

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ПРОГРАММЫ ПО НОВЫМ ИСТОЧНИКАМ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ*

А. КЛИМПЕЛЬ, д-р техн. наук (Силез. политехн. ин-т, г. Гливице, Польша)

Проведен анализ стратегии Европейского Союза, содержащейся в программе «The European Strategic Energy Technology Plan» (SET-Plan). Описано строение ветрогенераторов большой мощности для использования на суше и на море, а также современные конструкционные материалы и конструктивные решения башен, лопастей и несущей конструкции гондол. Предложены направления исследований современных сварочных технологий, которые должны применяться при изготовлении ветряных генераторов мощностью до 20 МВт.

Ключевые слова: сварные конструкции, возобновляемая энергия, ветряные генераторы, европейский план, новые конструкционные материалы, новые технологии сварки, монтажные работы

В конце 2010 г. Европейская комиссия утвердила новую программу «The European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan)» [1], основной целью которой является снижение эмиссии парниковых газов (CO₂) и разработка эффективных энергетических технологий. Эта инициатива прежде всего основана на сотрудничестве с European Industrial Initiatives и охватывает следующие области: биоэнергию; улавливание и накопление CO₂; электрические сети; топливные элементы и водород; ядерную энергию; солнечную и ветряную энергию.

В каждой из указанных выше областей важная роль принадлежит технологиям сварки, наплавки, термического напыления и резки, которые, к сожалению, обычно не учитываются или трактуются как второстепенные. Создана группа экспертов, включающая автора статьи, задачей которой является разработка концепции фундаментальных и прикладных исследований в области технологии материалов применительно к созданию морских ветряных генераторов большой мощности. Анализ документов «SET-Plan Wind Energy» показывает, что современные сварочные технологии должны сыграть одну из ведущих ролей в строительстве морских ветряных генераторов мощностью до 20 МВт. Ожидается, что в 2030 г. в Европейском Союзе ветряная энергия будет генерировать электрическую энергию мощностью 280...400 ГВт. Предполагается в рамках программы «SET-Plan Wind Energy», на которую будет выделено около 6 млрд евро, строительство до десяти опытных ветряных турбин нового поколения мощностью

10...20 МВт; не менее четырех опытных конструкций морских ветряных турбин большой мощности, расположенных в зонах с разными ветряными условиями, в прибрежной морской полосе и в открытом море на больших глубинах, что потребует использования сварочных технологий.

Существует множество национальных и международных организаций и обществ, которые, в частности, координируют сотрудничество между промышленностью и научно-исследовательскими центрами [2–25]. Ведущую роль на мировом рынке среди стран, производящих электроэнергию за счет энергии ветра, сейчас сохраняет Дания, где в 2010 г. из энергии ветра произведено уже около 20 % всей электроэнергии (в Польше лишь 2,6 %). По данным Польского общества энергии ветра в 2010 г. около 1096 МВт электроэнергии было произведено наземными ветряными электростанциями (0 — морские ветряные электростанции), а по прогнозу на 2020 г. около 1,6 ГВт электроэнергии будут производить 10893 морских ветровых турбин и 14,4 ГВт 2100 наземных ветровых турбин, включая 600 частных турбин [26]. По прогнозу, представленному в докладе Йоса Бэурскенса, директора научной программы WE@SEA правительства Нидерландов [4], Польша является пока только потенциальной территорией для строительства морских ветряных электростанций и на фоне прогноза на 2030 г. для стран региона Балтийского и Северного морей выглядит плохо. Согласно этому прогнозу ожидается, что морские ветряные электростанции в 2030 г. будут производить электроэнергию мощностью: свыше 4 ГВт (Дания), 6 (Нидерланды), 4 (Бельгия), 33 (Великобритания) и 25 (Германия).

Наземные и морские ветрогенераторы, изготавливаемые в широком диапазоне мощности из различных конструкционных материалов, приведены на рис. 1–5 и табл. 1. На мировом рынке ветряной энергии представлено достаточно много производителей ветрогенераторов, среди которых

* Ранее статья опубликована в журнале «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach», № 2, 2011 г. Перевод на русский язык выполнен д-ром техн. наук Е. Турыком.

