

$$x = \left[R^2 + (h - z)^2 \right]^{1/2}, \quad (15)$$

$$p_{\max} = \Delta P \cdot (R_0)^{-\mu\sigma}, \quad (16)$$

где ΔP — максимальное избыточное давление в объеме при взрывном горении газозвоздушной смеси, $R_0 = R/r_{СКВ}$ — безразмерное расстояние.

Задавшись R , по зависимости (16) определяем p_{\max} , а затем по известной Δ_k из уравнения (14) находим z , а из уравнения (15) — величину x , т.е. координаты зоны разрушения структуры в радиусе R . Последовательно увеличивая R , можно построить график зоны разрушения структуры.

Величину Δ_k приходится определять экспериментально, путем взрыва в шурфе и замера глубинными реперами пористости, максимальной глубины разрушения структуры и уплотнения z_{\max} .

Выводы

1. Проведенные исследования позволили разработать аналитическую зависимость динамического деформирования дисперсных грунтов, которая учитывает основные свойства и поведение грунтов при различных режимах нагружения.

2. Разработан полуэмпирический метод определения зон разрушения структуры грунта при взрывных воздействиях: в зависимости от величины сжимаемости компонентов грунта возможно различное распределение напряжений между скелетом грунта и поровой водой.

References

1. *Ivanov P.L.* The compression of bad connected grounds by explosions. — М.: Depths, 1983. — 230 p.
2. *Lyakhov G.M.* Bases of a explosion dynamics in grounds and liquid environments. — М.: Science, 1984. — 216 p.

УДК 622.673.1

Повышение прочности конструкций горных машин, находящихся в длительной эксплуатации

The strength increasing of constructions of mining machines that are in long term operation

Мехтиев А.Д., Югай В.В., Эйрих В.И., Кшалова А.А., Алимов М.Ш.

Карагандинский государственный технический университет (E-mail: barton.kz@mail.ru)

Шаршаған қирату қауіпті аймақтарда апатты жағдайда негізгі есеп тежегіш құрылғысын күшейту бойынша ұсыныстарды өңдеу болып табылады. Оған ANSYS бағдарламасын қолдану арқылы қол жеткізуге болады және де бұл ұзақ мерзім бойы ШПМ пайдалану, сондай-ақ қойылған есептің шешімі беріктік және сенімділіктің көрсеткіштерін сақтауға мүмкіндік береді. Тежегіш құрылғы сұлбасында негізгі даму процестері үлгіленген. Конструкциядағы жарықшақтардың ұлғаюының сипаты Fatigue Module ANSYS бағдарламасында жасалған. Конструкцияларды күшейту әдісін, ары қарай оның қирауына жол бермейтін әдісті, қарастырып шықтық.

The main aim is development of recommendations for strengthening the brake construction in accident dangerous areas of fatigue destruction. This allows to keep the HBM strength and reliability parameters during the exploitation period. Solving of the set problem is provided by using the ANSYS program's abilities. The main processes of fatigue cracks development in the «critical points» of the braking system construction are modeled. The «accident dangerous» areas of fatigue destructions and the character of cracks development in the construction are detected with a help of the ANSYS Fatigue Module. The construction strengthening method, which eliminates the possibility of the further destruction, is considered.

Обеспечение надежности работы тормозного устройства (ТУ) шахтной подъемной машины (ШПМ) требует научного поиска рационального варианта конструкции, способной длительное время противостоять усталостному разрушению и сохранять свою работоспособность на протяжении дли-

тельного срока эксплуатации. Программа ANSYS позволяет моделирование напряженно-деформированного состояния элементов ТУ и замену громоздких натуральных испытаний экспериментальных образцов. Путем моделирования удастся найти оптимальный вариант усиленной конструкции с более высокими параметрами прочности и надежности, а также разработать практические рекомендации для восстановления и проведения ремонта ТУ ШПМ. Применение методики выбора рационального вида усиления конструкции в «аварийно-опасных зонах» возникновения усталостных трещин, в зависимости от параметров эксплуатационного нагружения, позволяет продлить срок эксплуатации ТУ. При помощи элементов усиления можно локализовать и остановить рост усталостных трещин в элементах ТУ.

