

КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НЕСУЩИХ СТАЛЬНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК АВТОМОБИЛЬНОЙ ЭСТАКАДЫ МАГНИТНЫМ И ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДАМИ

© 2022 г. С.М. Кулак^{1,*}, В.Ф. Новиков^{1,**}, В.С. Мальцев^{1,***}

¹Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38
E-mail: *ksm-rabochi@rambler.ru; **vitaly.nowikov2017@yandex.ru; ***coreboxe@gmail.com

Поступила в редакцию 14.12.2021; после доработки 12.02.2022

Принята к публикации 14.02.2022

Исследовано магнитоупругое размагничивание несущих двутавровых балок автомобильной эстакады г. Тюмень в течение одного месяца ее эксплуатации в разных режимах интенсивности движения транспорта. Разработано, изготовлено и апробировано съемное запоминающее тензометрическое устройство для измерения деформации растяжения несущей балки автомобильного моста при ее изгибе, вызванном проездом транспорта. На одной из исследуемых балок установлена зависимость изменения напряженности магнитного поля рассеяния ее локальной остаточной намагниченности (ЛОН) от механической деформации растяжения на поверхности балки при ее изгибе. Полученная зависимость использована для калибровки величины магнитоупругого размагничивания восьми исследуемых стальных балок автомобильной эстакады по уровню испытываемых ими максимальных деформаций за один месяц наблюдения. Она показала, что метод определения магнитоупругой чувствительности (МУЧ) с помощью удара дает достаточно достоверные результаты и может быть использован на металлоконструкциях, которые невозможно нагрузить для калибровки. Проведена оценка пиковых значений механических напряжений осевого растяжения в двутавровых балках эстакады по уровню размагничивания в режиме магнитоупругой памяти, вызванного динамическим воздействием проезжающего транспорта. Способ не нуждается в наклейке дорогостоящих датчиков и следящей аппаратуре и может быть внедрен без существенных капиталовложений.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, стальная эстакада, остаточная намагниченность, динамическое нагружение, магнитоупругое размагничивание стали, магнитоупругая чувствительность стали.

DOI: 10.31857/S0130308222030022

ВВЕДЕНИЕ

Дорожная инфраструктура крупных городов России требует постоянной модернизации и развития в связи с интенсивно возрастающим потоком автотранспорта [1]. В целях снижения уровня заторных явлений автомобильных дорог Тюменской области и повышения безопасности дорожного движения реализуются мероприятия (проекты) по увеличению их пропускной и несущей способностей с переводом в наиболее высокую категорию надежности и строительству крупных инфраструктурных объектов [2]. Одним из них является эксплуатируемая с 2013 г. пятнадцатипролетная эстакада транспортной развязки улиц Мельникайте — Ставропольская в г. Тюмень общей протяженностью 640 м с двухсторонним четырехполосным движением. Возведение такого сооружения позволило существенно разгрузить прилегающие перекрестки и магистрали, снизить уровень заторных явлений и увеличить пропускную способность всей транспортной системы города в целом. При его постройке в качестве несущих элементов применялись двутавровые шарнирно-опертые балки длиной 42 м, выполненные из стали 15ХСНД (рис. 1), которые на каждом пролете эстакады расположены по ширине в десять параллельных друг другу рядов с интервалом 1,3 м на железобетонных фундаментных основаниях. Каждый такой элемент, согласно [3, 4], рассчитан испытывать нагрузку при упругой деформации растяжения изгибом не более 250 МПа.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) любого такого несущего элемента эстакады определяется характеристиками воздействующих на него нагрузок. Основными являются из постоянных нагрузок собственный вес, а из кратковременных воздействий — проезжающий автотранспорт.

При плоском поперечном изгибе балки от произвольной внешней нагрузки в ее поперечных сечениях возникают перерезывающие силы и изгибающие моменты. К изгибающему моменту в сечении приводят нормальные напряжения σ , действующие перпендикулярно плоскости поперечного сечения (см. рис. 1). Перерезывающая сила является равнодействующей касательных напряжений τ , действующих в плоскости сечения. Наиболее опасными точками по нормальным напряжениям будут 1, 2 (см. рис. 1). Опасной точкой по касательным напряжениям будет 3, где действуют максимальные касательные напряжения, а нормальные напряжения равны нулю. Очевидно,

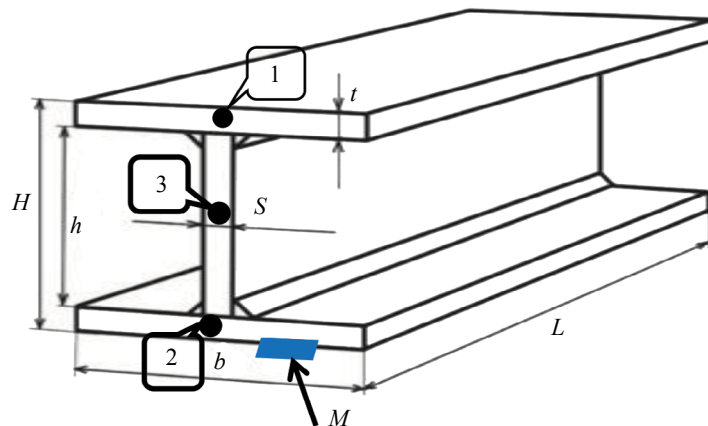


Рис. 1. Несущая двутавровая балка:

$H = 1400$ мм — высота балки; $h = 1320$ мм — высота стенки балки; $b = 650$ мм — ширина нижней полки; $t = 40$ мм — толщина полки; $S = 25$ мм — толщина стенки; $L = 42000$ мм — длина балки между соседними опорами; M — область локального намагничивания ЛОН.

