

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРРАСНОЙ ДОСКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА, ПОЛИПРОПИЛЕНА И ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

Т.А. Мацевич, А.А. Аскадский*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26;*

**Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук
(ИНЭОС РАН), 119334, г. Москва, ул. Вавилова, д. 28*

АННОТАЦИЯ. Исследованы механические свойства древесно-полимерных композитов (ДПК), в которых матричными полимерами являлись полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП) и поливинилхлорид (ПВХ). Измерены их прочность, модуль упругости и предельная деформация при растяжении, удельная ударная вязкость при положительных и отрицательных температурах. В результате сравнительного анализа установлено, что наилучшими свойствами обладает террасная доска на основе поливинилхлорида, поскольку механические свойства террасных досок на основе ПЭ и ПП существенно уступают свойствам материалов на основе ПВХ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: террасная доска, древесно-полимерные композиты, прочность при растяжении, модуль упругости, предельная деформация при растяжении, удельная ударная вязкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мацевич Т.А., Аскадский А.А. Механические свойства террасной доски на основе полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида // Строительство: наука и образование. 2017. Т. 7. Вып. 3 (24). Ст. 4. Режим доступа: <http://nso-journal.ru>.

MECHANICAL PROPERTIES OF DECKING ON THE BASE OF POLYETHYLENE, POLYPROPYLENE AND POLYVINYLCHLORIDE

T.A. Matseevich, A.A. Askadskiy*

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation;*

**A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences (INEOS RAS),
28 Vavilova str., Moscow, 119991, Russian Federation*

ABSTRACT. The mechanical properties of wood-polymer composites (WPCs) with the matrix polymers, polyethylene (PE), polypropylene (PP) and polyvinyl chloride (PVC), were studied. The strength, modulus of elasticity, ultimate tensile strain and specific impact viscosity at positive and negative temperatures were measured. As a result of the comparative analysis, it is found that decking on the base of polyvinyl chloride had shown the best properties, while the mechanical properties of decking based on PE and PP are significantly inferior to the properties of materials based on PVC.

KEY WORDS: decking, wood-polymer composites (WPCs), tensile strain, modulus of elasticity, ultimate tensile strain, specific impact viscosity

FOR CITATION: Matseevich T.A., Askadskiy A.A. Mekhanicheskie svoystva terrasnoy doski na osnove polietilena, polipropilena i polivinilkhlorida [Mechanical Properties of Decking on the Base of Polyethylene, Polypropylene and Polyvinylchloride]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]. 2017, vol. 7, issue 3 (24), paper 4. Available at: <http://nso-journal.ru>. (In Russian)

В настоящее время все большую популярность приобретает использование полимерных композитов, наполненных древесиной (ДПК), для производства террасной доски. ДПК используются в основном для наружных работ. В частности, из такой доски изготавливают полы террасных помещений, сайдинг, декоративные ограждения, заборные системы, ступени, универсальные профили, разные аксессуары и комплектующие. Наиболее употребительными материалами для производства террасной доски являются поливинилхлорид (ПВХ), полипро-

пилен (ПП) и полиэтилен (ПЭ) (последние два относятся к классу полиолефинов). Естественно, что для производства такой доски используют вторичные полимеры, получаемые путем рециклинга. В качестве наполнителя применяется древесная мука или древесные волокна различных пород дерева.

В литературе имеются довольно ограниченные сведения по производству изделий из ДПК и зависимости их физико-химических свойств от состава полимерной матрицы [1–6]. В этих исследованиях рассматриваются разнообразные древесно-поли-

мерные композиты и их свойства, такие как предельные механические свойства и реологические свойства. Цикл работ посвящен исследованию ДПК на основе ПВХ [7–11], который является основным матричным полимером при производстве изделий такого рода. ПВХ служит полимерной матрицей преимущественно в виде первичного материала. Такой материал описан как в зарубежной, так и в отечественной литературе. Способы изготовления ДПК детально изложены в работах [12–14]. Материалы ДПК широко используются в строительстве [15–16].

Поскольку такие композиты используются в условиях действия влаги, температурных воздействий, УФ-излучения, а также под действием механической нагрузки разных видов, оценка качества продукции и сравнение разных типов террасных досок должны проводиться с учетом всех перечисленных факторов. Так, при исследовании механических свойств важными характеристиками являются модуль упругости при растяжении и сжатии, удельная ударная вязкость, стойкость к растрескиванию, прочность при изгибе и растяжении, твердость. При анализе термического воздействия наиболее важными характеристиками являются релаксационные переходы в материале при нагревании, связанные с расстекловыванием полимеров, изменением степени кристалличности, температуры плавления кристаллической фазы, коэффициентом термического расширения и изменением размеров изделий с ростом температуры в определенном направлении (по длине, ширине и толщине) на заданную величину изделия. Среди влияния погодных условий наиболее важным показателем является стойкость к влаго- и водопоглощению, а также к УФ-облучению за определенное время экспозиции. Прочностные свойства ДПК описаны, например, в работах [17–19] (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что наименьшая прочность и модуль упругости характерны для композитов на основе полиэтилена. Что касается композитов на основе полипропилена, то в данных статьях приводится большой разброс экспериментальных данных, особенно по прочностным свойствам. При этом наиболее низкие прочностные свойства находятся в интервалах ниже свойств композитов на основе ПВХ.

В данной работе проведен сравнительный анализ механических свойств террасной доски, в которой полимерами матрицы являются ПВХ, ПЭ и ПП:

как будет видно ниже, наилучшими свойствами обладает ДПК на основе матричного ПВХ. Испытания проводились согласно ГОСТу 11262 и ГОСТу 4648¹.

Рассмотрим результаты испытаний образцов террасной доски на основе полиэтилена низкого давления (ПЭНД) и поливинилхлорида (ПВХ), полученные нами в данной работе. Исследованы следующие образцы:

- образец 1 с тонким рифлением на основе ПЭНД;
- образец 2 с редким рифлением на основе ПВХ.

Испытания на растяжение и изгиб проводились на приборе LLOYD Instruments LR5K Plus (USA).