Обеспечение надежности работы ТУ шахтной подъемной машины становится все более актуальным, так как нагрузка резко возрастает в связи с увеличением добычи полезных ископаемых. Увеличение нагрузки напрямую влияет на износ и отказы элементов тормоза. Важным фактором является значительный срок эксплуатации подъемных установок, который составляет в среднем 30...40 лет [1]. В процессе подъема или спуска груза необходимо учитывать резко переменный характер нагрузки на тормозное устройство. Значительные пиковые нагрузки на элементы тормоза возникают при резких остановках органа навивки каната в момент аварийных ситуаций. Немаловажное значение имеет количество циклов работы тормоза в течение суток, которое составляет от 500 до 1500 «спусков и подъемов» [1]. Эти факторы способствуют развитию в элементах тормозного устройства усталостных трещин, которые в процессе эксплуатации могут привести к разрушению конструкции. Прогнозировать образование и развитие таких повреждений сложно, единственным наиболее доступным и надежным методом является дефектоскопия. По данным, приведенным в [2], усталостные трещины образуются в месте проушин, где крепятся втулки тормозных тяг. После выявления повреждений в элементах тормозной балки необходимо произвести ее ремонт или замену. Замена балки сопряжена со значительными экономическими и трудовыми затратами, так как требует разборки коренных частей подъемной машины, а также вызывает её простой. Ремонт сводится к разделке и завариванию трещины электродуговой сваркой. Такой способ не обеспечивает надежной работы конструкции, так как в процессе эксплуатации возможно продолжение развития трещин.

Учитывая эти обстоятельства, необходимо повысить прочность тормозной балки путем усиления ее конструкции в «слабых местах», где присутствуют концентраторы напряжений и со временем образуются усталостные трещины. Усиление ТУ ШПМ позволяет существенно повысить их долговечность.

Известно, что детали тормозного устройства надежно выполняют свои функции лишь в начальный период эксплуатации [1]. Часто они разрушаются по усталостным причинам, связанным с воздействием повторяющихся циклических нагрузок. Концентраторы напряжений уменьшают долговечность при циклических нагрузках и образуют «слабые места» в конструкции ТУ. Уменьшение усталостной прочности в конструкции балки отмечено в зонах 1 и 2, а также в зонах сварных швов верхней и боковых граней (рис. 1), что связано с изменением околошовной зоны и концентрацией напряжений.

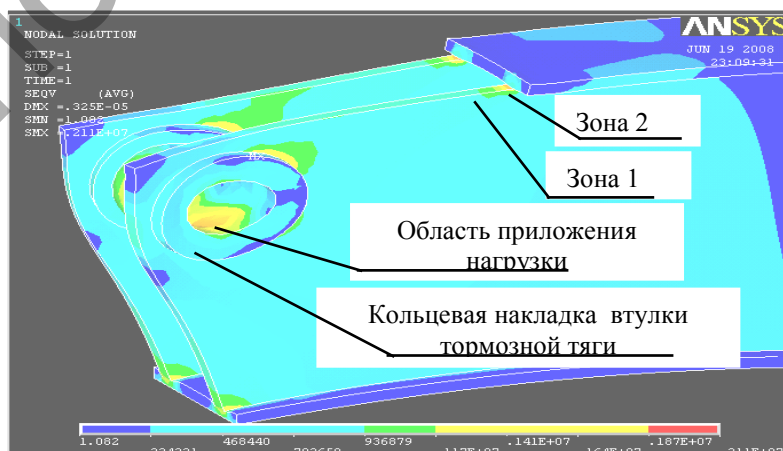


Рис. 1. Графическое отображение модели типовой конструкции тормозной балки с «аварийно-опасными зонами» усталостного разрушения 1 и 2

Анализ усталостного разрушения металла тормозной балки с учетом фактора циклической нагрузки показал, что основными факторами развития усталостных трещин являются: амплитуда напряжений и деформации; длительность и количество циклов. В процессе развития разрушения наблюдается переход от скрытой (тонкой) к наружной (широкой) трещине. Это объясняется усталостью металла, сопровождающейся накоплением повреждений в области границ зерен металла от цикла к циклу. Характер развития трещин в конструкции смоделирован с использованием программы ANSYS и приведен на рисунке 2.

