

УДК 621.791.1:669.715:620.18

Покляцкий А.Г.

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. Украина, г. Киев

СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Исследованы структурные особенности сварных соединений композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов с дисперсными армирующими керамическими частицами оксида алюминия Al_2O_3 или карбида кремния SiC. Показано, что применение сварки трением с перемешиванием не приводит к существенным фазово-структурным изменениям в металле шва и на прилегающих к нему участках в зоне образования неразъемного соединения и позволяет сохранить исходную дисперсность частиц и степень их рассредоточения по всему объему шва на уровне основного материала.

Ключевые слова: композиционные алюминиевые сплавы; дисперсные частицы; сварка трением с перемешиванием; микроструктура; агломерация; рассредоточение

1. Вступление

Одной из главных задач развития современной техники является снижение веса и уменьшение размеров конструкций при сохранении их функциональных возможностей. Особое внимание уделяется этому вопросу при изготовлении изделий авиационной техники, космических аппаратов, наземного и водного транспорта. На протяжении последних десятилетий решение этих проблем в значительной степени осуществляется благодаря более широкому использованию новых высокопрочных алюминиевых сплавов, обладающих высокими показателями удельной прочности, модуля упругости, коррозионной стойкости и сопротивления распространению усталостных трещин в процессе эксплуатации. Однако возможности для дальнейшего повышения свойств получаемых традиционными методами литья и последующей прокатки серийных промышленных алюминиевых сплавов практически исчерпаны. Поэтому существенного улучшения эксплуатационных характеристик изделий можно добиться путем использования при их изготовлении качественно новых перспективных композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов, армированных дисперсными (в том числе наноразмерными) частицами. Но при изготовлении эффективных сварных конструкций реализация потенциальных возможностей таких перспективных материалов в значительной степени зависит от качества их соединения.

2. Постановка задачи

Цель данной работы – оценить эффективность применения сварки трением с перемешиванием (СТП) для получения качественных соединений композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов с дисперсными армирующими керамическими частицами оксида алюминия Al_2O_3 или карбида кремния SiC.

Для исследований использовали некоторые композиционные материалы толщиной 2 мм на основе алюминиевых сплавов с дисперсными армирующими керамическими частицами оксида алюминия Al_2O_3 или карбида кремния SiC (табл.). Они являются перспективными конструкционными материалами благодаря высоким значениям модуля упругости, износостойкости и жаропрочности, а также низким значениям удельного веса и коэффициентов термического расширения и трения [1, 2].

Сварку трением с перемешиванием осуществляли на лабораторной установке, сконструированной в Институте электросварки им. Е.О. Патона (рис. 1). Она состоит из двух основных узлов, один из которых предназначен для вращения и перемещения в вертикальной плоскости специального сварочного инструмента, нагревающего за счет трения определенный объем металла в зоне сварки до пластического состояния и перемешивающего его по всей толщине свариваемых кромок. А другой обеспечивает фиксацию заготовок и надежное прижатие свариваемых кромок.

**Состав и предел прочности листов толщиной 2 мм
из композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов**

Матричный сплав	Содержание и состав армирующих частиц	Размеры армирующих частиц, мкм	Расстояния между армирующими частицами, мкм	Предел прочности, σ_b , МПа
АМг5	27% Al_2O_3	3-15	3-20	340
АЛ25	25% Al_2O_3	5-20	5-60	267
Д16	20% SiC	3-5	1-5	512
АЛ25	18% SiC	5-15	3-50	278
АД0	7% Al_2O_3	$\leq 0,1$	0,1-2,5	148
Д16	20% SiC	$\leq 0,1$	0,1-2,5	574

мых кромок к подкладке (без формирующей канавки), на которой формируется шов, а также равномерное перемещение их в горизонтальной плоскости, благодаря чему можно получать протяженные (до 400 мм) линейные швы. При этом скорость сварки регулируется в пределах 6-40 м/ч, а частота вращения инструмента определяется характеристиками

электродвигателя, на валу которого он фиксируется с помощью специальной цанги. Во избежание деформирования свариваемых кромок непосредственно перед инструментом располагается ролик, который дополнительно прижимает их к подкладке и не позволяет изменять им свое пространственное положение в процессе сварки.