На рис. 1 показаны кривые растяжения образцов на основе ПЭНД.

На рис. 2 показаны кривые растяжения образцов на основе ПВХ.

Видно, что зависимости напряжения от деформации не являются линейными на всем протяжении кривых растяжения. Это означает, что модуль упругости образцов уменьшается с ростом деформации. Такое явление наблюдается для многих композиционных материалов, которые с ростом деформации обнаруживают нелинейное механическое поведение. Оно заключается в том, что структура материала нарушается, появляются полости в материале и модуль упругости снижается с ростом деформации. Для материалов на основе ПВХ такое изменение наклона кривых растяжения происходит при несколько больших деформациях, чем на основе ПЭНД. Поэтому сопоставление модулей упругости этих двух материалов не совсем корректно. Результаты расчетов прочности, деформации разрушения и модуля упругости сведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что образцы на основе ПВХ обладают существенно большей прочностью, чем на основе ПЭНД. Это вполне объяснимо, поскольку температура стеклования (размягчения) ПВХ составляет 70 °С, а ПЭНД — –60 °С. ПЭНД является частично-кристаллическим полимером, и его аморфные области при комнатной температуре на-

¹ ГОСТ 11262–80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение (с Изменением № 1).
ГОСТ 4648–2014. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб (с Поправкой).

Табл. 1. Ориентировочная прочность ДПК в зависимости от базовой смолы

Свойство	Единица измерения	Вещество		
		ПЭ	ПВХ	ПП
Предел прочности	МПа	5...16	20...30	17...40
Модуль упругости при растяжении	ГПа	2...5	5...7	4...8
Предел прочности при изгибе	МПа	10...26	40...47	30...52
Предел прочности при сжатии	МПа	12...27	60	–

ходятся в высокоэластическом состоянии, что приводит к сравнительно небольшим значениям прочности.

Помимо прочности, важнейшей характеристикой материала является способность к развитию значительных деформаций, т.е. отсутствие хрупкости. Из табл. 2 хорошо видно, что материалы на основе ПВХ разрушаются при значительно больших деформациях, чем материалы на основе ПЭНД. В этом заключается основное преимущество материалов на основе ПВХ.

Испытания на изгиб проводились на том же приборе LLOYD Instruments LR5K Plus (производства США) с заменой нагружающего устройства для осуществления трехточечного изгиба (согласно ГОСТу 4648). Результаты измерений приведены в табл. 3.

Максимальное напряжение изгиба при разрушении для образцов на основе ПВХ выше, чем на основе ПЭНД.

Помимо прочности и удлинения при разрыве измерены удельная ударная вязкость при положи-

тельных и отрицательных температурах, а также получены кривые растяжения большого количества образцов ДПК на основе ПВХ, несколько отличающиеся рецептурой и целевыми добавками, всегда присутствующих в данных композитах.

Сначала рассмотрим результаты измерений удельной ударной вязкости при 18 °С (табл. 5). Наибольшей удельной ударной вязкостью A обладает образец 2 (величина A составляет 8,9 кДж/м²), наименьшей удельной ударной вязкостью обладает образец 3 (4 кДж/м²). Для образца 2 удельная ударная вязкость по Шарпи с надрезом составляет 5,7 кДж/м², т.е. коэффициент ослабления составляет $5,7/8,9 = 0,64$. В целом значения удельной ударной вязкости показывают, что разрушение при ударе не является хрупким и находится на уровне большого количества полимерных материалов. Отметим, что удельная ударная вязкость ДПК на основе ПЭНД и сополимеров этилена с винилацетатом изучена в статье [14]. Значения удельной ударной вязкости, полученные в нашей работе, выше, чем в цитированном исследовании [14]. Так, значе-

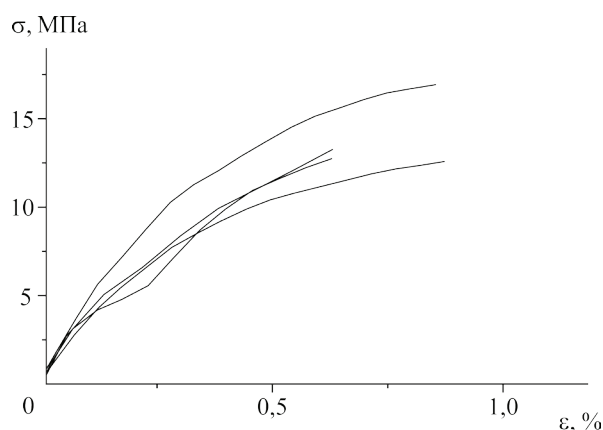


Рис. 1. Кривые растяжения образцов на основе ПЭНД

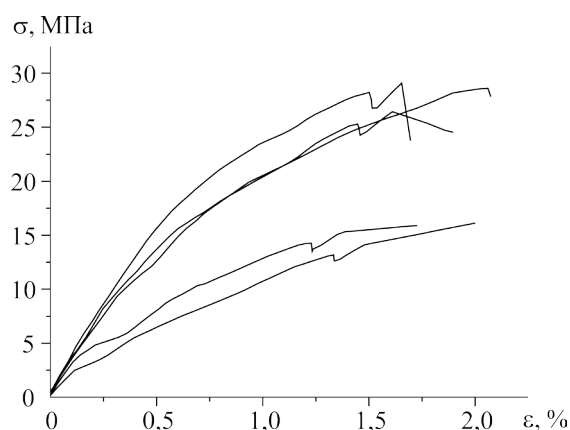


Рис. 2. Кривые растяжения образцов на основе ПВХ

Табл. 2. Результаты испытаний на растяжение

Номер испытания	Свойства		
	Прочность при растяжении σ_p , МПа	Удлинение при разрыве ϵ_r , %	Модуль упругости при растяжении E , МПа
<i>Образцы на основе ПЭНД</i>			
1	13,4	0,62	4980
2	16,9	0,85	4730
3	13,1	0,66	4720
4	12,7	0,86	4230
Средняя величина	14,0	0,75	4660
<i>Образцы на основе ПВХ</i>			
1	28,6	2,05	3250
2	24,8	1,84	3670
3	16,1	1,72	3650
4	29,3	1,66	3860
5	15,9	1,73	2940
Средняя величина	22,9	1,80	3480

ние $A = 4,8$ кДж/м² без надреза для ДПК на основе ПЭНД (а на основе сополимеров этилена с винилацетатом) лежит в интервале 5,2...6,3 кДж/м². Для ДПК на основе ПВХ, который является предметом исследования в нашей работе, интервалы значений A составляют 4,3...8,9 кДж/м², т.е. сопротивление ударному нагружению ДПК на основе ПВХ существенно выше, чем на основе ПЭНД.