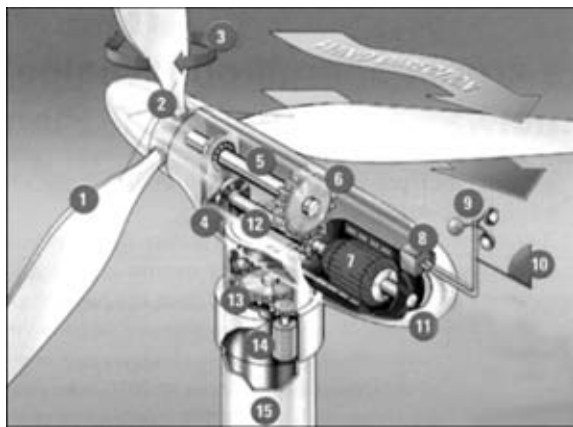


Рис. 1. Схема ветрогенератора: 1 — лопасти; 2 — ротор; 3 — система вращения лопасти во втулке ротора; 4 — система торможения вращения ротора; 5 — приводной вал с малой скоростью вращения; 6 — коробка передач; 7 — генератор; 8 — система управления; 9 — измерительный прибор скорости ветра; 10 — система слежения за направлением ветра; 11 — гондола; 12 — вал с большой скоростью вращения; 13, 14 — соответственно привод и двигатель системы поворота гондолы; 15 — башня



Рис. 3. Монтаж гондолы ветрогенератора большой мощности на башне ветрогенератора

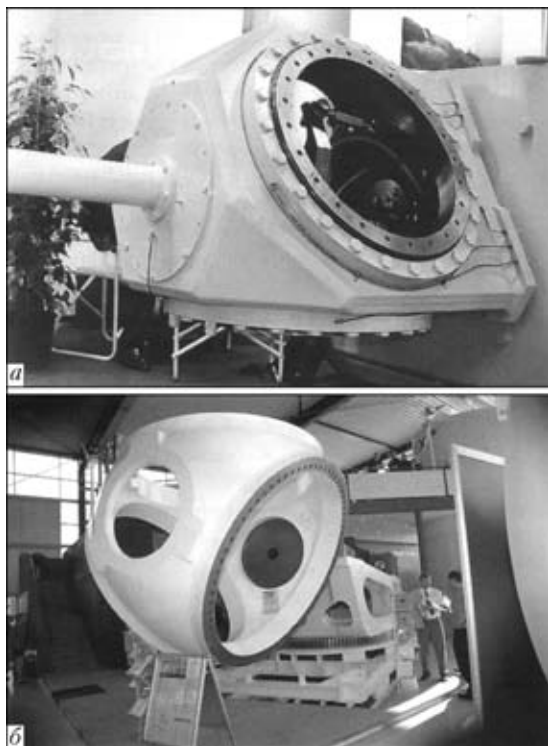


Рис. 2. Внешний вид втулки ротора ветрогенераторов: а — сварная конструкция из листового стали; б — отливка из сфероидизированного чугуна массой 15 т

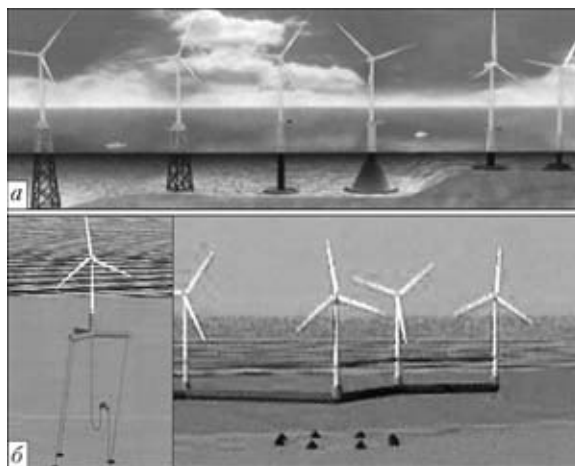


Рис. 4. Конструкции морских ветрогенераторов с основанием на дне в прибрежной морской полосе (а) и плавающих (б)

лидирующая роль принадлежит европейским фирмам [13–19], %: «VESTAS» (Дания) — 12,5...15,0; «ENERCON» (Германия) — 8,5...10,5; «GAMESA» (Испания) — 6,5...8,0; «SIEMENS WIND POWER» (Германия и Дания) — 5,0...6,0; «REPOWER» (Германия) — 3,5...4,5; «GE Wind Energy» (США) — 12...14; «SINOVEL» (Китай) — 9...11; «GLOWIND» (Китай) — 7...8; «Dongfang Electric» (Китай) — 6,0...6,5; «SUZLON» (Индия) — 6,0...6,5.

