

Таблиця 2

Порівняння дослідних і розрахункових прогинів балок

№ п/п	Найменування величини	Одиниця виміру	Умовні позначення	Розрахункові та експериментальні величини балок серії			
				БКСП	БУМ	БУФ	БУП
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Зусилля визначення прогину	кН	F	16	36	42	48
2.	Розрахункове значення згинального моменту при якому визначався прогин	кН·м	M	9,6	21,6	25,2	28,8
3.	Розрахункова кривизна елемента	1/мм	$\delta \cdot 10^{-6}$	10,66	11,88	14,12	13,2
4.	Розрахунковий прогин обчислений точним методом (формула (4.42))	мм	$f^{теор}$	4,34	5,11	6,21	5,66
5.	Прогин викликаний деформацією згину (формула (4.41))	мм	$f_m^{теор}$	3,69	3,65	4	4,51
6.	Прогин викликаний деформацією зсуву (формула (4.43))	мм	$f_q^{теор}$	0,65	0,88	1,07	1,15
7.	Розрахунковий прогин обчислений наближеним методом (формула (4.45))	мм	$f^{теор}$	4,37	5,19	6,23	5,73
8.	Експериментальний прогин	мм	$f^{експ}$	4,5	5,4	6,1	5,6
9.	$f^{експ} / f^{теор}$	-	-	1,04	1,06	0,98	0,99
10.	$\frac{f^{експ} (підсилених)}{f^{експ} (непідсилених)}$	-	-	1	1,2	1,36	1,24

Примітка. Дослідні величини порівняні з теоретичними, обчисленими точними методами.

Як видно з табл. 2 в усіх підсилених балках, незалежно від способу підсилення, значення прогинів збільшилося (див. рядок 10 табл. 2) у середньому на 20...35 %. Незважаючи на це, можна стверджувати, що жорсткість підсилених балок збільшилася у порівнянні з непідсиленими, тому, що незначне збільшення прогину (на 20...35 %) відбувалося на тлі значного збільшення руйнівного навантаження (близько 250 %). Також слід звернути увагу на досить значний внесок деформацій зсуву в загальний прогин балок. Так, для непідсилених балок їх величина склала близько 15 %, а для балок серій БУМ, БУФ та БУП знаходилася в межах 17...20 % від загального розрахункового прогину балок. Якщо ж говорити про ефективність того або іншого способу підсилення, то треба відмітити значний ефект від підсилення шаром полімербетону. Так,

прогини балок підсилених полімербетоном були, в середньому, на 4 % більше ніж у балок серії БУМ і на 12 % меншими ніж у балок серії БУФ, хоча навантаження, при якому вимірювали прогини балок серії БУП були відповідно на 33 % та 14 % більшими, чим у балок серій БУМ та БУФ.

Зважаючи на сказане можна дійти висновку, що запропонований метод обчислення підсилених балок за деформаціями, у даному випадку, показав задовільні результати.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Валовой О.И., Еременко О.Ю. Міднісні та деформативні характеристики залізобетонних балок, підсилених ефективними матеріалами. / Вісник КТУ. Збірник наукових праць. Випуск 7, 2005.- 178 с.
2. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции. Общий курс: Учебн. для вузов.- 5-е изд., перераб. и доп.- М.: Стройиздат, 1991.- 767с.
3. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.- 80 с.

УДК 69.057

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СИСТЕМЫ «МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ПОДЛОЖКА – АРМИРОВАННОЕ ПОЛИМЕРНОЕ ПОКРЫТИЕ» ПРИ ИЗГИБЕ И РАСТЯЖЕНИИ

*Д.Р. Веселовский, аспирант, Н.В. Савицкий, д.т.н., проф., *Б.А. Ляшенко, д.т.н., проф., **Р.А. Веселовский, д.х.н., проф., **О.С. Коротков, аспирант*

Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, г.Днепропетровск

**Институт проблем прочности Национальной академии наук Украины, г.Киев, **Институт химии высокомолекулярных соединений НАНУ, г.Киев*

Постановка задач исследования. Потери стран СНГ от коррозионного, эрозионного и других видов разрушения металлических конструкций и сооружений составляют 60 – 80млрд. долларов в год.