Также рассмотрим результаты измерений удельной ударной вязкости при отрицательных температурах. Измерения были проведены при 0 °С и –20 °С. Результаты измерений показаны в табл. 5.

Наибольшей удельной ударной вязкостью обладает образец 1 (6,4 кДж/м² при 0 °С), наименьшей ударной вязкостью — образец 2 (4,2 кДж/м² при –21 °С). В целом значения удельной ударной вязкости при отрицательных температурах показывают, что разрушение при ударе не является хрупким и находится на уровне большого количества полимерных материалов. На образце 2 удельная ударная вязкость при отрицательных температурах имеет значение в два раза ниже, чем при обычных температурах. На остальных образцах значения удельной ударной вязкости при отрицательных температурах

Табл. 3. Результаты испытаний на изгиб

Номер испытания	Свойства		
	Жесткость, Н/м	Модуль упругости при изгибе, МПа	Максимальное напряжение изгиба при разрушении, МПа
<i>Образец на основе ПЭНД</i>			
1	35 408	7082	33,6
2	31 183	6237	31,1
3	18 603	3721	24,8
4	30 158	6032	30,1
5	32 405	6481	32,4
6	29 560	5912	30,3
Средняя величина	29 536	5910	30,4
<i>Образец на основе ПВХ</i>			
1	18 491	3698	44,1
2	19 502	3900	49,6
3	22 891	5631	54,3
4	30 668	5054	48,2
5	24 479	3955	39,8
6	23 579	4715	46,3
Средняя величина	23 268	4492	47,0

Табл. 4. Удельная ударная вязкость при 18 °С

Номер образца	Удельная ударная вязкость A , кДж/м ²		Среднее значение ударной вязкости A_{cp} , кДж/м ²
	с надрезом	без надреза	
1	6,9	5,1	6,0
2	8,9	5,7*	8,9
3	4,0	5,4	4,7
4	5,1	4,6	4,8
5	4,6	4,6	4,6
6	4,3	6,3	5,3

* По Шарпи с надрезом.

Табл. 5. Удельная ударная вязкость при отрицательных температурах

Номер образца	Удельная ударная вязкость A , кДж/м ²			Среднее значение ударной вязкости A_{cp} , кДж/м ²	Температура T , °С
	с надрезом	без надреза	с надрезом		
1	4,6	6,9	7,7	6,4	0
2	4,3	4,0	—	4,2	-21
3	6,3	5,7	—	6,0	-21
4	4,0	4,6	4,6	4,4	0
5	4,0	5,4	—	4,7	-21
6	4,9	4,9	—	4,9	-21

и при обычных примерно одинаковы. Следует отметить, что данные по удельной ударной вязкости при отрицательных температурах отсутствуют в литературе, хотя они очень важны для регионов России, в которых низкие температуры наблюдаются в течение восьми месяцев.

Прочность при изгибе определялась при 18 °С. Измерения проводились на приборе «Динстат» консольным методом. Размеры образцов — 10×15×3,5 мм. Прочность при изгибе рассчитывается по формуле

$$\sigma_{\text{изг}} = m \cdot 6/bh^2,$$

где m — изгибающий момент, кг·см, b — ширина образца, см, h — толщина образца, см. Результаты измерений показаны в табл. 6. Разброс данных небольшой. Наибольшая средняя величина прочности при изгибе наблюдается для образцов 1 и 3, наименьшая — для образца 4.

Измерения прочности при растяжении при 18 °С образцов серии 1–6 на основе ПВХ проводились на универсальной испытательной машине LLOYD Instruments LR5K Plus. Скорость растяжения составляла 50 мм/мин. Кривая растяжения для

образца 2 в качестве примера показана на рис. 3. Там же указана предельная деформация при разрыве.

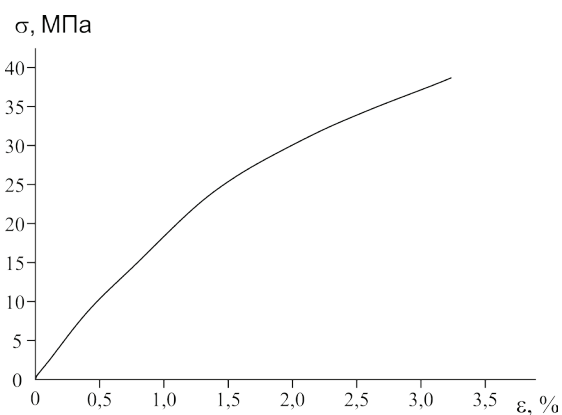


Рис. 3. Усредненная кривая растяжения образца 2 ($\sigma_p = 38,5$ МПа, $\epsilon_p = 2,88$ %)

Значения всех величин предельной деформации приведены в табл. 7. Сами же значения прочности при растяжении показаны в табл. 8.