Задача повышения прочности и обеспечения надежности работы тормозной балки ШПМ сводится к выбору способа усиления конструкции, исключающего возможность дальнейшего усталостного разрушения, связанного с многократными циклами приложения нагрузок к элементам тормоза в процессе его эксплуатации.

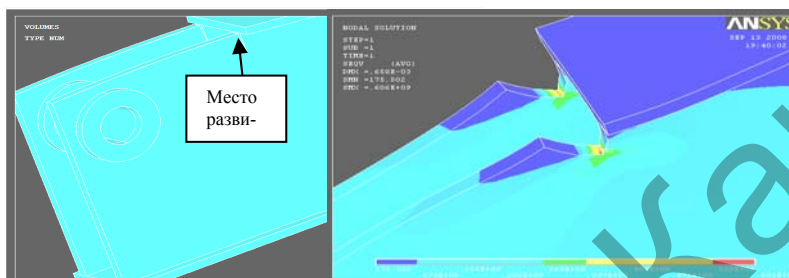


Рис. 2. Графическое отображение развития усталостной трещины в «аварийно-опасной зоне» 1

Накладными элементами усиления могут быть дисковая накладка, ребро, кольцевая накладка или их комбинированные варианты, которые отличаются большей эффективностью, связанной с локализацией «аварийно-опасных зон» и противодействием росту усталостных трещин. Технология изготовления и монтажа накладных элементов отличается простотой и не требует применения сложного сварочного и монтажного оборудования. На рисунке 3 приведены варианты элементов для усиления конструкции ТУ — «накладка» и «ребро», которые способны влиять на характер развития трещин, существенно уменьшать концентрацию напряжений и повысить долговечность конструкции. Возможности программы ANSYS позволяют моделировать нагрузки на элементы балки, связанные с асимметрией цикла.

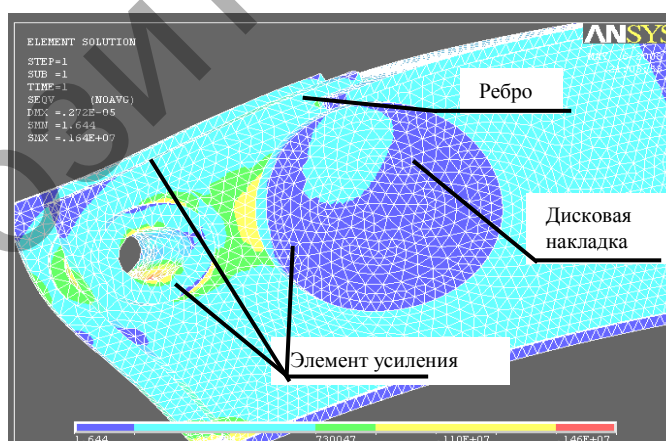


Рис. 3. Конструкция балки с элементами усиления

Повышение коэффициента асимметрии в сторону положительных значений вызывает снижение закрытия трещины и увеличение скорости роста усталостной трещины. По мере снижения размаха коэффициента интенсивности напряжений и скорости роста усталостной трещины чувствительность закрытия к асимметрии цикла напряжений усиливается до максимального уровня на пороге усталости. Уровень закрытия трещины определяется рядом факторов, которые условно делятся на две группы — эксплуатационные и структурные. К первой относятся параметры цикла напряжений (размах, асимметрия, частота), окружающая среда (ее химическая активность, влажность, температура), а

также характер напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в образце или элементе конструкции, который определяется их геометрией и размерами. Основные структурные факторы (вторая группа) обусловлены химическим составом материала и его микроструктурным состоянием. Закрытие трещины зависит от уровня размаха коэффициента интенсивности напряжения. Решение задачи по повышению прочности и обеспечению надежности работы тормозной балки сводится к определению «опасных мест» в конструкции и принятию мер по снижению значений напряжений и деформации. Это можно реализовать, используя метод компьютерного моделирования развития трещин в конструкции при помощи ANSYS Fatigue Module [3]. Результаты исследований по установлению зависимости снижения запаса прочности конструкции от длины растущей в ней трещины и зависимости снижения значений допустимых напряжений, приводящих к разрушению конструкции, от длины растущей в ней трещины приведены на рисунках 4, 5.