Одним из методов восстановления несущей способности изношенных металлических конструкций является дублирование их армированными полимерными покрытиями [5]. Такие конструкции в процессе эксплуатации часто подвергаются интенсивным изгибающим, сжимающим или растягивающим механическим нагрузкам, локальным и распределенным, статическим и динамическим, которые могут вызвать их деформацию и разрушение.

В связи с этим представляет интерес исследование влияния изгибных и растягивающих нагрузок на деформированное состояние композиционных материалов, а также определение величин максимальных линейных деформаций подложки, при которых покрытие сохранит адгезионную связь при их совместном деформировании. Сохранение этой связи в условиях деформированного состояния возможно только при наличии высокой адгезионной

прочности. В то же время особенности совместного деформирования подложки и покрытия являются одной из наиболее важных и недостаточно изученных задач.

Изложение основного материала. Испытания композиционных материалов на базе стеклопластиков показали, что основным видом разрушения является расслаивание слоев стеклоткани под действием сжимающей нагрузки. Потеря устойчивости может наступать и в элементарном звене армированного полимерного покрытия. При сжатии его вдоль волокон стеклоткани развитие деформаций в клеевой композиции приводит к потере устойчивости стекловолокон, что инициирует начало разрушения композиционного материала.

Армированные полимерные покрытия в большинстве случаев хорошо работают в условиях растяжения и сжатия и хуже при изгибе. Ликвидировать различие между характеристиками прочности этого материала пытаются различными способами: местным упрочнением, увеличением толщины материала, установкой ребер жесткости и т.п. Однако, применение армированного полимерного материала, предназначенного для раздельной работы его в растягиваемых или изгибаемых элементах, нецелесообразно и не всегда осуществимо. Необходимо иметь материалы, способные воспринимать как растягивающие, так и изгибающие нагрузки. Рассмотрим более подробно некоторые виды разрушения композиционного (металлополимерного) материала типа металл – армированное полимерное покрытие.

При исследовании в качестве металлополимерных элементов использовались образцы размером 5 x 60 x 350 мм, изготовленные из стали ВМ Ст.3 сп, так как сталь этой марки является одним из основных конструкционных материалов, применяемых в различных областях техники.

При формировании армированного полимерного покрытия в качестве связующих использовались разработанные нами композиции «Спрут-А1» на основе ненасыщенной полиэфирной смолы, «Спрут-А2» на основе акриловой смолы и «Спрут-А3» на основе эпоксидной смолы. Во все смолы вводились специальные модификаторы и реакционноспособные поверхностно-активные вещества [6,7], обеспечивающие увеличение адгезионной прочности и неизменность ее во времени даже в воде, а также снижение усадочных внутренних напряжений на границе металл – полимер. Армирующим материалом служила стеклоткань Т-11-ГВС-9.

Прочность композиционного материала при растяжении определяли по формуле (1):

$$\sigma_k = \sigma_m v_m + (1 - v_m) \sigma_n = \sigma_m v_m + \sigma_n v_n \quad (1)$$

где $\sigma_k, \sigma_m, \sigma_n$ – предел прочности композиционного материала, металла и покрытия соответственно, МПа;

v_m, v_n - объемная доля металла и покрытия соответственно, %.

Формула (1) справедлива лишь для идеального адгезионного контакта покрытия с подложкой в предположении, что: а) связь между покрытием и подложкой является совершенной; б) взаимодействие покрытия с подложкой не приводит к появлению поперечных деформаций; в) до нагружения в

покрытии и подложке нет остаточных напряжений; г) все фазы при всех уровнях напряжений находятся в условиях равной деформации; д) волокна стеклоткани расположены параллельно оси нагружения.

В исследуемых образцах $\sigma_m = 400$ МПа, $\sigma_n = 320$ МПа, соотношение $v_m / v_n = 3/1$. Отсюда прочность теоретическая равна 375 МПа. Фактическая прочность (контрольная) композиционных образцов определялась на разрывной машине Instron.

В связи с тем, что элементы, изготовленные из композиционного материала, могут находиться в условиях резкого изменения температур, возникает опасение, что в силу различия коэффициентов линейного расширения и в связи с относительно большой толщиной покрытия возможно уменьшение адгезионной прочности.

