

Технология и технологические машины

УДК 389.001

DOI 10.18698/0536-1044-2016-4-44-51

Сравнение совмещенной и отдельно-совмещенной схем ультразвукового контроля углепластиков

А.А. Гемберг, М.А. Прилуцкий

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Comparison of Combined and Separated-Combined Schemes of Ultrasonic Testing of Carbon Fiber Reinforced Plastic

A.A. Gemberg, M.A. Prilutskiy

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: gemberg67@gmail.com, map@bmstu.ru

i В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) все чаще применяются в различных отраслях промышленности. Широкое внедрение ПКМ связано с необходимостью обеспечения надежной и безопасной эксплуатации конструкций из них, что требует разработки и применения методов неразрушающего контроля. Анализ методов контроля ПКМ показал, что наиболее перспективным из них является ультразвуковой метод, обладающий наибольшей чувствительностью к характерным технологическим и эксплуатационным дефектам в композите. Приведены результаты исследований по ультразвуковому контролю образцов из ПКМ (углепластика) с искусственными и технологическими дефектами различных размеров. Экспериментальные образцы толщиной 4,0 мм были выполнены с заложенными дефектами в виде фторопластовых пленок диаметром 4, 8 и 12 мм, имитирующими технологические дефекты, появление которых в производстве может быть обусловлено технологическими отклонениями при формовании или несоблюдением технологических режимов. Проведены эксперименты на образцах толщиной 4,0 мм с искусственными дефектами в виде плоскодонных отражателей, имитирующими расслоения и непроклеи. Плоскодонные искусственные отражатели диаметром 3, 4, 5, 6, 8, 10 и 12 мм, выполненные цекованием на одинаковой глубине 2,0 мм, предназначены для оценки чувствительности, а отражатели диаметром 8 мм на глубине 3,5; 2,0 и 0,5 мм — для оценки возможности выявления дефектов в приповерхностных зонах. Рассмотрены теоретически и экспериментально преимущества и недостатки совмещенной и отдельно-совмещенной схем контроля.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, ультразвуковой контроль, схема контроля, искусственный дефект, коэффициент затухания, пьезоэлектрический преобразователь.

i Nowadays polymer composite materials (PCM) are increasingly used in various industries. The widespread introduction of PCM is associated with the need to ensure reliable and safe operation of PCM structures that requires the development and application of non-destructive testing methods. The analysis of the existing PCM testing methods has shown that the most promising of these is the ultrasonic testing method. It has the greatest sensitivity to the characteristic technological and operational defects in the composite. The results of studies on ultrasonic testing of PCM (CFRP) samples with artificial and technological defects of various sizes are presented in this paper. Test samples of a 4.0 mm thickness had inherent defects in the form of PTFE films with a diameter of 4, 8 and 12 mm. The films simulated technological defects that might occur in manufacturing due to deviations during forming or non-compliance with technological procedures. Experiments were carried out on 4.0 mm thick samples with artificial defects in the form of flat-bottomed reflectors that simulated delamination and improper bonding. Flat-bottomed artificial reflectors with a diameter of 3, 4, 5, 6, 8, 10 and 12 mm manufactured by counter boring at a 2.0 mm depth were meant to assess the sensitivity; while reflectors with a diameter of 8 mm at a depth of 3.5, 2.0 and 0.5 mm were used to assess the possibility of defect detecting in the near-surface zones. The advantages and disadvantages of combined and separated-combined testing methods were considered through theoretical and experimental studies.

Keywords: polymeric composite material, ultrasonic testing, control scheme, artificial defect, damping factor, piezoelectric transducer.

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) как в мире, так и в России являются перспективными и развивающимися материалами производство которых интенсивно растет с каждым годом. ПКМ все чаще применяют в различных отраслях промышленности: атомной, автомобиле- и судостроении, строительстве. Но наибольший импульс к развитию ПКМ дали космическая отрасль и авиация, где к материалам часто предъявляются противоречивые требования, такие как минимальная масса конструкции с максимальной прочностью и жесткостью в условиях работы под нагрузкой при высоких температурах в агрессивных средах.

