

*prove the algorithm to determine the fuel consumption by the criterion of maximum use of fuel with low prices in countries international route passing vehicles.*

**Key words: trucking, fuel consumption and cost, international road transport, planning transportation costs**

УДК 621.833

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СТАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ**

**А. В. Говоруха, Ю. А. Градыский, кандидаты технических наук  
Харьковский национальный технический университет  
сельского хозяйства имени Петра Василенко  
e-mail: kafDTSLK@gmail.com**

**Аннотация.** Целью данной статьи является установление основных закономерностей усталостного разрушения высокопрочных болтов на примере строительных стальных конструкций, где они широко применяются.

Исследование выполнено на примере разрушения высокопрочных болтов подкрановых балок коробчатого сечения. Балки опираются на колонны с помощью торцевых поясов, которые являются элементами сдвигостойкого соединения на высокопрочных болтах. Узлы крепления имеют определенную жесткость и, передавая изгибающие моменты балок на колонны, создают условия для появления переменных растягивающих усилий в направлении осей болтов. Приведены результаты анализ материала болтов на содержание отдельных химических элементов, определена твердость, вырезанные образцы опробованы на растяжение и ударный изгиб, изучена микроструктура. Определяли твердость по Виккерсу, временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, ударную вязкость, долю волокна в изломе. Приведены фрактограммы изломов в зоне многоциклового усталости. Оценен размах напряжений, действующих в болтах при циклических перегрузках. Изучен механизм усталостного разрушения высокопрочных болтов и разработаны конструкторско-технологические меры его предотвращения.

**Ключевые слова:** *пластичность, критерий, материал, трещина, параметр*

© А. В. Говоруха, Ю. А. Градыский, 2017

**Постановка проблемы.** Обычно в строительных стальных конструкциях фрикционные соединения на высокопрочных болтах характеризуются высокой надежностью. Усилия в таких соединениях передаются на элементы равномерно через контактные поверхности. В отличие от сварных соединений, в них отсутствуют резкие концентраторы напряжений, отсутствуют остаточные напряжения и деформации, микроструктура и механические свойства металла не подвергаются локальным изменениям, исключены горячие, холодные и слоистые трещины.

**Анализ последних исследований.** В работе [1] проанализированы расчетные модели типовых фланцевых соединений и сопоставлены требования нормативных документов к таким соединениям. В работе [2] приведены различные методики расчета фланцевых соединений металлических конструкций: приближенная, уточненная (при работе фланца в упругой стадии деформирования), уточненная (с учетом развития пластических деформаций) и инженерная методика и приведены примеры их использования.

**Целью исследования** является установление основных закономерностей усталостного разрушения высокопрочных болтов на примере строительных стальных конструкций, где они широко применяются.

**Результаты исследования.** Установлено, что высокопрочные болты при циклическом растяжении быстро разрушаются, если они не затянуты или затянуты слабо. Однако усталостная прочность резко повышается при натяжении болтов в пределах их расчетного сопротивления. Положительная роль предварительного натяжения обусловлена тем, что большая часть внешней переменной нагрузки воспринимается действующими в соединении контактными усилиями сжатия. При этом повышается коэффициент асимметрии цикла и уменьшается амплитуда действующих на болты циклических напряжений.

Надежность соединений на высокопрочных болтах может оказаться недостаточно высокой, если на болты в направлении их осей действует циклическое растяжение. Причиной возможных отказов может служить низкая усталостная прочность болтов. В качестве примера рассмотрим усталостные повреждения соединений на высокопрочных болтах. При обследовании металлических конструкций цеха после 10 лет эксплуатации в опорных узлах крепления подкрановых балок к колоннам по ряду на отметке 10 м было обнаружено большое количество высокопрочных болтов, разрушившихся от потери выносливости. Подкрановые балки коробчатого сечения работают круглосуточно в тяжелом

режиме. Балки высотой 2500 мм с расстоянием между вертикальными стенками 1650 мм и шириной поясов 1930 мм опираются на колонны с помощью торцевых поясов, которые являются элементами сдвигостойкого соединения на болтах (рис. 1).