Коэффициент линейного расширения армированного полимерного покрытия в интервале 297 – 373 К равен $9 \cdot 10^{-5}$, а коэффициент линейного расширения металла равен $12 \cdot 10^{-6}$. В связи с этим было исследовано влияние циклических изменений температуры, а также длительного воздействия повышенной температуры на физико-механические свойства системы металл – армированное полимерное покрытие.

Вначале образцы выдерживались в термостате при температуре 373 К в течение 30 минут, после чего переносились в сосуд с жидким азотом (123 К), в котором выдерживались также 30 минут. Всего было проведено 15 таких циклов. Для определения эффектов термических воздействий и теплового удара в отдельности часть образцов подвергалась только одному нагреву в течение 5 часов при температуре 373 К.

Образцы, прошедшие нагрев и охлаждение, осматривались визуально (с помощью лупы 20-кратного увеличения), а затем испытывались на растяжение. Результаты испытаний образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Прочностные свойства образцов после воздействия температуры.

Состояние образцов	Полимерная композиция	σ_k , МПа	Снижение σ_k , %
После циклического воздействия температуры	Спрут-А1	350	5,5
	Спрут-А2	340	5,5
	Спрут-А3	347	5,8
После длительного воздействия повышенных температур	Спрут-А1	355	4,2
	Спрут-А2	345	4,1
	Спрут-А3	351	4,5
Контрольные	Спрут-А1	370	-
	Спрут-А2	360	-
	Спрут-А3	364	-

Как видно из таблицы, потерю прочности композиционных образцов при растяжении при циклическом изменении температуры (до 5,8%) можно считать незначительной. Исследования показали, что армированное полимерное покрытие увеличивает прочность элемента, главным образом, в экстремальных условиях, когда разрушающая нагрузка на элемент превышает предел упругости материала подложки, то есть покрытие начинает принимать на себя нагрузку при пластическом деформировании стали.

Композиционные образцы были нагружены до напряжения 200 МПа, выдерживались под растягивающей нагрузкой в течение 5 минут, затем нагрузка снималась и циклы повторялись. После 500 циклов увеличивали нагрузку и доводили образцы до механического разрушения покрытия в виде отслаивания его от металла.

Проводились также испытания на растяжение образцов, вырезанных из реальной судовой конструкции после 12 лет эксплуатации. Армированное покрытие в этом случае наносилось на корродированную поверхность металлического образца.

На коррозионную стойкость в морской воде и нефти композиционные образцы испытывались путем погружения их в среды в течение 50 суток. Через каждые 5 суток с помощью лупы 20-кратного увеличения проводились визуальные осмотры, которые показали полное отсутствие каких-либо коррозионных разрушений.

После 50 суток образцы испытывались на растяжение. На этот же вид нагрузки испытывались образцы после выдержки их в течение года на открытом воздухе. Визуальный осмотр этих образцов показал, что наружная поверхность (со стороны покрытия) не подверглась каким-либо изменениям, т.е. армированное полимерное покрытие хорошо выполняет функцию коррозионной защиты, а на поверхности металла без покрытия наблюдались очаги коррозионного износа металла в виде язвин и оспин. В таблице 2 приведены результаты этих испытаний.

Незначительное снижение прочности некоторых образцов после испытаний в течение 50 суток в морской воде и в течение года на открытом воздухе, по-видимому, может быть объяснено взаимодействием полимера с водой и окружающей средой. Исследования показали, что плотность материала покрытия в результате набухания в течение 5 суток возросла на 0,6 – 0,7%. Такое увеличение плотности связано, очевидно, с заполнением водой микродефектов в объеме армированного покрытия. Затем наблюдалось снижение плотности на 0,2 – 0,3% при увеличении времени выдержки образцов до 20 суток. Дальнейшее увеличение времени выдержки до 50 суток не приводит к изменениям плотности армированного полимерного покрытия. Снижение плотности материала покрытия мы связываем с некоторой пластификацией полимера водой. Прочность образцов, выдержанных в нефти и образцов с корродированной поверхностью практически была равна контрольной.

Таблица 2

Прочностные свойства образцов после коррозионных испытаний.

