

Опыт применения капиллярного метода контроля для сварных соединений элементов большепролетного купола

Ю.С. Кунин, Т.В. Потапова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В настоящее время в нашей стране проектируется, возводится и эксплуатируется значительное число большепролетных общественных зданий различного назначения с использованием пространственных металлических конструкций. Одной из основных областей их применения являются уникальные спортивные объекты. Настоящая статья посвящена опыту применения капиллярного метода неразрушающего контроля при обследовании сварных соединений большепролетного пространственного покрытия. Объектом изучения являлся купол торгово-развлекательного центра «Горки Город Молл», построенного в городе Сочи к Олимпийским играм в 2014 году. Авторами описывается методика применения капиллярного неразрушающего контроля, анализируются его достоинства и недостатки. Приводятся типичные дефекты сварных соединений пространственных металлических конструкций, выявленные данным способом. Сведения, полученные в результате опыта эксплуатации большепролетных сооружений, позволяют дополнять и уточнять разрабатываемые нормативные документы.

Ключевые слова: большепролетное покрытие, дефект, капиллярный метод, купол, металлическая конструкция, неразрушающий контроль, обследование, пространственная стержневая конструкция, сварное соединение, сетчатая оболочка

Пространственные металлические конструкции широко используются в качестве покрытий общественных зданий различного назначения [1-3]. Одной из основных областей применения являются спортивные сооружения. К Олимпийским играм в Сочи в 2014 году, Чемпионату мира по футболу в 2018 году и другим крупным турнирам в нашей стране было возведено значительное число уникальных объектов с использованием большепролетных металлических конструкций, что делает актуальным их дальнейшее изучение [4]. Активно разрабатывается нормативная база, посвященная данному вопросу. За последние 4 года вступили в силу Своды правил 494.1325800.2020 «Конструкции покрытий пространственные металлические. Правила проектирования» и 523.1325800.2023 «Конструкции покрытий пространственные металлические. Правила изготовления и монтажа».

Основной задачей контроля состояния большепролетного сооружения является проверка качества изготовления и монтажа соединений значительного количества элементов несущих металлических конструкций. При этом в настоящий момент наблюдается нехватка экспериментальных данных о том, как решение и состояние узлов влияют на надежность таких объектов [5]. Целью настоящей статьи является анализ опыта применения капиллярного метода неразрушающего контроля при обследовании сварных соединений большепролетного металлического купола. Объектом изучения являлись строительные конструкции покрытия торгово-развлекательного центра «Горки Город Молл».

Рассматриваемое здание было построено к зимним Олимпийским играм в городе Сочи в 2014 году и вошло в состав спортивно-туристического комплекса «Горная карусель». Монолитное стеклянное покрытие площадью 6000 м² являлось на момент возведения самым большим в Европе. На верхнем этаже комплекса располагается аквапарк с песчаным пляжем.

Несущими конструкциями покрытия являются стальные главные балки и прогоны [6]. Ячейки каркаса имеют треугольную форму, часто используемую в сетчатых покрытиях [7-9]. Пояса главных балок прямоугольного поперечного сечения имеют ширину 200 мм и толщину 25 мм, стенки выполнены из листов 600x12 мм. Между собой главные балки соединяются с помощью сварных швов. Общий вид купола и его несущих конструкций представлен на рис. 1.

Специалистами НИУ МГСУ в 2013 году выполнялось научно-техническое сопровождение строительства купола здания. Данные работы являются необходимыми при возведении уникальных большепролетных сооружений [10, 11].

