



А. П. ИВАНОВА,
канд. техн. наук
(Национальный горный
университет)

УДК 624:622.791

К вопросу прогнозирования долговечности многоэлементных стержневых металлических конструкций

Приведены результаты исследований, перспективность которых – в расширении возможностей прогнозирования долговечности надшахтных конструкций применительно к условиям их эксплуатации. Со временем несущая способность конструкций снижается вследствие накопления повреждений, поэтому выявление ее резерва – важная практическая задача. Проанализированы причины, которые приводят к аварийному разрушению многоэлементных стержневых металлоконструкций. Сделан вывод о необходимости учета возможности проявления масштабного эффекта как при проектировании, так и при эксплуатации таких конструкций. Уделено внимание влиянию вида деформации на коррозионный износ элементов.

Ключевые слова: металлические стержневые конструкции, масштабный эффект, деформация, коррозия, несущая способность.

Контактная информация: ivaso94@mail.ru

Стержневые металлоконструкции, которые занимают особое место среди строительных конструкций, широко применяются в различных отраслях промышленности (копры, эстакады, галереи, башни, мачты, мосты), однако эксплуатируются в условиях коррозионных сред и испытывают влияние перепада температур. На эти конструкции действуют квазистатические, циклические, динамические и случайные нагрузки. Используемые при проектировании зданий и сооружений строительные нормы и правила не предусматривают расчет конструкций с развивающимися дефектами и не позволяют прогнозировать поведение объекта в аварийных ситуациях, которые в промышленно развитом регионе могут быть вызваны множеством техногенных и природных факторов.

На кафедре строительства, геотехники и геомеханики ГВУЗ «НГУ» проблемой оценки масштабного эффекта применительно к сложно-структурному породному массиву занимаются давно. В таком массиве дефекты расположены случайным образом [1, 2, 3]. В работе [1] впервые была предложена вероятностно-статистическая модель, позволяющая количественно оце-

нить это явление. Отмечено, что размеры и количество дефектов растут по мере увеличения размеров образца, что ведет к снижению прочности более крупных образцов. Феноменология масштабного эффекта – прочность любых материалов снижается по мере увеличения размеров изделий или образцов из них.

В последнее время в строительной отрасли отмечается тенденция к структурному усложнению зданий и сооружений, которое выражается в возрастании длин пролетов, размеров высотных отметок, количества конструктивных элементов, в применении новых материалов и т. д.

Накопление повреждений, появление и развитие дефектов снижают несущую способность конструкций, следовательно, для крупноразмерных и многоэлементных систем вероятность потери несущей способности и сокращение срока эксплуатации увеличиваются. Поэтому проблема масштабного эффекта в этом случае особенно актуальна.

Выход из строя (разрушение) одного или нескольких элементов системы еще не означает прекращение ее функционирования. Поэтому сейчас широко применяют понятие «живучести» [4–7], под которой подразумевают свойство конструкции сохранять общую несущую способность при локальных разрушениях.

Изучение поведения конструкции при выходе из строя составляющих ее частей и выявление при этом дополнительных резервов, например за счет альтернативных (запасных) путей перераспределения внешних воздействий, – важная практическая задача.

Фундаментальные аспекты разрушения материалов за последние десятилетия в достаточной степени исследованы для простых идеа-

лизированных силовых схем [8, 9], но процесс разрушения реальных конструкций – более сложный, требует исследования напряженно-деформированного состояния в конкретных эксплуатационных условиях с учетом факторов, формирующих механизмы разрушения.

В инженерной практике накоплен большой опыт проектирования и эксплуатации металлических конструкций. Но несмотря на развитие аналитического аппарата, компьютерной техники и методов моделирования, ученые и инженеры сталкиваются с проблемами проектирования, создания и эксплуатации сложных крупноразмерных и многоэлементных стержневых систем. У металлоконструкций, в отличие от железобетонных и каменных, сравнительно небольшой резерв в перераспределении усилий, например локальные повреждения (выход из строя одного из элементов или одной связи) – иногда причина потери несущей способности конструкции, а если элемент основной и несущий, то может разрушиться весь объект [10].

Повреждения конструкций по характеру влияния на несущую способность можно разделить на изменяющие:

геометрические характеристики поперечных сечений;

характер напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов;

конструктивную схему вследствие нарушения связности между элементами.