Состояние образцов	Полимерная композиция	σ_k , МПа	Снижение σ_k , %
После 500 циклов нагружения	Спруг-А1	360	-2,7
	Спруг-А2	350	-2,8
	Спруг-А3	354	-3,0
После выдержки в нефти в течение 50 суток	Спруг-А1	371	+1,0
	Спруг-А2	362	+1,1
	Спруг-А3	365	+1,0
После выдержки в морской воде в течение 50 суток	Спруг-А1	355	-1,1
	Спруг-А2	335	+0,3
	Спруг-А3	339	-2,1
После выдержки в течение года на открытом воздухе	Спруг-А1	350	-1,4
	Спруг-А2	340	-0,6
	Спруг-А3	344	-1,8
Образцы с корродированной поверхностью	Спруг-А1	372	+1,0
	Спруг-А2	363	+1,1
	Спруг-А3	366	+1,1
Контрольные	Спруг-А1	370	-
	Спруг-А2	360	-
	Спруг-А3	365	-

Армированные полимерные покрытия, используемые для восстановления прочности, жесткости и герметичности изношенных элементов металлических конструкций, эксплуатируются, а часто и наносятся в присутствии воды и нефтепродуктов. В связи с этим большой практический интерес представляет оценка адгезионной прочности покрытий в этих условиях.

Рассмотрены следующие варианты нанесения и испытания армированных полимерных покрытий:

1. Нанесение покрытий на воздухе, испытание на воздухе, воде и нефтепродуктах.
2. Нанесение покрытий на металлическую поверхность, покрытую нефтепродуктами, испытание на воздухе и в присутствии нефтепродуктов. В качестве нефтепродуктов использовались дизельное топливо, сырая нефть и мазут, в связи с тем, что результаты испытаний с этими материалами были приблизительно одинаковыми, в дальнейшем описании мы их не разделяем.
3. Нанесение покрытий в воде, испытание на воздухе и в воде.
4. Нанесение покрытий по вариантам 2 и 3, выдержка и испытание в той же среде.

Некоторые результаты испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов на нормальный отрыв и сдвиг

№ п/п	Условия нанесения и испытания покрытий	Адгезионная прочность образцов, МПа					
		Спрут-А1		Спрут-А2		Спрут А3	
		σ_n	τ_n	σ_n	τ_n	σ_n	τ_n
1	Нанесение и испытание на воздухе	30,8	30,1	28,4	27,0	28,2	29,5
2	Нанесение в воде испытание на воздухе	28,8	28,3	28,1	27,6	27,3	28,4
3	Нанесение в нефти продуктах, испытание на воздухе	29,2	27,8	27,0	26,0	27,6	29,1
4	Нанесение, выдержка и испытание в нефтепродуктах	28,6	28,1	25,3	24,2	27,8	28,6
5	Нанесение, выдержка и испытание в воде	28,7	28,2	28,6	27,1	27,2	27,6

Примечание: σ_n и τ_n - пределы прочности при нормальном отрыве и сдвиге соответственно, МПа. Испытания на нормальный отрыв проводили по ГОСТ 14760-69, на сдвиг - по ГОСТ 14759-69.

Как видно из таблицы, нанесение армированных покрытий в воде и нефтепродуктах оказывает незначительное влияние на значение адгезионной прочности. При этом закономерности, полученные для связующих полиэфирного, акрилатного или эпоксидного типа приблизительно одинаковые. Это связано с тем, что все виды связующих содержат в своем составе реакционноспособные поверхностно-активные вещества и взаимодействие полимер – металл осуществляется через монослой ПАВ, при этом химическая природа связующего уже не имеет принципиального значения [6].

Поверхностно-активное вещество обеспечивает термодинамические условия вытеснения воды или нефтепродуктов с границы раздела композиция – металл при склеивании в этих жидкостях. Однако, как было показано нами ранее [7], для получения прочного адгезионного соединения в этих условиях при нанесении композиции необходим подвод механической работы на границу раздела фаз. Практически это можно осуществить, используя жесткие щетки для нанесения композиции, при склеивании в жидкости больших поверхностей необходимо обеспечивать течение композиции в адгезионном слое. При этом следует предусмотреть удаление вытесненной с поверхности металла жидкости за пределы адгезионного слоя.