в исследуемой нижней полке балки касательные напряжения будут равны нулю и в дальнейших расчетах учитываться не будут [8, 9].

Для большинства балок в различных конструкциях нормальные напряжения (σ) являются наибольшими, и по ним проверяется прочность таких элементов. Для балки на двух опорах с распределенной нагрузкой от воздействия собственного веса конструкции [4, 9] эти максимальные напряжения будут равны:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{\min}} \sim 10^6 \text{ Па} \leq [\sigma], \quad (1)$$

где $M_{\max} \sim 2000$ Н·м — наибольший по модулю изгибающий момент в сечении балки; $W_{\min} \sim 7 \cdot 10^3$ см³ — минимальный момент сопротивления сечения; $[\sigma]$ — допускаемое нормальное напряжение равное $k \cdot \sigma_T$ ($k \sim 5$ — запас прочности, $\sigma_T \sim 400$ МПа — предел текучести материала (сталь 15ХСНД)). При указанном пределе текучести и запасе прочности рабочие напряжения в балках будут ~ 80 МПа. В этом диапазоне проводились измерения.

Все внешние нагрузки перпендикулярны оси балки, продольный распор балок отсутствует. Конструкция со всех сторон закрыта от воздействия ветровой нагрузки плотной застройкой из высотных зданий. Пренебрегая поперечными горизонтальными опрокидывающими воздействиями на эстакаду, можно считать, что напряженное состояние ее несущих элементов формируется одноосными изгибными деформациями (растяжения, сжатия), вызываемыми действием собственного веса и проезжающим транспортом. Поскольку поток транспорта не постоянен во времени (сутках, днях недели, времени года, полосах движения), то возникает практический интерес в определении максимальных динамических напряжений, испытываемых несущими двутавровыми элементами и оценке степени их влияния на усталостные изменения в материале [10].

Одним из направлений научных исследований по обеспечению безопасности транспортных сооружений, в том числе и мостов (согласно [5, 11]), является исследование изменения напряженно-деформированного состояния в опасных зонах и узлах [12, 13]. При этом следует учитывать возможное изменение напряженного состояния вследствие наличия дефектов и развития повреждений, влияния агрессивных эксплуатационных сред, деструкции материала, перераспределения усилий [14, 15]. В статье [6] и книге [7] рассмотрены аварии пешеходных мостов. Указывается, что за 180 лет в мире случилось большое количество аварий мостовых сооружений, вызванных действием пешеходной нагрузки. Причем эти аварии мостов под действием пешеходной нагрузки практически не анализировались.

Поэтому актуальным является периодическое исследование напряженного состояния двутавровых балок автомобильной эстакады от воздействий проезжающего по ней транспорта и определение максимальных напряжений, испытываемых каждой из них при транспортировке грузов.

Современная компьютерная база и программное обеспечение позволяют с большей надежностью проектировать мостовые конструкции. Проектировщики должны учитывать опасность пере-

грузки пролетных строений и опор мостов, а также и возможный динамический характер этой нагрузки [16]. Однако от приборного контроля напряженно-деформированного состояния их элементов никто не освобождал, особенно в межремонтный и после ремонтный периоды. Полноценный тензометрический и оптический контроль НДС не всегда возможны и дороги, поэтому целесообразно разрабатывать и применять для этого новые приборные экспресс-методы.

Цель работы — исследование возможности применения эффекта магнитоупругого размагничивания стали в качестве экспресс-метода контроля напряженно-деформированного состояния стальных двутавровых балок автомобильной эстакады при их конструировании и эксплуатации.

Задачи:

- 1) исследование магнитоупругого размагничивания нижних полков двутавровых балок автомобильной эстакады, вследствие их деформации, вызванной действием проезжающего транспорта;
- 2) разработка и изготовление съемного тензометрического устройства для измерения деформации двутавровых балок; измерение деформации изгиба нижней полки одной балки после проезда автомобильного транспорта по эстакаде;
- 3) калибровка величины магнитоупругого размагничивания балок эстакады по уровню ее деформации, измеренному тензометрическим устройством;
- 4) оценка напряжений растяжения в несущих балках, создаваемых динамическим воздействием транспорта по величине калиброванного уровня их магнитоупругого размагничивания.

Для исследования напряженно-деформированного состояния двутавровых балок действующей автомобильной эстакады от динамического воздействия проезжающего транспорта применялся метод [17], позволяющий оценивать его уровень по изменению магнитного потока в остаточной намагниченной зоне. Метод [17—23] основан на явлении магнитоупругого эффекта [24, 25], который именуем в своих работах магнитоупругой памятью (магнитоупругим размагничиванием (МУП)), и заключается в необратимом изменении остаточной намагниченности M_r локального участка стали, вызванном действием механических напряжений σ в ней.

