125 \times 500$ мм от действия сжимающих напряжений, возникающих в процессе сварки в момент ее окончания. При охлаждении наблюдается деформация пластины в результате перехода сжимающих напряжений в растягивающие. Максимальные значения пластических деформаций наблюдаются в центре пластины.

На основании проведенных исследований выведены следующие закономерности:

- масса наплавленного металла и глубина проплавления оказывают влияние на конечное коробление конструкции вследствие изменения зазора между заготовками;
- чем больше провар, тем ближе прогиб к продольной оси шва;
- характер влияния отношения длины шва ($L_{ш}$) к длине сварного образца ($L_{обр}$) на коробление конструкции:
 - при $L_{ш}/L_{обр} \leq 1$ – финишное коробление минимальное;
 - при $L_{ш}/L_{обр} \geq 1/5$ – прогиб в сторону корня;
 - при $L_{ш}/L_{обр} \geq 1/2,5$ – прогиб в сторону усиления при зазоре $a \geq 2$ мм;
 - при $L_{ш}/L_{обр} \geq 1/2,5$ – прогиб в сторону корня шва при $a \leq 2$ мм;

- характер влияния угла расхождения кромок на деформацию конструкции: при сборке заготовок с зазором в корне шва $1,5$ мм при угле расхождения $\alpha \approx 172^\circ$ наблюдается прогиб в сторону корня шва, но величина прогиба меньше по сравнению со случаем, когда $L_{ш}/L_{обр} \geq 1/2,5$.

Экспериментальные исследования деформации сварных швов методом замера величины прогиба титановых и стальных заготовок показали удовлетворительную сходимость с данными математических расчетов [15]. Прогнозируя момент возникновения и динамику изменения пластических деформаций, можно назначать различные методы уменьшения или исключения коробления сварных конструкций. Анализ сварочных деформаций по расчетной модели температурных полей при сварке тонких пластин встык из углеродистой стали позволяет выявить направление действия внутренних напряжений и оценить изменение геометрии деталей, что может служить основанием для распространения методики расчетов на сварные соединения из других материалов.

Исследования твердости образцов проводили в четырех участках (рис. 2): зоне основного металла (1); зоне термического влияния (2); зоне сплавления (3); зоне наплавленного металла (4).

На основании результатов замеров микротвердости в различных зонах сварного соединения построены соответствующие кривые (рис. 3). Максимальной энергией Гиббса обладает зона 4, минимальной – зона 1.

Исследованиями макро- и микроструктуры металла шва сварных образцов из стали СтЗсп в зонах со значительными концентраторами напряжений выявлены как структурные изменения (особенно в зоне сплавления наличие видманштеттовой структуры), так и микротрещины и несплавления.

В микроструктуре металла шва образцов из титанового сплава ВТ20 после холодной пластической дефор-

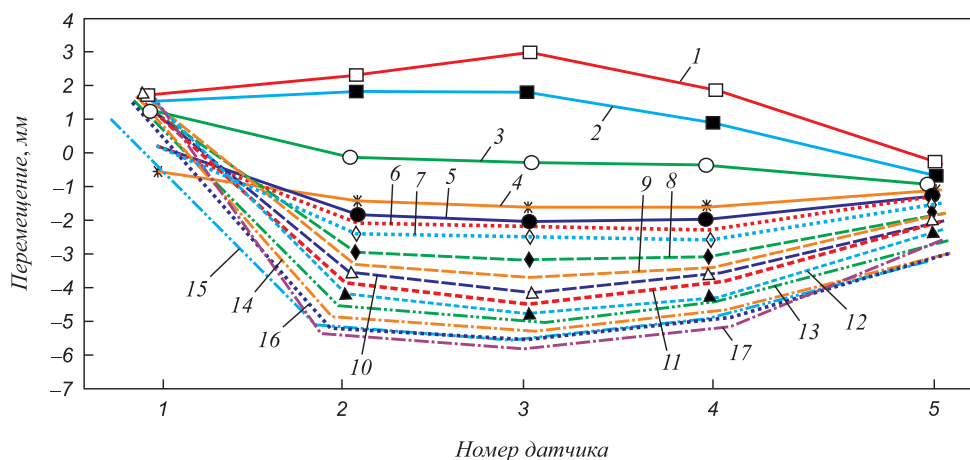


Рис. 1. Диаграмма кинетики деформаций при стыковой сварке при различных значениях t , °С:

1 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40; 6 – 50; 7 – 60; 8 – 70; 9 – 80; 10 – 90; 11 – 100; 12 – 110; 13 – 120; 14 – 130; 15 – 140; 16 – 150; 17 – 160

Fig. 1. Diagram of deformation kinetics at butt welding at different t values at °C :

1 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40; 6 – 50; 7 – 60; 8 – 70; 9 – 80; 10 – 90; 11 – 100; 12 – 110; 13 – 120; 14 – 130; 15 – 140; 16 – 150; 17 – 160

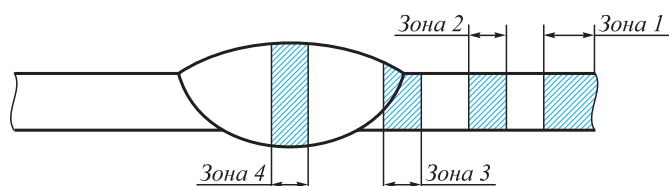


Рис. 2. Схема расположения участков замера микротвердости образцов

Fig. 2. Layout chart of measurement sections of sample microhardness

магии наблюдаются сдвиговые полосы (α - и β -фазы), которые после отжига коагулируют и округляются. Явно выраженная игольчатая структура в зоне сплавления трансформируется в пластинчатую форму. Интенсификация скорости охлаждения в интервале фазового превращения $\beta \rightarrow \alpha$ приводит к уменьшению толщины пластин.

Замеры коэрцитивной силы цифровым полуавтоматическим коэрцитиметром образцов сразу после сварки позволили построить как линейную, так и пространственную магнитогаммы (рис. 4), по которым можно определить общую напряженность магнитных полей рассеивания и место зоны со значительными концентраторами напряжений, о чем свидетельствуют два перехода магнитных полей через ноль (экстремумы на участках L_x 100 и 300 мм).

В таблице приведена сравнительная оценка коэрцитивной силы и твердости сварных швов. На рис. 5 представлена контрольная карта распределения значений коэрцитивной силы по поверхности сварного шва образцов.