Для сварки трением с перемешиванием исследуемых композиционных материалов использовали асинхронный электродвигатель мощностью 4 кВт с частотой вращения вала 1420 об/мин. Скорость линейного перемещения инструмента составляла 8-14 м/ч. Стыковые соединения получали, используя разработанный в ИЕС им. Е.О. Патона специальный сварочный инструмент с коническим наконечником и буртом диаметром 12 мм [3]. Исследования микроструктуры поперечных шлифов полученных сварных соединений проводили с помощью оптического микроскопа МИМ-8М.

3. Результаты исследований

Структура композита представляет собой матричные зерна алюминиевого сплава, находящиеся в нем интерметаллидные включения и частицы армирующей фазы, более-менее равномерно распределенные по всему объему матрицы (рис. 2). На характеристики композиционных материалов кроме механических свойств наполнителя и матричного сплава, объемного соотношения компонентов, структуры композиционных отливок и характера термической или термомеханической обработки существенно влияют фракционный состав и равномерность распределения армирующих частиц в матрице. От размера самих частиц зависят как их внутреннее строе-

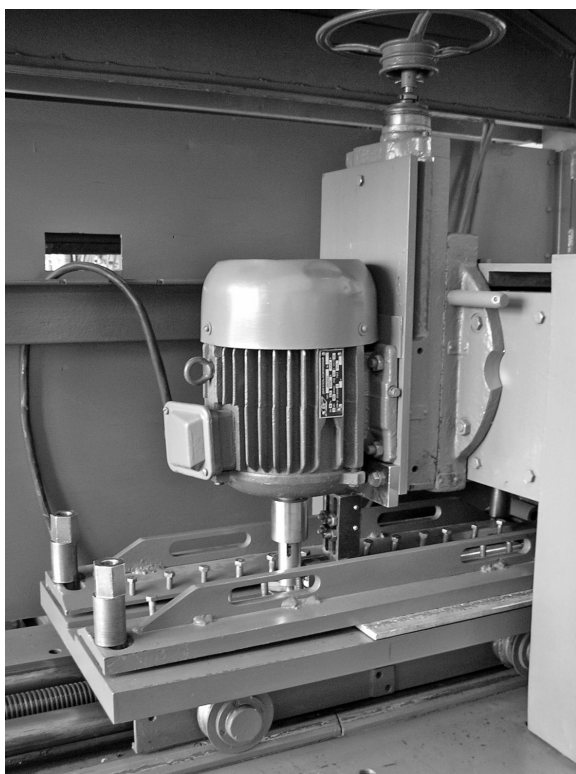


Рис. 1. Лабораторная установка для сварки трением с перемешиванием тонколистовых (0,8 – 3,0 мм) материалов на основе алюминия и магния