Кривые растяжения для каждого образца были перестроены в средние кривые, и по ним определе-

Табл. 6. Прочность при изгибе

Номер образца	Прочность при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$, МПа			Средняя величина прочности при изгибе $\sigma_{\text{изг.ср}}$, МПа
1	64,7	72,0	70,1	68,9
2	54,9	57,6	62,4	58,3
3	72,0	67,2	67,2	68,8
4	63,7	54,0	54,7	57,5
5	57,8	67,2	67,2	64,1
6	62,7	67,2	67,2	65,7

Табл. 7. Прочность при растяжении при 18 °С

Номер образца	Прочность при растяжении σ_p , МПа			Среднее значение прочности при растяжении $\sigma_{\text{ср}}$, МПа	Модуль упругости при растяжении E , МПа			Среднее значение модуля упругости при растяжении $E_{\text{ср}}$, МПа
1	18	27	29	25	950	2200	2300	1820
2	39	33,5		38,5	2300	1900		2100
3	27	27	40	34	1800	2300	2050	2050
4	22,2	23,9	34,6	27,4	2200	2400	1550	2050
5	32,5	41,1	23,4	32,0	2450	3400	2800	2880
6	20,3	40,7	25,7	26,0	2500	2600	2950	2680

Табл. 8. Предельная деформация при растяжении

Номер образца	Предельная деформация при растяжении ϵ_p , %			Среднее значение предельной деформации при растяжении $\epsilon_{\text{ср}}$, %
1	2,2	2,9	2,9	2,67
2	2,55	3,2		2,88
3	1,55	2,22	2,67	2,15
4	1,92	2,54	3,04	2,50
5	3,0	2,9	1,8	2,57
6	1,6	3,1	1,5	2,07

ны значения средней прочности при изгибе $\sigma_{ср}$. Также по средним кривым определялся модуль упругости по тангенсу угла наклона начального участка кривой растяжения.

Из табл. 7 видно, что наибольшей прочностью при растяжении обладает образец 2, а наименьшей — образец 1. Наблюдается существенный разброс в значениях прочности при изгибе в параллельных измерениях, который иногда достигает 50 % (например, для образцов 5 и 6). Это свидетельствует о том, что образцы являются не совсем однородными. Что касается модуля упругости, то его средние значения лежат в интервале 1125...3000 МПа. Предельная деформация при растяжении показана в табл. 8, она лежит в пределах 1,6...3,2 %.

Данные, полученные в исследовании [20], показывают, что прочность при разрыве ДПК на основе ПЭНД составляет 11,9 МПа. При замене ПЭНД на сополимеры этилена с винилацетатом (сэвилены) прочность при разрыве существенно уменьшается и лежит в интервале 8,4...5,5 МПа, причем последнее значение характерно для материала, содержащего 25 % сэвилена.

Прочность ДПК на основе полиэтилена при растяжении описана также в заключении по испытаниям профильных изделий, представленных «Научно-

исследовательским центром «Древесно-полимерные композиты» («НИЦ «ДПК») от 05.03.2015 г. для одного из российских производителей ДПК на основе полиэтилена. Согласно данному заключению, прочность при изгибе лежит в интервале 45,8...52,0 МПа, а прочность при разрыве — 21,0...26,1 МПа. Для сравнения приведем интервалы этих значений для ДПК на основе ПВХ: интервал прочности при изгибе составляет 57,5...68,9 МПа, а при растяжении — 25,0...38,5 МПа.

Детальный анализ механических свойств древесно-полимерных композитов, основанный как на литературных данных, так и на результатах собственных исследований, показал, что ДПК на основе матричного полимера ПВХ существенно превосходит по свойствам ДПК на основе таких матричных полимеров, как полиэтилен и полипропилен. Особенно ценным является то обстоятельство, что ДПК на основе ПВХ обладает примерно таким же сопротивлением ударной нагрузке при температуре -21 °С, как и при положительной температуре 18 °С. При статическом нагружении прочность при изгибе и растяжении материалов на основе ПВХ в среднем на 25...32 % и 19...64 % выше, чем у материалов на основе полиолефинов: полиэтилена и полипропилена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абушенко А.В., Воскобойников И.В., Кондратюк В.А. Производство изделий из ДПК // Деловой журнал по деревообработке. 2008. № 4. С. 88–94.
2. Ершова О.В., Чупрова Л.В., Муллина Э.Р., Мишурин О.А. Исследование зависимости свойств древесно-полимерных композитов от химического состава матрицы // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. Ст. 26. Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12363>.
3. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты / пер. с англ. А. Чмеля. СПб. : Научные основы и технологии, 2010. 736 с.
4. Walcott M.P., Englund K.A. A technology review of wood-plastic composites; 3ed. N.Y. : Reihold Publ. Corp., 1999. 151 p.
5. Руководство по разработке композиций на основе ПВХ / под. ред. Р.Ф. Гроссмана; пер. с англ. под ред. В.В. Гущеева. СПб. : Научные основы и технологии. 2009. 608 с.
6. KICKELBICK G. Introduction to hybrid materials // Hybrid Materials: Synthesis, Characterization, and Applications / G. KICKELBICK (ed.). Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. 498 p.
7. Уилки Ч., Саммерс Дж., Даниелс Ч. Поливинилхлорид / пер. с англ. под ред. Г.Е. Зайкова. СПб. : Профессия, 2007. 728 с.
8. KOKTA B.V., MALDAS D., DANEULT C., BELAND P. Composites of polyvinyl chloride-wood fibers // Polymer-plastics Technology Engineering. 1990. Vol. 29. Pp. 87–118.
9. Низамов Р.К. Поливинилхлоридные композиции строительного назначения с полифункциональными наполнителями : дис. ... докт. техн. наук. Казань, 2007. 369 с.
10. Stavrov V.P., Spiglazov A.V., Sviridenok A.I. Rheological parameters of molding thermoplastic composites high-filled with wood particles // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 2007. Vol. 12. No. 2. Pp. 527–536.
11. Бурнашев А.И. Высоконаполненные поливинилхлоридные строительные материалы на основе наномодифицированной древесной муки : дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2011. 159 с.
12. Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured binder for acid-resisting building materials // Scientific Israel — Technological Advantages. 2012. Vol. 14. No. 1. Pp. 7–12.
13. Hwang S.-W., Jung H.-H., Hyun S.-H., Ahn Y.-S. Effective preparation of crack-free silica aerogels via ambient drying // Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2007. Vol. 41. Pp. 139–146.
14. Помогайло А.Д. Synthesis and intercalation chemistry of hybrid organo-inorganic nanocomposites // Высокомолекулярные соединения. 2006. Т. 48. № 7. С. 1317–1351.
15. Фиговский О.Л., Бейлин Д.А., Пономарев А.Н. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах // Нанотехнологии в строительстве. 2012. № 3. С. 6–21.
16. Королев Е.В. Принцип реализации нанотехнологии в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 60–64.