Массовая доля и доля расходов на изготовление основных несущих узлов конструкции ветрогенераторов (втулки ротора, несущей конструкции гондолы и башни) зависят не только от мощности ветрогенератора, его размеров, но и показывает насколько важную роль играет узел в конструкции ветрогенератора [1–25] (рис. 1–3, табл. 2). Башни ветрогенераторов большой мощности (свыше 2 МВт) изготавливают сварными из стали среднего предела текучести, обычно S355 NL. Несущие конструкции гондолы и втулки ротора выполнены в виде тяжелых отливок из сфероидизированного чугуна, цельными или из секций, сваренных способом MAG, а также из кованных стальных элементов, соединяемых способом MAG, и листового стали, чаще всего S355 NL [11–20]. Ротор генератора (втулка и лопасти) является наиболее дорогостоящим узлом ветрогенератора и одновременно узлом, к которому предъявляются требования особо высокой надежности. Разрабатываются технологии изготовления втулок роторов из композиционных материалов [25]. Применяемые в настоящее время основные производственные процессы при изготовлении элементов

Таблица 1. Ветрогенераторы максимальной мощности разных производителей и их параметры [13–18]

Ветрогенератор	Электрическая мощность, МВт	Диаметр ротора, м	Вид башни	Высота башни, м
VESTAS-V112-3.0	3,0	112	Труба стальная	В зависимости от размещения
ENERCON-E126	7,5	127	Трубчатая, стальная	135
GAMESA-G128-4,5 MW	4,5	128	Трубчатая — сталь или преднапряженный железобетон	120
SIEMENS SWT-3,6-107	3,6	107	Трубчатая, стальная	80 или в зависимости от размещения
REPOWER-6M	6,15	126	»»	100...117 на суше, 85...95 морская
GE WIND ENERGYGE 4.0	4,0	110	»»	Нет данных
SET-Plan	20	160...250	Нет данных	120...160

Примечание. У морского ветрогенератора VESTAS-V112-3,0 размер гондолы следующий: высота 6,8, длина 12,8, ширина 4,0 м.



Рис. 5. Внешний вид первой свободноплавающей ветроэнергетической турбины фирмы «Siemens» и «StatoilHydro», установленной 8 сентября 2009 г. в Северном море

конструкции ветрогенераторов представлены в табл. 3.

Отметим, что одной из основных технологических целей программы Европейского Союза «SET-Plan — Wind Energy» является строительство морских ветрогенераторов мощностью до 20 МВт при одновременном снижении издержек производства электроэнергии. Анализ документов [1–9] показывает, что фундаментальные и прикладные

научно-исследовательские работы в области технологии материалов должны сосредоточиться на совершенствовании современных конструкционных материалов, а следовательно, и сварочных технологий и материалов. Основные конструкционные элементы ветрогенераторов большой мощности (более 2 МВт), такие как ротор, гондола и башня, должны быть изготовлены из материалов с высокой удельной усталостной прочностью при одновременном снижении затрат на производство. Для выполнения этих требований целью фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ должно быть снижение массы ротора (втулка ротора + лопасти), гондолы (приводной вал, коробка передач, генератор, система управления, привод установки ротора) и башни.

Башни ветрогенераторов большой мощности как морских, так и наземных, являются элементом, подверженным наибольшей усталостной нагрузке. В настоящее время башни строят из толстостенных труб конической формы сходимостью около 3 %, реже решетчатой конструкции (в Европе изготавливаются фирмой «RUUKI» [19]), а

Таблица 2. Массовая доля и доля расходов основных конструкционных элементов ветрогенераторов [1–24]

Элемент конструкции	Ориентировочная масса, т, турбин мощностью 2...3 МВт	Массовая доля, %	Доля расходов, %	Материал
Башня	200	50...68	10...25	Сталь, преднапряженный железобетон
Вся гондола (несущая конструкция + коробка передач + генератор)	70	25...40	40...65	Сталь, медь, алюминий, специальные сплавы металлов и т. д.
Несущая конструкция гондолы	11,5 (сварнолитая конструкция)	6...8	Нет данных	Сталь, чугун сфероидизированный
Ротор	40	10...20	20...30	Сталь, чугун сфероидизированный, стеклопластик или пластмасса, упрочненная углеродным волокном, древесина и эпоксидные смолы
Втулка ротора		6,5...7,0	Нет данных	Сфероидизированный чугун
Три лопасти		Нет данных	» »	Стеклопластик или пластмасса, упрочненная углеродным волокном, древесина и эпоксидные смолы