К разрушению стержневых металлоконструкций могут привести дефекты монтажа или изготовления, коррозия, использование металла с характеристиками ниже проектных значений, ошибки проекта, неполный учет возможных нагрузок и недостаточная система конструктивных связей. Приводим данные по аварийным разрушениям металлоконструкций:

Влияние условий эксплуатации, %	60
Влияние человеческого фактора, %	19
Разрушение отдельных элементов конструкции, %	10
Внезапные воздействия, %	8
Причина неопределена, %	3

Примерно 60 % аварий происходит во время строительства, когда не все элементы конструкции собраны и замкнуты в стыках и узлах. Применительно к металлическим конструкциям, именно коррозия – один из наиболее весомых факторов, вызывающих их разрушения. В отличие от задач в классической постановке многие константы, ха-

рактеризующие свойства элемента в нейтральной среде, – функции, если элемент эксплуатируется в агрессивной среде. При этом степень их изменения неодинакова для разных точек конструкции. Таким образом, воздействие агрессивной среды приводит к возникновению наведенной (изменяющейся во времени) неоднородности геометрических и, в некоторых случаях, механических свойств по области конструкции [11].

Основная характеристика коррозионного процесса – скорость его протекания, на которую значительное влияние оказывает напряженное состояние конструкции.

Обработка автором статьи результатов обследования технического состояния металлических конструкций зданий и сооружений шахт им. В. И. Ленина, «Гвардейская», «Октябрьская», «Родина», ПАО «Криворожский железорудный комбинат», металлических конструкций литейного и плавильного цехов ПАО «Никопольский завод трубной арматуры» показала, что существует зависимость между видом деформации, испытываемой элементом конструкции, и его коррозионным повреждением (рис. 1).

Максимальное количество повреждений имеют изгибаемые стержни. Это касается и растянутых стержней. Можно предположить, что удлинение стержней увеличивает площадь их контакта с агрессивной средой и они разрушаются быстрее.

Отказы в работе стальных конструкций [9] с разрушением их элементов свидетельствуют о влиянии длительности эксплуатации на вероятность зарождения и развития трещин. Около 50 % всех отказов в работе происходит в первую зиму эксплуатации, 14 – во вторую, 8 – в третью и т. д.

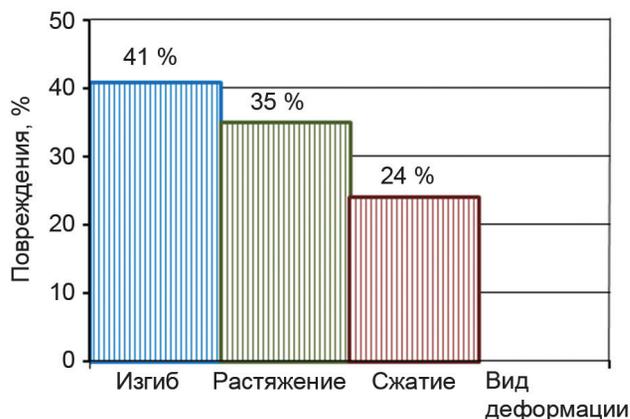


Рис. 1. Зависимость коррозионных повреждений от вида деформации.

