



Д. Н. ХАРЛАМОВ,
к. т. н., генеральный директор ООО «Трансстройпроект»;
В. И. ЗВИРЬ,
инженер-технолог ООО «Трансстройпроект»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ НАТЯЖЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БОЛТОВ ВО ФРИКЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СОБРАННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Основным фактором в определении усилия натяжения высокопрочных болтов является коэффициент закручивания. В действующем СТП-006-097, однако, не отображены требования по применению его значений при расчете крутящего момента и не регламентированы требования по контролю усилия натяжения в ранее смонтированных металлоконструкциях и тем более в эксплуатируемых. Практика эксплуатации болтовых соединений в стальных конструкциях мостов показывает, что значение коэффициента закручивания с течением времени только увеличивается, его снижения не происходит. В процессе эксплуатации высокопрочные болты во фрикционных соединениях практически не меняют своего напряженного состояния, созданного на стадии натяжения. В болте происходит лишь незначительное (около 5%) падение растягивающих напряжений за счет их релаксации.

ВВЕДЕНИЕ

Метод натяжения высокопрочных болтов по расчетному крутящему моменту ($M_{кр}$) с помощью калиброванных динамометрических ключей является основным в России. Рассчитывают исходя из заданного усилия натяжения $P = 0,7 R_{min}$, где: R_{min} — предельно допустимая нагрузка для высокопрочных болтов; $M_{кр} = P \cdot d \cdot K_3$; d — диаметр болта; K_3 — коэффициент закручивания. За рубежом используют термин «коэффициент трения» или «коэффициент скольжения».

Входящий в расчет крутящего момента коэффициент закручивания, как правило, находится в широком диапазоне. По действующим отечественным стандартам он составляет $K_3 = 0,14-0,20$ для черных болтов без покрытия и $K_3 = 0,11-0,20$ для болтов с защитным покрытием.

Если выполнить расчет $M_{кр}$ по нормативным технологическим стандартам СТП-006-97, то получим следующий результат.

Например, для болтов черных М22 диаметр $d=22$ мм усилие натяжения $P=0,7 \cdot R_{пр}$, $P=0,7 \cdot 32,0 = 22,4$ тс.

Расчетный коэффициент закручивания $K_3 = 0,175$:

$$M_{кр} = P \cdot d \cdot K_3 = 22,4 \cdot 22 \cdot 0,175 = 84 \text{ кг} \cdot \text{м}$$

С учетом 10% и 20% перенатяжения $M_{кр}$ соответственно составит:

$$\begin{aligned} M_{кр 10\%} &= 92,2 \text{ кг} \cdot \text{м}; \\ M_{кр 20\%} &= 100,8 \text{ кг} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Если в используемой партии будут установлены в соединении болты с $K_3 = 0,14$, то усилие натяжения в них составит с учетом перенатяжения соответственно:

$$P_{0,14} = \frac{M_{кр10\%}}{d \cdot K_3} = \frac{92,2}{22 \cdot 0,14} = 30 \text{ тс};$$

$$P_{0,14} = \frac{M_{кр20\%}}{d \cdot K_3} = \frac{100,8}{22 \cdot 0,14} = 33 \text{ тс};$$

На примере видно, что с учетом 20% перенатяжения создаем в болтах растягивающую нагрузку, превышающую допустимую, а для болтов с защитным покрытием, где $K_3 = 0,11$, она будет чрезмерной — разрушающей ($P = 41,6$ тс).

Однако, если в используемой партии будут установлены болты с $K_3 = 0,20$, то при номинальном расчетном крутящем моменте $M_{кр} = 84$ соответственно получим недотяжение болта в соединении:

$$P_{0,2} = \frac{84,0}{22 \cdot 0,2} = 19 \text{ тс.}$$

Это на 16% ниже расчетного усилия натяжения, что приведет к снижению несущей способности пролетного строения.