Таблица 3. Основные производственные процессы изготовления элементов конструкции ветрогенераторов и технологические задачи [1–25]

Элемент конструкции	Основной материал	Производственные процессы	Технологические задачи
Башня	Сталь	Непрерывное литье с контролируемой прокаткой, сварка	Производство стали более высокого качества и лучшей свариваемости, высококачественных сварочных материалов, снижение производственных расходов, разработка высококачественных технологий сварки
Несущая конструкция гондолы	»»	Непрерывное литье с контролируемой прокаткой, сварка, литье	Производство стали более высокого качества и лучшей свариваемости, высококачественных сварочных материалов, снижение производственных расходов. Овладение технологией литья чугунных отливок большой массы, повышение их качества
	Чугун		
Втулка ротора	Сталь	Ковка, литье, сварка	Производство стали более высокого качества и лучшей свариваемости, высококачественных сварочных материалов, снижение производственных расходов. Овладение технологией литья чугунных отливок большой массы, а также технологией производства высококачественных конструкций из композиционных материалов
	Чугун		
	Композиционные материалы		

также гибридной конструкции (стальбетонные или полностью бетонные) [18–22]. При установке морских ветрогенераторов одной из самых сложных технологических задач является разработка технологии монтажа элементов башни и конструкции их основания на морском дне, а также технология прикрепления ко дну на большой глубине или реализации конструкции плавающих башен (рис. 4, 5). Все мировые и европейские программы сосредоточены на прикладных исследованиях по нахождению конструктивных решений башни, монтажу ее элементов, а также созданию и применению композиционных материалов с очень высоким пределом текучести, обеспечивающих существенное повышение прочностных свойств, снижение массы ветровых башен и себестоимости продукции [1–26]. Свыше 90 % построенных башен ветрогенераторов большой мощности изготовлено из низколегированных сталей в основном типа S355 NL ($\sigma_{0,2} = 345...355$ МПа) [11–23]. Основной технологией выполнения сварных соединений в процессах изготовления башен ветрогенераторов большой мощности является автоматическая сварка под флюсом [29–35]. В то же время проводятся также исследования по технологии сварки применительно к монтажу стальных элементов башен вместо дорогостоящих болтовых соединений [27, 28], хотя на европейском рынке доступны стали с хорошей свариваемостью с пределом текучести 1100...1300 МПа (WELDOX 1100 и WELDOX 1300) и толщиной листов до 25,4 мм.

В программу Европейского Союза «SET-Plan — Wind Energy», которая находится на этапе разработки стратегии основных и прикладных исследований, целесообразно ввести: исследование технологии лазерной гибридной сварки стыковых и тавровых соединений листового металла из сталей с высоким пределом текучести как в цеховых условиях, так и в условиях монтажа секций башен (вместо болтовых соединений) [36–

56]; исследования по разработке высококачественных присадочных материалов для лазерной гибридной сварки сталей с высоким пределом текучести [52–56]; исследования технологии ротационной сварки трением стыковых и тавровых соединений листового металла из сталей с высоким пределом текучести в цеховых условиях монтажа секций башен (вместо болтовых соединений) [57–63]; исследования технологии сварки MAG самозащитной порошковой проволокой (метод SSA) стыковых и тавровых соединений толстостенных высококачественных отливок втулок ротора и несущей конструкции гондолы из стального литья и чугуна; исследования технологии условий лазерной и гидроабразивной резки листового металла из сталей с высоким пределом текучести.

1. *Global gaps in clean energy R&D: Update and recommendations for international collaboration* // IEA Report for the Clean Energy Ministerial, 2010.
2. *Fichaux N. Delivering today the energy of tomorrow*. http://www.windplatform.eu/fi-leadadmin/ewetp_docs/Events/Europ_ean_Wind_Initiative_JP.pdf.
3. *Energy 2010* // Ann. report 2010 on public grants from energy research programmes ForskEL, EDDP/ERP, ELforsk, DSCR energy and environment and energy projects of the Danish National Advanced Technology Foundation, 2010.
4. *Beurskens J. Developing offshore wind energy now and in the future*: <http://www.we-at-sea.org/leden/docs/conference2010/1.pdf>.
5. *TPWind: The way forward* // 6 Frame Work Programme. — March 2009.
6. *Profile of the Danish wind industry*. <http://www.e-pages.dk/windpower/21/>
7. *RenewableUK* (BWEA). <http://www.bwea.com/pdf/publications/CapReport.pdf>.
8. *Doing business with wind turbine manufacturers*. <http://www.bvgassociates.co.uk/LinkClick.aspx?fileticket=YcepA-zeHDQc%3D&tabid=101>.
9. *American wind power surmounted challenges in 2010*. http://www.awea.org/m_release_01-06-11.cfm.
10. *AWEA 3rd Quarter 2010 Market Report*. http://www.awea.org/documents/reports/2010_third_quarter_report.pdf.
11. *Winds of change. A manufacturing blueprint for the wind industry*. http://www.awea.org/la_pubs_reports.cfm.