Выполненные исследования доказали возможность распределять напряжения и деформации у вершины трещины, а также значительно снижать влияние концентраторов напряжений при помощи усиления конструкции. Основой расчетов усталостной долговечности (выносливости) является определение способности материала конструкции сопротивляться многоциклового усталости, которая приводит к разрушению и уменьшению срока эксплуатации тормозного устройства. Расчет выносливости выполняется при помощи трех методов: расчета деформаций, расчета напряжений и механики разрушения. Все эти методы доступны в модуле расчета долговечности и смоделированы в ANSYS.

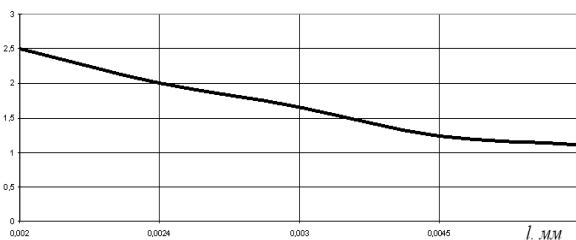


Рис. 4. Зависимость снижения запаса прочности конструкции от длины растущей в ней трещины

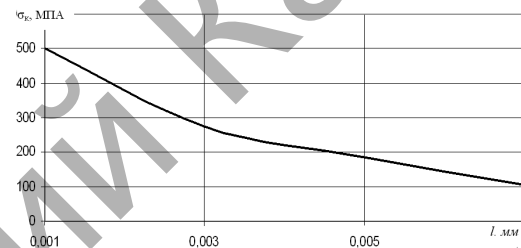


Рис. 5. Зависимость снижения значений допустимых напряжений, приводящих к разрушению конструкции, от длины растущей в ней трещины

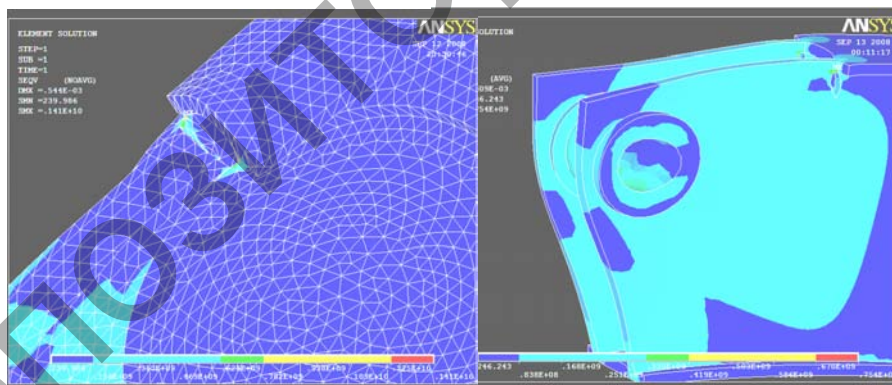


Рис. 6. Графическое отображение локализации развития трещин в конструкции при помощи усилений ТУ ШПМ

Практика эксплуатации тормозных устройств показала, что чрезмерное увеличение зазоров вследствие износа деталей шарнира приводит к нарушению кинематической точности, заклиниванию рычажно-шарнирного механизма, недопустимому перераспределению нагрузки между элементами тормозного устройства и является причиной образования усталостных трещин в проушинах крепления втулок тормозной балки и разрыва тормозных тяг.

Усиление конструкции тормозной балки позволяет предотвратить образование усталостных трещин в области проушин крепления втулок. Одновременно эти усиления позволят уменьшить нагрузку на контактные поверхности втулок тормозной тяги, тем самым снизить вероятность их преждевременного износа и повреждения (рис. 6). Используя в дальнейшем научные результаты проведенного исследования, можно решить ряд немаловажных прикладных задач по повышению прочно-

сти конструкции и надежности работы тормозных устройств шахтных подъемных установок. Для практической реализации методов восстановления прочности конструкции необходимо выявить трещины на ранней стадии развития — для этого используется ультразвуковая дефектоскопия.