Практика применения черных болтов показывает, что значения коэффициента закручивания возрастают во времени их работы в соединении и могут составить $K_3 = 0,22-0,23$ в зависимости от срока их установки и среды эксплуатации.

Приведенный пример показывает, что определяющую роль в расчете крутящего момента играют значения коэффициента закручивания. В реальных условиях на него влияет большое количество факторов, поэтому фактическое значение может меняться непредсказуемо.

Из приведенного примера натяжения высокопрочных болтов видно, что в действующем СТП-006-097 не отображены требования по применению значений коэффициента закручивания при расчете крутящего момента и не регламентированы требования по контролю усилия натяжения в ранее смонтированных металлоконструкциях и тем более в эксплуатируемых.

Разработчик СТП-006-097 рекомендует при монтаже металлоконструкций использовать высокопрочные болты с узким полем допуска значения коэффициента закручивания — не более 0,04. Оптимальным является поле допуска 0,03. Например, для черных болтов $K_3 = 0,16-0,18$, с защитным покрытием $K_3 = 0,14-0,16$.

Обоснование применения болтокомплектов с узким полем допуска коэффициентом закручивания не более 0,4 изложено в «Методике определения коэффициента закручивания (K_3^p) для черных болтов и с защитным покрытием», раздел 2.

Для контроля усилия натяжения высокопрочных болтов необходим своевременный контроль крутящего момента в процессе монтажа металлоконструкций и регистрация его в журналах выполнения работ по подготовке болтокомплектов, контактных поверхностей и работ по постановке болтов в соединениях, а также контроль ведения этих журналов. Этот объем требований является необходимым и достаточным условием, обеспечивающим качество болтового фрикционного соединения.

При разработке технологических регламентов на сборку и сварку металлоконструкций пролетных строений необходимо обосновывать сроки контроля усилия натяжения (крутящего момента) высокопрочных болтов. Согласно требований п. 5.7 СТП-006-97, период времени от смазки резьбы метизов до их постановки не должен превышать 10 суток для черных болтов, сроки контроля должны соответствовать этому периоду. Для болтов с защитным покрытием требованиями изложены в СТО заводов-изготовителей высокопрочных метизов.

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ УСИЛИЯ НАТЯЖЕНИЯ

Методика проверки усилия натяжения высокопрочных болтов черных и с защитным покрытием за длительный период их постановки в соединение разработана с учетом требования надежности работы фрикционных соединений, с учетом возможных расчетных и практических отклонений значений коэффициентов закручивания.

Необходимый объем проверки усилия натяжения на рассматриваемом объекте определяет заказчик.

В случаях вынужденного (не согласованного с заказчиком объема) проведения контроля усилия натяжения высокопрочных болтов после длительного времени их натяжения (более 10 суток для черных) в смонтированных соединениях необходимо выполнить контроль не менее чем в трех сечениях по пяти болтам в каждом из узлов сечения.

Проверку следует проводить при температурах, соответствующих климатическому календарному периоду натяжения при монтаже металлоконструкций пролетного строения.

Динамометрический ключ должен быть оттарирован на проектный крутящий момент в соответствии с заданным усилием в чертежах КМ. На шкалу (стекло) индикатора следует нанести риску на расчетное усилие и с перенатяжением на 20% от проектного. Для черных болтов принять расчетный коэффициент закручивания $K_3 = 0,18$, а для болтов с защитным покрытием определять его исходя из данных сертификата или СТО завода-изготовителя. Для болтокомплектов, установленных в соединение не ранее 2016 года, принять расчетный $K_3 = 0,15$.

Оттарированным ключом следует проверить фактический крутящий момент на контролируемых болтах в испытуемом соединении. На них предварительно нанести маркировочные метки (порядковые номера).

Если полученные значения фактического усилия натяжения находятся в интервале номинальных проектных значений и не превышают 20%, то это соединение соответствует СП 46.13330-2011 и полученные результаты испытаний распространяются на все пролетное строение. В таком случае дальнейший контроль не требуется.

