

researches of interaction of elements of reinforced concrete designs]. Omsk: SibADI, 1997. 276 p.

3. GOST 27751-2014. Nadezhnost' stroitel'nykh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozenija [State standart 27751-2014. Reliability of constructions and foundations. The main provisions]. Moscow, Standartinform, 2015. 14 p.

4. Serija 1.020-1/87. Konstrukcii karkasa mezhvidovogo primenenija dlja mnogoetazhnykh zdanij [Series 1.020-1 / 87. Construction of interspecific application framework for multi-storey buildings].

5. Perel'muter A.V. Izbrannye problemy nadezhnosti i bezopasnosti stroitel'nykh konstrukcij [Selected problems of reliability and safety of building structures]. Moscow, Izdatel'stvo ASV, 2007. 256 p.

6. Kudishin Ju.I., Drobot D.Ju. K voprosu o zhivuchesti stroitel'nykh konstrukcij [On the issue of survivability of building structures]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*, 2008, no 2. pp. 36-43.

7. Sventikov A.A. Ocenka progressirujushhego razrushenija prostranstvennykh visjachih sterzhnevnykh pokrytij [Evaluation of progressive failure of spatial hanging rod in coatings]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*, 2010, no 5. pp. 34-38.

8. Rajzer V.D. Teorija nadezhnosti sooruzhenij [Reliability theory structures]. Moscow, Izdatel'stvo ASV, 2010. 384 p.

9. Nazarov Ju.P. K probleme obespechenija zhivuchesti stroitel'nykh konstrukcij pri avarijnykh vozdeystvijah [Simbirkin V.N. On the problem of ensuring the survivability of constructions for emergency actions]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*, 2009, no 4. pp. 5-9.

10. Tihonov I.N., Kozelkov M.M. Raschet i konstruirovanie zhelezobetonnykh monolitnykh perekrytij zdaniy s uchetom zashhity ot progressirujushhego

obrushenija [Calculation and design of reinforced concrete monolithic slabs of buildings, taking into account the protection of the progressive collapse.]. *Beton i zhelezobeton*, 2009, no 3. pp. 2-8.

Краснощекоев Юрий Васильевич (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции», ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: uv1942@mail.ru).

Мельникова Светлана Олеговна (Россия, г. Омск) – магистрант, ФГБОУ ВПО «СибАДИ». (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: svetamelnikova93@yandex.ru).

Екимов Александр Александрович (Россия, г. Омск) – магистрант, ФГБОУ ВПО «СибАДИ». (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: ekimovalex90@gmail.com).

Krasnoshchekov Yury Vasilyevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, the associate professor, professor of Building constructions department of The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: uv1942@mail.ru).

Melnikova Svetlana Olegovna (Russian Federation, Omsk) – undergraduate, of The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: svetamelnikova93@yandex.ru).

Ekimov Alexander Aleksandrovich (Russian Federation, Omsk) – undergraduate, of The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: ekimovalex90@gmail.com).

УДК 624.072.21.012.4.046

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОТЕРИ МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ОПОРНОЙ ЗОНЕ СБОРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОФИЛИРОВАННЫХ НЕСУЩИХ ОБОЛОЧЕК

Л.В. Красотина

ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. Обоснована инженерная методика расчета критических напряжений потери местной устойчивости в опорной зоне незамкнутых сборных профилированных несущих цилиндрических геометрически ортотропных оболочек на основе математического моделирования контактной краевой задачи конструкционного типа. Выявлены принципиальные отличия существующих расчетных методик от предложенной в работе. Сделаны выводы о возможности использования разработанной методики для любых типов рассматриваемого типа оболочек. Приводятся результаты комплекса экспериментальных работ по натурному моделированию процесса потери местной устойчивости элементами профилей.

Ключевые слова: метод конечных элементов, сборная профилированная несущая цилиндрическая оболочка, гофрированный отсек; критические напряжения потери местной устойчивости; плоские и криволинейные участки профиля.