Как видно из табл.3, выдержка покрытий в воде практически не снижает адгезионную прочность, даже при испытании покрытия на основе полиэфирной композиции «Спрут-А1». Как отмечается в литературе [7], клей и покрытия на основе ненасыщенных полиэфирных смол имеют очень низкую водостойкость. В данном случае, использование нами реакционноспособных ПАВ позволило уменьшить межфазное натяжение клей – металл до такого значения, при котором диффузия воды по межфазной границе становится термодинамически невозможной [6,7]. При выдержке покрытий в нефти также отмечается очень незначительное изменение адгезионной прочности даже для акриловых композиций, которые характеризуются значительной пластификацией нефтепродуктами. Для снижения пластифицирующего эффекта в состав макромолекул композиции были введены изоцианатные группы, которые обеспечивали образование межмолекулярных сшивок.

Учитывая полученные результаты, все испытанные композиции могут быть рекомендованы для использования в условиях воздействия воды или нефтяных сред. Однако, принимая во внимание более высокую технологичность композиции «Спрут-А1», предпочтение следует отдавать этой композиции. Действительно, эта композиция может отверждаться практически при любой температуре окружающей среды, время отверждения может регулироваться от 1 секунды (при использовании фотосенсибилизаторов) до нескольких суток.

Микронеоднородные пластические деформации металла исследовались с помощью метода реперных точек. Суть метода заключается в нанесении на полированную поверхность образца реперных точек с различной базой с последующим сравнением расстояния между реперными точками до и после деформации. Испытания проводились на разрывной машине Instron. Средняя микродеформация рабочего участка образца измерялась тензометром с базой 50 мм. Нагрузка регистрировалась электронным силоизмерителем. Наблюдение и фотографирование рабочего участка образца производилось с помощью микроскопа с фотонасадкой. После достижения заданного уровня деформации рост нагрузки прекращался и осуществлялось фотографирование рабочего участка с реперными точками при 300-кратном увеличении. При достижении пластической деформации, во избежание релаксации образец разгружался и фотографировался.

Перед нанесением покрытия поверхность образцов полировалась до чистоты, соответствующей $R^a = 0,20 - 0,30$ по ГОСТ 2789-73. С целью снятия внутренних напряжений и повышения чистоты поверхности, образцы электрополировались. При электрополировке использовался хлоруксусный электролит, алюминиевый катод и принудительное охлаждение электролита. Качество электрополировки проверялось на микроскопе МИИ-8 при 300-кратном увеличении. Снятие внутренних напряжений контролировалось на микротвердомере ПМТ-3 измерением микротвердости после каждого цикла электрополировки. Всего было проведено 17 циклов электрополировки.

После окончания электрополировки образцы травились в 10% растворе HF для выявления структуры. Измерение величины зерен показало, что средний размер зерна равен 30 мкм. В связи с этим был выбран шаг реперных точек

10 мкм. Так как шаг реперных точек мал, а в месте их нанесения поверхность пластически деформируется, возник вопрос наименьшей возможной нагрузке на индентор микротвердомера. Проведенный эксперимент показал, что реперная точка надежно различима при нагрузке не менее 3 грамм. Образец выставлялся на предметном столике микротвердомера так, чтобы несоосность образца и оси перемещения столика составляла не более 0,005 мм на 2 мм рабочего участка. Соосность контролировалась по симметричности отпечатка при нагрузке на индентор микротвердомера 10 грамм.

На образцы наносилось по 200 реперных точек. Для облегчения поиска исследуемого участка он маркировался тушью. Сразу после нанесения реперные точки фотографировались с помощью микроинтерферометра МИИ-4 при 300-кратном увеличении.

Первичные результаты эксперимента представляют собой фотопленки с изображением последовательных этапов деформирования рабочего участка. Деформация каждого микроучастка равна разности расстояний между двумя соседними реперными точками после и до деформации. Измерение расстояний между реперными точками производилось с фотопленок на инструментальном микроскопе типа БМИ при увеличении в 100 раз с точностью до 0,01 мм. Каждое измерение проводилось три раза. Если в дальнейшем оказывалось, что одно из значений отличается от двух других более, чем на 0,01%, данный промежуток перемерялся заново. Таким образом была обеспечена 0,01% точность измерений.