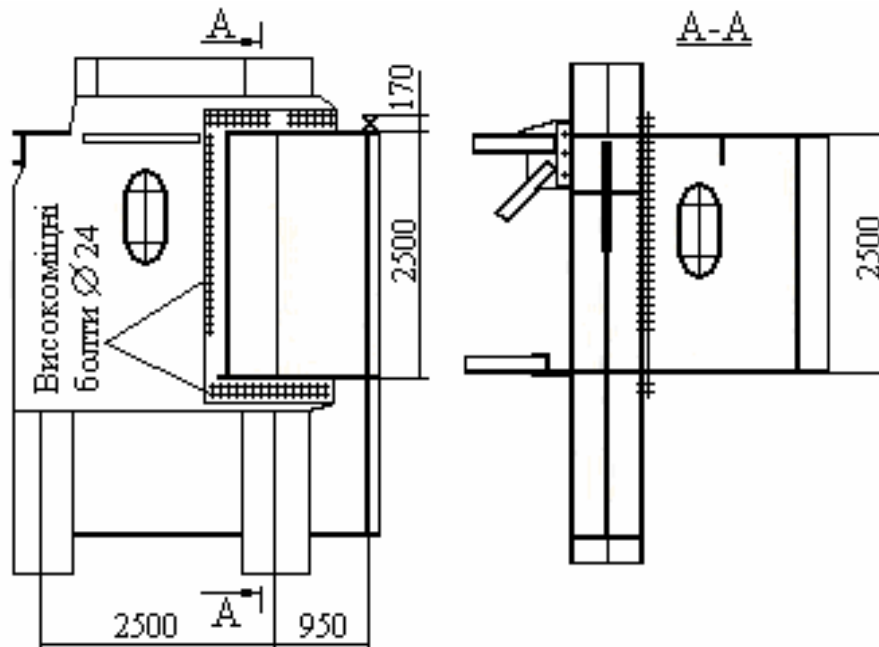


Рис. 1. Фронтальная (а) и боковая (б) проекции опорного узла.

Такие соединения можно назвать фланцевыми лишь условно: в основном они передают на колонны нагрузки от моментов кручения и вертикальные усилия. При проектировании предполагалось, что в отношении изгибающих моментов балок опорные узлы с торцевыми поясами толщиной 25 мм будут иметь малую жесткость и работать как шарнирные. Однако разрушение болтов показывает, что это не так. Узлы имеют определенную жесткость и, передавая изгибающие моменты балок на колонны, создают условия для появления переменных растягивающих усилий в направлении осей болтов.

Шаг колонн по ряду – 36 м. Для уменьшения поперечного сечения балок и действующих в них усилий, а также снижения опорных реакций на колоннах в средней части пролета на расстояниях 24 м и 12 м от колонн балки опираются на вертикальные стойки, что придает им характер двупролетных неразрезных. В результате, знак момента на опорных узлах может меняться в зависимости от положения крана в пролете. Вместе с тем, при ремонте вертикальную стойку убирали, и подкрановая балка работала как однопролетная с большим увеличением момента изгиба.

В каждом торцевой поясе высокопрочные болты М24 в количестве 72 шт. располагаются в два ряда вдоль верхнего и нижнего поясов балки и в один ряд вдоль ее вертикальной стенки (рис. 1). Согласно проекту, болты были затянуты усилием 247 кН. Из 432 болтов в шести опорных узлах на момент обследования оказался разрушенным 71 болт. Наибольшее количество разрушений зафиксировано в первом ряду над верхним поясом балки и в верхней части вертикального ряда, что свидетельствует о деформационной податливости торцевого пояса (так называемый рычажный эффект). И только на оси 1 наблюдали разрушение болтов по внутреннему ряду у нижнего пояса балки.

Для определения качества материала и изучения характера разрушения использовали восемь разрушенных болтов - болты М24×125 мм, с накатной резьбой (под условными номерами). Был выполнен анализ материала болтов на содержание отдельных химических элементов, определена твердость, вырезанные образцы опробованы на растяжение и ударный изгиб, изучена микроструктура. А именно, определяли твердость по Виккерсу, временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, ударную вязкость, долю волокна в изломе. Результаты испытаний показывают, что качество материала болтов удовлетворяет требованиям МРТУ 14-6-8-66, а также ГОСТ 22356-94. Микроструктура материала болтов однородна по сечению и состоит из продуктов отпуска мартенсита.