Введение

В современных условиях возрос интерес к сборным профилированным несущим оболочкам [1]. Это связано с усовершенствованием технологий их производства, появлением новых материалов, улучшающих прочностные характеристики данных конструкций, а так же развитием программных продуктов, реализующих МКЭ.

Но проектирование таких оболочек является непростой задачей, требующей на предпроектном этапе решения многопараметрической задачи, что сдерживает применение этих прогрессивных конструкций. На этапе эскизного проектирования рассматриваемых конструкций необходимо учесть геометрию конструкции (радиус кривизны, тип профиля, толщину профиля), технологические возможности ее изготовления, внешнюю нагрузку и ее сочетания и т.д. [2].

Учитывая большое количество входных параметров, длительный процесс моделирования оболочек, значительное время расчета конечноэлементных моделей, проводить варианты расчеты для выявления рациональной конструкции методом конечных элементов сложно и неэффективно [3].

Инженерная методика определения критических напряжений потери местной устойчивости

Одной из задач проектирования часто применяемых незамкнутых сборных профилированных несущих цилиндрических оболочек является необходимость учета значительных продольных усилий в опорных зонах.

В связи с этим, необходимо рассматривать вопрос о возможной потере местной устойчивости элементами профиля проектируемой оболочки.

В нормах по проектированию стальных конструкций [4] рекомендаций по расчету на местную устойчивость внецентренно сжатых и сжато - изгибаемых участков тонкостенных геометрически ортотропных оболочек не приводится.

Аналитически получить результат определения критических напряжений можно только для профилей с четко выраженными граничными условиями, например, для тонкостенной квадратной трубы. Для рассматриваемых же профилей сортамента [5], состоящих из плоских и криволинейных участков, граничные условия закрепления сложнее, а значения критических напряжений

потери местной устойчивости необходимо определять с учетом взаимодействия плоских и радиусных участков гофра. В этом случае аналитическое решение громоздко и практически нереализуемо.

Простейший прием теоретической оценки критических напряжений состоит в расчленении профиля на отдельные пластинчатые элементы (плоские и криволинейные) с последующим определением для каждого из них критических напряжений при подходящих граничных условиях.

Известно, что потеря устойчивости плоских участков гофра не вызывает разрушения конструкции, поскольку плоская пластина после потери устойчивости продолжает нести нагрузку. Потеря устойчивости криволинейными участками гофра, как правило, соответствует разрушению. Поэтому предварительный расчет на местную устойчивость опорной зоны незамкнутых сборных профилированных несущих цилиндрических оболочек можно свести к определению критических напряжений потери местной устойчивости в криволинейных участках гофра.

Данная методика лежит в основе расчета на местную устойчивость гофрированных отсеков в ракетостроении и изложена в [6].

Критические напряжения сжатия в упругой области для криволинейных участков гофра можно определить по формуле [1]:

$$\sigma_{кр} = kE \frac{h_e}{r}, \quad (1)$$

где h_e - толщина гофра; r - радиус сечения гофра; E - модуль упругости материала профиля.

Для гофров с отношением радиуса к толщине $r/h_e=20...100$, используемых для сухих гофрированных отсеков в ракетостроении, по рекомендациям [6] приближенно можно принять $k=0,150$.

Но сборные профилированные несущие оболочки рассматриваемого сортамента [5] существенно отличаются от гофрированных отсеков, используемых в ракетостроении, поперечной гофрировкой, геометрией гофров, способом приложением нагрузки и отношением радиуса гофра к его толщине r/t_e (рис.1). Так, например, для рассматриваемых оболочек отношение r/t_e варьируется от 3 до 8, а для гофрированных отсеков - $r/t_e=20...100$ [6].