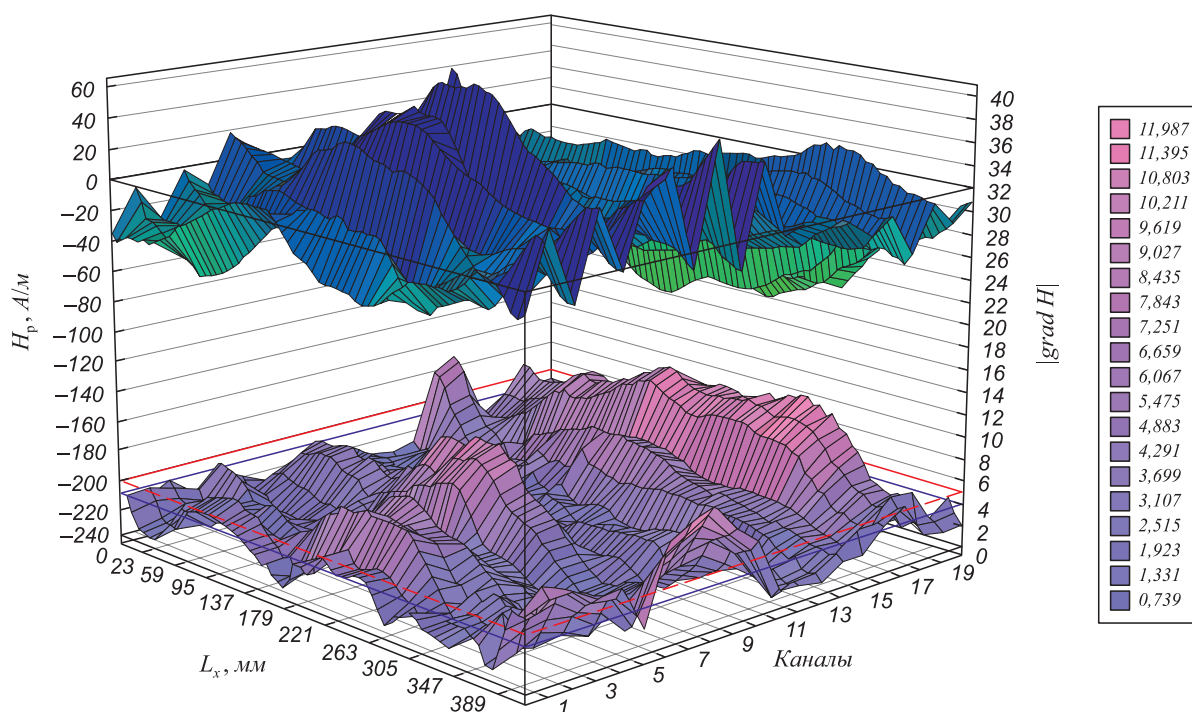


Рис. 4. Пространственная магнитогамма сварного образца

Fig. 4. Spatial magnetogram of the welded sample

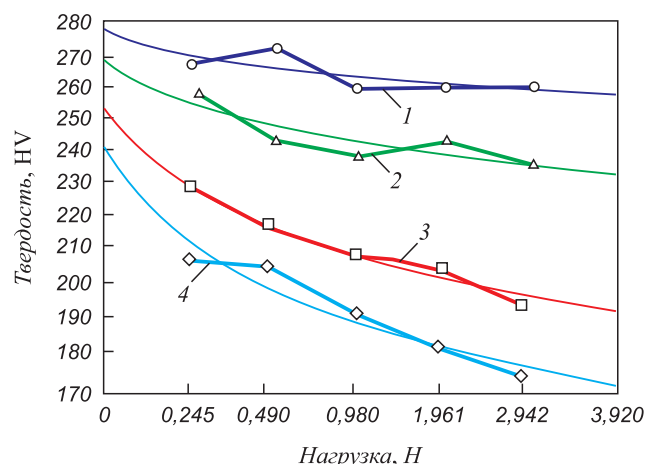


Рис. 3. Микротвердость и энергия Гиббса сварных образцов из стали Ст3 в различных зонах замеров:

- ◇ – зона 1, уравнение линии тренда $y = 243,71x^{-0,178}$;
- – зона 2, $y = 255,26x^{-0,141}$;
- △ – зона 3, $y = 268,96x^{-0,069}$; ○ – зона 4, $y = 276,85x^{-0,036}$

Fig. 3. Microhardness and Gibbs energy of welded samples of St3 steel in different measurement sections:

- ◇ – section 1, trendline equation $y = 243,71x^{-0,178}$;
- – section 2, $y = 255,26x^{-0,141}$; △ – section 3, $y = 268,96x^{-0,069}$;
- – section 4, $y = 276,85x^{-0,036}$

Коэрцитивную силу можно использовать как параметр оценки и прогнозирования не только дефектности (остаточных напряжений, трещин), но и структурного состояния и механических свойств металла.

Выводы. Проведенными исследованиями выявлены закономерности появления остаточных напряжений в

Коэрцитивная сила и твердость сварных швов образцов из стали СтЗсп

Coercive force and hardness of the sample welded joints of St3sp steel

Образец	H_c , А/см		Твердость в зоне контроля, НВ	H_c , А/см		Твердость в зоне контроля, НВ
	Точка 1	Точка 2		Точка 3	Точка 4	
1	4,5	4,6	–	3,9	4,7	–
2	6,3	5,1	157, 158, 154	5,3	5,7	–
3	4,5	4,5	184, 179, 172	5,0	5,7	–
4	4,7	4,8	–	4,6	5,3	–
5	4,7	4,5	–	4,5	5,1	155, 149, 151

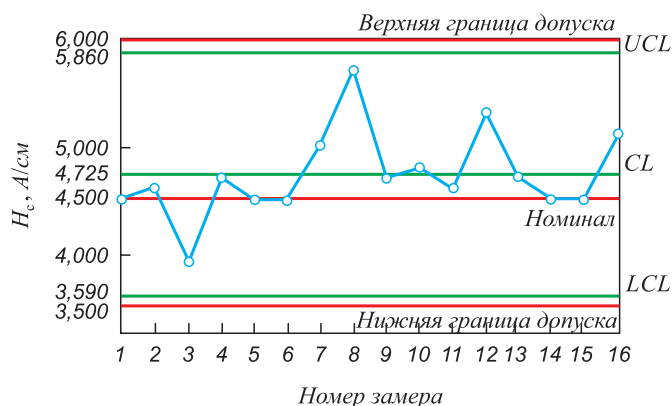


Рис. 5. Контрольная карта распределения значений коэрцитивной силы (H_c) по поверхности сварного шва образцов 1 – 5

Fig. 5. Testing value distribution map of the coercive force (H_c) along the surface of the sample welded joints 1 – 5

процессе охлаждения сварной конструкции. Показана удовлетворительная сходимость результатов математического расчета и экспериментальных значений деформации конструкции в процессе сварки. Исследования остаточных напряжений на специальном стенде позволяют выявлять: направление действия внутренних напряжений; геометрию деталей по расчетной модели температурных полей при стыковой сварке стальных и титановых заготовок. Выявлена возможность использования коэрцитиметра для прогнозирования структурно-го состояния и свойств сварных соединений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
2. Руссо В.Л. Дуговая сварка в инертных газах. – Л.: Судостроение, 1984. – 120 с.
3. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блашук и др. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.