Представленные болты имели разрушения или по резьбе под гайкой (№ 1, 2, 5, 8), или по сбегу резьбы (№ 3, 4, 6, 7). Излом болтов № 4, 6, 7 и 8 был покрыт пятнами коррозии в разной степени. Болты № 1, 2, 3 и 5 следов коррозии в изломе не имели и, очевидно, разрушились последними. Визуально во всех изломах обнаружены три характерные зоны – см. рис. 2.



Рис. 2. Характерные изломы болтов: №1 (а), №2 (б), №4 (в).

Первая – стабильного роста усталостной трещины – имеет светлую гладкую поверхность с небольшой шероховатостью и

макрополосы, отражающие различные положения фронта растущей трещины; вторая – зона малоциклового усталости – матовую поверхность. Третья – зона долома с более грубым рельефом – содержит расположенные веером выступы и бороздки, направленные вдоль распространения трещины.

Если связь степени коррозии изломов с последовательностью разрушения болтов справедлива, то с увеличением срока службы болтов имеется тенденция к уменьшению длины зоны многоциклового усталости и увеличению зоны малоциклового усталости. Это могло быть следствием повышения переменных усилий в болтах, оставшихся при разрушении соседних.

Более подробно изломы изучали с помощью электронного сканирующего микроскопа при увеличении в 20–3000 раз. Установлено, что в зоне стабильного роста трещины преобладает ровная поверхность с низким рельефом в виде мелких гребней (рис. 3, а), четко заметные микрополоски отсутствуют. На поверхности имеется значительное количество мелких вторичных трещин (рис. 3, б). В редких кольцевых участках, выявленных визуально (на рис. 3, а отмечены стрелками), присутствует более грубый рельеф со следами вязкого ямочного разрушения (рис. 3, в). Нет сомнений, что эти участки образовались в болтах при значительных циклических перегрузках.

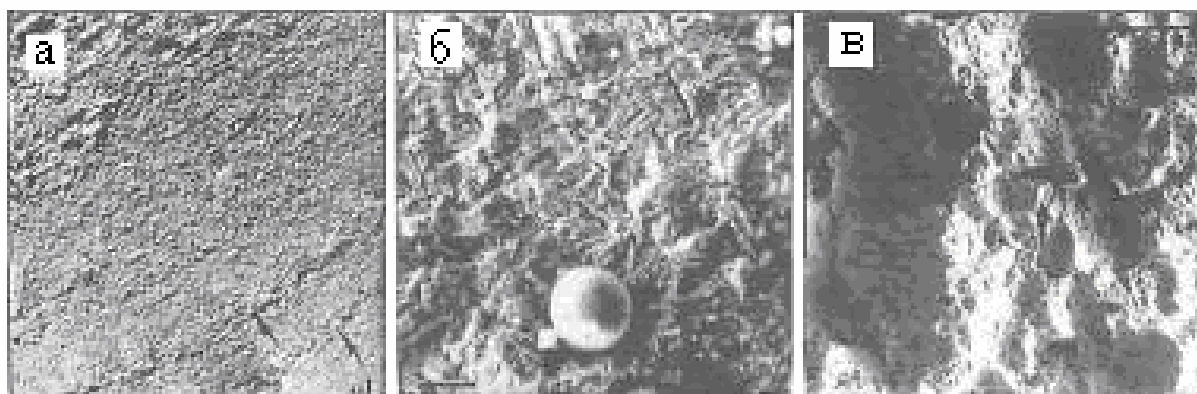


Рис. 3. Фрактограммы изломов в зоне многоциклового усталости.

Переход в зону малоциклового усталости связан с развитием регулярного рельефа. Он образован бороздками и выступлениями небольшой длины (рис. 4, а, б), расположенными перпендикулярно к направлению роста трещины.

При большом увеличении оказывается участие в образовании излома вязкого ямочного разрушения и в некоторых случаях – хрупкого разрушения сколом (рис. 4, в).

Характер изломов в малоциклового зоне и на участках перегрузок в зоне стабильного роста трещины во многом совпадает.