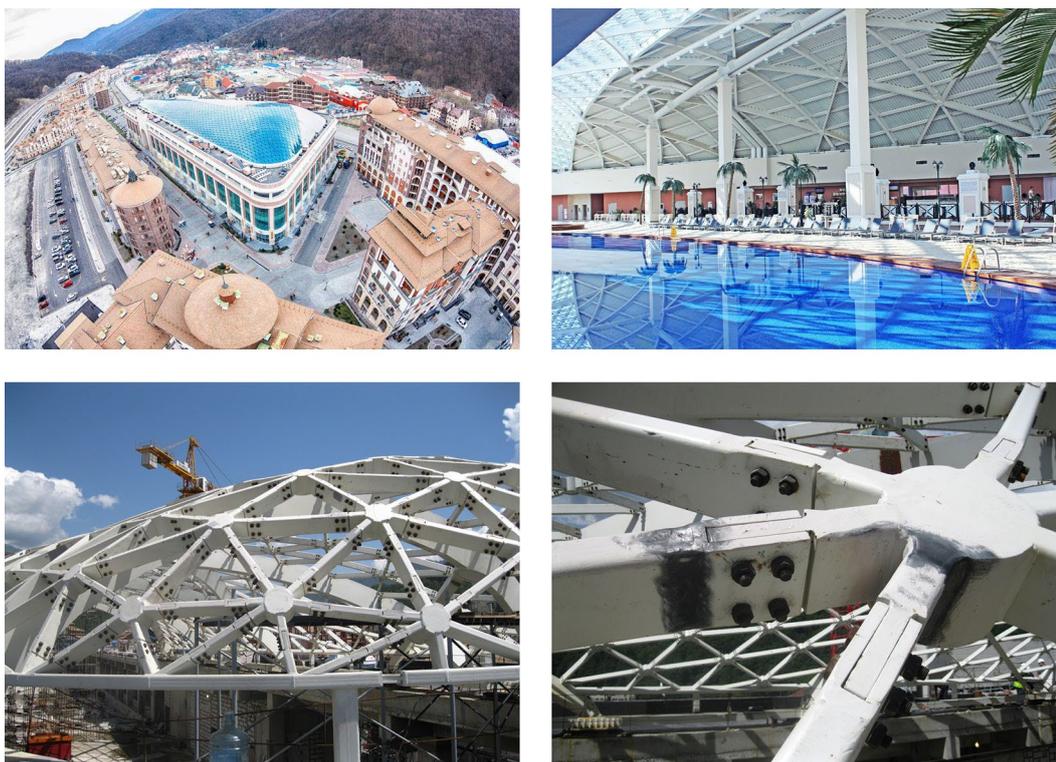


Рис. 1. – Общий вид купола и его несущих конструкций [12, 13]

Для выявления и определения размеров и формы дефектов сварных соединений может быть использован капиллярный метод неразрушающего контроля. Перед проведением испытаний металл тщательно очищается от окалины, краски, коррозии, масел, грязи и т.д. (рис. 2а). Далее на контролируемую поверхность методом распыления или погружения наносится специальная жидкость – пенетрант (рис. 2б). За время выдержки на воздухе в течение 10-15 минут раствор проходит внутрь всех несплошностей и микротрещин, а в ряде случаев через дефекты на противоположную сторону конструкции. Высокая проникающая способность пенетранта определяется его малой вязкостью и незначительным по сравнению с водой поверхностным натяжением. После выдержки выполняют промывку-проявление с удалением состава с поверхности (рис. 2в), а затем протирают и просушивают место контроля. Все микротрещины, дефекты и нарушения сплошности металла становятся четко видимыми и

контрастными, что позволяет более качественно осуществить визуальный контроль соединения (рис. 2г).