В массивной металлоконструкции после ее локального намагничивания над намагниченным участком появляется магнитное поле рассеяния локальной остаточной намагниченности (ЛОН), напряженность H которого линейно связана с магнитным моментом локальной намагниченности M_r ($H \sim M_r$). В работе [26] предложены гиперболическая и экспоненциальная закономерности изменения M_r стали при приложении механических напряжений σ и проведена проверка их выполнимости.

В работе [27] отмечена высокая временная стабильность уровня локальной остаточной намагниченности конструкционной стали, не подверженной действию внешних усилий и магнитных полей. За 340 дней убыль напряженности магнитного поля рассеяния составила порядка 30—35 % без нагрузки у стали 10 и 7—8 % у стали 09Г2С. Результаты таких исследований показывают возможность применения локального намагничивания при долговременном контроле напряженного состояния стальных конструкций методом МУП.

В работах [28, 29] описан алгоритм определения действовавшего осевого напряжения в стальных конструкциях в режиме памяти. Одним из этапов его реализации является определение магнитоупругой чувствительности (МУЧ) стали к упругим деформациям (напряжениям) ее растяжения по результатам измерения МУЧ к напряжениям поперечного сжатия, вызванного ударным или статическим локальным воздействием на сталь [29]. Определение МУЧ стали к искомому напряжению повышает точность контроля ее НДС методом МУП.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе исследования МУП проводились на восьми одинаковых и параллельных друг другу балках (см. рис.1) одного из пролетов автомобильной эстакады, каждой из которых присваивались порядковые номера от 1 до 8. Балки с номерами 1—4 приходились на полосы движения транспорта, въезжающего на эстакаду, а с номерами 5—8 — съезжающего. Две крайние балки с обеих сторон пролета, не испытывающие заметного динамического воздействия со стороны потока транспорта, исследованию не подвергались. Весь пролет эстакады опирается на два железобетонных основания, расположенных на расстоянии ~ 42 м друг от друга. Для исследований были выбраны участки нижних полков в центральной части каждой балки, которые испытывают при изгибе наибольшие деформации [9].

Согласно (1), начальные исходные нагрузки (в отсутствие транспорта) на исследуемые участки нижней полки, вызываемые статическим действием собственного веса, малы по сравнению с динамическими, поэтому они не учитывались. Кроме того, для каждой балки определялась маг-

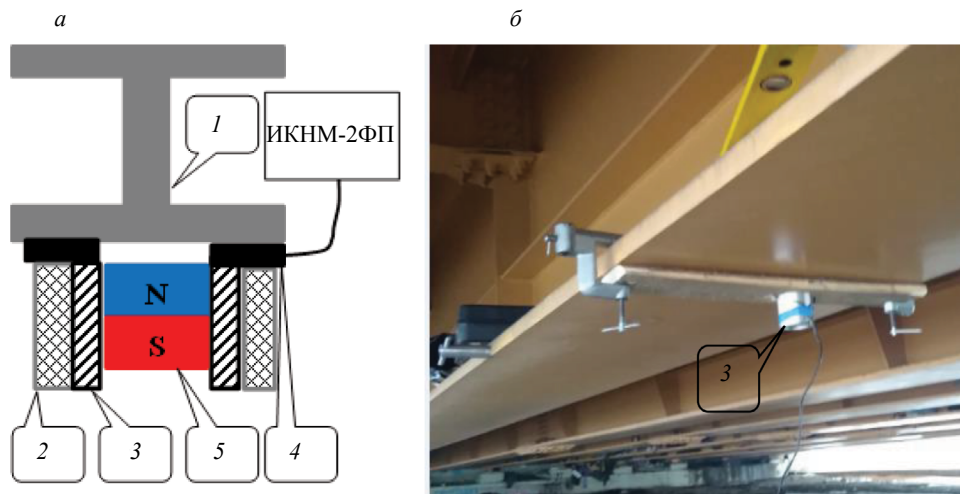


Рис. 2. Схема (а) и фото (б) исследования МУП на двутавровой балке автомобильной эстакады:
 1 — поперечное сечение двутавровой балки; 2 — пластиковое крепежное кольцо; 3 — направляющий алюминиевый цилиндр;
 4 — феррозондовые датчики тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния; 5 — дисковый магнит.

нитоупругая чувствительность (МУЧ) ее стали в местах исследования МУП, что позволило в [30] провести расчет напряжений с учетом МУЧ.

В центре нижней полки каждой исследуемой двутавровой балки (1) с помощью клея «Момент» крепилось пластиковое кольцо (2) (рис. 2), которое позволяло надежно размещать на ее поверхности направляющий алюминиевый цилиндр (3). В основании цилиндра диаметрально и встречно друг к другу расположены два феррозондовых датчика (4). Через направляющий цилиндр к поверхности полки доставлялся дисковый магнит (5) в алюминиевом держателе для ее локального намагничивания (ЛН) до состояния близкого к техническому насыщению (в точке M на рис.1). В этом случае в стали создавалась локально остаточная намагниченность M_{r0} перпендикулярно поверхности и оси действия напряжений растяжения $\sigma_{\text{раст}}$, возникающих при изгибе балки. Затем магнитометром ИКНМ-2ФП, соединенным с двумя феррозондовыми датчиками, измерялась в максимуме тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности $H_{0\sigma} \sim M_{r0}$. При таком диаметрально встречном симметричном относительно ЛОН расположении двух феррозондовых датчиков исключалось влияние на нее внешних магнитных полей. Применение направляющего цилиндра (3) и крепежного пластикового кольца (2) позволяло при повторных измерениях помещать феррозондовые датчики точно в местах максимального значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН.