17. Абушенко А.В. Древесно-полимерные композиты: слияние двух отраслей // Мебельщик. 2005. № 3. С. 32–36.
 18. Абушенко А.В., Воскобойников И.В., Кондратюк В.А. Производство изделий из ДПК // Деловой журнал по деревообработке. 2008. № 4. С. 88–94.

19. Абушенко А.В. Экструзия древесно-полимерных композитов // Мебельщик. 2005. № 2. С. 20–25.
 20. Шкуро А.Е., Глухих В.В., Мухин Н.М. и др. Влияние содержания сэвилена в полимерной матрице на свойства древесно-полимерных композитов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 17. Т. 15. С. 92–95.

Поступила в редакцию в июне 2017 г.
 Принята в доработанном виде в июле 2017 г.
 Одобрена для публикации в августе 2017 г.

Об авторах: **Мацевич Татьяна Анатольевна** — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, MatseevichTA@mgsu.ru;
Аскадский Андрей Александрович — доктор химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории строительных композитов, растворов и бетонов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, andrey@ineos.ac.ru.

At the present time, the use of wood-filled polymer composites (WPC) for production of decking gains in popularity. WPC are widely used for external work. In particular, decking is used for construction of outside decks flooring, siding, decorative fencing, fencing systems, steps, universal moldings and various accessories. The most widely used materials for decking manufacturing include polyvinyl chloride (PVC), polypropylene (PP) and polyethylene (PE) (the two latter are related to polyolefins). As a matter of course, secondary polymers manufactured by means of recycling are also used for production of such decking. Wood dust and fibers of various species of wood are applied as fillers.

Manufacturing of building products from WPC and relationship between physical-and-mechanical properties and composition of polymer matrix have received rather limited attention in the scientific literature [1–6]. Those studies are concerned with various wood polymer composites and their characteristics, such as ultimate mechanical and rheological properties. The number of papers is dedicated to the study of WPC on the base of PVC [7–11] which is basically the main matrix polymer for manufacturing products of this type. PVC serves as a polymer matrix mainly in the form of a primary material. Such a material has been described in both foreign and national literature. The methods of manufacturing WPC are outlined in complete detail

in the papers [12–14]. WPC-materials are extensively used in construction [15–16].

As such composites are subject to impact of humidity, temperature, ultra-violet emission and various mechanical loads, the assessment of products quality and comparison of different types of decking should be carried out with due consideration of all the above-mentioned factors. Thus, when researching mechanical properties, the most important parameters are modulus of elasticity in tension and compression, specific impact viscosity, stress cracking resistance, bending resistance and tensile strength, scratch hardness. When analyzing thermal impact, the most valuable characteristics are the following: relaxation transitions of materials upon the application of heat related to devitrification of polymers, change of crystallinity degree, melting point of crystalline material, coefficient of thermal expansion and change of parameters of products with a rise of temperature in certain direction (along the length, width and thickness) for a given value. Among the parameters related to the impact of weather conditions, the most important factor is resistance to humidity and water as well as UV-emission for a discreet exposure time. Strength properties of WPC are described, for example, in the papers [17–19] (table 1).

As seen from the table 1, the composites of the base of polyethylene have the minimum strength and

Table 1. Approximate strength of WPC depending on the base resin

Property	Unit of measurement	Substance		
		PE	PVC	PP
Breaking stress	MPa	5...16	20...30	17...40
Modulus of elasticity in tension	GPa	2...5	5...7	4...8
Flexural strength	MPa	10...26	40...47	30...52
Ultimate compressive strength	MPa	12...27	60	—

modulus of elasticity. As far as the composites on the base of polypropylene are concerned, a wide scatter of measured data is given in the present papers, specifically for strength properties. Along with this, the lowest strength characteristics are set within the interval of the lowest properties of PVC.

In the present article, the comparative analysis of mechanical properties of decking is implemented, when the matrix polymers comprise PVC, PE and PP. As is evident from the stated below, WPC on the base of matrix PVC is of the best material properties. The tests have been carried out according to the All-Union Standards GOST 11262 and GOST 4648¹.

Let's take a closer look at the test results for samples of decking on the base of low-pressure (high-density) polyethylene (HDP) and polyvinylchloride (PVC) received by the authors in the present study. The following test-samples have been analyzed:

- the test-sample 1 with fine ribbing on the base of HDP;
- the test-sample 2 with wide ribbing on the base of PVC.

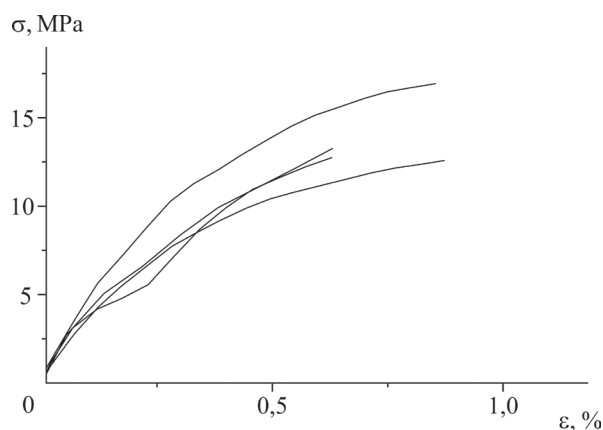


Fig. 1. Tension curves of the test-samples on the HDP-base

Tensile and bending tests have been carried out by means of the appliance LLOYD Instruments LR5K Plus (USA). Fig. 1 shows the tension curves of the test-samples on the HDP-base.

Fig. 2 shows the tension curves of the test-samples on the PVC-base.