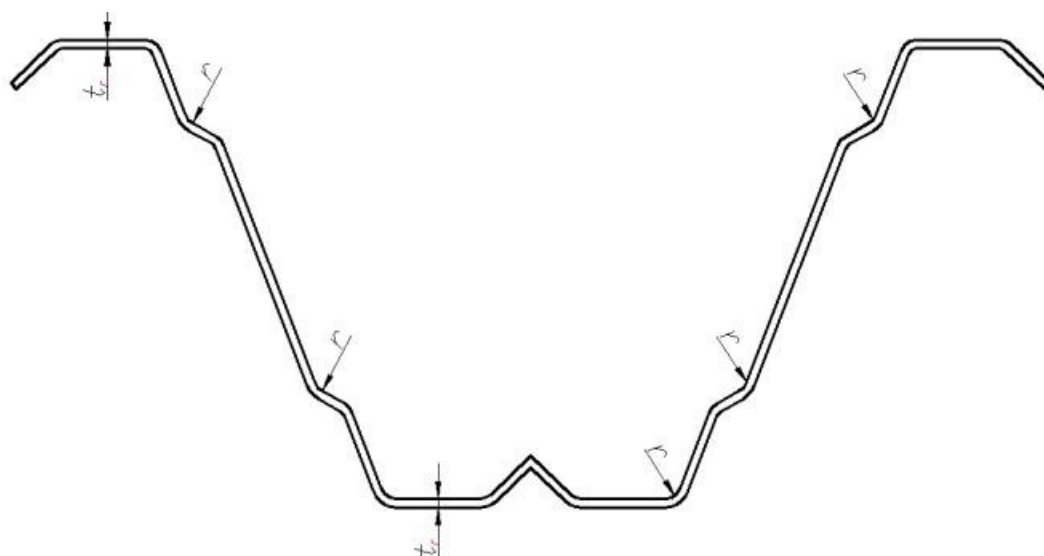


Рис.1. Фрагмент поперечного сечения профиля А-Н107

Ввиду существенных конструктивных отличий сборных профилированных несущих цилиндрических оболочек от используемых в ракетостроении, для определения критических напряжений потери местной устойчивости криволинейными участками гофра по зависимости (1), необходимо определить коэффициент k для рассматриваемого типа оболочек. Для решения поставленной задачи в ПК «NX NASTRAN» [7] были построены КЭ-модели гофра оболочки (рис. 2), определены усилия, при которых теряет устойчивость криволинейная часть гофра и выявлены напряжения потери местной устойчивости $\sigma_{кр}$ с последующим определением коэффициента k для каждого типа профиля и возможных толщин рассматриваемого сортамента [5].

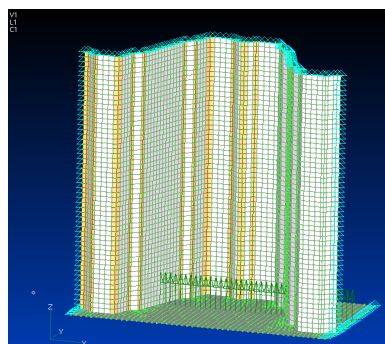


Рис. 2. КЭМ гофра профиля А-Н107

Расчеты выполнялись в линейной постановке с использованием блока линейного анализа устойчивости «*Bucling*». В результате расчетов определены усилия, при которых происходит потеря местной устойчивости криволинейными участками гофра и выявлены напряжения потери местной устойчивости $\sigma_{кр}$ с последующим определением коэффициента k для каждого типа профиля сортамента [5] и всех возможных толщин. Коэффициент k определен в зависимости от типа профиля и его толщины t_2 . Например, для профиля А-Н107 k можно определить по зависимости:

$$k = 0,027t_2 - 0,007. \quad (2)$$

В результате исследований выявлено, что для всех рассмотренных профилей с толщиной гофра $t_2 > 0.8$ мм критические напряжения потери местной устойчивости выше предела текучести материала.

На рисунке 3 в КЭ-модели гофра выделена группа криволинейных участков гофра для удобства определения в них напряжений потери местной устойчивости $\sigma_{кр}$. Группа криволинейных участков гофра фрагментирована, что позволяет четко зафиксировать 1-ую форму потери их устойчивости.

