



DOI: [10.71167/uaceg.2025.580205](https://doi.org/10.71167/uaceg.2025.580205)

Получена: 21.01.2025 г.

Приета: 18.02.2025 г.

## АНАЛИЗ НА АВАРИЯТА НА МОСТ С ПРЕДВАРИТЕЛНО НАПРЕГНАТА СТОМАНОБЕТОННА КОНСТРУКЦИЯ

Ив. Топурова<sup>1</sup>

*Ключови думи:* предварително напрегат стоманобетон, мост Карола, крехко разрушаване при високи опънни напрежения и корозионна среда – SCC

### РЕЗЮМЕ

Анализът на причините за повреди или аварии по конструкциите е от съществено значение и е пряко свързан с развитието на нормативната база и с подобряване на строителните и проектантските практики. В настоящата статия се представят възможните причини за аварията на стоманобетонен предварително напрегат мост. Анализът е базиран на литературно проучване на достъпната на автора информация. Фокус се поставя върху феномена, свързан с развитието на пукнатини при определен вид стомани за предварително напрегане, използвани главно в периода 1960 – 1980 година. Основна цел е да се обърне внимание на ролята на поддръжката и оценката на състоянието на съществуващите мостове. В допълнение е коментирана възможността за прилагането на иновативни методи за обследване на предварително напрегнати конструкции, подобни на разглеждания мост.

### 1. Въведение

В периода от 1960-а до 1980-а година са построени много стоманобетонни предварително напрегнати мостове. Липсата на достатъчен опит и нормативна уредба води до различни дефицити в тези конструкции по отношение на тяхната дълговечност. Особена чувствителност на определени високоякостни стомани за предварително напрегане от по-стари периоди на производство (в Германия това са стомана за предварително напрегане Sigma, Neptune или Hennigsdorfer) към крехко разрушаване

<sup>1</sup> Иванка Топурова, гл. ас. д-р инж., кат. „Пътища и транспортни съоръжения“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [itopurova\\_fte@uacg.bg](mailto:itopurova_fte@uacg.bg)

вследствие на комбинираното действие на високи опънни напрежения и корозионна среда е един от проблемите в тази насока. В България този процес не е изследван в дълбочина и поради това в статията се коментират основно разработки в други страни. Пример се дава с мост в град Дрезден, Германия, който претърпя авария на 11.09.2024 г., въпреки сравнително високото ниво на поддръжка и мониторинг.

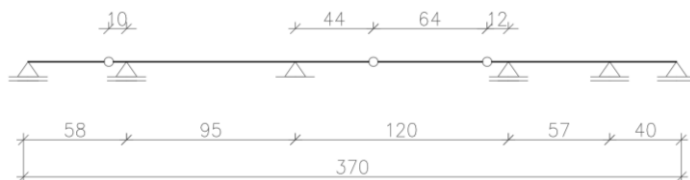
## 2. Описание на конструкцията

Мостът Карола играе основна роля в транспортната инфраструктура на град Дрезден поради възрастовата структура на останалите съоръжения, на част от които има въведени ограничения в допустимите скорости и натоварвания. На същото място през годините е имало различни мостове. В последните дни на Втората световна война зиданият мост Карола е умишлено повреден, за да се възпрепятства навлизането на Червената армия. След края на войната временно е експлоатиран, но се взема решение за построяването на нов мост. Поставя се условие при избора на конструкцията да не се закрива гледката към историческата централна част на града. По този начин предложеният вариант за висящ мост с висок пилон отпада и се проектира предварително напрегнат стоманобетонен мост. С цел осигуряване на плавателния габарит, конструктивната височина в централния отвор е възприето да е възможно най-малка.



Фиг. 1. Изглед към моста [1]

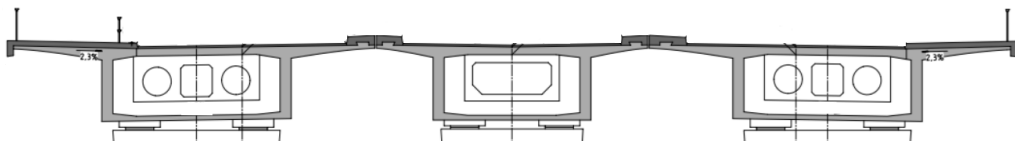
Статическата схема на съоръжението е герберова гредя с три става. Централният отвор е с дължина 120 m, като окачената част е с приблизителен отвор от 64 m (фиг. 2).



Фиг. 2. Статическа схема на съоръжението

Мостът се състои от три отделни съоръжения с кутиеобразна върхна конструкция – „А“, „В“ и „С“. Общият им напречен габарит е 32 m и освен пътния трафик, по мост „С“ е проектирано трамвайно безбаластово трасе. Възприето е такова изпълнение, за да

се минимизира постоянното натоварване на моста. В кухнята на същото съоръжение са разположени и тръбопроводите на централното отопление на града.



**Фиг. 3. Напречен разрез през върхната конструкция на трите съоръжения [2]**

Допълнително е изпълнена напречна връзка между отделните съоръжения в зоната на герберовите стави, за изравняване на деформациите на отделните върхни конструкции.



**Фиг. 4. Напречна връзка при герберова става [3]**

Прието е ограничено напъгане с прътови елементи без сцепление, което позволява донапъгането им. Липсата на допълнителна защита чрез запълване с разтвор и видът на стоманата, използвана за тези елементи (фиг. 5) предполага високата степен на опасност от появата на пукнатини при наличието на корозионна среда [4].



**Фиг. 5. Напъгащата армировка от моста [5]**

Нетипично е решението при герберовата става. Проектиран е стоманен ставен елемент, който е свързан чрез болтове към стоманобетонното сечение (фиг. 6). Чрез болтовете се осъществява и закотвянето на част от предварително напрегнатите елементи. Строителството на моста е завършено през 1971 г. За времето на експлоатация са проведени множество обследвания на конструкцията, включително през 1974 г., 1979 г., 1982 г. и 1993 г. е извършен контрол на напъгащите сили чрез 121 броя измервателни уреди на закотвящите елементи.



**Фиг. 6. Стоманена герберова става [6]**

През 2020-а година е изпълнено разширение на тротоарната конзола на съоръжение „А“ чрез използването на иновативни материали [7]. Подобен подход за разширение е бил планиран и за мост „С“, който е трябвало да започне след октомври 2024-а година.

### **3. Анализ на причините за аварията**

На 11.09.2024 година, данните от монтираната мониторингова система показват, че е имало движение на мост „С“ малко след преминаването на последния трамвай. Поради свързването на трите връхни конструкции в напречна посока при ставите съоръжението „С“ не се разрушава веднага, а остава за известно време „закрепено“ за съседната конструкция. Предполага се, че веднага след това опорното сечение при най-дългата конзола – опора 3 – се разрушава.



**Фиг. 7. Разрушаване на съоръжение „С“ [8]**



*Опорно сечение*

*Зона при герберова става*

**Фиг. 8. Детайли от разрушено съоръжение „С“ [9]**

След аварията е възложен доклад на експерти от Техническият университет в Дрезден. Професор Стефан Маркс изследва разрушената конструкция и елементи от нея. Първоначално са били разгледани няколко възможни причини за нетипичната повреда без допълнително натоварване от трафик. Освен голямата температурна разлика, евентуална повреда в топлопроводите или дори терористичен акт, особено внимание се отделя на феномен, който е очакван при този тип конструкции, като се има предвид производственият период на вложената предварително напрегната високоякоствена стомана.

Окончателният доклад на проф. Стефан Маркс посочва като основна причина именно т.нар. Stress corrosion cracking – SCC. Това е процес, характеризиращ се с образуването и съответно нарастването на пукнатини в корозионна среда при високи нива на статично опънно напрежение в елемента. Основна разлика в сравнение с другите процеси на корозия е механизмът на разрушение, което е крехко, обикновено без образуване на забележими корозионни продукти, които могат лесно да бъдат обследвани.

Факторите, обуславящи този процес, са три:

- високи нива на опънни напрежения в елемента;
- състав и начин на производство на високоякоствена стомана;
- корозионна среда.

Развитието на SCC е възможно само при наличието и на трите изброени параметъра. При стомани без склонност към SCC, дори при наличие на агресивна среда и високи опънни напрежения, не се наблюдава този феномен.

Важно е да се спомене, че по отношение на корозионната среда основен фактор е наличието на влага, която може да е образувана още вследствие на транспорта или монтажа на налягащите елементи [10].

Изследванията показват, че съставът на стоманата е предопределящият фактор за опасността от инициране на пукнатина и нейното нарастване, а не корозионната среда [11]. Доказателство в тази насока е и появата на SCC процес при предварително напрегнати конструкции със сцепление, при регистрирано добре изпълнено запълване на каналобразувателите, което възпрепятства навлизане на агресивни състави.

Изследвани са различни механизми за развитие на SCC, като при високоякоствните стомани, използвани при предварително напрегнатите конструкции този процес основно се предизвиква от наличието на водород.

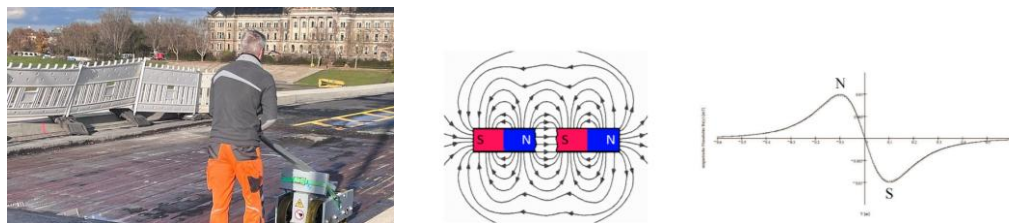
Видовете стомана за предварително напрегнатите конструкции, използвани днес, се различават от SCC застрашените стомани за предварително налягане по техния производствен процес и легиращи елементи (особено по отношение на съдържанието на силиций, манган и хром).

#### **4. Възможни методи за обследване на опасността от възникване на SCC**

Основното предизвикателство при обследването на състоянието на предварително напрегнатите елементи, разположени в стоманобетонното сечение, е свързано с недостъпността за оглед. Възможен безразрушителен подход е прилагането на методи, базирани на изследване на магнитното поле в зоната на елементите [12, 13] или използването на ултразвук. При втория метод има ограничение, свързано с преминаването на звука през различна среда. Пример може да се даде с пътната плоча на

мост с положена хидроизолация и/или настилка [14]. Възможностите за прилагане на метода чрез намагнитизиране на предварително напрегнатата армировка са сравнително по-големи. При него е възможно да се документира състояние на армировката за наличие на скъсвания, пукнатини или корозирали участъци, надвишаващи 20 % от сечението на елемента. Този метод е приложим при предварително налягане със сцепление, както преди бетонирането, така и при предварително налягане след бетонирането.

Изпитването се базира на силно магнетизиране на стоманения елемент, като в точката на дефекта има магнитен северен полюс (N) и магнитен южен полюс (S) в непосредствена близост. Сигналът има инфлексна точка между двата полюса (екстремни стойности) (фиг. 8).



**Фиг. 8. Безразрушителен метод за изследване на дефекти-пукнатини в предварително напрегнатата армировка, приложен на моста Карола [15, 16]**

При провеждането на изпитването е необходимо да се вземат под внимание параметри като процент на армиране, местоположение на меката армировка, закладни части и др. Въпреки значителното ниво на прецизност на посочения метод, би следвало да се спомене, че такова обследване посочва моментното състояние на армировката и не могат да се направят изводи за степента на риск от развитието на пукнатини в бъдеще.

В доклада за анализ на причините за аварията на моста Карола, въпреки проведените допълнителни изследвания на състоянието на предварително напрегнатите елементи, чрез изследване на магнитното поле на другите неповредени съоръжения – „А“ и „В“, се дава препоръка за цялостното им демантиране, тъй като рискът от авария се степенува като твърде висок.

## 5. Заключение

Представеният пример посочва един от проблемите, свързани със сигурността на старите предварително напрегнати мостове, при които е използвана стомана, склонна към развитие на пукнатини при комбинирано действие на високи опънни напрежения и корозионна среда. Въз основа на направения анализ и с цел да се минимизират рисковете от достигане на аварийни състояния може да се изведе препоръка за необходимостта от определяне на произхода и годината на производство на вложената висококачествена стомана при обследването на такъв тип конструкции. Подобна информация би спомогнала да се направи индиректен извод за степента на риска от развитие на SCC. Нормативното регулиране на конкретни подходи при обследването на такъв тип конструкции и имплементирането на допълнителни безразрушителни методи за обследване и преизчисление би довело до повишаване на тяхната надеждност и ниво на сигурност. В България все още липсва наредба за проектиране на мостове, с която да се регламентират аспектите от проектирането, необхванати от системата Еврокод [17],

включително обхватът и съдържанието на обследването на съществуващи съоръжения. Това позволява много често то да се прави формално и извършените дейности да се ограничават само до определяне на якостта на натиск и дълбочината на карбонизация на бетона. По този начин при проектиране на реконструкцията на съществуващите мостове се пропуска възможността те да получат необходимата надеждност и да се гарантира безопасната им експлоатация.

## ЛИТЕРАТУРА

1. <https://de.wikipedia.org/wiki>, poseten na 07.01.2025.
2. <https://issuu.com/verlagsgruppe-wiederspahn/docs>, poseten na 12.12.2024.
3. <https://www.mz.de/deutschland-und-welt/deutschland/rost-in-der-bruecke-wie-es-zum-ungluck-in-dresden-gekommen-sein-konnte-3914744>, poseten na 12.12.2024.
4. Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden (Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 06/2011.
5. [https://www.dresden.de/de/stadtraum/zentrale-projekte/carolabruoecke.php?pk\\_kwd=carolabruoecke](https://www.dresden.de/de/stadtraum/zentrale-projekte/carolabruoecke.php?pk_kwd=carolabruoecke), poseten na 12.12.2024.
6. [https://www.dresden.de/media/pdf/wirtschaft/vergabekonferenz/VK\\_2024\\_2024-01-23\\_Strassen-Tiefbauamt\\_Vergabekonferenz-2024.pdf](https://www.dresden.de/media/pdf/wirtschaft/vergabekonferenz/VK_2024_2024-01-23_Strassen-Tiefbauamt_Vergabekonferenz-2024.pdf), poseten na 12.12.2024.
7. *Michler, H., Burgard, S., Kalbe, H., Curbach, M.* Nichtmetallische Bewehrung im Großbrückenbau – Kappenverbreiterung Carolabrücke Dresden. In: M. Curbach, editor. Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium – Ergänzungsband 2021. TU Dresden, Institut für Massivbau, Dresden, 2021, p. 63 – 76.
8. <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen/dresden/dresden-radebeul/bilder-carolabruoecke-einsturz-abriss-sprengung-100.html>, poseten na 12.12.2024.
9. <https://www.bild.de/regional/dresden/dresden-fuenf-theorien-zum-einsturz-der-carolabruoecke-66e2c0802980616a4c4cd325>, poseten na 14.01.2025.
10. *Wild, M. R.* Zur Beurteilung des Zustands von Brücken bei Spannstahl-ausfällen infolge von Spannungsrissskorrosion. Dissertation, TUM School of Engineering and Design, 2022.
11. *Mietz, J., Pasewald, K., Isecke, B.* Untersuchungen zum wasserstoffinduzierten Sprödbruch vergüteter Spannstähle. Schlußbericht zum DIBt-Vorhaben IV 1–5–651/92, Berlin 1998.
12. *Knapp, S., Hillemeier, B.* Application of line scanner in remanent and active field compared with the big magnet impulse magnetization. 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 8. – 12. July, S. 503, Stresa (Italia), 2012.
13. *Scheel, H., Hillemeier, B.* Spannstahlbruchortung an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund unter Ausnutzung des Remanenzmagnetismus. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1997.
14. *Schiegg, Y et al.* Zerstörungsfreie Prüfmethode (ZfP): Bedürfnisse der Praxis und Stand der Technik, Forschungsprojekt AGB 2012/016 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB) November 2017.
15. Zerstörungsfreie Ortung von Brüchen und Rissen in der Spannbewehrung, [https://zerstoerungsfreie-pruefungen.de/media/idfb-infobroschuere\\_zum\\_rm-verfahren\\_2022.pdf](https://zerstoerungsfreie-pruefungen.de/media/idfb-infobroschuere_zum_rm-verfahren_2022.pdf).
16. <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen/dresden/dresden-radebeul/carolabruoecke-damm-elbe-baustrasse-abriss-100.html>, poseten na 06.01.2025.

17. *Nikolov, P.* Nasoki kam sudurjanieto na naredba za proektirane na mostove v Bulgaria. // Annual of University of architecture, civil engineering and geodesy, Vol. 53, Issue 2, 2019.

## **FAILURE ANALYSIS OF A PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE BRIDGE**

**I. Topurova<sup>1</sup>**

*Keywords: existing prestressed bridges, stress corrosion cracking, Carola Bridge*

### **ABSTRACT**

The analysis of the causes of damages or accidents in structures is essential and directly related to the development of the regulations and the improvement of construction and design practices. This paper presents the possible causes of the failure of a prestressed concrete bridge. The analysis is based on a literature review of the information available to the author. The focus is on the phenomenon associated with the development of cracks in certain types of prestressing steels mainly used between 1960 and 1980 – stress corrosion cracking (SCC). The main goal is to highlight the importance of maintenance and the assessment of the condition of existing bridges. Additionally, the potential for applying innovative methods for the inspection of prestressed structures, similar to the studied bridge, is discussed.

---

<sup>1</sup> Ivanka Topurova, Chief Assist. Prof., Dept. "Road Construction and Transport Facilities", UACEG, 1 H. Smiranski Blvd., Sofia 1046, e-mail: [itopurova\\_fte@uacg.bg](mailto:itopurova_fte@uacg.bg)