Широкое внедрение ПКМ связано с обеспечением надежной и безопасной эксплуатации конструкций из них, что требует разработки и применения методов неразрушающего контроля. Анализ методов контроля ПКМ [1] показал, что наиболее перспективным из них является ультразвуковой метод, обладающий наибольшей чувствительностью к характерным технологическим и эксплуатационным дефектам в композите [2–6].

В конструкциях из ПКМ в большей степени распространены дефекты, ориентированные параллельно поверхности изделия [7–9]. При такой ориентации дефектов целесообразно проводить контроль по совмещенной схеме прямыми совмещенными преобразователями

(СП) и по раздельно-совмещенной схеме раздельно-совмещенными преобразователями (РСП) продольных волн.

Поскольку ПКМ обладают такими характерными особенностями [10, 11], как слоистая структура, различные схемы армирования (ориентации волокон) и высокая анизотропия акустических свойств, необходимо рассмотреть преимущества и недостатки указанных схем контроля и выбрать оптимальные схему и частоту контроля, что на сегодняшний день является актуальной задачей.

Цель работы — повышение достоверности неразрушающего контроля за счет определения параметров ультразвуковых методов контроля, экспериментального и теоретического изучения различных схем контроля применительно к ПКМ. Результаты получены в рамках проекта № НК 13-08-12001, поддержанного РФФИ.

Для исследований были изготовлены образцы углепластика из углеродной ткани марки УТР1000-12-400П на основе нити Т700GС-12к, пропитанные эпоксидным связующим Т-31. Образцы № 4, 5, 6 (рис. 1) толщиной 4,0 мм были выполнены с заложенными дефектами в виде фторопластовых пленок диаметром 4, 8 и 12 мм, имитирующими технологические дефекты, появление которых в производстве может быть обусловлено технологическими отклонениями при формовании или несоблюдением технологических режимов.

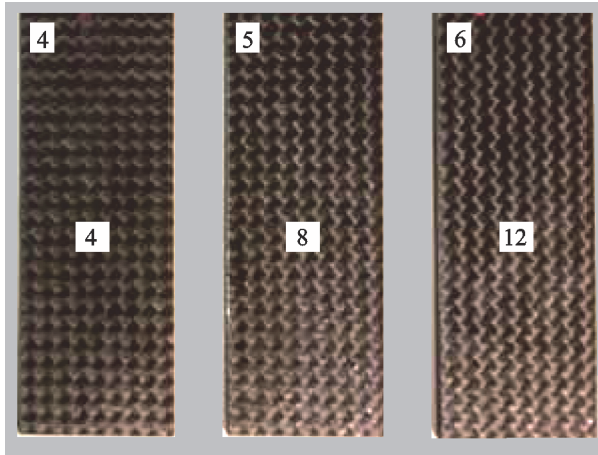


Рис. 1. Внешний вид образцов углепластика

Кроме того, был изготовлен образец толщиной 4,0 мм с искусственными дефектами в виде плоскостных отражателей, имитирующими расслоения и непроклеи (рис. 2). Плоскостные искусственные отражатели диаметром 3, 4, 5, 6, 8, 10 и 12 мм, выполненные цекованием на одинаковой глубине 2,0 мм, предназначены для оценки чувствительности, а отражатели диаметром 8 мм на глубине 3,5; 2,0 и 0,5 мм — для оценки возможности выявления дефектов в приповерхностных зонах.

Экспериментальные исследования проводились с использованием универсального ультразвукового дефектоскопа «Томографик» УД4-Т с набором стандартных прямых СП- и

РСП-продольных волн на частотах 2,5; 5,0 и 10,0 МГц.

Исследования проводились по методу отражения с использованием двух схем контроля (рис. 3): совмещенной и раздельно-совмещенной. При этом регистрировалась амплитуда эхо-сигналов от отражателей A_0 на образцах с технологическими и искусственными дефектами, а также амплитуда шумов $A_{ш}$.

Предварительно были определены коэффициенты затухания акустической волны для разных частот преобразователя на образцах из ПКМ с помощью формулы [6]

$$\delta = \frac{20 \lg(A_1/A_2) - 20 \lg(r_2/r_1)}{17,36(r_2 - r_1)},$$

где A_1 и A_2 — амплитуды первого и второго отраженного сигнала соответственно, дБ; r_1 и r_2 — расстояния, пройденные волной от первого и второго отражения соответственно, мм.