По мере продвижения трещины малоциклового усталости глубина рельефа поверхности разрушения увеличивается. В заключительной фазе циклического разрушения излом приобретает слоистого характера. Он состоит из протяженных террас и более коротких сбросов (рис. 4, г). Поверхность террас совпадает с плоскостью поперечного сечения болтов, сбросы перпендикулярны к ней. Такой излом образуется с участием ямочного механизма. Подобное разрушение по плоскостям расслоение при малоциклового усталости наблюдали для высокопрочной стали в работах [3, 4].

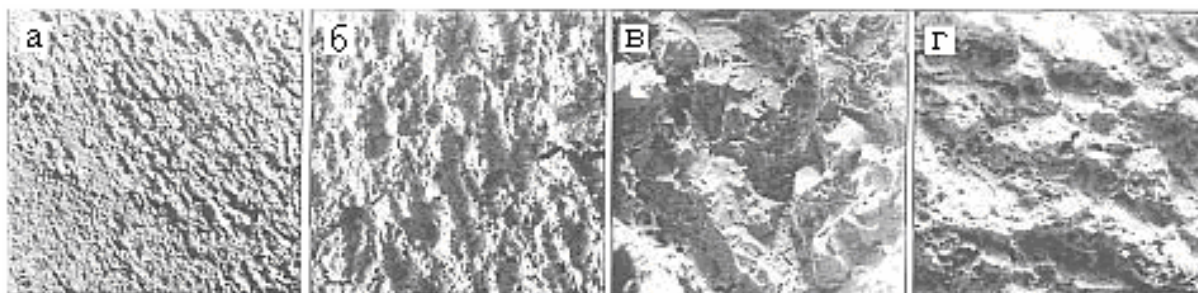


Рис. 4. Фрактограммы изломов в зоне малоциклового усталости: а –  $\times 20$ ; б –  $\times 55$ ; в – на участке хрупкого разрушения,  $\times 500$ ; г – на участке слоистого разрушения,  $\times 200$ .

В зоне долома для большинства болтов преобладал вязкий ямочный характер разрушения. Однако наблюдались также участки с хрупким транскристаллическим разрушением. Полученные результаты позволили, в частности, примерно оценить размах напряжений  $\Delta\sigma_R$ , действующих в болтах при циклических перегрузках. Использовали выражение, полученное А. Г. Примаковым:

$$\Delta K_i = \Delta\sigma_R \sqrt{\pi l_S}, \quad (1)$$

где:  $\Delta K_i$  – размах коэффициента интенсивности напряжений;  $l_S$  – длина трещины.

Используя (1) приняли, что продвижение трещины с многоциклового зоны в малоциклового происходит при  $\Delta K_i = 1000 \text{ Н/мм}^{3/2}$ . Длину многоциклового трещины  $l_S$  приняли по таблице, добавив фактическую высоту профиля резьбы 1,9 мм. С помощью формулы (1) определили, что для исследованных болтов  $\Delta\sigma_R$  находится в пределах 175,4... 231,2 МПа.

**Вывод.** На основании проведенного обследования признано целесообразным заменить все ранее установленные болты новыми и ввести систематический контроль состояния болтовых соединений. Возможным направлением исследования является анализ влияния увеличением толщины торцевых поясов с целью

уменьшения неравномерности нагрузки болтов переменными усилиями и «рычажного эффекта». Однако существует опасность, что это увеличит жесткость опор и приведет к еще большему повышению действующих в болтах циклических напряжений.

### Список литературы

1. Перельмутер А. В., Криксунов Е. З., Юрченко В. В. Проекування болтових фланцевих з'єднань відповідно до Eurocode та вітчизняних норм: узгодженість та протиріччя // Металеві конструкції. 2010. Т. 16. №2. С. 93—104.
2. Алпатов В. Ю., Соловьев А. В., Холопов И. С. К вопросу расчета фланцевых соединений на прочность при знакопеременной эпюре напряжений // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 2. С. 26—30.
3. Романов О. Н., Зима Ю. В., Ткачев В. И., Крипьякевич Р. И. Исследование кинетики малоциклового усталости сталей в атмосфере водорода и в вакууме // Физико-химическая механика материалов. Т. 8. 1972. № 3. 284 с.
4. Иванова В. С., Ботвина Л. Р., Маслов Л. И. Фрактографические особенности усталостных изломов и вязкость разрушения // Усталость и вязкость разрушения металлов. Москва. Наука. 1974. С. 79—108.