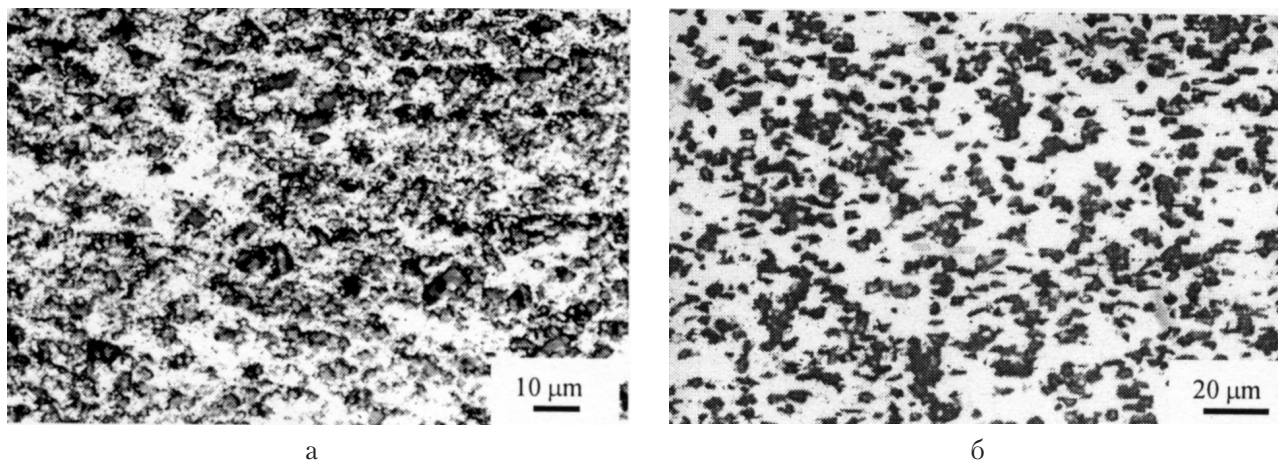


Рис. 2. Микроструктура композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов Д16 с 20% SiC (а) и АМг5 с 27% Al_2O_3 (б)

ние, так и структура межфазных поверхностей разграничения с матрицей. С уменьшением армирующих частиц уменьшаются плотность дислокаций и уровень внутренних напряжений в приграничных слоях. В больших частицах наблюдается упругий изгиб решетки на стыках отдельных зерен, что приводит к возникновению на этих участках упругих напряжений. Кроме того, с увеличением размера частиц у них повышается плотность дефектов структуры, количество двойников и дефектов упаковки [4, 5]. Поэтому композиционные материалы с нанодисперсными армирующими частицами оксида алюминия Al_2O_3 или карбида кремния SiC являются одними из наиболее перспективных конструктивных материалов для изготовления эффективных сварных конструкций.

Для получения неразъемных соединений обычных алюминиевых сплавов и композиционных материалов на их основе в большинстве случаев применяются традиционные методы сварки плавлением. При этом под воздействием высокотемпературного источника нагрева в месте образования шва про-

исходит полное расплавление некоторого объема соединяемых материалов и последующее его затвердевание. Поэтому в таких швах формируется литая крупнокристаллическая структура, и часто появляются дефекты в виде пор, горячих трещин и макровключений оксидной пленки [6-8]. Нерасплавыаемые армирующие частицы очень неравномерно распределяются в кристаллизующемся металле шва (рис. 3, а). Кроме того, если при сварке композиционных материалов, армированных частицами карбида кремния, температура нагрева металла превышает $660^\circ C$, то в результате их взаимодействия с алюминием могут образоваться игольчатые включения карбида алюминия Al_4C_3 (рис. 3, б). Распад или агломерация армирующих частиц наряду с образованием дефектов в швах приводят к значительному снижению механических свойств полученных соединений, а, следовательно, к ухудшению работоспособности и сокращению сроков эксплуатации сварных конструкций.

Поэтому при изготовлении конструкций из композиционных материалов на основе алюминиевых