Коэффициенты затухания акустической волны, полученные для различных значений частоты преобразователя, приведены ниже:

f , МГц.....	2,5	5,0	10,0
δ , дБ/мм.....	0,053	0,066	0,071

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при увеличении частоты колебаний акустических волн коэффициент затухания также повышается, т. е. на частоте 10,0 МГц затухание акустической волны наибольшее. Следова-

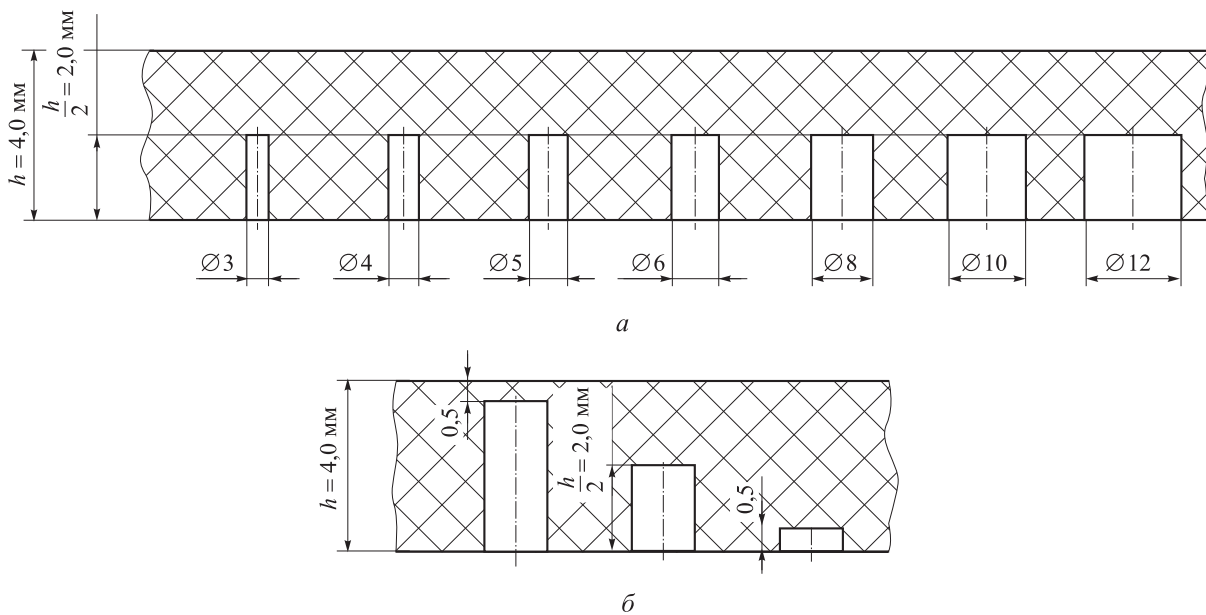


Рис. 2. Схемы расположения и размеры плоскостных искусственных отражателей в образце: а — отражатели для оценки чувствительности; б — отражатели для оценки возможности выявления дефектов в приповерхностных зонах

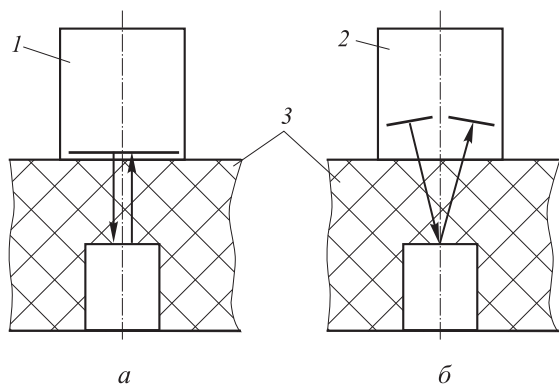


Рис. 3. Схемы проведения испытаний по совмещенной (а) и раздельно-совмещенной (б) схемам контроля:
1 — прямой СП; 2 — РСП; 3 — образцы из ПКМ

тельно, можно сделать вывод, что контроль преобразователями изделий с большой толщиной на частоте 10,0 МГц нецелесообразен.