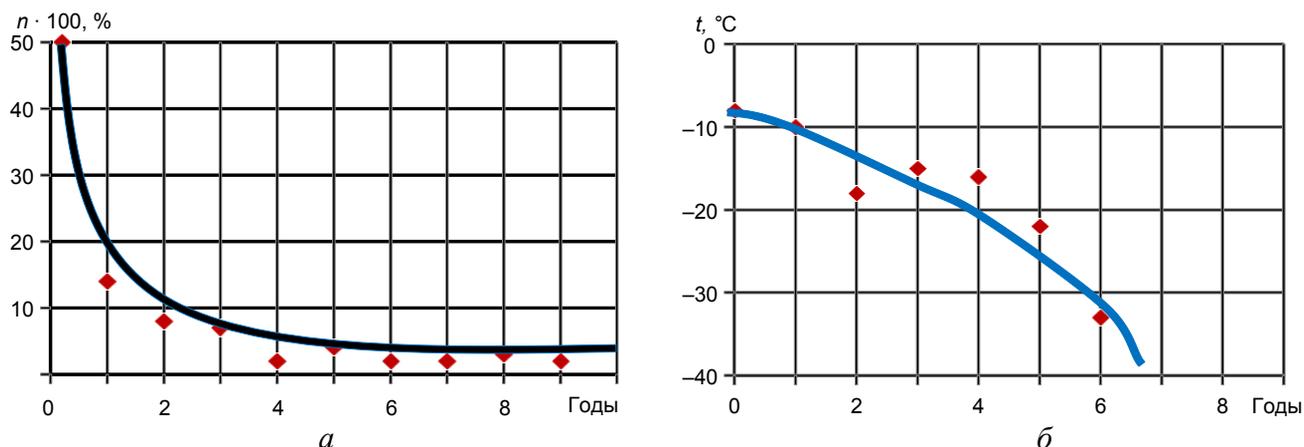


Рис. 2. Зависимости: *а* – относительного количества отказов в работе от длительности эксплуатации; *б* – температур t , соответствующих хрупкому разрушению, от длительности эксплуатации; n – отношение количества отказов за данный год к общему количеству отказов.

До 80 % всех отказов наблюдается в первые пять лет эксплуатации (рис. 2, *а*). Длительная эксплуатация приводит к тому, что отказы происходят при более низких температурах (рис. 2, *б*) и при более высоких номинальных разрушающих напряжениях, т. е. конструкция «приспосабливается» к условиям работы. Лучше «приспосабливаются» конструкции, не испытывающие мало- и многоцикловые нагрузки, т. е. эксплуатирующиеся в оптимальном режиме.

Физические причины того, что конструкции «приспосабливаются» к работе (в условиях их статического нагружения), следующие:

- развитие пластических деформаций (возникают под воздействием эксплуатационной нагрузки в теплое время года) в зонах концентрации напряжений, сглаживает эти напряжения;

- снижение уровня остаточных растягивающих напряжений в зонах их концентрации.

Конструкции, введенные в эксплуатацию в теплое время года, «приспосабливаются» более ак-

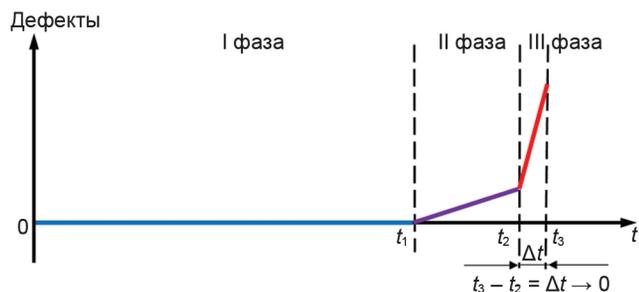


Рис. 3. Период эксплуатации t конструкции.

тивно. Это частично объясняет повышенную аварийность конструкций с хрупким разрушением их элементов, введенных в эксплуатацию в холодный период года.

Элементы систем в закритической области работы последовательно выходят из строя, перераспределяя нагрузки на другие элементы, и порождают тем самым внутренние для самой системы негативные воздействия [12]. Внешние и внутренние воздействия вызывают дальнейший отказ элементов, и система переходит в аварийное состояние. Насколько быстро наступит аварийное состояние системы также будет зависеть от степени ее статической неопределимости.

Решение проблемы безопасности любой конструкции сводится к обеспечению ее главных свойств – надежности и долговечности. Условно период эксплуатации конструкции до ее разрушения можно представить фазами (рис. 3), каждая соответствует:

- первая – штатному режиму работы конструкции, наиболее продолжительна по времени ($0 - t_1$);

- вторая – ограниченной работоспособности конструкции с накопившимися с течением времени дефектами, повреждениями, отказами некоторых элементов, т. е. «живучести» ($t_1 - t_2$);

- третья – полному разрушению конструкции, которое происходит внезапно за короткий промежуток времени ($t_2 - t_3$).