12. *WindVision 2025*. A strategy for Quebec. — Canadian Wind Energy Ass., 2010.
13. *VESTAS V 112 3.0 MW offshore*. pdf. www.vestas.com
14. *ENERCON wind energy converters*. Products overview. pdf. www.enercon.de.
15. *GAMESA G128-4,5 MW*. pdf. www.gamesacorp.com
16. *SIEMENS wind turbine*. New dimensions. pdf. www.siemens-windpower.com.
17. *Repower system*. The 5 MW megawatt power plant with 126 meter rotor diameter: Technical data. pdf. www.repower.com.
18. *GE power & water*. pdf. www.gewindenergy.com.
19. *Ruukki wind towers*. Reaching the heights with Ruukki. Ruukki- Engineering-Wind-tower-reaching-the-heights.pdf.
20. *Acona D., Weigh J. Mc*. Wind turbine materials and manufacturing fact sheet. US Dep. of Energy, 2011. — P. 1–8.
21. *Aldeman M*. Building the wind turbine supply chain: The next steps workshop. <http://renewableenergy.illinois-state.edu/wind/conferences/>.
22. *Gudmestad O. T., Sarkar A*. Offshore deployment and marine operation for offshore wind turbines // NORCOWE WP3 Meeting (7 June 2010).
23. *Fischer T., Kuhn M*. Importance and mitigation of loading on offshore wind turbines on monopiles support structures in cases of non-availability // Proc. of 20th intern. offshore and polar energy conf. (Beijing, 2010, June 20–25). — P. 644.
24. *Chou J.-S., Tu W.-T*. Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower // Eng. Failure Analysis. — 2011. — **18**. — P. 295–313.
25. *Innovative composite hub for wind turbines*. http://cordis.europa.eu/data/PROJ_FP5/ACTIONeq_DndSESSIONeqL2362005919ndDOCeqI021ndTBLeq_EN_PROJ.htm.
26. *RAPORT* // Energetyka wiatrowa w Polsce. — 2010. — Nov.
27. *166 Sprawozdafi projektow wykonanych w ramach funduszy badawczych Unii Europejskiej — programu WIND ENERGY*. <http://cordis.europa.eu/>.
28. *RFSR-CT-2006-00031*. High-strength steel tower for wind turbine: Final Report, 2010.
29. *Paschold R., Dirksen D*. Submerged arc welding of steels for offshore wind towers // Svetsaren. — 2005. — **60**, № 1. — P. 13–17.
30. *Torstensson B., Ivarson P*. ESAB welding solutions for windmill tower production. Processes and equipment for increased productivity // Ibid. — 2005. — **60**, № 2. — P. 14–19.
31. *Efficient welding in the wind tower manufacturing industry* // ESAB Brochure XA00126920.
32. *Man E., Lafleur W*. SIF Group at the foundation of Dutch wind energy // Svetsaren. — 2008. — **63**, № 1. — P. 18–22.
33. *Sharpe M*. Robotic fabrication of wind turbine power generators // Welding J. — 2009. — **88**, № 8. — P. 40–44.
34. *Wind turbine welding system uses linear motion modules* // Ibid. — 2009. — **88**, № 8. — P. 50–51.
35. *Wind energy*. An Oerlikon market solution // Brochure Air. Liquid. Welding.
36. *RFSR-CT-2005-00042*. Fatigue behavior of high strength steels welded joints in offshore and marine systems: Final Report, 2009.
37. *RFSR-CT-2006-00029*. Improvement in steel utilization and manufacturing by recent break-through in high-power fibre laser welding: Final Report, 2009.
38. *Industrial implementation of laser/GMA welding and mechanical properties of the welds* / C. Thorny, G. Sepold, T. Seefeld et al. // Proc. of supermartensitic stainless steels 2002 conf. — Brussels: KCI Publ., 2002. — P. 147–155.
39. *Sepold G., Thorny C., Seefeld T. et al*. CO₂-laser GMA hybrid welding — Aspects of research and industrial application // Proc. of lasers in manufacturing 2003 conf. — Stuttgart: AT-Fachverlag, 2003. — P. 149–156.
40. *Staufner H.*: Laser hybrid welding of ships // Welding J. — 2004. — **83**, № 3. — P. 39–43.