4. Тарасов А.А., Матохин Г.В., Молоков К.А. Распределение температурных полей и их влияние на структурные параметры материалов при сварке. Исследования по вопросам повышения эффективности судостроения и судоремонта. Сборник. – Владивосток, 2005. – 202 с.
5. Карпов Л.П. Профилактика разрушений и новые технологии термообработки. – М.: Машиностроение, 2003. – 252 с.
6. Потак Я.М. Хрупкие разрушения сталей и стальных изделий. – М.: Машиностроение, 1965. – 388 с.
7. Сизов А.М., Воробьев Г.А. Влияние импульсной обработки на внутренние напряжения в сталях // Перспективные материалы. 1997. № 4. С. 67 – 71.
8. Дебеляк А.А., Муравьев В.И., Бахматов П.В. Кинетика процесса деформации при сварке заготовок из углеродистых сталей. – В кн.: Материалы Российской научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в области технологий двойного назначения» (г. Комсомольск-на-Амуре, 21 – 24 ноября 2011 г.). – Комсомольск-на-Амуре: изд. КНАГТУ, 2011. – 317 с.
9. Дебеляк А.А., Муравьев В.И., Бахматов П.В. Определение возможности расчета остаточных деформаций по тепловым полям при сварке тонких пластин встык // Ученые записки «КНАГТУ». 2010. № IV-1 (4). С. 68 – 70.
10. Вашуль Х. Практическая металлография. Методы приготовления образцов / Пер. нем. – М.: Металлургия, 1988. – 320 с.
11. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2006. – 384 с.
12. Шпилева А.А. Разработка количественных структурно-энергетических показателей микроструктуры поликристаллических материалов / Автореф. дис. канд. тех. наук. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2009. – 22 с.
13. Колмаков А.Г., Терентьев В.Ф., Бакиров М.Б. Методы измерения твердости. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 150 с.
14. Никитенко Б.Ф., Казаков Н.С., Кузнецов В.П. Пути повышения достоверности и точности анализа эмиссионной спектрографии. – М.: изд. ЦНИИиТЭЧ, 1989. – 54 с.
15. Череповский П.В., Муравьев В.И. Эффективность снятия остаточных напряжений в сварных титановых сплавах. – В кн.: Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности. Материалы III науч.-практ. конференции молодых ученых и аспирантов (23 – 25 ноября 2005 г., Москва). – М.: ОАО «ОКБ Сухого», 2005. С. 510 – 515.

Поступила 9 января 2014 г.

EFFECT OF STRESS STATE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CONSTRUCTIONS OF STEELS AND ALLOYS AT WELDING

V.I. Murav'ev, P.V. Bakhmatov, N.O. Pletnev, A.A. Debelyak

Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. The paper presents the analysis of the residual stresses caused by the processes of technological welding cycle of steels and alloys. It has been found that the maximum residual stresses arise during cooling of the weldment. The research has established a satisfactory convergence of the calculation results of the mathematical and experimental design values of strain during welding on a special stand that allows identifying the direction of internal stresses action, as well as assessing the geometry details on the calculation model of temperature fields in butt welding of steel and titanium billets. In the article the authors show the possibility of using the coercimeter to assess the stress state of the material, its defects, the ability to predict the structural state and properties of welded joints. The studies have enabled the authors to give an opinion on the timing and dynamics of the flow of welding deformation as a result of internal residual stresses and structural changes caused by the welding process.

Keywords: residual stress, welding deformation, buckling, Gibbs energy, coercive force.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-4-251-255