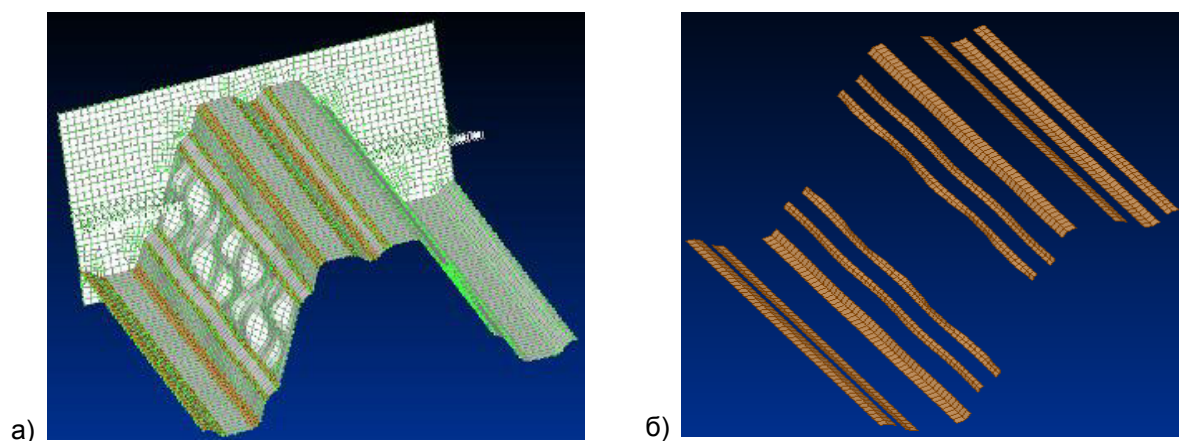


Рис. 3. Потеря местной устойчивости плоскими и криволинейными участками гофра; а – КЭ-модель гофра профиля А-Н107; б- потеря устойчивости фрагментированной группы криволинейных участков гофра

Результаты определения критических напряжений потери местной устойчивости и численных значений коэффициентов k для

профиля А-Н107 толщиной от 0,7 до 1,5 мм приведены в таблице 1.

Таблица 1 – $\sigma_{кр}$ и k для профиля А-Н107

Значения толщины профиля, t_s мм	$\sigma_{кр}$, МПа	k
0,7	235,31	0.011
0,8	312,52	0.015
0,9	345,12	0.016
1,0	422,35	0.021
1,2	547,85	0.026
1,5	711,99	0.033

Для выявления влияния размеров КЭ-модели, в частности, количества гофров, на определение критических напряжений потери местной устойчивости, был проведен численный эксперимент. Создана КЭ-модель фрагмента опорной зоны оболочки шириной 1 м, наложены граничные условия 1-го рода, в том числе моделирующие совместную работу рассматриваемого фрагмента в составе конструкции покрытия в целом (рис. 4а). Фрагмент оболочки загружен аналогично варианту с одной волной профиля.

В результате анализа результатов расчетов выявлено, что проявление местной

потери устойчивости элементов только в одной стенке профиля метровой ширины, содержащего в своем составе восемь стенок (рисунок 4б) обусловлено погрешностями геометрии сечения профиля, не абсолютной жесткостью торцевого элемента и неточностью приложения продольной нагрузки N .

В данном случае потеря местной устойчивости проявилось в самом «слабом» звене. Расчеты показали, что остальные полки теряют местную устойчивость по первой форме при нагрузках, превышающих первую критическую не более чем на 1,5 %.