41. *Thorny C., Seefeld T., Vollertsen F*. Application of high-power fibre lasers in laser and laser-MIG welding of steel and aluminium // Proc. of IIV Ann. Assembly conf. (Prague, Czech Republic, 10–16 July, 2005). — P. 88–98.
42. *Staufner H., Graf T*. Laser hybrid welding drives VW improvements // Welding J. — 2003. — **82**, № 1. — P. 42–48.
43. *Joining pipe with hybrid laser-GMAW process: Weld test results and cost analysis* / E. W. Reutzel et al. // Ibid. — 2006. — **85**, № 6. — P. 66–71.
44. *Staufner H.* Laser hybrid welding and laser brazing at Audi and VW // Welding in the World. — 2006. — **50**, № 7/8.
45. *Ozden H*. Investigating fiber lasers for shipbuilding and marine construction // Welding J. — 2007. — **86**, № 5. — P. 26–29.
46. *Staufner H.* Laser hybrid welding in the automotive industry // Ibid. — 2007. — **86**, № 10. — P. 36–40.
47. *Defalco J.* Practical applications for hybrid laser welding // Ibid. — 2007. — **86**, № 10. — P. 47–51.
48. *Stridh L.-E.* Welding of 13 % Cr-steels using the laser-hybrid process // Svetsaren. — 2007. — **62**, № 1. — P. 34–36.
49. *Ohlsen F*. Hybrid laser arc welding. — Cambridge: Woodhead publ., 2009.
50. *Fiber laser-GMA hybrid welding of commercially pure titanium* / C. Li, K. Muneharua, S. Takao et al. // Materials and Design. — 2009. — № 30. — P. 109–114.
51. *Using hybrid laser arc welding to reduce distortion in ship panels* / S. M. Kelly et al. // Welding J. — 2009. — **88**, № 3. — P. 32–36.
52. *Wind tower consumable selection guide*. www.lincolnelectric.com.
53. <http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/mc05114.pdf>.
54. <http://www.bernardwelds.com/articles/article4.htm> http.
55. http://weldingdesign.com/processes/news/wdf_11004/.
56. http://www.hobartbrothers.com/aboutus/fillermetals_high-strength_pipe/.
57. *Friction stir welding studies on mild steel* / T. J. Linert et al. // Welding J. — 2003. — **82**, № 1. — P. 1–9.
58. *A microstructural study of friction stir welded joints of carbon steels* / A. Ozekcin et al. // Intern. J. Offshore and polar eng. — 2004. — **14**, № 4. — P. 284–288.
59. *Friction stir welding — process variants and recent industrial developments* / I. M. Norris, W. M. Thomas, J. Martin et al. // Proc. of 10th intern. Aachen welding conf. on welding and joining, key technologies for the future (Aachen, 24–25 Oct. 2007).
60. *Defalco J., Steel R.* Friction stir process now welds steel pipe // Welding J. — 2009. — **88**, № 5. — P. 44–48.
61. *Santos T. F.* A Friction stir welding of UNS S32205 duplex stainless steel // LNLS Activity 2009. Report.
62. *EBSD investigation of friction stir welded duplex stainless steel* / T. Saeidet al. // World Academy of Sci., Eng. and Techn. — 2010. — **61**. — P. 376–379.
63. *Friction stir spot welding of advanced high-strength steels — A feasibility study* / Z. Feng et al. // SAE Intern. Report 2005-01-1248.

Analysis of the strategy of EuroUnion outlined in the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) was performed. The objective of this program is limiting the hothouse effect and an essential increase of power generation using renewable sources, including wind energy. Design of high-power wind generators for application on land and at sea is described, as well as modern structural materials and design solutions of towers, blades and load-carrying structures of nacelles. Directions of investigation of modern welding technologies to be applied in manufacture of up to 20 mW wind generators are proposed.

Поступила в редакцию 10.01.2012