Поскольку магнитный полюс ЛОН имеет замкнутую конфигурацию разнонаправленных магнитных силовых линий — своего рода «кокон», в котором внешнее магнитное поле усиливает сонаправленные поля и уменьшает противоположные поля, делает такой «кокон» в целом мало восприимчивым к не очень большим внешним полям.

После локального намагничивания измерялись исходное $H_{0\sigma}$ и периодически в течение одного месяца последующее значение тангенциальной составляющей напряженности H_{σ} поля рассеяния ЛОН, рассчитывалось ее соответствующее относительное изменение $\delta H_{\sigma} = (H_{0\sigma} - H_{\sigma})/H_{0\sigma}$ за каждый период исследований.

Для измерения деформации поверхности исследуемых балок автомобильной эстакады было разработано и изготовлено съемное (накладное) запоминающее тензометрическое устройство (рис. 3).

Тензометрическое устройство (рис. 3а) состоит из датчика деформации (1) и блоков ее измерения (2, 3, 4). Датчик представляет собой полный измерительный мост, собранный из тензорезисторов сопротивлением 350 Ом каждый, на текстолитовой подложке (1) размером 150×40 мм. Полный мост из тензорезисторов размером 10×10 мм размещался в середине подложки. Крайние участки подложки служат для ее крепления на контролируемой конструкции. Такой датчик может механически крепиться на нижней полке двутавровой балки исследуемой эстакады при давлении с помощью струбцин (рис. 3б). Для исключения проскальзывания текстолитовой

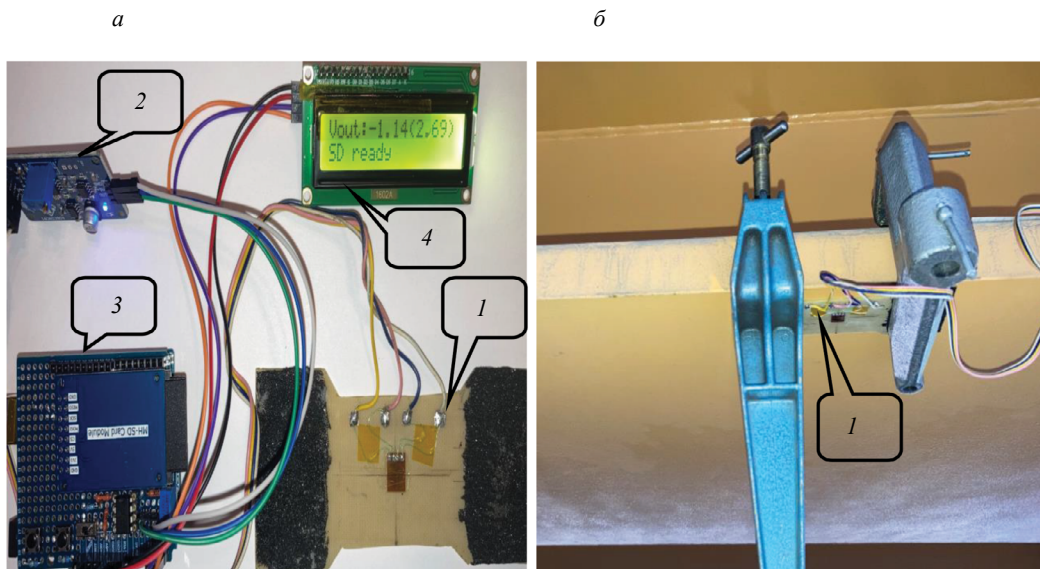


Рис. 3. Тензометрическое устройство (а) и его датчик деформации на объекте исследования (б):
 1 — датчик деформации; 2 — усилитель выходного сигнала датчика; 3 — микроконтроллер; 4 — блок индикации результатов измерения.

подложки датчика деформации в местах прижатия ее струбцинами к балке, на нее наносится абразивный материал. В результате действия на балки эстакады проезжающего автотранспорта будет происходить их изгиб, приводящий к деформации растяжения нижней полки. Вместе с ней аналогичные деформации будет испытывать и закрепленный на ней измерительный датчик деформации. Это вызовет разбаланс его тензометрического измерительного моста на величину ΔU , регистрируемую блоком измерения (2, 3, 4 на рис. 3а). Поскольку выходной сигнал такого моста составляет десятые (сотые) доли мВ, то для регистрации, дальнейшего анализа и обработки необходимо его усиление. Для этого в схему блока измерения включен блок (2), построенный на двух операционных усилителях с двухполярным питанием. Усиленный сигнал поступает в блок 10-битного АЦП микроконтроллера atmega328p (3), где аналоговый сигнал преобразуется в цифровой вид с количеством шагов, равным 1024. Затем оцифрованный сигнал поступает в блок индикации и управления (4) с монохромным дисплеем. Результаты измерения разбаланса ΔU измерительного тензомоста передаются на карту памяти, где сохраняются в текстовом формате, предназначенном для представления в табличной форме (CSV) и обработки в программе Excel. Питание тензометрического устройства осуществляется с помощью источника постоянного напряжения 5 В или аккумулятора типа «крона».