На образце с заложенными фторопластовыми пленками были проведены исследования для оценки возможности выявления технологических дефектов различного размера и оценки чувствительности, которой можно добиться при контроле ультразвуковым методом по совмещенной и раздельно-совмещенной схемам на различных частотах. Зависимости среднего отношения сигнал/шум (ОСШ) от диаметра заложенного технологического дефекта для различных частот преобразователя (2,5; 5,0 и 10,0 МГц) приведены на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что при контроле по совмещенной схеме на частоте 2,5 МГц не удалось

уверенно выявить технологические дефекты диаметром 4 и 8 мм (среднее ОСШ меньше 6 дБ). При контроле на других частотах по совмещенной и раздельно-совмещенной схемам все дефекты были успешно выявлены. Наилучшее ОСШ было получено при контроле на частоте 10,0 МГц вне зависимости от схемы контроля.

Результаты аналогичного эксперимента, проведенного на образце с искусственными дефектами в виде плоскодонных отражателей, приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что максимальное ОСШ наблюдается при использовании раздельно-совмещенной схемы вне зависимости от частоты и совмещенной схемы на частоте 10,0 МГц. Минимальная чувствительность при данных схемах контроля и частотах, т. е. минимальный размер дефекта, который можно уверенно обнаружить (среднее ОСШ более 6 дБ), может быть эквивалентна чувствительности при выявлении плоскодонного отражателя диаметром 3 мм.

Наименьшее значение ОСШ, как и в предыдущем случае, выявлено при контроле по совмещенной схеме на частоте 2,5 МГц. Кроме того, наблюдается зависимость ОСШ от размера дефекта. Однако она незначительна, что может свидетельствовать о том, что при контроле ультразвуковым методом размеры дефектов в ПКМ невозможно определить по амплитудному критерию, как это принято при контроле изделий из металлов.

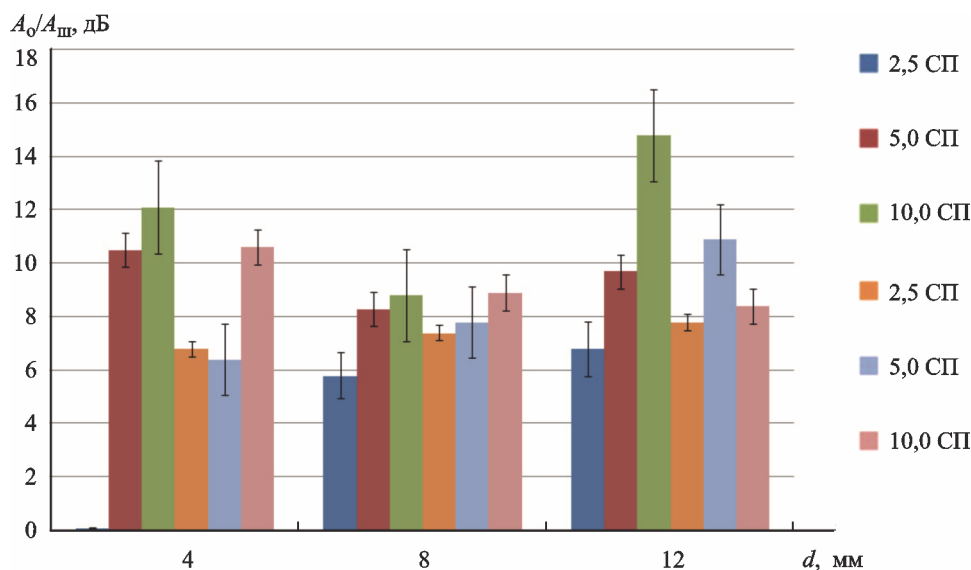


Рис. 4. Зависимость среднего ОСШ $A_0/A_{ш}$ от диаметра d заложенного технологического дефекта (цифра перед СП и РСП соответствует частоте преобразователя)