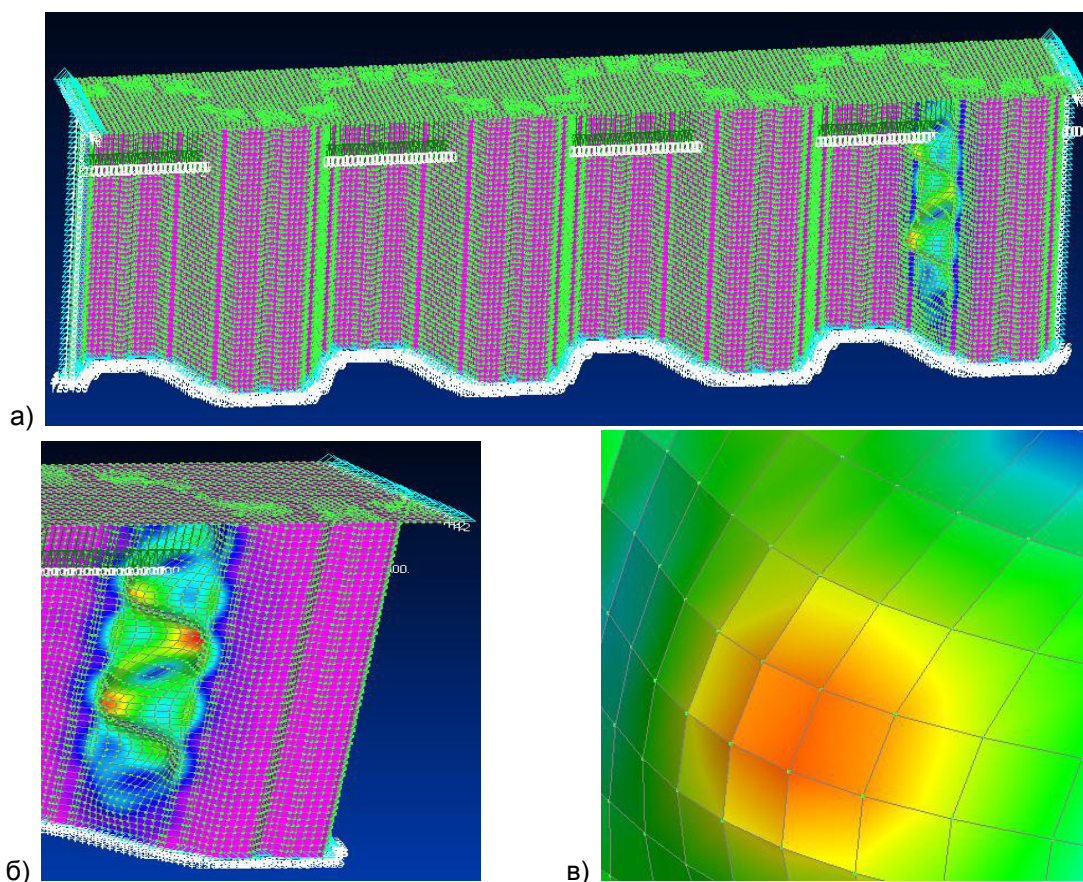


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу;
а - общий вид КЭ-модели; б- фрагментация КЭ-модели в зоне потери устойчивости;
в- распределение напряжений в зоне потери устойчивости

С целью подтверждения достоверности расчетных данных проведен комплекс экспериментальных работ по натурному моделированию процесса потери местной устойчивости элементов фрагмента профиля А-Н107-0,7 [5] с исследованием напряженно-деформированного состояния профиля.



Рис.5 .Потеря местной устойчивости профилем А-Н107 $t=0.7$ мм.

Для профиля А-Н107-0.7 оценена точность теоретического определения величины критической силы, действующей на профиль в опорной зоне. Для этого фрагменты оболочек испытывались на сжатие. Внешний вид одного из образцов представлен на рисунке 5. Текущие перемещения гофра фиксировались с помощью индикаторов часового типа после каждой ступени нагружения. При этом считалось, что достигнуто значение критической силы при увеличении перемещений до значения равном толщине профиля.

Результаты испытаний приведены в таблице 3

Таблица 3 – Результаты экспериментального и теоретического определения критических напряжений

Профиль А-Н107 $t_p = 0,7\text{мм}$ ГОСТ 24045-94					
№ образца	$\sigma_{\text{эксп}}$, МПа	$\sigma_{\text{теор}}$, МПа	$\sigma_{\text{мкэ}}$, МПа	$\Delta_{\text{эксп}}$, %	$\Delta_{\text{мкэ}}$, %
1	222,7	238,9	230,3	6,8	3,6
2	221,2			7,4	
3	212,4			11,1	
4	220,1			7,9	
5	210,8			11,8	
6	218,6			8,5	
7	217,6			8,9	
8	223,4			6,5	
9	215,7			9,7	
10	213,8			10,5	

Заключение

В результате проведенных исследований определены: вид участков профиля, потерявших местную устойчивость по первой форме (рис. 3,4); значения нормальных напряжений, соответствующих первой форме потери местной устойчивости элементами профиля.