С помощью машины для механических испытаний ИР 5047-50 проведена калибровка величины разбаланса тензомоста ΔU тензометрического устройства. Для этого в датчике деформации (1) (см. рис. 3а) создавались механические напряжения растяжения $\sigma_{\text{раст}}$ известной величины и регистрировались соответствующие им уровни ΔU . Полученная в результате калибровки зависимость $\Delta U = f(\sigma_{\text{раст}})$ применялась при контроле изменения напряженного состояния несущих балок моста, результаты которого отражены на рис. 4 и 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 показаны результаты проведенных исследований МУП в виде временной диаграммы изменения параметра δH_{σ} восьми двутавровых балок одного из пролетов автомобильной эстакады. Диаграмма состоит из трех частей (1, 2, 3), каждая из которых соответствует очередному этапу измерений, проводимому через разные промежутки времени после локального намагничивания. Здесь 1, 2, 3 — это нумерация этапов измерения напряженности H_{σ} магнитного поля рассеяния ЛОН на каждой из восьми балок. Порядковый номер столбца, отсчитываемый слева направо в каждой из трех частей диаграммы, обозначает номер балки. Высота каждого столбца диаграммы численно равна величине относительного изменения δH_{σ} напряженности магнитного поля рассея-

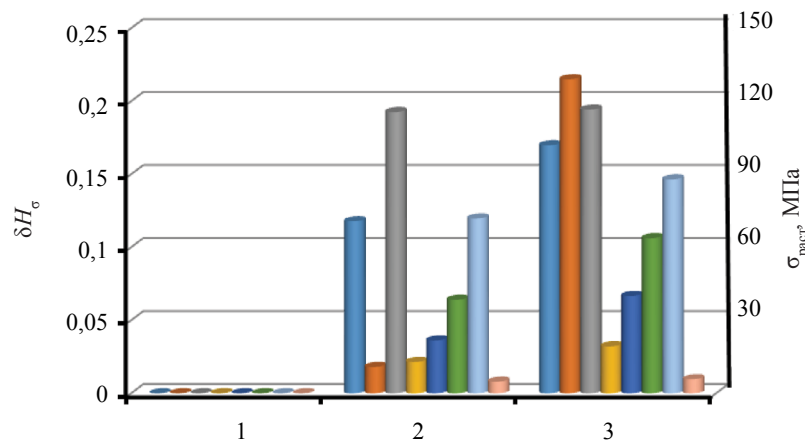


Рис. 4. Диаграмма относительного изменения значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния δH_{σ} ЛОН и напряжений $\sigma_{\text{раст}}$ на поверхности восьми двутавровых балок (№ 1, 2, ..., 8 слева направо), зарегистрированная через разные интервалы времени его эксплуатации после локального намагничивания: 1 этап — через 0,5 ч (интенсивность движения «нулевая»); 2 этап — через 2 ч (интенсивность движения возрастает); 3 этап — через 36 суток после намагничивания.

ния ЛОН, определенного на соответствующем этапе измерений (1, 2, 3) каждой из балок и величине механических напряжений $\sigma_{\text{раст}}$, полученной по результатам калибровки δH_{σ} на одной из балок (рис. 5).

Как видно из рис. 4, за весь период исследований все балки испытывают разного уровня изменение поля рассеяния ЛОН, вызванное динамическим воздействием проезжающего автотранспорта. Причем за два с небольшим часа после локального намагничивания наибольшие нагрузки от проезжающего автотранспорта испытывают балки под въезжающим на эстакаду потоком (№ 1 и 3), а наименьшие — под потоком съезжающего с нее транспорта (№ 8). Спустя 36 суток уровень размагничивания ЛОН всех балок заметно возрастает. Такое отличие в изменениях δH_{σ} магнитного параметра локальной остаточной намагниченности балок обусловлено тем, что они испытывают напряжения растяжения $\sigma_{\text{раст}}$ более высокого уровня от воздействия на них проезжающего транспорта. Чем больше проходит времени между этапами измерений, тем больше вероятность проезда более тяжелого или скоростного транспорта. Если в последующий временной период напряжения $\sigma_{\text{раст}}$, которые испытала балка, будут меньше, чем в предшествующий, то напряженность поля H_{σ} рассеяния ЛОН и δH_{σ} останутся практически неизменными. Другими словами, ЛОН работает в режиме запоминания максимальных напряжений и не реагирует на аналогичные или меньшие по