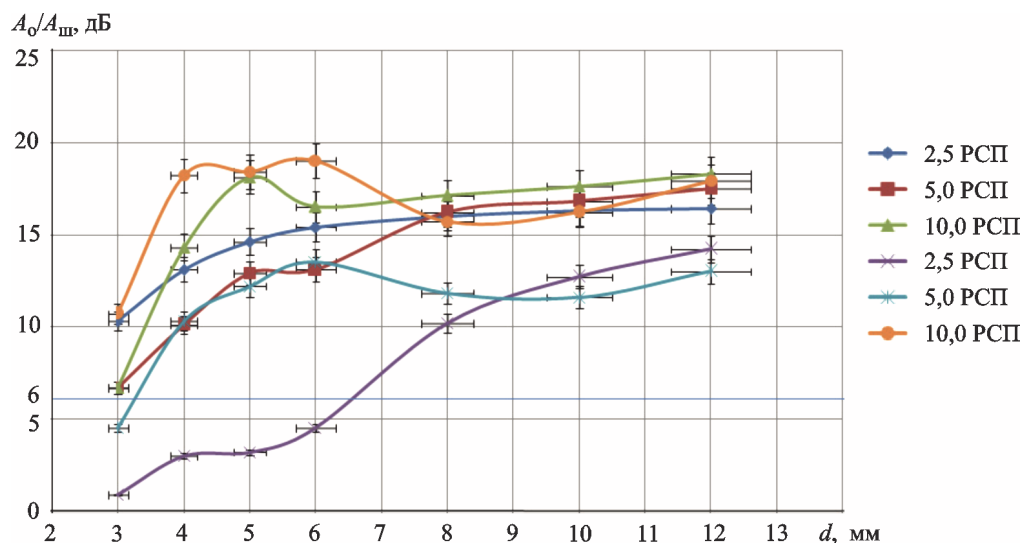


Рис. 5. Зависимость среднего ОСШ $A_0/A_{ш}$ от диаметра d искусственного дефекта (цифра перед СП и РСП соответствует частоте преобразователя)

Значения средних ОСШ в зависимости от дефектов на различной глубине

Схема контроля	Частота, МГц	Среднее ОСШ, дБ		
Совмещенная	2,5	Нет	9,0	7,8
	5,0		12,7	8,7
	10,0		14,7	12,3
Раздельно-совмещенная	2,5	8,2	17,3	16,7
	5,0	9,9	14,5	14,5
	10,0	12,6	14,7	12,3

Слоистый характер углепластиков указывает на равновероятность образования технологических и эксплуатационных дефектов по всему объему, в том числе и в приповерхностных зонах. Однако дефекты, находящиеся в непосредственной близости к поверхностям, при контроле ультразвуковым методом могут быть не выявлены при использовании схем и режимов, в которых обеспечивается обнаружение таких же дефектов, находящихся в объеме материала.

Для оценки возможности выявления таких дефектов было проведено специальное исследование

с использованием совмещенной и раздельно-совмещенной схем контроля на различных частотах. Исследования проводились на образце толщиной 4,0 мм с искусственными дефектами в виде плоскодонных отражателей диаметром 8 мм на глубине 3,5; 2,0 и 0,5 мм (см. рис. 2). Полученные данные приведены в таблице.

Из таблицы видно, что ОСШ для искусственных дефектов, расположенных с обратной стороны поверхности ввода ультразвуковой волны, незначительно меньше (в среднем на 2 дБ) ОСШ для искусственных дефектов, рас-

положенных в середине толщины образца. При этом данные искусственные дефекты могут быть уверенно выявлены (среднее значение ОСШ более 6 дБ) как раздельно-совмещенной, так и совмещенной схемой контроля на всех исследуемых частотах. ОСШ для искусственных дефектов, расположенных непосредственно под поверхностью ввода ультразвуковых колебаний, существенно меньше ОСШ для искусственных дефектов, расположенных в середине толщины образца, а при совмещенной схеме контроля полезный эхо-сигнал от дефекта неразличим на фоне зондирующего импульса. Это обусловлено наличием мертвой зоны при работе по совмещенной схеме контроля. Для обнаружения дефектов, находящихся вблизи поверхности ввода, необходимо использовать раздельно-совмещенную схему.

Выводы

1. В ходе работы были экспериментально и теоретически рассмотрены преимущества и недостатки совмещенной и раздельно-совмещенной схем ультразвукового контроля углепластиков.