Определены корректирующие коэффициенты k для расчетов на местную устойчивость приопорных участков профилей с использованием известных положений, принятых в ракетостроении.

Полученные значения коэффициентов k зависят от толщины профиля, типа и гофрировки поперечного сечения, в отличие от принятых в ракетостроении, где для всех толщин и видов рассчитываемых профилей принято значение коэффициента $k = 0,150$.

Разработанная инженерная методика определения напряжений потери местной устойчивости может быть использована для любых типов профилей сборных профилированных несущих незамкнутых цилиндрических оболочек [8].

Библиографический список

1. Красотина, Л.В. Моделирование систем сводчатого покрытия, составленного из арочных заготовок / Л.В. Красотина // Материалы 66-й научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» Книга 1 – Омск, 2012. – С. 231-235.
2. Афанасьев, В.Ю. Несущие арочные покрытия из трапециевидного профиля производства ООО «Монтажпроект», г. Омск / В.Ю. Афанасьев, З.Н. Соколовский, С.А. Макеев // Роль механики в создании эффективных материалов, конструкций и машин 21 века: Труды всероссийской научно-технической конференции, 6-7 декабря 2006г. – Омск: СибАДИ, 2006. – С.81 – 86.
3. Макеев, С.А. Большепролетные покрытия на основе арочных несущих балок составного

сотового сечения / С.А. Макеев, Ю.В. Афанасьев, Л.В. Красотина // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – № 3. – С. 16 – 20.

4. СНиП II-23-81* Стальные конструкции. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 94 с.

5. ТУ 112-235-39124899-2005. Профили стальные гнутые арочные с трапециевидными гофрами / СибНИИстрой. – Новосибирск, 2005. – 18 с.

6. Балабух, Л.И. Строительная механика ракет / Л.И. Балабух, Н.А. Алфутов, В.И. Усюкин. – М.: «Высшая школа», 1984. – 391 с.

7. Шимкович, Д.Г. Femap & Nastran. Инженерный анализ методом конечных элементов / Д.Г. Шимкович. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 704 с.

8. ГОСТ 24045-94. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. Технические условия (с поправкой, опубликованной в ИУСе № 4 1996 г.). – Взамен ГОСТ 24045-86; введ. 1995-09-01 – М.: Издательство стандартов, 2000. – 22 с.

ENGINEERING METHOD FOR DETERMINING CRITICAL STRESS LOCAL STABILITY IN THE CORE ZONE MODULAR CYLINDRICAL PROFILED BEARING SHELLS

L.V. Krasotina

Abstract. In this article we presented an option of engineering calculation of the critical stress of stability loss of local support in the area of open-ended modular pro-profiled bearing cylindrical shells on the basis of mathematical modeling of the contact boundary value problem of structural type. Revealed fundamental differences existing calculation methods of the proposed work. Conclusions on the possibility of using techniques developed for all types of membranes of this type. The results of complex experimental work on the full-scale simulation of the loss of local sustainability profile elements of the process.

Keywords: finite element method, the team profiled bearing cylindrical shell, corrugated section; critical voltage loss of local sustainability; flat and curved sections of the profile.