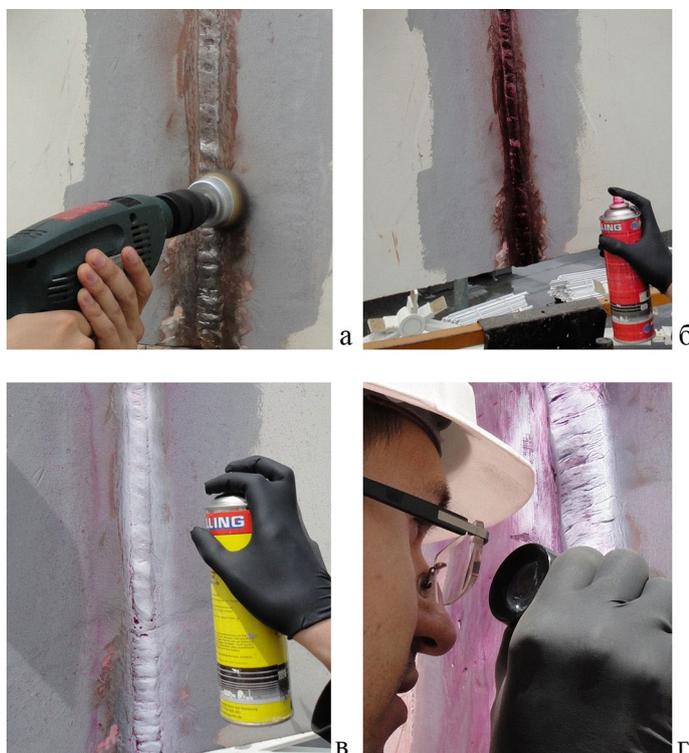


Рис. 2. – Капиллярный контроль: а) подготовка поверхности сварного соединения; б) нанесение индикаторного пенетранта; в) нанесение проявителя; г) визуальный контроль соединения

Одним из главных достоинств капиллярного метода контроля конструкций и материалов является отсутствие необходимости в технически сложном и дорогостоящем оборудовании, его поверке и калибровке. Подготовка операторов-дефектоскопистов также не представляет трудности. При этом капиллярный метод является очень информативным и позволяет обнаруживать мельчайшие дефекты, зачастую недоступные для других видов контроля. Часть применяемых пенетрантов обладает люминесцентными свойствами, что при ультрафиолетовом освещении делает возможным определение трещин раскрытием до полумикрона. При естественном освещении выявляются дефекты размером от нескольких микрон.

Проанализировав результаты проведенного обследования, можно выделить следующие типичные дефекты сварных соединений элементов большепролетного купола:

- 1) наличие отдельных пор и их скоплений диаметром до 5 мм, длиной до 30 мм, глубиной до 2 мм (рис. 3а);
- 2) прожоги металла шириной до 3 мм и длиной до 15 мм (рис. 3б);
- 3) трещины, в том числе сквозные, шириной раскрытия $0,1 \div 1$ мм, длиной $10 \div 25$ мм, глубиной $0,5 \div 1,5$ мм (рис. 3в);
- 4) чешуйчатость (рис. 3г);
- 5) брызги металла на поверхности шва (рис. 3д);
- 6) непровары (рис. 3е);
- 7) смещение кромок соединяемых деталей друг относительно друга до 7 мм (рис. 3а).

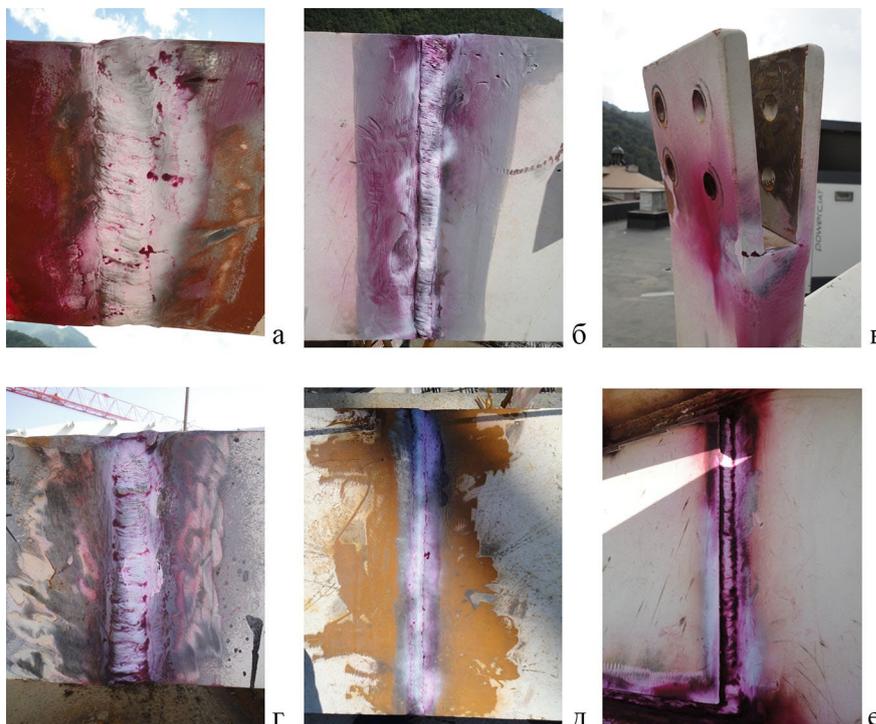


Рис. 3. – Виды обнаруженных дефектов:

- а) поры, смещение кромок деталей, низкое качество шва; б) прожоги;
в) сквозная трещина; г) чешуйчатость; д) брызги металла; е) непровар

Невозможность выявления заглубленных дефектов, не имеющих выхода на поверхность материала конструкции, является основным недостатком капиллярного метода. Поэтому оптимальным следует считать его совместное применение с другими способами неразрушающего контроля (ультразвуковыми, магнитными, вихретоковыми, радиационными, тепловыми и др.). Необходимость использования данных методов в каждом конкретном случае зависит от многих факторов:

- задач дефектоскопии;
- характера, формы, размеров и глубины залегания предполагаемых дефектов;
- формы, размеров, сечений, толщин, вида материалов и состояния поверхности контролируемых конструкций;
- общего объема работ, количества времени и размера бюджета, выделенного для их выполнения;
- наличия необходимого оборудования и квалифицированного персонала;
- температурных, влажностных и других условий, при которых проводится обследование.

Совместное применение нескольких видов неразрушающего контроля при обследовании большепролетных сооружений также является целесообразным из-за значительного разнообразия узлов и элементов металлических конструкций, а также различной степени их доступности. В рассматриваемом здании там, где возможно, применялись одновременно визуально-инструментальный, капиллярный, ультразвуковой и вихретоковый методы. Результаты контроля можно наглядно представить в виде сводной таблицы (рис. 4). В ней указываются место расположения узлового соединения, описание выявленных дефектов и данные измерений.

№ узла	Шов	Геометрические характеристики, мм					Вид производимого контроля				Описание выявленных дефектов	Заключение	Примечания
		Ширина	Высота	Катет верт.	Катет	гор.	Визуальный	Капиллярный	Ультразвуковой	Высокоскоростной			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Монтажные швы несущих рам													
1	A	23	1-3	-	-	+	+			поры диаметром 0,1 мм, неравномерность шва по высоте		фото №№ 1, 2	
	B	20	1-4	-	-	+	+			прожоги; поры диаметром до 0,5 мм; отдельные поры диаметром до 1 мм		фото №№ 3, 4	
	C	20-25	0-2	-	-	+	+			скопления пор диаметром до 0,25 мм; отдельные поры диаметром до 1 мм		фото №№ 5, 6	
	D	20	1	-	-	+	-			смещение кромок деталей 2 мм		фото №7	
2	A	25-30	2-5	-	-	+	-			поры диаметром 0,5 мм		фото №8	
	B	25-30	4	-	-	+	+			скопления пор диаметром до 0,5 мм; отдельные поры диаметром до 1 мм		фото №№ 9, 10	
	C	30-40	3-4	-	-	+	+			отдельные поры до 1 мм, прожоги основного металла шириной до 2 мм		фото №№ 11, 12	
	D	30	1	-	-	+	-			смещение кромок деталей 2 мм		фото №13	

Рис. 4. – Пример ведомости контроля сварных соединений

Учет повреждений соединений пространственных металлических конструкций играет важную роль в обеспечении надежности большепролетных сооружений. Накопление сведений об опыте их эксплуатации позволяет дополнять нормативные документы в области проектирования, монтажа и возведения уникальных объектов.

Литература

1. Сиянов А.И., Ярошевич Д.К. Испытание модели стальной цилиндрической сетчатой оболочки // Инженерный вестник Дона, 2022, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7860.
2. Zhang Q., An Yu., Zhao Z., Fan F., Shen Sh. Model selection for super-long span mega-latticed structures // Journal of Constructional Steel Research, 2019, vol. 154, pp. 1-13. URL: doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.017.
3. Bai Ch., Tian L., Zhong W., Xu G. Numerical simulation and performance evaluation of compression members in long-span single-layer spatial grid structures constrained by steel bars // Structures, 2024, vol. 65 URL: doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106804.
4. Семенов А.А., Демидова Д.А., Нафикова А.А., Зимин С.С., Николаев Д.И. Вариантное проектирование конструкции покрытия большепролетного

спортивного сооружения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. №5 (68). С. 24-35 URL: elibrary.ru/yluylz.

5. Мущанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Цепляев М.Н., Мущанов А.В. Комплексный подход к оценке надежности пространственных металлических конструкций // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. №1. С. 6-23 URL: doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.1.

6. Кунин Ю.С., Абрамов И.Л., Забелина О.Б. Влияние соблюдения проектной технологии сборки каркасных купольных покрытий на качество построенного объекта и его эксплуатационные свойства // Инженерный вестник Дона, 2019, №6 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6054.

7. Лебедь Е.В., Алукаев А.Ю. Большепролетные металлические купольные покрытия и их возведение // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. №14 (1). С. 4-16. URL: doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-1-4-16.

8. Скуратов С.В., Скидан А.А., Кеворков А.Э. Расчет треугольных обшивок многогранных сетчатых куполов // Строительство и техногенная безопасность. 2019. №15 (67). С. 21-24. URL: elibrary.ru/yoxbdr.

9. Белостоцкий А.М., Павлов А.С. Комплексное конечноэлементное моделирование НДС и устойчивости сетчатой оболочки покрытия большепролетного сооружения с эластомерными опорами // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2014. №10 (3). С. 64-70 URL: elibrary.ru/swkwhz.

10. Еремеев П.Г. Металлические пространственные конструкции покрытий уникальных большепролетных сооружений в России // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №10. С. 9-14 URL: elibrary.ru/riumprr.

11. Шумейко В.И., Кудинов О.А. Об особенностях проектирования уникальных, большепролетных и высотных зданий и сооружений //



Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164.

12. Апартаменты Горки Город – фотоальбом // отдых.наКубани.ру
URL: otdih.nakubani.ru/apartamentyi-gorki-gorod/osnovnie-photo.

13. Аквапарк Mountain Beach // туристер.ру. URL:
tourister.ru/world/europe/russia/city/sochi/parks_ent/24621.

References

1. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №8. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7860.

2. Zhang Q., An Yu., Zhao Z., Fan F., Shen Sh. Journal of Constructional Steel Research, 2019, vol. 154, pp. 1-13 URL: doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.017.

3. Bai Ch., Tian L., Zhong W., Xu G. Structures, 2024, vol. 65 URL:
doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106804.

4. Semenov A.A., Demidova D.A., Nafikova A.A., Zimin S.S., Nikolaev D.I. Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. 2018. №5 (68). pp. 24-35. URL:
elibrary.ru/ylulz.

5. Mushchanov V.F., Orzhekhovskiy A.N., Tseplyaev M.N., Mushchanov A.V. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie. 2024. Vol. 14. №1. Pp. 6-23. URL:
doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.1.

6. Kunin Yu.S., Abramov I.L., Zabelina O.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №6 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6054.

7. Lebed E.V., Alukaev A.U. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. 2018. №14 (1). Pp. 4-16. URL: doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-1-4-16.

8. Skuratov S.V., Skidan A.A., Kevorkov A.E. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. 2019. №15 (67). Pp. 21-21 URL: elibrary.ru/yoxbdr.



9. Belostotsky A.M., Pavlov A.S. Mezhdunarodnyy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitel'nykh konstruktsiy. 2014. №10 (3). Pp. 64-70. URL: elibrary.ru/swkwhz.
10. Eremeev P.G. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2013. №10. Pp. 9-14. URL: elibrary.ru/riumphr.
11. Shumeyko V.I., Kudinov O.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164.
12. Apartamenty Gorki Gorod – fotoal'bom [Gorki Gorod Apartments – photo album]. URL: otdih.nakubani.ru/apartamentyi-gorki-gorod/osnovnie-photo.
13. Akvapark Mountain Beach [Mountain Beach Water Park]. URL: tourister.ru/world/europe/russia/city/sochi/parks_ent/24621.

Дата поступления: 11.02.2025

Дата публикации: 26.03.2025