2. Показано, что при использовании раздельно-совмещенной схемы контроля можно обнаруживать дефекты меньших размеров с наилучшим ОСШ. Кроме того, при использовании раздельно-совмещенной схемы контроля обеспечивается выявление подповерхностных дефектов. При контроле тонкостенных изделий рекомендуется использовать частоту ультразвуковых колебаний 10,0 МГц. Однако с учетом того, что коэффициент затухания для ПКМ на частоте 10,0 МГц максимален, при переходе на толстостенные детали следует понижать частоту до 5,0 МГц.

Литература

- [1] Завидей В.И., Васенев Ю.Г., Ступаченко С.Л. *Комплексный подход к выявлению дефектов многослойных конструкций из композиционных материалов*. URL: <http://www.panatest.ru/static?al=COMPOSITE+MATERIALS> (дата обращения 15 ноября 2015).
- [2] Алешин Н.П., Григорьев М.В., Щипаков Н.А. Современное оборудование и технологии неразрушающего контроля ПКМ. *Инженерный вестник*, 2015, № 1, с. 533–538. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/754392.html> (дата обращения 10 октября 2015).
- [3] Григорьев М.В., Прилуцкий М.А., Щипаков Н.А., Лавренченко М.А. Влияние основных типов дефектов в монолитных образцах из ПКМ, выявляемых с использованием ультразвукового контроля, на прочностные характеристики материала. *Сварка и Диагностика*, 2015, № 6, с. 11–14.
- [4] Shen Q., Omar M., Dongri S. Ultrasonic NDE Techniques for Impact Damage Inspection on CFRP Laminates. *Journal of Materials Science Research*, 2012, vol. 1 (1), pp. 1–16. URL: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jmsr/article/view/11648/9703> (дата обращения 10 ноября 2015).
- [5] Wrobel G., Wierzbicki L., Pawlak S. A method for ultrasonic quality evaluation of glass/polyester composites. *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 28, no. 12, pp. 729–734.
- [6] Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г., Юргенсон С.А. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов. *Труды МАИ*, 2011, вып. 49. URL: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28061&PAGEN_2=2 (дата обращения 01 ноября 2015).
- [7] Алёшин Н.П. *Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений*. Москва, Машиностроение, 2013. 576 с.
- [8] Миронов Ю.М., Храповицкая Ю.В., Макеев М.О., Нелюб В.А., Бородулин А.С., Чуднов И.В., Буянов И.А. Оценка структурных дефектов углеродных волокон и полимерных композиционных материалов на их основе. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2011, № 11, с. 1–7. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/281952.html> (дата обращения 10 ноября 2015).
- [9] Куликов В.В., Петрова А.П. Анализ типов дефектов в клеевых соединениях авиационной техники и их ремонт. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2011, № 5, с. 24–27.

- [10] Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С., Крыжановский В.К. *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология*. Санкт-Петербург, Профессия, 2008. 560 с.
- [11] Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Технология изготовления ПКМ способом пропитки пленочным связующим. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2011, № 6, с. 25–29.