### References

1. Perel'muter A. V. Kriksunov E. Z., Jurchenko V. V. (2010). Proektuvannja boltovih flancevih zednan' vidpovidno do Eurocode ta vitchiznjanih norm: uzgodzhenist' ta protirichchja [Design of flange bolt connections according to the eurocode and ukrainian codes: coordination and contradictions]. Metal constructions. 2. 93-104.
2. Alpatov V. Ju., Solov'ev A. V., Holopov I. S. (2009) K voprosu rascheta flancevyh soedinenij na prochnost' pri znakoperemennoj jepjure naprjazhenij [On the question of the calculation of flange connections on the strength of the alternating stress diagram]. Industrial and civil construction. 2. 26-30.
3. Romaniv O. N., Zima Ju. V., Tkachev V. I., Kripjakevich R. I. (1972). Issledovanie kinetiki malociklovoj ustalosti stalej v atmosfere vodoroda i v vakuume [Kinetics study cycle fatigue steels in a hydrogen atmosphere and in vacuum]. Physico-chemical mechanics of materials. 8. 3. 284.
4. Ivanova V. S., Botvina L. R., Maslov L. I. (1974). Fraktograficheskie osobennosti ustalostnyh izlomov i vjazkost' razrushenija [Fractal graphics features of fatigue fracture and fracture toughness]. Fatigue and fracture of metals viscosity. Moscow. Nauka. 79-108.

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

**О. В. Говоруха, Ю. О. Градиський**

**Анотація.** Метою даної статті є встановлення основних закономірностей втомного руйнування високоміцних болтів на прикладі будівельних сталевих конструкцій, де вони широко застосовуються.

Дослідження виконано на прикладі руйнування високоміцних болтів підкранових балок коробчастого перетину. Балки спираються на колони с допомогою торцевих поясів, які є

елементами здвигостійкого з'єднання на високоміцних болтах. Узли кріплення мають певну жорсткість і, передаючи згинальні моменти балок на колони, створюють умови для появи змінних розтягуючих зусиль в напрямку осей болтів. Наведено результати аналіз матеріалу болтів на утримання окремих хімічних елементів, визначена твердість, вирізані зразки випробувані на розтяг і ударний вигин, вивчена мікроструктура. Визначали твердість по Віккерсу, тимчасовий опір, межа плинності, відносне подовження, відносне звуження, ударну в'язкість, частку волокна в зламі. Наведено фрактограми зламів в зоні багаточислової втоми. Оцінений розмах напружень, що діють в болтах при циклічних перевантаженнях. Вивчено механізм втомного руйнування високоміцних болтів і розроблені конструкторсько-технологічні заходи для його запобігання.

**Ключові слова:** *пластичність, критерій, матеріал, тріщина, параметр*

## **ENSURING THE RELIABILITY OF STEEL BUILDING STRUCTURES UNDER CYCLIC LOADING**

**O. V. Hovorukha, Yu. A. Gradysky**

**Abstract.** *The purpose of this article is to establish the basic laws of fatigue fracture of high-strength bolts on the example of the construction of steel structures, where they are widely used.*

*A study carried out by the example of the destruction of high-strength bolts crane box beams. The beams rest on the column c using end zones, which are elements of connections (which is resistant to shear) on high-strength bolts. Units have a certain rigidity and, passing the bending moments of beams on columns, create conditions for the emergence of variable tensile forces in the direction of the bolt axis. The results of analysis of the bolts of material on the content of individual chemical elements, determined the hardness of cut samples tested on tensile and impact strength, microstructure studied. Vickers hardness was measured, tensile strength, yield strength, elongation, reduction of area, impact toughness, fracture in the fibre fraction. Results fraktogramy fractures in the area of high-cycle fatigue. Estimate the extent of stresses acting in the bolts under cyclic overload. The mechanism of fatigue fracture of high-strength bolts and developed design and technological measures to prevent it.*

**Key words:** *plasticity, criteria, material, crack, option*