It is apparent that the relationship between stress and strain is not linear along the entire length of tension curves. That means that modulus of elasticity of the test-samples declines with the strain growth. This appears for many composite materials showing non-linear mechanical behavior with the strain growth. Such a behavior lies in the fact that the structure of material is damaged, cavities appear and modulus of elasticity declines with the strain growth. For materials on the PVC base, such a change of the tension curves slope arises under marginally higher strains as compared to those on the HDP-base. Therefore, the correlation of modulus of elasticity for these two materials is considered to be rather incorrect. The results of calculation of strength, failure strain and modulus of elasticity are set out in the table 2.

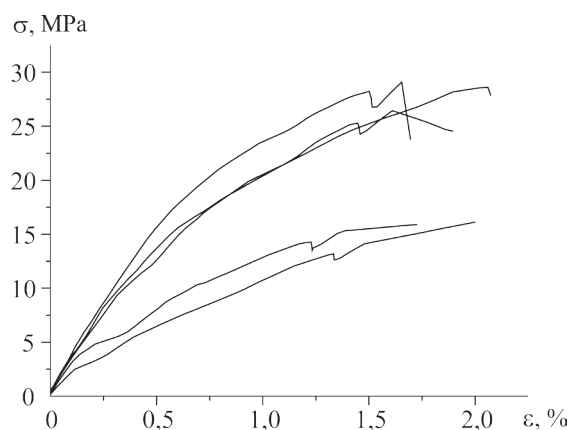


Fig. 2. Tension curves of the test-samples on the PVC-base

Table 2. The results of tensile tests

Test number	Properties		
	Tensile (longitudinal) strength σ_p , МПа	Elongation at failure ϵ_p , %	Modulus of elasticity in tension E , МПа
<i>Test-samples on the HDP-base</i>			
1	13.4	0.62	4980
2	16.9	0.85	4730
3	13.1	0.66	4720
4	12.7	0.86	4230
Average value	14.0	0.75	4660
<i>Test-samples on the PVC-base</i>			
1	28.6	2.05	3250
2	24.8	1.84	3670
3	16.1	1.72	3650
4	29.3	1.66	3860
5	15.9	1.73	2940
Average value	22.9	1.80	3480

As seen from the table 2, the test-samples on the PVC-base have significantly higher strength than those on the HDP. This could be attributed to the fact that the glass-transition (softening) temperature of PVC is equal to 70 °C, and HDP — –60 °C correspondingly. HDP is a partially crystalline polymer and its amorphous regions are in a high elastic state at the ambient temperature which results in the relatively low values of strength.

Apart from strength, one of the most important properties of a material is the ability to develop significant strains, i.e. the lack of brittleness. As is evident from the table 2, the materials on the PVC-base are fractured at significantly higher strains, than the materials on the HDP-base. Therein lays the main advantage of the materials on the PVC-base.

Bending tests were carried out with the use of the same appliance LLOYD Instruments LR5K Plus (USA) with the replacement of the load-applying unit for three-point bending (according to the GOST 4648). The test results are set out in the table 3.

Maximum fracture strain in bending is higher for the test-samples on the PVC-base as compared with those on the HDP-base.

Apart from strength and elongation at failure, specific impact viscosity at positive and negative temperatures has been measured, the tension curves have been obtained for the great number of the test-samples WPC on the PVC-base, which are distinguished by mix specification and targeted additives always found in such composites.

Let's first consider the results of measuring specific impact viscosity at 18 °C (table 5). The test-sample 2 is characterized by the highest value of specific impact viscosity A (A is equal to 8.9 kJ/m² while the test-sample 3- by the lowest value correspondingly (4 kJ/m²). For the test-sample 2, Charpy V-notch specific impact viscosity is equal to 5.7 kJ/m², i.e. extinction coefficient amounts to $5.7/8.9 = 0.64$. In general, the values of specific impact viscosity showed that impact fracture is not brittle and stays at the level of the large number of polymer materials. It is important to mention that specific impact viscosity of WPC on the HDP-base and copo-

Table 3. Results of bending tests

Test number	Properties		
	Stiffness, H/m	Modulus of elasticity in bending, MPa	Maximum fracture strain in bending, MPa
<i>Test-sample on the HDP-base</i>			
1	35 408	7082	33.6
2	31 183	6237	31.1
3	18 603	3721	24.8
4	30 158	6032	30.1
5	32 405	6481	32.4
6	29 560	5912	30.3
Average value	29 536	5910	30.4
<i>Test-sample on the PVC-base</i>			
1	18 491	3698	44.1
2	19 502	3900	49.6
3	22 891	5631	54.3
4	30 668	5054	48.2
5	24 479	3955	39.8
6	23 579	4715	46.3
Average value	23 268	4492	47.0

Table 4. Specific impact viscosity at 18 °C

Test-sample number	Specific impact viscosity A , kJ/m ²		Average value of specific impact viscosity A_{av} , kJ/m ²
1	6.9	5.1	6.0
2	8.9	5.7*	8.9
3	4.0	5.4	4.7
4	5.1	4.6	4.8
5	4.6	4.6	4.6
6	4.3	6.3	5.3

* Charpi V-notch

lymer of ethylene and vinyl acetate has been studied in the article [14]. The values of specific impact viscosity received in the present paper are higher than in the cited article [14]. Thus, the value $A = 4.8 \text{ kJ/m}^2$ without notch for WPC on the HDP-base (on the base of the copolymer of ethylene and vinyl acetate) lies within the range $5.2 \dots 6.3 \text{ kJ/m}^2$. For WPC on the PVC-base which is the object of study in this paper, the range of A value lies within $4.3 \dots 8.9 \text{ kJ/m}^2$, i.e. multiple impact strength of WPC on the PVC-base is significantly higher than for WPC on the HDP-base.

Let's also take a detailed look at the results of measuring specific impact viscosity at negative temperatures. The measurements were taken at the temperature $0 \text{ }^\circ\text{C}$ and $-20 \text{ }^\circ\text{C}$. The test results are set out in the table 5.