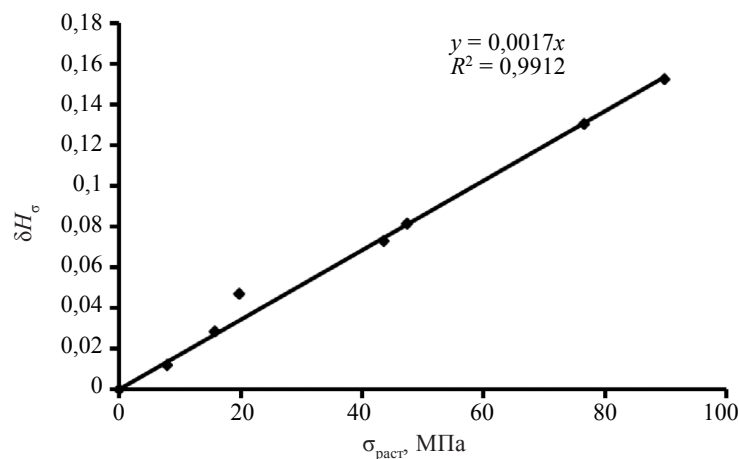


Рис. 5. Зависимость относительного изменения значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния δH_{σ} локальной остаточной намагниченности балки № 2 от напряжений растяжения $\sigma_{\text{раст}}$ измеренных тензометрическим устройством.

величине напряжения $\sigma_{\text{раст}}$. Каждый из трех этапов измерения (1, 2, 3) проводился через разные промежутки времени, после локального намагничивания балок. Причем между 2 и 3 этапами прошло гораздо больше времени, по сравнению с промежутком времени от 1 до 2 этапа. Следовательно, в период от 2 до 3 этапа измерений через мост переместилось больше транспорта, чем за время до 2 этапа, и вероятность испытания балками в это время больших нагрузок гораздо выше.

Результаты измерения деформации растяжения $\sigma_{\text{раст}}$ нижней полки исследуемой балки № 2 тензометрическим устройством при изгибе и вызванного ей соответствующего магнитоупругого размагничивания δH_{σ} ЛОН показаны на рис. 5 в виде зависимости $\delta H_{\sigma} = f(\sigma_{\text{раст}})$. Для получения такой зависимости на нижней полке балки № 2 крепился датчик деформации (1) тензометрического устройства (как показано на рис. 3б), и его измерительный мост приводился в равновесное состояние ($\Delta U = 0$). Производилось локальное намагничивание балки (как показано на рис. 2), измерялось начальное значение $H_{0\sigma}$ напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН и последующие значения H_{σ} , когда измерительный мост испытывал разбаланс ($\Delta U > 0$) вследствие деформации датчика и балки, вызванной действием проезжающего транспорта. В результате была установлена зависимость относительного изменения $\delta H_{\sigma} = (H_{0\sigma} - H_{\sigma})/H_{0\sigma}$ напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН балки № 2 от напряжения ΔU разбаланса измерительного моста тензометрического устройства. Используя результаты вышеописанной калибровки величины разбаланса тензомоста ΔU тензометрического устройства по уровню испытываемых напряжений $\sigma_{\text{раст}}$ в виде зависимости $\Delta U = f(\sigma_{\text{раст}})$, была получена зависимость $\delta H_{\sigma} = f(\sigma_{\text{раст}})$ (см. рис. 5). В дальнейшем зависимость рис. 5 использовалась для калибровки величины МУП ЛОН каждой исследуемой балки по уровню напряжений растяжения. Результаты калибровочной оценки $\sigma_{\text{раст}}$ по величине δH_{σ} в каждой балке представлены в табл. 1 и на рис. 4. В работах [28—31] предлагается для повышения точности магнитоупругих методов контроля НДС стальных конструкций измерять магнитоупругую чувствительность их стали, например, с помощью устройства, позволяющего оказывать локально дополнительное ударное воздействие непосредственно в месте ЛН [28—30].

Таблица 1

Результаты измерения относительного изменения значения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния δH_{σ} ЛОН, коэрцитивной силы H_c в них и оценки напряженного состояния $\sigma_{\text{раст}}$ нижних полок балок эстакады по результатам исследования их магнитоупругого размагничивания от воздействия на мост провозимых грузов (транспорта)

№ балки	δH_{σ}	H_c , А/м	$\sigma_{\text{раст}}$, МПа
1	0,169	—	100
2	0,216	370	127
3	0,193	387	114
4	0,032	405	19
5	0,066	410	39
6	0,106	410	62
7	0,147	410	86
8	0,0096	—	6

Предлагаемым методом мы решаем также вопрос калибровки применяемого в работах [28, 30] ударного устройства для определения МУЧ стали и эффективного напряжения, создаваемого им.

Пределы выносливости σ_{-1} при 107 циклах нагружения и текучести σ_T для стали 15ХСНД равны 274—299 и 349 МПа соответственно.

Максимально динамически нагруженными воздействием транспорта за период исследований были балки № 1, 2 и 3, расположенные под первой и второй наиболее интенсивными полосами движения транспорта, въезжающего на эстакаду. Балка № 4 приходилась на нейтральную (разделительную) полосу эстакады. В меньшей степени изменилось поле локальной остаточной намагниченности у балок № 5, 6, 7, 8 на второй половине эстакады, где динамическое воздействие съезжающего с нее транспорта существенно слабее, чем при скоростном въезде.