Наблюдение за образцами в процессе деформирования при испытаниях на растяжение показало, что разрушению композиционного материала предшествует когезионное разрушение армированного полимерного покрытия с одновременным или более ранним нарушением адгезионной связи, то есть отслаиванием. С началом растрескивания клеевого слоя, разрыва волокон стеклоткани и отслаивания покрытия от металла происходила потеря защитных и упрочняющих свойств покрытия. Все это происходило до исчерпания прочности подложки из-за различных модулей упругости подложки и армированного полимерного покрытия.

Исследования показали, что разрушение вследствие сдвига между слоями стеклоткани наблюдается только при изгибе композиционного материала сосредоточенной силой с малым отношением длины пролета к высоте сечения. Во всех остальных вариантах изгиба, наиболее часто встречающихся на практике, разрушение материала происходит в сжатой зоне.

Испытания образцов на изгиб показали, что разрушение в зоне растяжения наступает позже, чем в зоне сжатия при линейных деформациях материала подложки 0,25 – 0,35%.

При действии изгибающей нагрузки сначала происходит разрушение внешнего слоя, затем оно распространяется внутрь материала покрытия. Это объясняется различным характером предельного состояния и механизмом разрушения армированного полимерного покрытия при растяжении и сжатии. В сжатой зоне разрушение армированного полимерного покрытия происходит в виде выпучивания наружного слоя стеклоткани (образуются складки) с последующим отслаиванием от металла, т.е. сжатые волокна стеклоткани

утрачивают упругую устойчивость. При действии сжимающих сил, когда достигается предел устойчивости, клеевая композиция утрачивает способность удерживать волокна стеклоткани и покрытие разрушается. В растянутой зоне разрушение покрытия происходит в виде разрыва волокон стеклоткани с последующим нормальным отрывом от подложки.

Для определения работоспособности металлических конструкций, дублированных армированным покрытием, представляет интерес определение зависимости разрушающей нагрузки от соотношения толщины покрытия и подложки.

При работе металлополимерных образцов на изгиб разрушающую нагрузку определяли по следующему выражению (2):

$$P_u / \sigma = \frac{\varepsilon_{кр} \delta_n^3 E_m [1 + E^2 \delta^4 + 2E(2\delta^3 + 3\delta^2 + 2\delta)]}{12Le\delta^3(1 + E\delta)}, \quad (2)$$

а при работе на растяжение по выражению:

$$P_p / \sigma = \frac{\varepsilon_{кр} [E_m \delta_m^2 + E_n \delta_n^2 + 2e(E_m \delta_m + E_n \delta_n)]}{2e}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{кр}$ - линейная деформация подложки, при которой наступало отслаивание покрытия от металла;

e - расстояние от адгезионного слоя до нейтрального слоя;

$$E = E_n / E_m; \quad \delta = \delta_n / \delta_m;$$

E_m, E_n - модуль упругости материала подложки и покрытия соответственно;

L - длина металлополимерного образца между опорами;

δ_m, δ_n - толщина подложки и покрытия соответственно;

σ - ширина металлополимерного образца.

В эксперименте, по результатам которого производился расчет, толщина армированного полимерного покрытия была постоянной и равной $\delta_n = 0,15$ см, а подложки $\delta_m = 0,3; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4$ см.

Необходимо отметить [8], что относительная деформация армированного полимерного покрытия при разрыве на порядок выше, чем у металла. Кроме того, предел прочности материала покрытия также значительно выше адгезионной прочности. Следовательно, разрушение композиции типа металл – армированное полимерное покрытие будет иметь только адгезионный

характер. Экспериментально было установлено, что разрушение композиционного материала происходит при появлении в поверхностном

слое металла линейных деформаций порядка $\varepsilon_{кр} = 0,25 - 0,35\%$. В этом случае микронеоднородные пластические деформации металла и изменение рельефа приводят к разрушению адгезионной связи, т.е. участки поверхностного слоя металла являются концентраторами напряжений, которые резко снижают прочность металлополимерного элемента. Прочность этого элемента оценивалась по линейным деформациям поверхностного слоя металла. Величина деформации была стабильной при различных значениях нагружения и соотношениях толщин покрытия и металла, а величина разрушающей нагрузки соответствовала расчетной. Это подтверждает правильность принятой гипотезы об оценке прочности металлополимерного материала по величине удлинения металла на границе раздела фаз, позволило подтвердить роль микронеоднородных пластических деформаций в разрушении адгезионной связи и упрочняющее действие покрытия за счет уменьшения значения таких деформаций, т.е. выявлен один из механизмов разрушения металлополимерного материала и факт повышения предела текучести поверхностного слоя металла.