The test-sample 1 has the highest specific impact viscosity (6.4 kJ/m^2 at $0 \text{ }^\circ\text{C}$) while the test-sample 2 — the lowest correspondingly (4.2 kJ/m^2 at $-21 \text{ }^\circ\text{C}$). In general, the values of specific impact viscosity at negative temperatures showed that impact fracture is not brittle and stays at the level of the large number of polymer materials. For the test-sample 2, the value of specific impact viscosity at negative temperature is half as high as at ambient temperature. For other test-samples, the values of specific impact viscosity are much the same for both negative and ambient temperatures. It is worth mentioning that the data describing specific impact viscosity at negative temperatures are not available in the national scientific literature, though they are of critical importance for the regions of Russia where subzero temperatures are registered during eight months a year. Bending resistance was determined at $18 \text{ }^\circ\text{C}$. The measurements were taken with the use of the Dinstat appliance by a cantilever method. The test-specimen dimensions are equal to $10 \times 15 \times 3.5 \text{ mm}$. Bending resistance was calculated by the formula

$$\sigma_{\text{изг}} = m \cdot 6/bh^2,$$

where m — bending moment, $\text{kg}\cdot\text{cm}$, b — the width of the test-specimen, h — the height of the specimen, cm . The tests results are given in the table 6. The scatter of data is not wide. The maximum value of bending resistance is registered for the test-samples 1 and 3, while as the minimum — is for the test-specimen 4.

The measurements of bending resistance at the temperature of $18 \text{ }^\circ\text{C}$ of the test-sample sets 1-6 on the PVC-base have been taken with the use of the universal testing machinery LLOYD Instruments LR5K Plus. Tensile speed amounted to 50 mm/min . The tensile curve for the test-specimen 2 is given as an example at the fig. 3. Fracture strain in bending is also shown at the figure.

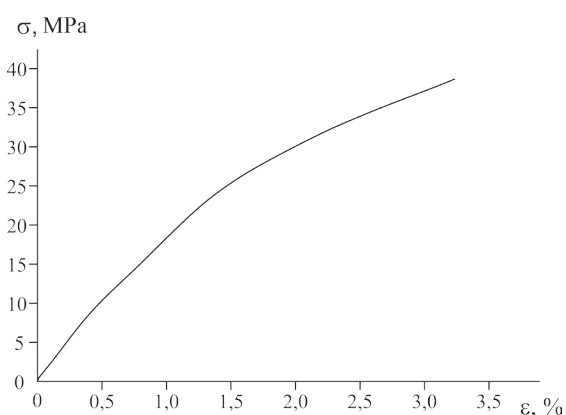


Fig. 3. Averaged tensile curve for the test-sample 2 ($\sigma_p = 38.5 \text{ MPa}$, $\epsilon_p = 2.88 \%$)

All the values of fracture in bending are set out in the table 7. The values of bending resistance are shown in the table 8.

Table 5. Specific impact viscosity at negative temperatures

Test-sample number	Specific impact viscosity A , kJ/m^2			Average number of specific impact viscosity A_{av} , kJ/m^2	Temperature T , $^\circ\text{C}$
1	4.6	6.9	7.7	6.4	0
2	4.3	4.0	—	4.2	-21
3	6.3	5.7	—	6.0	-21
4	4.0	4.6	4.6	4.4	0
5	4.0	5.4	—	4.7	-21
6	4.9	4.9	—	4.9	-21

Table 6. Bending resistance

Test-sample number	Bending resistance $\sigma_{\text{изг}}$, MPa			Average value of bending resistance $\sigma_{\text{изг,ср}}$, MPa
1	64.7	72.0	70.1	68.9
2	54.9	57.6	62.4	58.3
3	72.0	67.2	67.2	68.8
4	63.7	54.0	54.7	57.5
5	57.8	67.2	67.2	64.1
6	62.7	67.2	67.2	65.7

Table 7. Bending resistance at 18 °C

Test-sample number	Bending resistance σ_p , MPa			Average value of bending resistance σ_{av} , MPa	Modulus of elasticity in tension E , MPa			Average value of modulus of elasticity in tension E_{av} , MPa
1	18	27	29	25	950	2200	2300	1820
2	39	33.5		38.5	2300	1900		2100
3	27	27	40	34	1800	2300	2050	2050
4	22.2	23.9	34.6	27.4	2200	2400	1550	2050
5	32.5	41.1	23.4	32.0	2450	3400	2800	2880
6	20.3	40.7	25.7	26.0	2500	2600	2950	2680

Table 8. Fracture strain in bending

Test-sample number	Fracture strain in bending ε_p , %			Average value of fracture strain in bending ε_{cp} , %
1	2.2	2.9	2.9	2.67
2	2.55	3.2		2.88
3	1.55	2.22	2.67	2.15
4	1.92	2.54	3.04	2.50
5	3.0	2.9	1.8	2.57
6	1.6	3.1	1.5	2.07

Tensile curves for each test-sample have been realigned into the averaged curves, and according to them, the values of bending resistance σ_{cp} have been calculated. Also by the averaged curves modulus of elasticity for the slope ratio of the initial section of the tensile curve has been determined.

As seen from the table 7, the test-sample 2 has the highest bending resistance, whereas in contrast the test-sample 1 — the lowest, correspondingly. There is a wide scatter of data for the values of bending resistance in parallel measurements that could reach up to 50% (e.g. for the test-samples 5 and 6). It proves that the test-samples are not quite homogeneous. As far as modulus of elasticity is concerned, its average values fit into the range 1125...3000 MPa. Fracture strain in bending is shown in the table 8; its values fit into the range 1.6...3.2 %.

The laboratory findings received in the paper [20] showed that fracture strain for WPC on the HDP-base amounted to 11.9 MPa. When HDP is substituted by the copolymers of polyethylene and vinyl acetate (EVA, also known as poly) fracture strain decreases significantly and falls into the range of 8.4...5.5 MPa; at that, the latter value is typical for the material with the EVA-content of 25 %.

Bending resistance of WPC on the base of polyethylene is also described in the evaluation of tests of structural shaped article presented by the National Research Center Wood-Polymer Composites (NRC WPC) dated 05.03.2015 for one of the Russian manufacturers of WPC on the PE-base. According to this evaluation, bending resistance falls into the range 45.8...52.0 MPa and fracture strain in bending — 21.0...26.1 MPa. For comparison, the range of the values for WPC on the PVC-base is the following: bending resistance varies in the range of 57.5...68.9 MPa while as tensile strength — 25.0...38.5 MPa.