REFERENCES

1. Vinokurov V.A., Grigor'yants A.G. *Teoriya svarochnykh deformatsii i napryazhenii* [Theory of welding deformations and stresses]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 280 p. (In Russ.).
2. Russo V.L. *Dugovaya svarka v inertnykh gazakh* [Arc welding in inert gases]. Leningrad: Sudostroenie, 1984, 120 p. (In Russ.).
3. Gurevich S.M., Zamkov V.N., Blashchuk V.E., Kushnirenko N.A., Kharchenko G.K. *Metallurgiya i tekhnologiya svarki titana i ego splavov* [Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys]. Kiev: Naukova dumka, 1986, 240 p. (In Russ.).
4. Tarasov A.A., Matokhin G.V., Molokov K.A. *Raspredelenie temperaturnykh polei i ikh vliyanie na strukturnye parametry materialov pri svarkе. Issledovaniya po voprosam povysheniya effektivnosti sudostroeniya i sudoremonta. Sbornik* [Distribution of temperature fields and their effects on structural parameters of materials at welding. Researches of the issues to increase the efficiency of shipbuilding and shop repair. Collected articles]. Vladivostok, 2005, 202 p. (In Russ.).
5. Karpov L.P. *Profilaktika razrusheniya i novye tekhnologii termoo obrabotki* [Destruction preventive measures and new technologies of heat treatment]. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 252 p. (In Russ.).
6. Potak Ya.M. *Khrupkie razrusheniya staley i stal'nykh izdelii* [Brittle fractures of steels and steel items]. Moscow: Mashinostroenie, 1965, 388 p. (In Russ.).
7. Sizov A.M., Vorob'ev G.A. Influence of pulse treatment on internal stresses in steels. *Perspektivnye materialy*. 1997, no. 4, pp. 67–71. (In Russ.).
8. Debelyak A.A., Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V. Kinetics of deformation processes at welding of blanks from carbon steel. In: *Materialy Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Fundamental'nye issledovaniya v oblasti tekhnologii dvoynogo naznacheniya" (g. Komsomol'sk-na-Amure, 21–24 noyabrya 2011 g.)* [Proceedings of Russian Scientific Conference "Fundamental researches in the area of twofold purpose technologies" (Komsomolsk-on-Amur, November 21–24, 2011)]. Komsomol'sk-on-Amur: izd. KnAGTU, 2011, 317 p. (In Russ.).
9. Debelyak A.A., Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V. Determination of the possibility to calculate residual deformation by heat fields when welding thin plates edge-to-edge. *Uchenye zapiski KnAGTU*. 2010, no. IV-1 (4), pp. 68–70. (In Russ.).
10. Washull Horst. *Präparative Metallographie. Präparationstechnik für die Lichtmikroskopie*. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1984. (Russ.ed.: Washull H. *Prakticheskaya metallografiya. Metody prigotovleniya obraztsov*. Moscow: Metallurgiya, 1988. 320 p.).
11. Brandon David G., Kaplan Wayne D. *Microstructural characterization of materials*. Chichester, New York, 1999. (Russ.ed.: Brandon D., Kaplan W. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya*. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 384 p.).
12. Shpileva A.A. *Razrabotka kolichestvennykh strukturnoenergeticheskikh pokazatelei mikrostruktury polikristallicheskikh materialov: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Development of quantitative structural-and-energy data of polycrystalline material microstructure. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Komsomol'sk-on-Amur, 2009, 22 p. (In Russ.).
13. Kolmakov A.G., Terent'ev V.F., Bakirov M.B. *Metody izmereniya tverdosti* [Measuring methods of hardness]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2005, 150 p. (In Russ.).
14. Nikitenko B.F., Kazakov N.S., Kuznetsov V.P. *Puti povysheniya dostovernosti i tochnosti analiza emissionnoi spektrografii* [Ways to increase reliability and exactness of the emission spectrography analysis]. Moscow: izd. TsNIIITECh, 1989, 54 p. (In Russ.).
15. Cherepovskii P.V., Murav'ev V.I. Efficiency of residual stress relief in welded titanium alloys. In: *Issledovaniya i perspektivnye razrabotki v aviatsionnoi promyshlennosti. Materialy III nauch.-prakt. konferentsii molodykh uchenykh i aspirantov (23–25 noyabrya 2005 g., Moskva)* [Researches and perspective developments in aviation industry. Proceedings of the 3rd Theoretical and Practical Conference of Young Scientists and Post-graduates (November 23–25, 2005, Moscow)]. Moscow: OAO "OKB Sukhogo", 2005, pp. 510–515. (In Russ.).

Information about the authors:

V.I. Murav'ev, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Professor of the Chair "Mechanical Engineering and Metallurgy" (vmuravyev@mail.ru)
 P.V. Bakhmatov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair "Mechanical Engineering and Metallurgy" (mim@knastu.ru)
 N.O. Pletnev, Postgraduate of the Chair "Mechanical Engineering and Metallurgy" (Nik1111ta@mail.ru)
 A.A. Debelyak, Postgraduate of the Chair "Mechanical Engineering and Metallurgy" (kts@knastu.ru)

Received January 9, 2014