Усталостные трещины, как показывает практика, образуются прежде всего на концах балки в области проушин, где расположены втулки. При проведении дефектоскопии использовался прибор марки SONYC. Полученные при перемещении ультразвукового датчика (см. рис. 7) диаграммы позволяют установить параметры образовавшихся трещин на поверхности боковой грани конструкции. Результаты проведенных исследований представлены на рисунке 8. Контроль осуществляется искателем на частоте 2,5 МГц прямым пучком.

При перемещении искателя на экране дефектоскопа наблюдается частокол импульсов, являющихся результатом отражения ультразвуковых колебаний. Резкое уменьшение амплитуды импульсов ультразвуковых колебаний является признаком наличия усталостной трещины. Для уточнения характера дефекта рекомендуется искатель установить на диаметрально противоположную сторону. С целью улучшения разрешающей способности дефектоскопа необходимо проводить контроль послойно, с использованием задержки и временной регулировки коэффициента усиления.

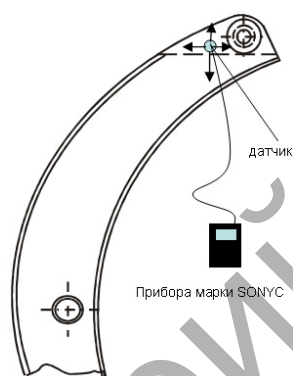


Рис. 7. Схема перемещения ультразвукового датчика

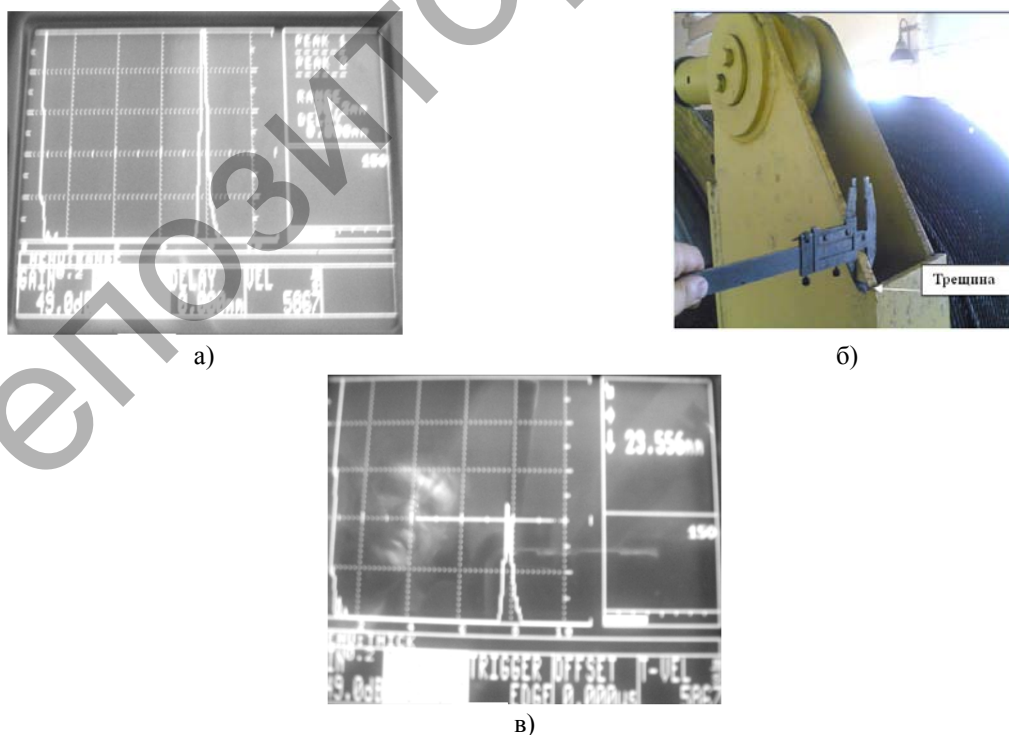


Рис. 8. Полученные результаты дефектоскопии тормозной балки: а) отсутствие усталостной трещины; б) место образования усталостной трещины; в) наличие усталостной трещины

Результаты компьютерного моделирования и натурных измерений напряженно-деформированного состояния конструкции тормозной балки приведены в таблице и на рисунке 9. Измерения производились на типовой конструкции тормозной балки шахтной подъемной машины НКМЗ 2Ц-4х2,3 с использованием прибора ИКН-1М при практическом применении дисковых накладок при ремонте.