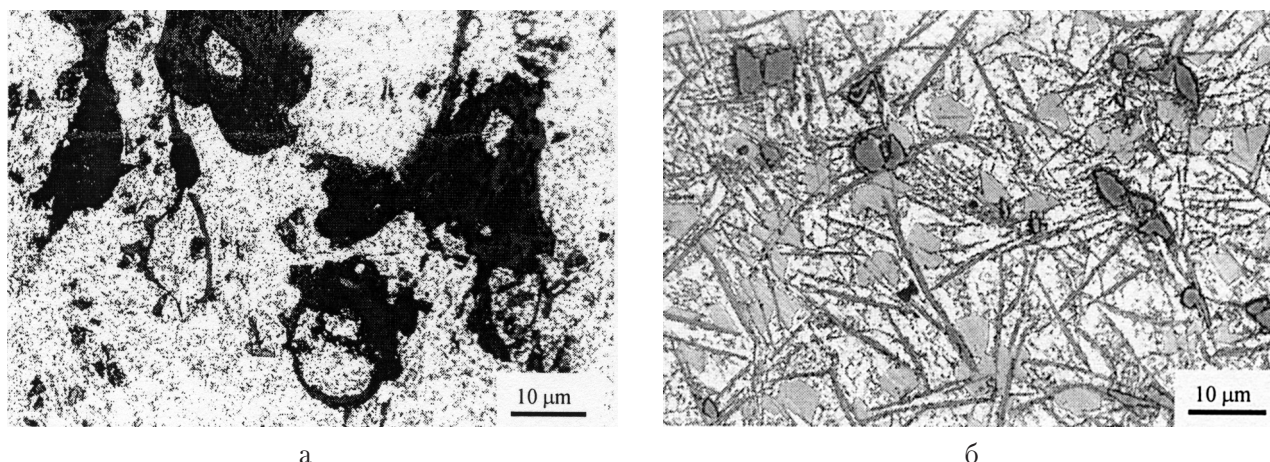


Рис. 3. Микроструктура металла швов, полученных при сварке плавлением композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов АЛ25 с 25% Al_2O_3 (а) и с 18% SiC (б)