Следует отметить, что величина напряжений растяжения $\sigma_{\text{раст}}$ шести балок, оцениваемая расчетным способом в работе [30] по уровню МУП с учетом экспериментально определенной МУЧ, в 1,4—1,6 раза превышает результаты (см. табл. 1), полученные с применением тензометрического устройства. При этом распределение напряжений по всем балкам остается неизменным и имеет максимум для балки № 2. Количественное отличие полученных здесь и в работе [30] результатов оценки $\sigma_{\text{раст}}$ балок объясняется калибровой эффективностью напряжения в лабораторных условиях на гораздо более тонких пластинах и учетом индивидуальной МУЧ стали, значение которой, как показано в работе [30], может для каждой балки заметно отличаться.

Таким образом, для определения одноосных растягивающих напряжений (или сжимающих) в любой стальной конструкции (высотный, автомобильный подъемный кран, мосты, рельсы, машины и т.д.) от динамических воздействий методом МУП необходимо наклеить на участок контролируемой конструкции пластмассовое фиксирующее кольцо, произвести локальное намагничивание. Такой намагниченный участок конструкции будет служить «квазидатчиком», запоминающим пиковые напряжения в этом месте. Для более детального изучения распределения напряжений в исследуемой конструкции необходимо создать на ней требуемое количество таких «квазидатчиков». Производя периодически измерения поля рассеяния H в таком намагниченном «квазидатчике», по относительной величине его изменения можно оценивать максимальные деформации (напряжения), которые испытала контролируемая конструкция за это время. Контроль НДС методом МУП необходим в конструкциях и сооружениях, испытывающих периодически непредсказуемые нагрузки. Все это не требует больших материальных средств для приборного оснащения, так и для проведения самого контроля и может быть легко внедрено.

Для контроля напряжений конструкции тензометрическим методом необходимо наклеивание на ее поверхность тензодатчиков, и связанное с этим временное прекращение эксплуатации, применение регистрирующей и записывающей аппаратуры, что удорожает и усложняет ее тотальный и долговременный контроль. Предлагаемый метод МУП лишен этих недостатков. Однако он не конкурирует с тензометрическим, но может дополнить его путем более широкого охвата контролируемой конструкции и возможности без приборного запоминания пикового значения напряжений, без использования дорогостоящей запоминающей электронной аппаратуры. Метод МУП позволит выявлять участки конструкций, испытывающих аномально высокие нагрузки, испытываемые ею в процессе работы. И что не менее важно, метод позволит определять избыточную металлоемкость некоторых элементов проектируемых конструкций. Знание эпюры напряжений в элементах мостов, трубопроводов, зданий позволит при дальнейшем проектировании аналогичных конструкций снижать уровень запаса их прочности, а, следовательно, и металлоемкость, а также себестоимость производства и эксплуатации.

ВЫВОДЫ

Разработано, изготовлено и апробировано на двутавровой балке автомобильной эстакады съемное запоминающее тензометрическое устройство для измерения деформации на ее поверхности.

Проведенная калибровка относительного изменения напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности δH исследованных балок по уровню механических напряжений растяжения $\sigma_{\text{раст}}$ измеренных тензометрическим устройством, показала их практически линейную зависимость в диапазоне рабочих напряжений (0—90 МПа);

Исследуемый метод позволяет создавать на стальной конструкции множество магнитных квазидатчиков и в режиме «памяти» без дежурной аппаратуры определять распределение напряжений по балкам моста, что может быть полезным для контроля напряженно-деформированного состояния элементов стальной металлоконструкции в процессе эксплуатации и при ее проектировании.

Реализация исследуемого метода МУП не требует заметных капиталовложений и может быть быстро внедрена для обследования НДС металлоконструкций.

Анализ полученных предварительных результатов определения напряжений в несущих балках моста показывает их существенный разброс и, на наш взгляд, не специалистов по мостостроению, на избыточный (более чем десятикратный) запас прочности некоторых элементов, завышенную металлоемкость и стоимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российская Федерация. Законы. Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федера-

ции: Федеральный закон от 08.11.2007 N 257-ФЗ [принят Государственной думой 18 октября 2007 года: одобрен Советом Федерации 26 октября 2007 года]. М.: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс. Текст: непосредственный.

2. Постановление правительства Тюменской области от 30 декабря 2014 года N 701-п Об утверждении государственной программы Тюменской области «Развитие транспортной инфраструктуры» до 2022 года.

3. ГОСТ 19281—89 Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 28.09.89 г. № 2972: дата введения 1991-01-01. М.: Стандартиформ, 2009. 16 с. Текст: непосредственный.

4. СНИП II-23-81*: Часть II Нормы проектирования: глава 23 Стальные конструкции: утверждены постановлением Госстроя СССР от 14 августа 1981 г. № 144. М.: ЦИТП, 1990. 96 с. Текст: непосредственный.

5. Пономарев В.П., Травуш В.И., Бондаренко В.М., Еремин К.И. О необходимости системного подхода к научным исследованиям в области комплексной безопасности и предотвращения аварий зданий и сооружений. Текст: электронный // Предотвращение аварий зданий и сооружений. 2012. С. 1—9. Электронный ресурс: <http://ramag.ru/pressa/bss-pse>.

6. Walnut B., Sertis D. Failures of pedestrian bridges. Bridges of the world. 2004. P. 69—77. (In Russian).

7. Ovchinnikov I.G., Dyadchenko G.S. Peshekhodnye mosty: konstrukciya, stroitel'stvo, arhitektura. [Pedestrian bridges: design, construction, architecture.]. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2005. 227 p.

8. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для машиностроительных вузов. М.: Наука, 1974. 544 с.

9. Куриленко Е.Ю., Огороднова Ю.В., Шантала И.В. Сопротивление материалов: учебное пособие по технической механике и сопротивлению материалов. Тюмень: РИО Тюм ГАСУ, 2014. 163 с.

10. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Регулирование динамических характеристик пролетных строений мостов в условиях изменяющегося воздействия временной подвижной нагрузки // Профессорский журнал. Серия: Технические науки. 2021. № 1 (4). С. 4—19.

11. Липанов И.Д., Молодкин И.А., Хомоненко А.Д. Разработка и перспективы информационной системы для мониторинга состояния мостов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2021. № 3 (27). С. 11—16.

12. Горохов Е.В., Васылев В.Н., Миронов А.Н., Щербина А.С. Напряженно-деформированное состояние металлической эллиптической балки // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. Вып. 4 (104). С. 65—68

13. Божков В.И., Дизенко С.И., Педан О.А., Хорошев А.А. Испытание моста через реку Сочи // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2017. № 3. С. 83—89.

14. Будник М.С., Иодчик А.А. Исследование влияния коррозии на напряженно-деформированное состояние стальных конструкций // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2020. Т. 1. № 1. С. 18—20.

15. Козлов В.А. Напряженно-деформированное состояние элементов мостовых конструкций с переменной толщиной стенок вдоль длины // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 4 (48). С. 71—82

16. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Ч. 1. Текст: электронный // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2017. Т. 4. № 4. <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/13TS417

17. Способ определения механических напряжений в конструкциях из ферромагнитных материалов / Пат. 2274840 РФ №2004132739/28; заявл. 10.11.2004; опубл. 20.04.2006, Бюл. № 11.

18. Новиков В.Ф., Устинов В.П., Радченко А.В., Муратов К.Р., Кулак С.М., Сорокина С.В. О контроле напряжений в сложно нагруженной стальной конструкции методом магнитоупругого размагничивания // Дефектоскопия. 2016. № 6. С. 71—76.

19. Kulak S.M., Novikov V.F., Baranov A.V. Control of Mechanical Stresses of High Pressure Container Walls by Magnetoelastic Method / Transport and Storage of Hydrocarbons IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. V.154. P.012004. DOI:10.1088/1757-899X/154/1/012004

20. Костин В.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П., Лоскутов В.Е., Лопатин В.В., Костин К.В. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 54—67.

21. Кулак С.М., Новиков В.Ф. Определение механических напряжений в стали методом магнитоупругого размагничивания // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 7. Т. 81. С. 56—59.

22. Кулак С.М., Новиков В.Ф. Контроль механических напряжений стальных конструкций и сооружений, испытывающих многоосные деформации // Контроль. Диагностика. 2016. № 5. С. 55—59.

23. Большаков В.Н., Горбаш В.Г., Оленович Т.В. Влияние механических напряжений на локальную остаточную намагниченность // Известия АН БССР. Серия: Физ. Тех. Наук. 1980. № 1. С. 109—112.

24. *Вонсовский С.В., Шур Я.С.* Ферромагнетизм. Москва—Ленинград: ГИТТЛ, 1948. 816 с.
25. *Устинов Ю.Ф., Семькин В.Н., Калинин Ю.И., Ульянов А.В.* Магнитоупругий метод контроля металлических конструкций землеройно-транспортных и грузоподъемных машин // *Механизация строительства*. 2009. № 4. С. 7—11.
26. *Новиков В.Ф., Важенин Ю.И., Бахарев М.С., Кулак С.М., Муратов К.Р.* Диагностика мест повышенной разрушаемости трубопровода. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2009. 200 с.
27. *Новиков В.Ф., Сорокина С.В., Муратов К.Р., Устинов В.П.* Учет временной стабильности остаточной намагниченности при диагностике механических напряжений магнитоупругим размагничиванием // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2015. Т. 81. № 4. С. 44—47.
28. *Novikov V.F., Kulak S.M., Parakhin A.S.* Testing Uniaxial Stresses in Steels with Allowance for Their Magnetoelastic Sensitivity // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 4. P. 310—319. [*Новиков В.Ф., Кулак С.М., Парахин А.С.* Контроль одноосных напряжений в сталях с учетом их магнитоупругой чувствительности // *Дефектоскопия*. 2021. № 4. С. 42—50.]
29. Способ контроля механических напряжений в стальных конструкциях магнитоупругим методом / Пат. 2764001 РФ №2021112651; заявл.29.04.2021; опубл. 12.01.2022. Бюл. № 2.
30. *Новиков В.Ф., Кулак С.М., Андреев В.О.* О контроле напряженно-деформированного состояния стальных мостовых конструкций (мост) методом магнитоупругого размагничивания // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2020. № 4. С. 3—7.
31. *Сандомирский С.Г.* Условия повышения достоверности двухпараметрового косвенного измерения свойств сталей по сравнению с однопараметровым / В сб. *Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов*. Сб. ст. 7-й Международной научно-технической конференции. Могилев, 2020. С. 170—176.