Главным звеном, обуславливающим прочность металлополимерного элемента при изгибе, является характеристика сцепления между подложкой и покрытием. Момент потери устойчивости сжатого слоя покрытия определяется характером связи с подложкой, и, прежде всего, прочностью и деформативностью адгезионного слоя. Однако, потеря устойчивости в сжатом слое покрытия еще не определяет момента начала разрушения композиционного материала при изгибе, так как отрыва армированного полимерного покрытия от подложки еще не произошло и элемент работает в монолитном состоянии. Нормальный отрыв покрытия после потери устойчивости наступает в момент достижения отрывающими усилиями предела прочности сцепления между подложкой и покрытием. Сжатие чаще всего приводит не к непосредственному разрушению металлополимерного элемента по адгезионному слою, а к потере устойчивости сжатого слоя покрытия.

Небольшое различие в свойствах и характере разрушения покрытия при растяжении и сжатии обусловлено потерей устойчивости сжатого слоя из-за его недостаточной адгезионной связи с подложкой.

Испытания показали, что наибольшему разрушению армированное полимерное покрытие подвергается на деформируемой подложке. Изгиб и растяжение образцов свидетельствуют о том, что еще до достижения величины предела прочности материала подложки покрытие отслаивается. Это одинаково характерно и для зоны сжатия и для зоны растяжения.

Наличие касательных напряжений между слоями подложки и покрытия значительно уменьшает адгезионную прочность при нормальном отрыве, приводя к потере устойчивости сжатых слоев материала покрытия при значительно меньших напряжениях сжатия, т.е. имеет место зависимость разрушающего напряжения в условиях поперечного изгиба сосредоточенной силой от соотношения длины и поперечного композиционного элемента.

Таким образом, разрушение металлополимерного материала при изгибе определяется, в основном, адгезионной прочностью покрытия с подложкой при нормальном отрыве. Разработанные нами реакционноспособные поверхностно-активные вещества обеспечивают уровень адгезионной прочности выше когезионной прочности полимера. Кроме того, большое влияние на прочность металлополимерного элемента оказывает величина адгезионной прочности полимера к волокнам стеклоткани, в связи с чем для аппретирования стеклонитей следует использовать прямые замасливатели.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. К.А.Забела, Р.А.Веселовский, Ю.К.Значков. Ремонт подводных трубопроводов с помощью клеев, М. «Недра», 1978г, 176с
2. И.Г.Манец, Р.А.Веселовский. Полимерные композиционные материалы в горном деле. М., «Недра». 1988, 375с.
3. С.И.Корягин. Применение полимерных материалов при ремонте судовых конструкций и деталей механизмов рыбопромысловых судов. Калининград: Всесоюзный институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов рыбной промышленности и хозяйства., 1992, 131 с.
4. Р.А.Веселовский. Физическая химия многокомпонентных полимерных систем, том 1, Наукова Думка, Киев, 1986, 375с.
5. С.И.Корягин, И.Г.Манец. Исследование листовых элементов из армированного полимерного покрытия при действии равномерно-распределенной нагрузки. Вестник машиностроения, 1985, №11, с. 42-43
6. Р.А.Веселовский. Регулирование адгезионной прочности полимеров., Наукова Думка, Киев, 1988, 176с.
7. R.A.Veselovsky, V.N.Kestelman. Adhesion of Polymers, McGraw Hill, New-York, 2003, 500с.
8. У.Ф.Хаббард. Волокнистые композиционные материалы. М., «Химия», 1967, 248с.

УДК 533.6.013.42; 696.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ГИБКОГО СТЕРЖНЯ

В.Е. Волкова к.т.н., доцент

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск

В статье представлены результаты исследования вынужденных полигармонических колебаний гибкого стержня. Выполнен анализ влияния формы внешнего возмущения на динамическое поведение системы. Получены временные процессы, фазовые траектории и спектральные характеристики наиболее характерных динамических режимов, построены амплитудно-частотные зависимости.