Т а б л и ц а

Результаты экспериментального компьютерного моделирования и практических расчетов НДС балки тормозного устройства

Диаметр накладки, м	Давление Q , МПа	Скругление грани	Зона 1 $\sigma_{\max 1}$, МПа	Зона 2 $\sigma_{\max 2}$, МПа	σ_{\max} , МПа
Результаты исследования имитационной модели с толщиной стенки 20 мм, без усиления (кривая 1)					
–	10	Нет	19,4	29,2	43,7
–	1	Нет	1,94	2,92	4,37
–	0,1	Нет	0,194	0,292	0,437
–	0,01	Нет	0,0194	0,0292	0,0437
Результаты, полученные опытным путем нагружении конструкции с толщиной стенки 20 мм, без усиления (кривая 2)					
–	10	Нет	13,5	22	39,6
–	1	Нет	1,3	2,2	3,7
–	0,1	Нет	0,12	0,22	0,37
–	0,01	Нет	0,011	0,021	0,036
Результаты исследования имитационной модели с толщиной стенки 20 мм, с усилением (кривая 3)					
0,5	10	Нет	16,2	24,2	36,4
0,5	1	Нет	1,62	2,42	3,64
0,5	0,1	Нет	0,162	0,242	0,364
0,5	0,01	Нет	0,0162	0,0242	0,0364
Результаты, полученные опытным путем нагружении конструкции с толщиной стенки 20 мм, с усилением (кривая 4)					
0,5	10	Нет	14,52	23,4	30,4
0,5	1	Нет	1,4	2,42	3,05
0,5	0,1	Нет	0,142	0,232	0,28
0,5	0,01	Нет	0,014	0,0238	0,027

Проведенной проверкой элементов тормозной системы методами неразрушающего контроля на шахтах Караганды и Экибастуза установлены важные факторы образования дефектов в работе тормозной системы ШПУ. Выявленные дефекты по элементам тормозной системы распределены в процентах следующим образом:

- трещины в проушинах тормозных балок 17,6;
- износ шарнирных соединений тормозных балок 40;
- вертикальные и горизонтальные тормозные тяги 12,5;
- тормозной обод 12,1;
- шпильки подвески грузов 8,1;
- тяги вертикальных траверс и шпильки поршней 5,5;
- прочие 4,2.

При значительном сроке эксплуатации подъемной установки и перегрузках в отдельных элементах конструкции тормозных устройств возникают повреждения, связанные с временной усталостью металла, что приводит к появлению трещин. В частности, трещины и разрушения появляются в конструкции тормозной балки.

В результате обследования и диагностики прибором марки SONYC установлено, что более 61 % поврежденных элементов тормозного устройства подъемных машин, находящихся в эксплуатации на шахтах Караганды и Экибастуза, имеют повреждения, связанные с развитием усталостных трещин. На практике причинами возникновения трещин являются: нарушение технологии изготовления, нарушения технологии монтажа и правил эксплуатации, перегрузки, длительная эксплуатация в течение 20–30 лет. Полученные данные доказывают снижение прочности и надежности конструкции балки тормозного устройства, имеющего трещины, что делает невозможным ее эксплуатацию. Для решения этой задачи необходимо усилить «слабые места» конструкции тормозной балки, что позволит предотвратить образование и рост трещин.

Сущность заявленного технического решения заключается в возможности восстановления после ремонта и усиления конструкции тормозной балки шахтной подъемной машины. Дисковые накладки закрепляются непосредственно на месте трещины при помощи сварки, симметрично относительно друг друга, что позволит усилить конструкцию и препятствует образованию и росту трещин, которые вызывают ее разрушение.