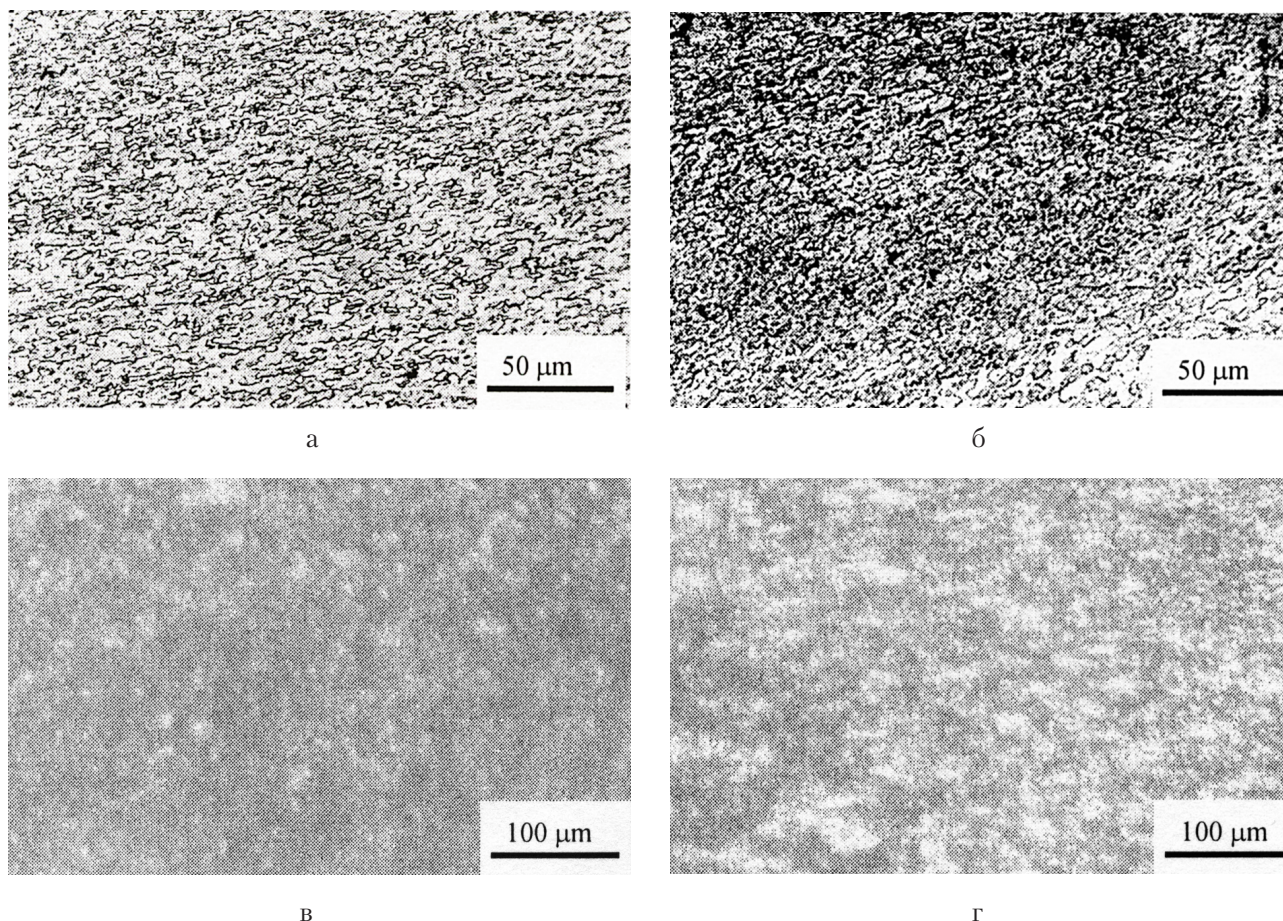


Рис. 4. Микроструктура металла швов (а, в) и зон сопряжения их с основным материалом (б, г), полученных при сварке трением с перемешиванием композиционных нанодисперсных материалов на основе алюминиевого сплава АД0 с 7% Al₂O₃ (а, б) и алюминиевого сплава Д16 с 20% SiC (в, г)

сплавов с дисперсными армирующими керамическими частицами оксида алюминия Al₂O₃ или карбида кремния SiC целесообразно использовать технологии получения неразъемных соединений, позволяющие избежать проблем, обусловленных высокотемпературным нагреванием металла в зоне сварки, его плавлением и кристаллизацией. Эффективным способом получения неразъемных соединений алюминиевых сплавов в твердой фазе без расплавления основного материала является сварка трением с перемешиванием, изобретенная в СССР в 1965 г. [9]. Формирование шва при таком способе сварки осуществляется благодаря нагреванию за счет трения определенного объема соединяемых материалов в зоне их контакта до пластического состояния и перемешиванию его специальным инструментом, что позволяет получать различные типы соединений (стыковые, угловые, тавровые, нахлесточные, а также замковые, прорезные и т. п.) [10, 11]. Благодаря выполненным в Британском институте сварки (TWI) исследованиям удалось реализовать этот способ сварки при производстве узлов ракетно-космической техники, кораблей, воздушного и наземного

транспорта, оборудования для химической промышленности, строительных конструкций и т. п. [12-16].

В результате проведенных в ИЭС им. Е.О Патона исследований установлено, что при сварке трением с перемешиванием композитов на основе алюминия с дисперсными керамическими частицами оксида алюминия Al₂O₃ или карбида кремния SiC удается обеспечить равномерное распределение этих частиц по всему объему металла шва и не допустить их распада и агломерации. Кроме того, формирование неразъемного соединения в твердой фазе позволяет сохранить исходную нанодисперсность армирующих частиц и степень их рассредоточения по всему объему шва на уровне основного материала (рис. 4).

4. Выводы

Формирование неразъемных соединений композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов с дисперсными армирующими керамическими частицами оксида алюминия Al₂O₃ или карбида кремния SiC за счет интенсивной пластической деформации металла при низкотемпературном

нагреве его в процессе СТП позволяет избежать диссоциации и агломерации частиц. При этом в шве сохраняется исходная дисперсность армирующих частиц и обеспечивается равномерность распределения их по всему объему на уровне основного материала.