Если показания стрелки индикатора превышают значения установленного крутящего момента с перенатя-

жением 20% или не доходят до расчетного крутящего момента, то это означает, что болт недотянут. В таком случае следует нанести на стекло метки фактических крутящих моментов, соответствующих размеченным болтам, и продолжить работу по контролю.

Усилие крутящего момента нужно прикладывать только через гайку. Крутящий момент страгивания гайки не учитывается.

На тарировочном стенде следует определить вес груза G_{min} и G_{max} , соответствующий повороту головки ключа до нанесенных меток на индикаторе по значениям минимального и максимального поворота. Для расчета принимаются метки, превышающие перенатяжение 20% (третья метка на индикаторе), метки недотянутых болтов в расчет не принимаются.

Определить фактический крутящий момент согласно полученным значениям G_{min} и G_{max} по формуле:

$$M_{кр} = M_{гр} + M_{кл} = GL + q L_k,$$

где: G — вес соответствующих грузов G_{min} и G_{max} , кг; L — расстояние от места подвеса груза на ключе до оси оправки, или болта, м; q — собственная масса ключа, кг; L_k — расстояние от центра тяжести ключа до оси оправки или болта, м.

Взамен демонтированных болтов следует установить новые на проектное усилие. Демонтировать намеченные болты в контролируемом соединении и определить фактический коэффициент закручивания K_ϕ с помощью тарировочного калибратора.

На период между демонтажом болтов и контролем коэффициента закручивания не допускается появление конденсата и загрязнения резьбы болтов и гаек, а временной интервал по этой операции необходимо сводить к минимуму. Состояние резьбы должно быть исходным — без дополнительной смазки. Точность оценки коэффициента закручивания — 0,01.

Фактическое усилие натяжения болтов в контролируемом соединении рассчитывается исходя из полученных значений фактического крутящего момента $M_{кр min}$ и $M_{кр max}$ и соответствующих им коэффициентов закручивания K_ϕ по формуле:

$$P_\phi = M_{кр} / K_\phi d.$$

Если полученные фактические значения выходят за пределы номинальных проектных значений или

превышают 20%, то необходимо проверить 100% установленных высокопрочных болтов в пролетном строении.

Для расчета крутящего момента $M_{\text{ф кр}}$ принимается среднее значение $K_{\text{ф рас}}$ из полученных фактических коэффициентов закручивания на калибраторе.

$$M_{\text{ф кр}} = P K_{\text{ф рас}} d,$$

где: P — номинальное проектное усилие натяжения, кг; $K_{\text{ф рас}}$ — определяют из полученных данных на калибраторе, значения которых должны находиться в поле допуска 0,04; d — диаметр болта, м.

Если фактические значения выходят за поле допуска, то расчетное значение коэффициента закручивания смещают в сторону больших значений, чтобы уменьшить риски ослабления усилия натяжения.

Калибровочный ключ КМШ-1400 тарируют по $M_{\text{ф кр}} + 20\%$.

В процессе проверки заново протарированным ключом ослабленные болты дотягивают до $M_{\text{ф кр}}$.

Перетянутые болты, превышающие 20% $M_{\text{ф кр}}$, удаляют и устанавливают новые.

Допустимое количество болтов, не соответствующих нормам усилия натяжения или не установленных, которые можно оставить в соединении, необходимо согласовать с проектной организацией.

Наличие краски или ржавчины на поверхности болтокомплектов не искажают контролируемые показатели, предварительной очистки не требуется. За многолетнюю практику обследования высокопрочных болтов в стальных конструкциях мостов не выявлено следов коррозии и загрязнений контактных поверхностей. В процессе контроля болтов гайка смещается в сторону чистой поверхности резьбы.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЗАКРУЧИВАНИЯ

При сборке фрикционных соединений на высокопрочных болтах стальных пролетных строений перед технической службой строительной организации ставится задача рассчитать крутящий момент натяжения болтов $M_{\text{кр}}$.