The detailed analysis of mechanical properties of wood-polymer composites based on both literature data and the results of authors' research showed that WPC on the base of matrix PVC are vastly superior to WPC on the base of such matrix polymers as polyethylene and polypropylene in their properties. It's valuable that WPC on the PVC-base have much the same multiple impact strength at temperature of -21 °C and positive temperature of 18 °C. When experiencing static loading, bending resistance and tensile strength of the materials on the PVC-base is 25...32 % and 19...64 % higher at the average than of those on the base of polyolefins: polyethylene and polypropylene correspondingly.

REFERENCES

1. Abushenko A.V., Voscoboinikov I.V., Kondratyuk V.A. *Proizvodstvo izdeliy iz DPK* [Manufacturing WPC-articles]. *Delovoy zhurnal po derevoobrabotke* [Derewo.ru]. 2008, no. 4, pp. 88–94. (In Russian)
2. Ershova O.V., Chuprova L.V., Mullina E.R., Mishurina O.A. *Issledovanie zavisimosti svoystv drevesno-polimernykh kompozitov ot himicheskogo sostava matricy* [Study of Relationship between Properties of WPC and Chemical Composition of a Matrix]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Recent Developments in Science and Education]. 2014, no. 2, paper 26. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12363>. (In Russian)
3. Klyosov A.A. *Wood-Plastic Composites*. Wiley-Interscience, 2010, 702 p.

4. Walcott M.P., Englund K.A. *A Technology Review of Wood-Plastic Composites*. 3ed. N.Y., Reihold Publ. Corp., 1999, 151 p.
5. Grossman R.F. *Rukovodstvo po razrabotke kompozitsiy na osnove PVH* [Guideline for Formulation of PVC-compositions]. Saint Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2009, 608 p. (In Russian)
6. KICKELBICK G. *Introduction to Hybrid Materials, in Hybrid Materials: Synthesis, Characterization, and Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2007, 498 p.
7. Wilkie C., Summers J., Daniels C. *PVC: Handbook*. Hanser Publications, 723 p.
8. Kokta B.V., Maldas D., Daneault C., Béland P. *Composites of Polyvinyl Chloride-Wood Fibers*. Polymer-plastics Technology Engineering. 1990, vol. 29, pp. 87–118.
9. Nizamov R.K. *Polivinilhlordidnye kompozitsii stroitel'nogo naznacheniya s polifunktsional'nymi napolnityami : dissertatsiya ...doktora tekhnicheskikh nauk* [Polyvinylchloride Compositions for Building Purpose with Multifunctional Fillers: Thesis of doctor of Technical Science]. Kazan', 2007, 369 p. (In Russian)
10. Stavrov V.P., Spiglazov A.V., Sviridenok A.I. Rheological Parameters of Molding Thermoplastic Composites High-filled with Wood Particles. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2007, vol. 12, no. 2, pp. 527–536.
11. Burnashev A.I. *Vysokonaplnennye polivinilhlordidnye stroitel'nye materialy na osnove nanomodifitsirovannoy drevesnoy muki* [Highly-filled Polyvinylchloride Building Materials on the Base of Nanomodified Wood Dust]. Kazan', KGASU, 2011, 159 p. (In Russian)
12. Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials. *Scientific Israel — Technological Advantages*. 2012, vol. 14, no. 1, pp. 7–12.
13. Hwang S.-W., Jung H.-H., Hyun S.-H., Ahn Y.-S. Effective Preparation of Crack-free Silica Aerogels via Ambient Drying. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2007, no. 41, pp. 139–146.
14. Pomogaylo A.D. Synthesis and Intercalation Chemistry of Hybrid Organo-Inorganic Nanocomposites. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*. 2006, vol. 48, no. 7, pp. 1317–1351.
15. Figovsky O.L., Beilin D.A., Ponomarev A.N. Uspekhi primeneniya nanotekhnologiy v stroitel'nykh materialakh [Advances of Application of Nanotechnology in Building Materials]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve* [Nanotechnologies in Construction]. 2012, no. 3, pp. 6–21. (In Russian)
16. Korolev E.V. Printsip realizatsii nanotekhnologii v stroitel'nom materialovedenii [Principle of Realization of Nanotechnology in Building Materials Science]. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013, no. 6, pp. 60–64. (In Russian)
17. Abushenko A.V. Drevesno-polimernye kompozity: sliyanie dvukh otrasley [Wood-Polymer Composites: Merging Two Industries]. *Mebel'shchik* [Furniture Maker]. 2005, no. 3, pp. 32–36. (In Russian)
18. Abushenko A.V., Voskoboinikov I.V., Kondratyuk V.A. Proizvodstvo izdeliy iz DPK [Manufacturing WPC-articles]. *Delovoy zhurnal po derevoobrabotke* [Derewo.ru]. 2008, no. 4, pp. 88–94. (In Russian)
19. Abushenko A.V. Ekstruziya drevesno-polimernykh kompozitov [Extrusion of Wood-Polymer Composites]. *Mebel'shchik* [Furniture Maker]. 2005, no. 2, pp. 20–25. (In Russian)
20. Shkuro A.E., Glukhikh V.V., Mukhin N.M. et al. Vliyaniye soderzhaniya sevilena v polimernoy matritse na svoystva drevesno-polimernykh kompozitov [Effect of the Ultrathene Content in a Polymer Matrix on the Properties of Wood-Polymer Composites]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2012, vol. 15, no. 17, pp. 92–95. (In Russian)

Received in June 2017.

Adopted in revised form in July 2017.

Approved for publication in August 2017.

About the authors: **Matseevich Tat'yana Anatol'evna** — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; MatseevichTA@mgsu.ru;

Askadskiy Andrey Aleksandrovich — Doctor of Chemical Sciences, Professor, Leading Researcher of the laboratory “Building Composites, Solutions and Concretes”, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; andrey@ineos.ac.ru.