Нередко оценка технического состояния длительно эксплуатирующихся металлических конструкций не содержит основной характеристики –

надежности конструкции. Это вызвано тем, что, как правило, на практике отсутствуют достоверные и полные по объему статистические данные о входных и выходных параметрах конструкции. Такая ограниченная информация создает определенные сложности для прогнозирования их безаварийной эксплуатации. При оценке эксплуатационной надежности конструкции необходимо учитывать фактическую длительность (участок $0 - t_2$ на рис. 3) ее работы, т. е. выявить резерв (участок $t_1 - t_2$ на рис. 3) ее несущей способности.

Выводы. В последние годы усложнение зданий и сооружений, так называемый «архитектурный бум», а также рыночная конкуренция приводят к возведению недостаточно апробированных конструктивных форм.

В Украине ситуация усугубляется, с одной стороны, несколько «отстающей» от времени нормативной базой, неудовлетворительной подготовленностью участников строительства, нарушением правил эксплуатации построенных объектов и другими негативными факторами. С другой стороны, ряд документов имеют рекомендательный характер. В контексте описанных современных реалий такое состояние вопроса определило актуальность данной статьи. Для корректного прогнозирования безаварийной эксплуатации многоэлементных металлоконструкций предполагается выполнить следующее:

обосновать и сформулировать основные понятия, принципы, качественные и количественные показатели эксплуатационной работоспособности (живучести) и связанные с ней категории применительно к узлам и элементам конструкций, а также к техническим системам в целом;

учесть возможность проявления масштабного эффекта как при проектировании, так и при эксплуатации крупноразмерных и многоэлементных металлоконструкций;

собрать и систематизировать данные о физическом износе металлоконструкций, эксплуатирующихся длительное время;

изучить поведение конструкций в условиях нерегламентированных нормами воздействий, в том числе при частичном повреждении или разрушении отдельных элементов;

исследовать причины возникновения характерных дефектов и повреждений стержневых метал-

локонструкций, включая моделирование процессов формирования повреждений, выявление физических закономерностей случайного характера размеров и расположения дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шашенко А. Н.* Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве: дис. ... доктора техн. наук: 05.15.04, 05.15.11 / Шашенко Александр Николаевич. – Днепропетровск, 1988. – 507 с.
2. *Шашенко А. Н.* Методы теории вероятностей в геомеханике / А. Н. Шашенко, Н. С. Сургай, Л. Я. Парчевский. – К.: Техника, 1994. – 224 с.
3. *Шашенко А. Н.* Деформируемость и прочность массивов горных пород: моногр. / А. Н. Шашенко, Е. А. Сдвижкова, С. Н. Гапеев. – Днепропетровск: НГУ, 2008. – 224 с.
4. *Тур В. В.* Проектные стратегии защиты конструктивных систем от прогрессирующего обрушения в рамках требований международных нормативных документов / В. В. Тур // Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство): междунар. симпозиум: сб. науч. трудов. – Брест, 2009. – С. 302 – 314.
5. *Перельмутер А. В.* Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А. В. Перельмутер. – М.: АСВ, 2007. – 256 с.
6. *Кудишин Ю. И.* Живучесть строительных конструкций – важный фактор снижения потерь в условиях аварий / Ю. И. Кудишин, Д. Ю. Дробот // Металлические конструкции. – 2009. – № 1. – С. 61 – 72.
7. *Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений, строительных конструкций и оснований:* ДБН В.1.2 – 14. – 2009. – К., 2009. – 43 с.
8. *Машиностроение.* Энциклопедия в 40 т. Разд. II. Материалы в машиностроении. Т. 2: Стали. Чугуны. – М.: Машиностроение, 2000. – 784 с.
9. *Исследование хрупкой прочности строительных металлических конструкций* // Тр. ЦНИИПроектстальконструкции; под ред. Н. П. Мельникова. – М.: ЦНИИПроектстальконструкция, 1982. – 150 с.
10. *Доронин С. В.* Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем / С. В. Доронин, А. М. Лепихин, В. В. Москвичев, Ю. И. Шокин. – Новосибирск: Наука, 2005. – 250 с.
11. *Иванова А. П.* Исследование долговечности центрально сжатых стержней с изменяющимися геометрическими характеристиками / А. П. Иванова // Наук. вісник НГУ. – 2013. – № 3. – С. 87 – 93.
12. *Александров А. В.* Роль отдельных элементов стержневой системы при потере устойчивости / А. В. Александров // Вестн. МИИТ. – 2001. – № 5. – С. 46 – 50.