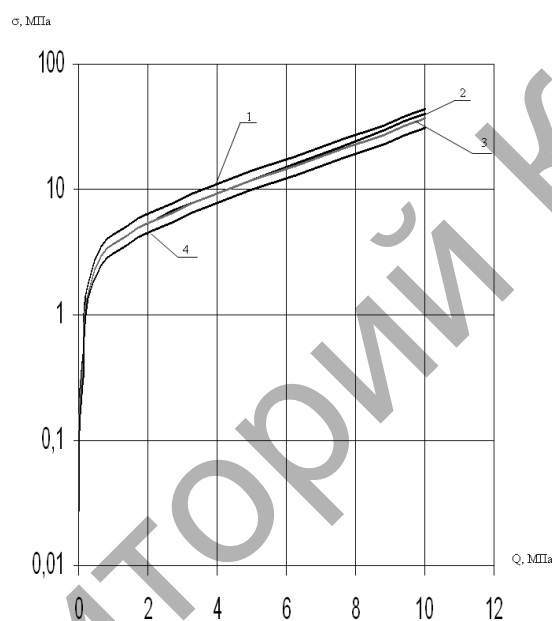


Рис. 9. Результаты измерений прибором ИКН–1М напряженно-деформированного состояния конструкции тормозной балки и исследований имитационной модели: 1) результаты исследования имитационной модели 1 с толщиной стенки 20 мм, без усиления; 2) результаты, полученные опытным путем нагружения конструкции с толщиной стенки 20 мм, без усиления; 3) результаты исследования имитационной модели с толщиной стенки 20 мм, с усилением; 4) результаты, полученные опытным путем нагружения конструкции с толщиной стенки 20 мм, с усилением

Компьютерное моделирование в среде ANSYS Fatigue Module позволило установить геометрические параметры накладных элементов усиления и рациональные координаты их расположения на боковых гранях конструкции балки. Результаты исследований положены в основу методики обеспечения надежности горных машин, находящихся в длительной эксплуатации. Методика прошла практическую апробацию при проведении ремонта на действующих шахтных подъемных машинах шахт Караганды и Экибастуза (рис. 10).

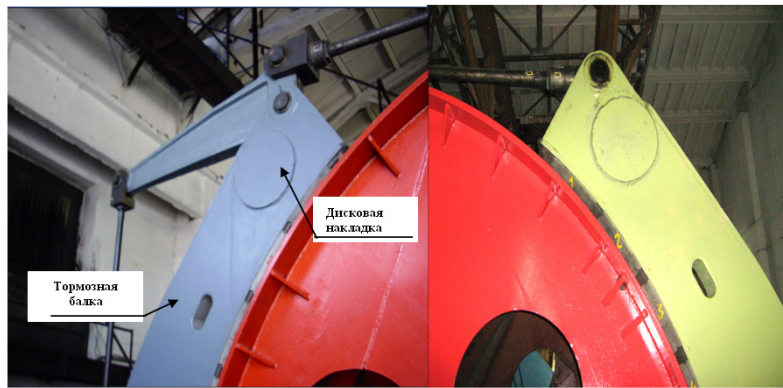


Рис. 10. Практическое применение дисковых накладок при ремонте тормозной балки шахтной подъемной машины НКМЗ

Выводы

У вершины образовавшейся трещины при нагружении возникает значительная концентрация напряжений и деформаций, происходит перераспределение последних, что вызывает развитие трещины. Поэтому для получения количественных характеристик способности материала конструкции тормозной балки сопротивляться разрушению при наличии трещины необходимо снижать значения напряжений и деформаций у вершины трещины. Элементы усиления позволяют: исключить образование и рост усталостных трещин в области проушин крепления втулок; обеспечить необходимую прочность и надежность; увеличить срок эксплуатации тормозного устройства; существенно ослабить влияние концентраторов напряжений; снизить значения напряжений и деформаций в конструкции. Установка дисковой накладки позволяет ликвидировать очаг возникновения усталостных трещин, а ребро и кольцевая накладка втулки работают на увеличение прочности конструкции балки и исключают возможность дальнейшего разрушения конструкции ТУ, связанного с многократными циклами приложения нагрузок в процессе его эксплуатации.

References

1. Mekhtiyev A.D., Likhachev V.V., Bulatbayev F.N. Methodology of improving the lifting machine's brake beam's work reliability // University proceedings. Iss.3. — Karaganda: KarSTU Publ., 2008. — P. 72–74.
2. Zhautikov B.A., Mekhtiyev A.D., Likhachev V.V. The method for mine lifting facility's brake beam cracks increase preventing. Innovational patent of The Republic of Kazakhstan, published 15.04.09, № 21109.
3. Basov K.A. ANSYS in examples and problems. — M.: Computerpress, 2002. — 342 p.