References

- [1] Zavidei V.I., Vasenev Iu.G., Stupachenko S.L. *Kompleksnyi podkhod k vyavleniiu defektov mnogosloinykh konstruksii iz kompozitsionnykh materialov* [An integrated approach to the identification of defects in laminated composite structures]. Available at: <http://www.panatest.ru/static?al=COMPOSITE+MATERIALS> (accessed 15 November 2015).
- [2] Aleshin N.P., Grigor'ev M.V., Shchipakov N.A. Sovremennoe oborudovanie i tekhnologii nerazrushaiushchego kontrolia PKM [Modern equipment and technologies of nondestructive testing RMB]. *Inzhenernyi vestnik* [Engineering bulletin]. 2015, no. 1, pp. 533–538. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/754392.html> (accessed 10 October 2015).
- [3] Grigor'ev M.V., Prilutskii M.A., Shchipakov N.A., Lavrenchenko M.A. Vliianie osnovnykh tipov defektov v monolitnykh obraztsakh iz PKM, vyavliaemykh s ispol'zovaniem ul'trazvukovogo kontrolia, na prochnostnye kharakteristiki materiala [Impact of major types of defects in monolithic samples of pcm, identified using ultrasound control on strength characteristics of the material]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2015, no. 6, pp. 11–14.
- [4] Shen Q., Omar M., Dongri S. Ultrasonic NDE Techniques for Impact Damage Inspection on CFRP Laminates. *Journal of Materials Science Research*, 2012, no. 1(1), pp. 1–16. Available at: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jmsr/article/view/11648/9703> (accessed 10 November 2015).
- [5] Wrobel G., Wierzbicki L., Pawlak S. A method for ultrasonic quality evaluation of glass/polyester composites. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2007, vol. 28, iss. 12, pp. 729–734.
- [6] Boitsov B.V., Vasil'ev S.L., Gromashev A.G., Iurgenson S.A. Metody nerazrushaiushchego kontrolia, primeniaemye dlia konstruksii iz perspektivnykh kompozitsionnykh materialov [Nondestructive testing methods used for the design of polymer composite materials]. *Trudy MAI* [Trudy MAI]. 2011, no. 49. Available at: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28061&PAGEN_2=2 (accessed 01 November 2015).
- [7] Aleshin N.P. *Fizicheskie metody nerazrushaiushchego kontrolia svarnykh soedinenii* [Physical methods of nondestructive testing of welded joints]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2013. 576 p.
- [8] Mironov Iu.M., Khrapovitskaia Iu.V., Makeev M.O., Neliub V.A., Borodulin A.S., Chudnov I.V., Buianov I.A. Otsenka strukturnykh defektov uglerodnykh volokon i polimernykh kompozitsionnykh materialov na ikh osnove [Structural defect estimation of carbon fibers and polymer composites based on these fibers]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2011, no. 11, pp. 1–7. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/281952.html> (accessed 10 November 2015).
- [9] Kulikov V.V., Petrova A.P. Analiz tipov defektov v kleevykh soedineniiakh aviatsionnoi tekhniki i ikh remont [Analysis of defect types in adhesive joints in aircraft and their repair]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives, sealants, and their properties]. 2011, no. 5, pp. 24–27.
- [10] Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S., Kryzhanovskii V.K. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoistva, tekhnologiia* [Polymeric composites: structure, properties, technology]. Sankt-Peterburg, Professiia publ., 2008. 560 p.
- [11] Kogan D.I., Chursova L.V., Petrova A.P. Tekhnologiia izgotovleniia PKM sposobom pro-pitki plenochnym sviazuiushchim [Technology for producing the polymer composites (PC) by impregnation with film binder]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives, sealants, and their properties]. 2011, no. 6, pp. 25–29.

Информация об авторах

ГЕМБЕРГ Алексей Анатольевич (Москва) — инженер. ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gemberg67@gmail.com).

ПРИЛУЦКИЙ Максим Андреевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: map@bmstu.ru).

Information about the authors

GEMBERG Aleksey Anatolievich (Moscow) — Engineer. Federal State Autonomous Institution, Scientific and Research Centre of Welding and Control at Bauman Moscow State Technical University FGAU NUTsSK (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St, Bldg. 5, Block 1, e-mail: gemberg67@gmail.com).

PRILUTSKIY Maxim Andreevich, (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor of «Technology of welding and diagnostics» Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: map@bmstu.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
под общей редакцией **Г.Б. Евгенева**
**Основы автоматизации технологических
процессов и производств**

Том 1. Информационные модели

Изложены теоретические основы и практические методы автоматизации технологических процессов и производств в соответствии с профессиональной деятельностью магистров по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств».

Приведены материалы, относящиеся к метаонтологии и предметной онтологии.

Описаны языки представления информационных моделей, включая основы системологии, язык построения реляционных баз данных IDEF1X, язык функционального моделирования систем IDEF0, унифицированный язык моделирования UML и онтологии инженерных знаний. Представлена функциональная модель жизненного цикла изделий.

Том 2. Методы проектирования и управления

Изложены теоретические основы и практические методы автоматизации технологических процессов и производств в соответствии с профессиональной деятельностью магистров по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств».

Приведены материалы, относящиеся к онтологии задач, включая методы преобразования входных данных при проектировании и управлении в выходные данные, методы создания интеллектуальных систем, технология экспертного программирования, структурированные порождающие системы, геометрические знания, математические негеометрические знания, интегрирование с использованием систем, основанных на знаниях, хранение и отображение баз знаний.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, читаемых авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Компьютерные системы автоматизации производства». Представленные материалы могут быть использованы в научно-исследовательской деятельности магистров при создании интеллектуальных систем по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru