

УДК 624.014.2.004.6

# АВАРИИ СООРУЖЕНИЙ И ИХ УЧЕТ ПРИ НАУЧНОМ И НОРМАТИВНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ МОСТОСТРОЕНИЯ

*COLLAPSE OF STRUCTURES  
AND THEIR ACCOUNT IN SCIENTIFIC  
AND NORMATIVE REGULATIONS  
IN CONSTRUCTION OF BRIDGES*

*В статье проанализирована аварийная ситуация мостового сооружения в процессе укрупнительной сборки. Приведены данные экспериментальных исследований болтов при их внецентренном растяжении. Проанализированы причины замедленного разрушения болтов в процессе аварии. Сформулированы рекомендации по предотвращению хрупкого разрушения болтов мостовых сооружений.*

*The article gives analysis of emergency situation for bridge structure in the course of pre-assembly. Results of experimental study of bolts' eccentric tension are given. Causes of delayed destruction of bolts during collapse are analyzed. Recommendations for prevention of brittle rupture of bolts in bridge structures are defined.*

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ аварий строительных конструкций способствует накоплению опыта проектировщиков и строителей и дает ценный материал для научных исследований [1, 2, 3]. Тщательное расследование и выявление причин аварий сооружений позволяет уточнить нормативные и расчетные нагрузки на конструкции, инициирует совершенствование методов расчета и конструктивных форм, научное и проектное обеспечение технологии производства мостостроительных работ. Аварийные ситуации на различных стадиях «жизни» белорусских мостов происходили, однако их исследование не выходило за рамки служебных материалов и тем самым мало сказывалось на повышении качества проектирования, изготовления и монтажа мостов, научного сопровождения их проектирования, строительства и эксплуатации.

*Е.А. Мойсейчик,  
кандидат технических наук, доцент  
Белорусского национального технического  
университета, г. Минск, Бела-  
русь*

## АВАРИЙНАЯ СИТУАЦИЯ ТРАНСПОРТНОЙ КОНСТРУКЦИИ И ЕЕ УРОКИ

Во время проведения в 2005 г. укрупнительной сборки арочной мостовой конструкции произошло обрушение одной из смонтированных полуарок.

Конструкция была запроектирована в виде блока, состоящего из двух арок, расположенных с небольшим уклоном к середине. Обе арки компоновались из стальных шарнирно опертых полуарок (ПА-1, ПА-2) двутаврового поперечного сечения (рис. 1). Материал полуарок - сталь марки 09Г2С по ГОСТ 19281-89. Соединения элементов полуарок сварные; в «ключе» (точка В) - монтажный стык на болтах. Масса каждой полуарки - 7,6 т.

После изготовления полуарок было предусмотрено произвести укрупнительную сборку арочного пролетного строения не на площадке строительства, а на территории завода-изготовителя, совместив такую сборку с контрольной заводской. В процессе сборки предполагалось установить все продольные и поперечные связи, выполнить монтажный стык в «ключе» (рис. 1) с использованием накладок и высокопрочных болтов. Был разработан проект производства работ (ППР) для укрупнительной сборки, изготовлены временные опоры. Монтаж полуарок предполагалось выполнить по схеме, приведенной на рисунке 2. ППР предусматривал следующую цепочку производства монтажных работ:

- 1) установка временной опоры, подкопрового пакета с упорами;
- 2) установка на предусмотренную стоянку автомобильного крана КС-5479;
- 3) строповка полуарки ПА-2, ее подъем и

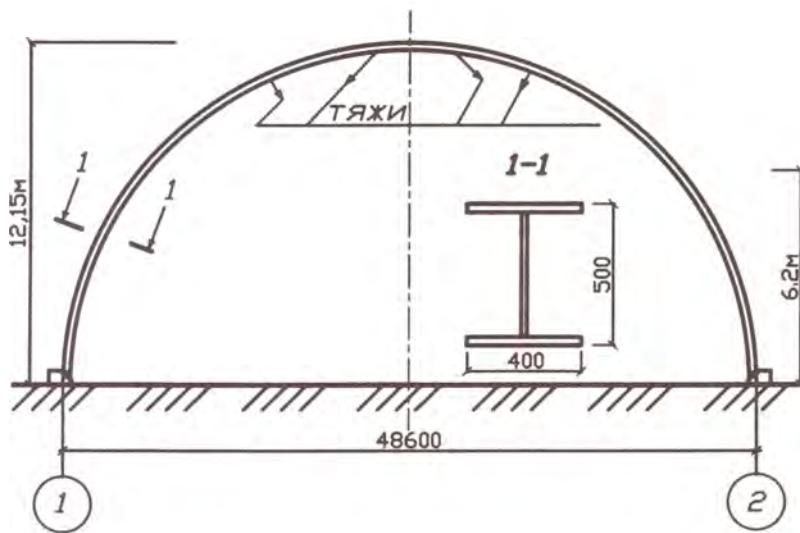


Рисунок 1 - Конструктивная схема арочной конструкции

болтов 1 и 2 произошло по усталостной схеме. На противоположной стороне столика один болт разрушился с изломом, а второй - только деформировался. Болты 1, 2 были выполнены из шестигранника, из стали 40, болт 3 – из стали типа ХГТ, болт 4 – из стали 20. Микроструктура болтов 1, 2, 3 – ферритоперлит, а болта 4 - троостосорбит. Испытание на растяжение вырезанных из болтов 1-4 образцов позволило установить, что при центральном растяжении прочность болтов 1,2,3,4 должна быть равной соответственно 17,4 т; 17,4 т; 21,6 т; 14,9 т, а отношение предел текучести/временное сопротивление равно 387,7/667,7 (для болтов 1, 2).

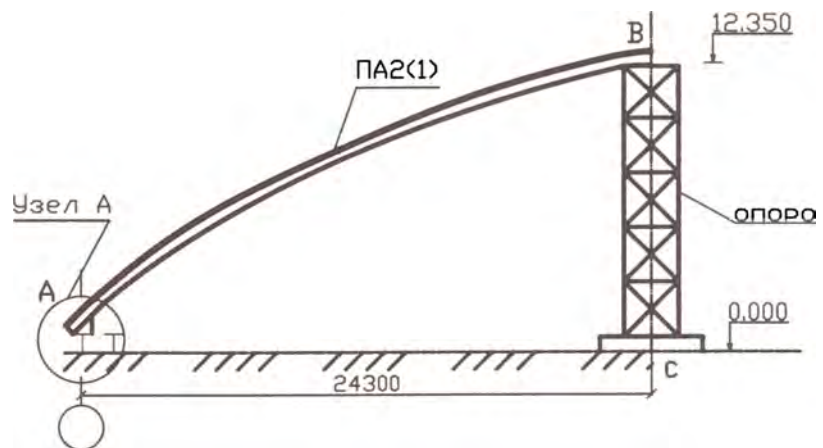
перемещение к месту установки;

4) установка полуарки ПА-2 в проектное положение и закрепление (фиксация) ее к соответствующей плите подкопрового пакета болтами, пропускаемыми через отверстия в плите опорного столика;

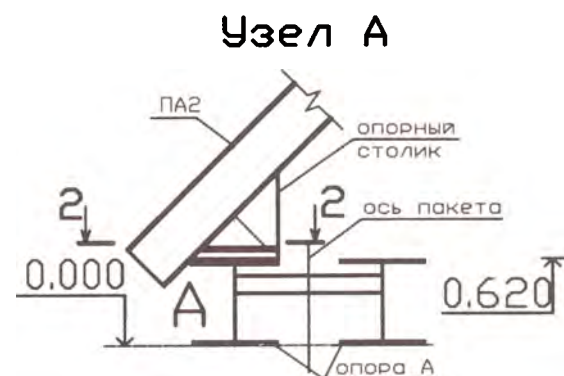
5) расстроповка полуарки ПА-2.

По завершении монтажа полуарки ПА-2 (и закрепления ее четырьмя болтами в опорном узле А (рис. 2)) приступили к установке смежной полуарки ПА-1 и выполнили при этом технологические операции 1-3. Звено рабочих поднялось на площадку до отметки 12,35 м на временной опоре. Через некоторое время ранее установленная полуарка ПА-2 потеряла устойчивость положения, и, поворачиваясь в падении вокруг своей оси, нанесла удар концом по двутавру временной опоры на отметке 12,35 м и, соскользнув с его кромки, упала вниз.

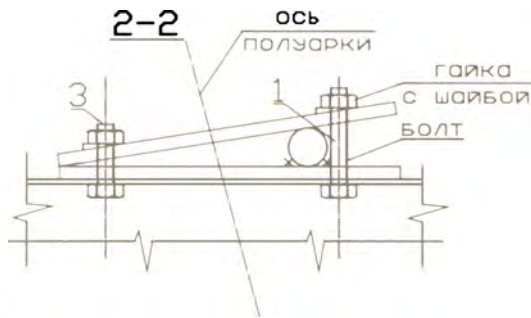
При расследовании аварии контролирующие службы определили в качестве первопричины крушения поврежденные болты крепления опорного столика полуарки к подкоповому пакету. Болты 1, 2 имели излом на первых витках резьбы. При металлографическом исследовании выявилось, что болты в изломе имели ногтеобразную трещину, занимающую около 10% от площади излома. Это позволило металловедам предположить, что разрушение наиболее нагруженных



а)



б)



в)

а) схема полуарки и ее опораний в точках А и В;  
б) схема узла А; в) схема расположения опорной  
плиты полуарки и установки болтов (болты 1  
и 2 закрепляют плиту в ее верхней части (позиция 1),  
а 3 и 4 - в нижней (позиция 3))

**Рисунок 2 - Схема установки полуарки  
в проектное положение  
при укрупнительной сборке**

Анализ деталей болтового соединения в местах установки болтов выявил следующее:

а) болты 1-4 устанавливались без предусмотренной проектом косой шайбы, вместо косой шайбы была установлена обычная шайба толщиной 1 мм;

б) после аварии стержни болтов 1 и 2 были изогнуты на участке ниже опорной поверхности гайки, шайба частично впрессована в металл пластины опорного столика и раздроблена на два сегмента, гайка опиралась на кромку отверстия плиты (рис. 2в) односторонне, а кромка опорной зоны при разрушении болтов была смята. Из рассмотренного следует, что болты 1 и 2 работали на внецентренное растяжение на участке с резьбой. Кроме этого, при аварийном нагружении увеличивался уклон полуарки, который с учетом обмятия шайбы, кромки пластины, резьбы и удлинения стержня болта достигал  $9^{\circ}$ - $10^{\circ}$  вместо предусмотренных проектом  $6^{\circ}$ . Возможный наклон арки от вертикали ничем не ограничивался, так как проектом не предусматривалось раскрепление полуарки из ее плоскости в процессе монтажа, а на опоре В полуарка также не закреплялась (например, в кондукторе), а укладывалась на двутавр временной опоры свободно.

Работа болтов на внецентренное растяжение в резьбовой части возможна для отдельных сопряжений различных строительных конструкций. В

действующих нормах на проектирование стальных конструкций зданий и сооружений (СНиП П-23-81\*[4]), мостов и труб (СНиП 2.05.03-84 [5]) недостаточно регламентируются требования к болтам, а их расчет предусматривается только на центральное растяжение и срез.

В процессе анализа технических причин аварии было принято решение экспериментально исследовать работу болтов на внецентренное растяжение при воздействиях, близких к возникающим при условиях работы болтов 1, 2 в аварийной ситуации.

Аварийная конструкция проектировалась в соответствии с нормами [5], которые требуют, чтобы для крепления опорных частей к пролетным строениям и стальным опорам применялись стальные болты по ГОСТ 7798-70 [6] и гайки по ГОСТ 5915-70 из сталей марок 09Г2 по ТУ 14-1-287-72, 09Г2-6 и 09Г2С-6 по ГОСТ 19281-73, 40Х по ГОСТ 4543-71 по специальным техническим условиям. Согласно п. 6 ГОСТ 7798-70 [6] технические требования к рассматриваемым болтам определяются документами [7, 8]. Механические свойства болтов, винтов (кроме установочных) и шпилек из углеродистых нелегированных и легированных сталей согласно п. 2.2.1 ГОСТ 1759.0-87 [8] следует определять в соответствии с ГОСТ 1759.4-87 [9]. По ГОСТ 1759.4-87 [9] для изготовления болтов, которые не могут быть испытаны на растяжение, допускается применять стали с ограничениями по химсоставу согласно таблице 2 [9] (ограничения на содержание углерода (не более 0,55%), фосфора (не более 0,05%), серы (не более 0,06%)). В разделе 2 ГОСТ 1759.4-87 [9] для изготовления болтов всех классов прочности допускается «применять другие материалы и виды термообработки по согласию между изготовителем и потребителем, если изготовитель гарантирует выполнение всех механических свойств, предусмотренных настоящим стандартом». Согласно таблице 1 (раздел 1 [9]) болты 1, 2 можно отнести к классу прочности 5.8 или к классу прочности 6.6 (с учетом данных лабораторного определения механических свойств стали образцов, вырезанных из разрушенных при аварии болтов).

В соответствии с п.4.2[5] необходимо определять требования к болтам в проектной документации. Однако в рабочих чертежах проекта производства работ (ППР) не были приведены расчетные усилия в опорном узле и не были указаны требования к болтам. На заводе-изготовителе указанные болты были выточены из шестигранного стержня из стали 40, которая удовлетворяет требованиям ГОСТ 1759.4-87 [9] к химсоставу сталей для болтов, указанных выше классов прочности. В соответствии с рекомендациями марочника сталей



и сплавов [10] сталь 40 после улучшения можно применять для изготовления ряда деталей, в т.ч. и болтов. Металлографический анализ показал, что ферритно-перлитная микроструктура стали болтов 1 и 2 получена в результате отжига (нормализации).

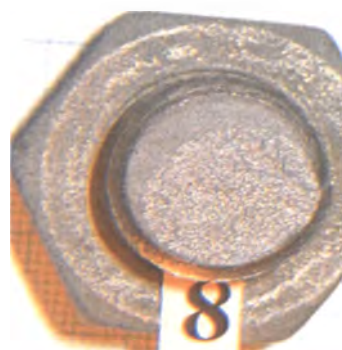
Следует отметить, что в сопоставлении со сталью 09Г2С сталь 40 имеет более высокие пределы прочности и текучести, ударную вязкость (характеризующую склонность металла к хрупкому разрушению) и несколько меньшую пластичность.

Дополнительно к механическим испытаниям образцов из стержней болтов в лаборатории были испытаны 20 болтов с доведением их до разрушения. Их изготовление велось по той же технологии и из материала той же партии, что и разрушенные болты 1 и 2 (рис. 2). Диаметры поперечных сечений болтов: стержня - 19,0-21,0 мм; резьбовой части – 16,4-18,0 мм. Согласно ГОСТ 22356-77 «Болты и гайки высокопрочные и шайбы» допускается по соглашению между сторонами изготавливать такие болты диаметром резьбы менее 20 мм из стали марки 40Х (в т.ч. для мостовых конструкций). Исследуемые болты нагружались в специальных захватах с использованием косых шайб, создавших следующие углы между контактной поверхностью гайки и плоскостью деформирующей поверхности: 0°; 6°; 10°. Испытания проводились с использованием универсальной машины с компьютерным управлением EU-100, позволившей создать скорость приложения усилий к болту в пределах 0,2-100 кН/с. После испытаний болты подвергались повторному металлографическому анализу.

В процессе испытаний было установлено, что временное сопротивление болтов существенно зависит от величины угла между плоскостью контактной поверхности гайки и плоскостью нагружения и от скоростей нагружения. Так, при статическом нагружении увеличение угла до 6,10° приводит к снижению временного сопротивления на 9%-12,5% (здесь и далее сравнение ведется с данными испытаний при статическом нагружении и нулевом угле). Увеличение скорости нагружения до 10 кН/с сопровождается снижением временного сопротивления на 3,6%-9%. При росте скорости нагружения до 50 кН/с временное сопротивление при нулевом угле возрастает на 2%, а при угле 10° - на 15% уменьшается; при скорости нагружения 100 кН/с происходит уменьшение прочности: при нулевом угле – на 6%; при угле 10° - на 31%. В местах излома всех испытанных болтов первоначально зарождалась трещина, которая при нагружении росла до критической величины, а затем происходил долом по механизму хрупкого разрушения. Начальная трещина имела серпо-

видную форму (ногтеобразная, вида узкого серпа молодой Луны (рис. 3)).

а)



б)



**Рисунок 3 - Характерный вид зарождающейся начальной серповидной трещины у наиболее напряженного витка резьбы (а) и вид зарождающейся трещины в корне наиболее напряженного витка резьбы (б)**

При больших скоростях нагружения «лунная поверхность» характеризуется узким серпом, а при малых – ширина серпа на изломе образцов увеличивалась. Все очаги зарождения разрушения находились во впадинах резьбы.

Таким образом, зарождение начальных серповидных трещин имело не усталостную, а статическую природу, а временное сопротивление болтов при названных условиях изменялось в пределах: 699,6-779,6 МПа; 657,4-766,3 МПа; 527,7-778,3 МПа соответственно для углов 0°; 6°; 10°.

Временное сопротивление стандартных образцов, вырезанных из болтов предназначенной для испытания партии, составило 604,4-682,6 МПа.

Весьма показательными являются данные измерений геометрии стержня в месте излома и замеров температуры поверхности образцов у изломов болтов двух испытанных серий. Остаточ-

ное удлинение стержня болта (от головки до начала резьбовой части) небольшое. В стадии предразрушения и разрыва все удлинение стержня обеспечивалось участком резьбы между гайкой и началом резьбы. Наибольшее удлинение резьбовой части наблюдалось у образцов 1-й серии. Образцы 2-й серии разрушались хрупко с незначительным удлинением резьбовой части. Более чувствительной к действию скорости нагружения и перекосу являлось относительное сужение в месте излома. Средняя температура в месте излома образцов 1-й серии достигала 40°C-50°C. Причем такая температура фиксировалась не только по поверхности излома, но и по всей области пластического течения металла, где происходило заметное сужение поперечного сечения. Для образцов 2-й серии среднюю температуру у излома было сложно фиксировать из-за ее быстрого снижения во времени. Подъем температуры у этих образцов наблюдался только непосредственно в плоскости излома (до 10°C-15°C), сталь смежных сечений практически не изменяла температуры. С увеличением скорости нагружения температура поверхности излома образцов обеих серий заметно повышалась.

Резьбовая часть болтов после их испытания исследовалась под микроскопом MeF-3 фирмы «Reihert» при увеличениях x100; x200; x500. Плоскости шлифов для анализа под микроскопом готовились из образцов, вырезанных по диаметральной плоскости в направлении действия изгиба на резьбовых участках болтов после испытания. Такой анализ выявил, что после испытания болтов во впадинах резьбы оставались трещины (рис. 3б): для центрально растянутого болта (угол 0°) глубина трещин составляла 0,02-0,04 мм, для растянутого с использованием косой шайбы (10°) болта соответствующие величины трещин составляли 0,12-0,03 мм и 0,2-0,13 мм. Глубина трещин была значительно большей в витках резьбы, примыкающих к плоскости излома (косая шайба, 10°), и почти не зависела от расстояния витков от плоскости излома (при отсутствии косой шайбы, 0°).

Машинная диаграмма растяжения болтов с использованием косых шайб отличается от соответствующих диаграмм растяжения болтов без использования косых шайб. В первом случае до 30%-40% общего удлинения болта происходит при его упругопластическом изгибе и только после этого проявляется более значительное упрочнение материала болтов.

Данные испытаний показали, что разрушение болтов 1 и 2 (рис. 2) произошло при статическом нагружении и с исчерпанием их несущей способности. При этом не исключается появление на-

чальных трещин во впадинах резьбы в процессе монтажного воздействия на полуарку.

При монтаже стальных арочных конструкций аварии происходили и раньше. Для понимания анализируемой ситуации может быть полезным опыт, полученный в результате аварии, произошедшей во время монтажа полуарки польскими специалистами [11]. К монтажу полуарки [11] приступили без предварительного анализа ее возможного предельного состояния. Кран в процессе монтажа поднимал полуарку, поворачивая ее вокруг нижнего опорного шарнирно закрепленного конца полуарки. При этом полуарка, хотя и располагалась в процессе монтажа в вертикальной плоскости, но имела гибкость из плоскости, значительно превышавшую расчетную. Из-за криволинейности полуарки ее центр тяжести располагался значительно выше линии, соединявшей опорный шарнир с точкой крепления полуарки к монтажному устройству. При подъеме произошли: потеря устойчивости, скручивание сечений и поворот полуарки относительно вертикальной плоскости. После анализа работы полуарки в предельном состоянии, устранения повреждений и предварительного раскрепления полуарки из ее плоскости тросовыми растяжками повторный монтаж был успешно осуществлен.

Указанный пример показал, насколько важной является установка связей, обеспечивающих устойчивость конструкции в процессе монтажа.

В изложенном выше случае фактическая гибкость полуарки (рис. 1, 2) из плоскости значительно превышала допустимую нормами величину, а проект производства монтажных работ не предусматривал раскрепление полуарки из плоскости связями. При принятой схеме монтажа полуарки было затруднительно установить ее в «проектное» положение без предшествующей рихтовки с использованием монтажного домкрата. А такая рихтовка вела к появлению начальных трещин в резьбовой части болтов 1 и 2 (рис. 2в). Таким образом, погрешности и ошибки на стадии проектирования и монтажа допускали возможность падения полуарки, показанной на рисунке 1.

Существенным является и то, что болт 1 разрушился спустя 1-1,5 часа после его установки и работы на внецентренное растяжение. Явление замедленного разрушения болтов при статической нагрузке отмечалось неоднократно [12, 13], однако до настоящего времени природа его изучена недостаточно. При объяснении этого явления заслуживает внимания установленный в ряде специально поставленных экспериментов факт, что при пластической деформации в стали «протекает химическая реакция образования карбидов железа» [14]. При внецентренном рас-

тяжении болтов 1 и 2 материал в резьбовой части получил пластические деформации. «Спутником же развивающейся пластической деформации неизбежно окажется процесс интенсивного ... выделения дисперсных карбидов железа, охрупчивающих сталь» [14].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Более четкие требования нормативных документов, определяющих современное проектирование стальных мостовых конструкций в Беларуси, смогли бы предотвратить подобные аварии. С этой целью первый абзац пункта 1.1 [5] целесообразно дополнить и изложить в редакции: «...выполнять требования по обеспечению надежности, долговечности и бесперебойности эксплуатации сооружений, а также безопасности и плавности движения транспортных средств, безопасности для пешеходов и охране труда рабочих в периоды строительства и эксплуатации с учетом реально возможных аварийных ситуаций, выявляемых при проектировании посредством анализа предельных состояний конструкций сооружений на всех этапах его возведения». В шестой подпункт пункта 4.2 [5] целесообразно также внести изменения: «...указывать в рабочих (КМ) и детализировочных (КМД) чертежах стальных конструкций марки сталей, материалы соединений и дополнительные требования к их испытаниям». Пункт 4.152 [5] целесообразно изложить в редакции: «В соединениях прокатных профилей, других соединяемых элементов с непараллельными поверхностями полков, поверхностей соединяемых элементов должны применяться клиновидные шайбы, предотвращающие местный изгиб болтов».

Предотвращению подобных аварийных ситуаций послужат также дальнейшие исследования физико-механических процессов, происходящих в окрестности конструктивно-технологических концентраторов при развитии пластических деформаций, и повышение качества подготовки специалистов, участвующих в проектировании, изготовлении, монтаже, эксплуатации и устранении последствий аварий стальных мостовых конструкций.

## Литература

1. *Дмитриев, Ф.Д. Крушения инженерных сооружений / Ф.Д. Дмитриев. - М.: Стройиздат, 1953. - 188 с.*
2. *Лащенко, М.Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений / М.Н. Лащенко. - Л.: Стройиздат, 1969. - 184 с.*
3. *Шкинее, А.Н. Аварии в строительстве / А.Н. Шкинее. - М.: Стройиздат, 1984. - 320 с.*
4. *Стальные конструкции: СНиП II-23-81\* / Госстрой СССР. - М., 2003.*
5. *Мосты и трубы: СНиП 2.05.03-84 / Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1998.*
6. *Болты с шестигранной уменьшенной головкой класса точности В. Конструкция и размеры: ГОСТ 7798-70.*
7. *Болты, винты, шпильки и гайки. Технические требования: ГОСТ 1759-70.*
8. *Болты, винты, шпильки и гайки. Технические условия: ГОСТ 1759.0-87.*
9. *Болты, винты, шпильки и гайки. Механические свойства и методы испытаний: ГОСТ 1759.4-87.*
10. *Сорокин, В.Г. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин, М.А. Гервасьев, М.А. Гредитор, К.М. Крылова, В.В. Кубачек, В.А. Мармелштейн. - М.: Машиностроение, 1989. - 640 с.*
11. *Аугустин, Я. Аварии стальных конструкций / Я. Аугустин, Е. Шледзевский; пер. с польск. - М.: Стройиздат, 1978. - 183 с.*
12. *Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов: в двух частях. Часть вторая: Механические испытания. Конструкционная прочность / Я.Б. Фридман. - М.: Машиностроение, 1974. - 368 с.*
13. *Потак, Я.М. Хрупкие разрушения стали и стальных изделий / Я.М. Потак. - М.: Оборонгиз, 1955. - 389 с.*
14. *Кишкин, С.Т. Физическая природа упрочнения стали / С.Т. Кишкин // Техника воздушного флота. - 1943. - №10-11. - С. 7-11.*