Список литературы

- [1] Сварка давлением микродисперсного композиционного материала $AMg5 + 27\% Al_2O_3$ с применением быстроакристаллизованной прослойки эвтектического состава $Al + 33\% Cu$ / Ю.В. Фальченко, А.Н. Муравейник, Г.К. Харченко и др. // Автоматическая сварка. – 2010. – №2. – С. 10-14.
- [2] Исследование свариваемости дисперсно-упрочненного композиционного материала $Al + SiC$ / В.Р. Рябов, А.Н. Муравейник, В.П. Будник и др. // Автоматическая сварка. – 2001. – №5. – С. 15-19.
- [3] Пат. 54096 Україна, МПК В23К 20/12. Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів / Іщенко А.Я., Покляцький А.Г.; заявник і патентовласник ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. – № u201005315; заявл. 30.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. №20.
- [4] Неорганическое материаловедение. Энциклопедическое издание под ред. Г.Г. Гнесина, В.В. Скорохода. Материалы и технологии. Том 2. Книга 1. – С. 434-444.
- [5] Исследование структуры композиционного материала на алюминиевой основе, упрочненного частицами карбида кремния / Л.И. Маркашова, В.Р. Рябов, В.В. Стаценко и др. // Автоматическая сварка. – 1995. – №8. – С. 35-38.
- [6] Разупрочнение высокопрочных алюминиевых сплавов при различных способах сварки плавлением / А.В. Лозовская, А.А. Чайка, А.А. Бондарев и др. // Автоматическая сварка. – 2001. – №3. – С. 15-19.
- [7] Покляцкий А.Г. Влияние параметров асимметричного и модулированного токов на качество сварных соединений алюминиевых сплавов / А.Г. Покляцкий, А.А. Гринюк // Автоматическая сварка – 2001. – №7. – С. 33-36.
- [8] Покляцкий А.Г. Особенности образования макровключений оксидной пленки в металле швов алюминиевых сплавов (Обзор) / А.Г. Покляцкий // Автоматическая сварка. – 2001. – №3. – С. 38-40.
- [9] А. с. 195846 СССР МПК В 23к 35/02. Способ сварки металлов трением. / Ю.В. Клименко (СССР). – №1036054/25-27; заявл. 09.11.65; опубл. 04.05.67, Бюл. №10.
- [10] Dawes C.J. Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys / C.J. Dawes, W.M. Thomas // Welding Journal. – 1996. – №3. – P. 41-45.
- [11] Pietras A. Characteristics of welds formed by pressure welding incorporating stirring of the weld material (FSW) / A. Pietras, L. Zadroga, M. Lomozik // Welding International. – 2004. – №1. – P. 5-10.
- [12] Johnsen M.R. Friction Stir Welding Takes Off at Boeing / M.R. Johnsen // Welding Journal – 1999. – №2. – P. 35-39.
- [13] Okamura H., Aota K., Ezumi M. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy and Application to Structure / H. Okamura, K. Aota, M. Ezumi // Journal of Japan Institute of Light Metals. – 2000. – №4. – P. 166-172.
- [14] Lahti K. FSW – possibilities in Shipbuilding / K. Lahti // Svetsaren. – 2003. – №1. – P. 6-8.
- [15] Arbegast W.J. Friction Stir Welding After a Decade of Development / W.J. Arbegast // Welding Journal. – 2006. – №3. – P. 28-35.
- [16] Friction Stir Welding Flies High at NASA / J. Ding, R. Carter, K. Lawless et al. // Welding Journal. – 2006. – №3. – P. 54 – 59.

Poklyatsky A.G.

E.O. Paton Electric Welding Institute NASU. Ukraine, Kiev

FRICION STIR WELDING – PROMISING TECHNIQUE OF PRODUCTION OF PERMANENT JOINTS OF COMPOSITE ALUMINUM ALLOYS

The structural features of the welded joints of composite materials based on aluminium alloys with dispersed reinforcing ceramic particles of aluminium oxide Al_2O_3 or silicon carbide SiC . It has been shown that the application of friction stir welding does not cause significant phase-structural changes in the weld metal and surrounding areas in the region formation of permanent connection and allows preserve the original particle size distribution and the degree of dispersion throughout the volume of the weld at the base material.