References

1. Krasotina L.V. Modelirovanie sistem svodchatogo pokrytija, sostavlenno iz arochnyh zagotovok [Modeling vaulted coating systems composed of arched blanks]. *Materialy 66-j nauchno-prakticheskoy konferencii FGBOU VPO SibADI*, Omsk, 2012. pp. 231-235.
2. Afanas'ev V.Ju., Sokolovskij Z.N., Makeev S.A. Nesushhie arochnye pokrytija iz trapecievidnogo profilja proizvodstva OOO «Montazhprom», g. Omsk [Nesushhie arochnye pokrytija iz trapecievidnogo profilja proizvodstva OOO «Montazhprom», g. Omsk]. *Rol' mehaniki v sozdanii jeffektivnyh materialov, konstrukcij i mashin 21 veka: Trudy vsrossijskoj nauchno- tehnikeskoy konferencii, 6 -7 dekabrja 2006*, Omsk: SibADI, 2006. pp.81 – 86.
3. Makeev S.A., Afanas'ev Ju.V., Krasotina L.V. Bol'sheproletnye pokrytija na osnove arochnyh nesushhih balok sostavnogo sotovogo sechenija [Span coating on the basis of arch bearing beams composite honeycomb section]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*, 2008, no 3. pp. 16 – 20.
4. SNiP II-23-81* *Stal'nye konstrukcii* [SNIP II-23-81 * Steel structures]. Moscow, CITP Gosstroja SSSR, 1990. 94 p.
5. TU 112-235-39124899-2005. *Profili stal'nye gnutye arochnye s trapecievidnymi goframi* [TU 112-235-39124899-2005. Steel bent profile, arched with

trapezoidal corrugations]. SibNIISroj, Novosibirsk, 2005. 18 p.

6. Balabuh L.I., Alfutov N.A., Usjukin V.I. *Stroitel'naja mehanika raket* [Construction missiles mechanics]. Moscow, Vysshaja shkola, 1984. 391 p.

7. Shimkovich D.G. *Femap & Nastran. Inzhenernyj analiz metodom konechnyh jelementov* [Engineering finite element analysis]. Moscow, DMC Press, 2008. 704 p.

8. GOST 24045-94. Profili stal'nye listovye gnutye s trapecievidnymi goframi dlja stroitel'stva. Tehnicheskie uslovija (s popravkoj, opublikovannoj v IUSE № 4 1996). [State standard 24045-94. Profiles Bent steel sheet with trapezoidal corrugations for building. Technical conditions (as amended, published in IUSE number 4 of 1996)]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2000. 22 p.

Красотина Лариса Владимировна (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры Строительные конструкции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: krasotina.larisa@gmail.com).

Larisa V. Krasotina (Omsk, Russian Federation) – candidate of technical sciences, associate professor Department of building construction Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Mira, 5 prospect, Omsk, e-mail: krasotina.larisa@gmail.com).

УДК 625.731.2:624.138.26

СОПРЯЖЕНИЕ ПОДХОДНЫХ НАСЫПЕЙ С МОСТАМИ И ПУТЕПРОВОДАМИ

А.Л. Ланис, Д.А. Разуваев, П.О. Ломов
ФГБОУ ВО СГУПС, Россия, г. Новосибирск.

Аннотация. Рассмотрены вопросы сопряжения мостов, путепроводов и виадуков с подходными насыпями. Обозначены причины образования остаточных деформаций в дорожном полотне, рассмотрены применяемые конструкции. Предложена конструкция сопряжения перечисленных искусственных сооружений с подходными насыпями, заключающаяся в армировании рабочего слоя земляного полотна на переходном участке бетонными буронабивными сваями (БНС) в раскатанных скважинах. Расчетами упругих прогибов дорожного полотна и исследованием их изменения вдоль участка подтверждена эффективность применения предложенного способа сопряжения.

Ключевые слова: земляное полотно, подходные насыпи, мосты, путепроводы, уплотнение грунтов, буронабивные сваи, раскатка скважин.

Введение

Сопряжение мостов, путепроводов и виадуков с подходными насыпями является важным элементом автомобильных дорог, предназначенным обеспечить плавный переход от относительно податливого земляного полотна на жёсткое пролетное строение. Вместе с тем именно в местах сопряжения земляного полотна с перечисленными искусственными сооружениями очень часто наблюдаются

деформации, которые снижают ровность покрытия, а нередко приводят и к разрушению дорожной одежды (рис. 1).

Анализ показывает, что подобные деформации обусловлены целым комплексом объективных и субъективных факторов, связанных в первую очередь с недостаточным уплотнением грунтов при возведении подходной насыпи и их избыточным увлажнением при последующей эксплуатации автомобильной дороги [1]. При