В проектной документации должны быть основные расчетно-конструктивные и технологические параметры:

ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЗАКРУЧИВАНИЯ K_3^z

Для черных болтов K_3^z определяют по данным сертификатов завода-изготовителя как среднее арифметическое коэффициентов закручивания поставленных партий высокопрочных болтов (при условии, что были заказаны высокопрочные болтокомплекты в диапазоне $K = 0,16-0,19$).

Следует дополнить, что при заключении контракта на поставку высокопрочного крепежа заказчик обязан согласовать с поставщиком диапазон K_3 для всех поставляемых партий с предельным отклонением не более 0,04 (оптимальным $-0,03$).

Те партии болтов, в которых значения K_3 выходят за принятые предельные отклонения, к постановке в соединения не допускаются.

В данном примере расчетным коэффициентом закручивания принят $K_3^z = 0,175$.

В случаях применения высокопрочных болтокомплектов с защитным цинк-ламельным покрытием расчетный коэффициент закручивания составит $K_3^z = 0,15$, из условия поставки в диапазоне $K_3 = 0,13-0,17$.

Целесообразно дополнительно проверять фактический K_3 от каждой партии после их подготовки до постановки в соединение в лаборатории строительной организации. Для этого рекомендуется использовать тарировочный калибратор «Skidmore Wilhelm MZ 100».

■ коэффициент трения по контактным поверхностям в соединении μ ;

■ диаметр высокопрочного болта;

■ расчетное усилие натяжения каждого высокопрочного болта P .

От завода-поставщика высокопрочного крепежа поступают сертификаты качества на болтокомплекты с указанием коэффициента закручивания K_3 на каждую конкретную партию болтов.

Из вышеприведенных данных технической службе необходимо определить расчетный крутящий момент:

$$M_{\text{кр}} = P \cdot d \cdot K_3^z,$$

где: $M_{\text{кр}}$ — расчетный крутящий момент, приложенный к гайке (кгс·м); P — нормативное усилие натя-

жения болта (дано в проектной документации); d — диаметр болта (задан в проектной документации); K_3^p — расчетный коэффициент закручивания, который необходимо определить.

Для определения K_3^p необходимо руководствоваться данными сертификатов качества заводов-поставщиков метизов.

Значение K_3^p оценивается как среднеарифметическое в диапазоне максимальных и минимальных значений для всех партий болтов, указанных в сертификатах.

Диапазон отклонений должен составлять не более 0,04, то есть разница $K_3^p - K_{min}^p \leq 0,02$ и $K_{max}^p - K_3^p \leq 0,02$. Эта разница в 0,02 составляет не более 15%.

Верхний интервал отклонений между максимальными и расчетными значениями $K_{max}^p - K_3^p$ компенсируют расчетные коэффициенты m_{bh} и m , принятые в формулах расчета усилия натяжения и количества болтов, по СП 35.13330-2011:

■ $m_{bh} = 0,95$ учитывает условия работы высокопрочного болта при контроле натяжения по крутяще-

му моменту в формуле (8.106, СП 35.13330-2011)

$$P = R_{bh} A_{bh} m_{bh};$$

■ $m = 0,9$ учитывает условия работы болта в пролетном строении в формуле (8.107, СП 35.13330-2011)

$$n = \frac{N}{m \cdot Q_{bh} \cdot n_s}$$

при расчете количества болтов в соединении.

Нижний интервал отклонений между расчетным и минимальными значениями $K_3^p - K_{min}^p$ регламентируется расчетным коэффициентом $K = 0,7$, то есть $R_{bh} = 0,7 \cdot R_{min}$ (8.14 СП 35.13330-2011), определяющим допустимое временное сопротивление относительно минимального значения временного сопротивления болта.

Предусмотренный в расчетах запас прочности в 30% перераспределяется:

- 10% на повышение крутящего момента при постановке в соединении с учетом перенатяжения болта;
- 15% на допустимое отклонение фактического коэффициента закручивания от расчетных значений в сторону минимального значения ($K_3^p - K_{min}^p$). ■