Keywords: composite aluminium alloys; disperse particles; friction stir welding; microstructure; agglomeration; dispersal



References

- [1] Pressure welding of micro-dispersed composite material AMg5 + 27% Al₂O₃ with application of rapidly solidified interlayer of eutectic alloy Al + 33% Cu / Yu.V. Falchenko, A.N. Muravejnik, G.K. Kharchenko et al. // *Automatic welding*. – 2010. – №2. – P. 10-14.
- [2] Investigation of weldability of dispersion-hardened composite Al + SiC / V.R. Ryabov, A.N. Muravejnik, V.P. Budnik et al. // *Automatic welding*. – 2001. – №5. – P. 15-19.
- [3] Pat. 54096 Ukraine, MPK V23K 20/12. Instrument dlya zvaryuvannya tertym z peremishuvannym alyuminievym splaviv / Ishchenko A.Ya., Poklyatsky A.G.; zayavnyk i patentovlasnyk E.O. Paton EWI NAS Ukraine. – № u201005315; zayav. 30.04.2010; opubl. 25.10.2010, Byul. №20.
- [4] Neorganicheskoe materialovedenie. Entseklpedicheskoe izdanie pod red. G.G. Gnesina, V.V. Skorohoda. Materialy i tehnologii. Tom 2. Kniga 1. – P. 434-444.
- [5] Investigation of the structure of a composite material based on aluminum reinforced by silicon carbide particles / L.I. Markashova, V.R. Ryabov, V.V. Statsenko et al. // *Automatic welding*. – 1995. – №8. – P. 35-38.
- [6] Softening of high-strength aluminium alloys in different fusion welding processes / A.V. Lozovskaya, A.A. Chajka, A.A. Bondarev et al. // *Automatic welding*. – 2001. – №3. – P. 15-19.
- [7] Poklyatsky A.G. Effect of parameters of asymmetric and modulated currents on quality of aluminium alloy welded joints / A.G. Poklyatsky, A.A. Grinyuk // *Automatic welding*. – 2001. – №7. – P. 33-36.
- [8] Poklyatsky A.G. Peculiarities of formation of macroinclusions of oxide film in weld metal of aluminium alloys (Review) / A.G. Poklyatsky // *Automatic welding*. – 2001. – №3. – P. 38-40.
- [9] A. s. 195846 SSSR MPK V 23k 35/02. Sposob svarki metallov treniem. / Yu.V. Klimenko (SSSR). – №1036054/25-27; zaiavl. 09.11.65; opubl. 04.05.67, Byul. №10.
- [10] Dawes C.J. Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys / C.J. Dawes, W.M. Thomas // *Welding Journal*. – 1996. – №3. – P. 41-45.
- [11] Pietras A. Characteristics of welds formed by pressure welding incorporating stirring of the weld material (FSW) / A. Pietras, L. Zadroga, M. Lomozik // *Welding International*. – 2004. – №1. – P. 5-10.
- [12] Johnsen M.R. Friction Stir Welding Takes Off at Boeing / M.R. Johnsen // *Welding Journal* – 1999. – №2. – P. 35-39.
- [13] Okamura H., Aota K., Ezumi M. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy and Application to Structure / H. Okamura, K. Aota, M. Ezumi // *Journal of Japan Institute of Light Metals*. – 2000. – №4. – P. 166-172.
- [14] Lahti K. FSW – possibilities in Shipbuilding / K. Lahti // *Svetsaren*. – 2003. – №1. – P. 6-8.
- [15] Arbegast W.J. Friction Stir Welding After a Decade of Development / W.J. Arbegast // *Welding Journal*. – 2006. – №3. – P. 28-35.
- [16] Friction Stir Welding Flies High at NASA / J. Ding, R. Carter, K. Lawless et al. // *Welding Journal*. – 2006. – №3. – P. 54 – 59.