

УДК 622.67.531

Ильина С.С., канд. техн. наук
(ГВУЗ «НГУ»)

**ВЛИЯНИЕ НАРУШЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
ДВУТАВРОВЫХ РАССТРЕЛОВ НА ПРОЧНОСТЬ АРМИРОВКИ
ШАХТНОГО СТВОЛА**

Ільїна С.С., канд. техн. наук
(ДВНЗ «НГУ»)

**ВПЛИВ ПОРУШЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ДВОТАВРОВИХ
РОЗСТРІЛІВ НА МІЦНІСТЬ АРМУВАННЯ ШАХТНОГО СТВОЛА**

Pijina S.S., Ph. D. (Tech.)
(SHEI «NMU»)

**INFLUENCE OF CRIPPLING OF DOUBLE-T BUNTONS ELEMENTS ON
THE STRENGTH OF MINE SHAFTS REINFORCEMENT**

Аннотация. В статье поставлена и решена задача моделирования дефектов расстрелов армировки шахтных стволов с коробчатыми проводниками. Приведены результаты обследований, показывающие характерные типы дефектов расстрелов при длительной эксплуатации в условиях агрессивной шахтной среды. Методом твердотельного моделирования в системе SolidWorks - Simulation выполнено исследование влияния наличия разрушения участка вертикальной стойки несущего двутавра в месте заделки в крепь ствола при сохранении нормативных геометрических параметров горизонтальных стоек под действием лобовых динамических нагрузок со стороны подъемного сосуда на его напряженно-деформированное состояние. Показано, что в системе «расстрел-проводник» с бездефектными расстрелами изменение точки приложения усилия практически не приводит к существенному повышению напряжений в зонах концентрации возле крепи и под проводником. Кроме того, при наличии разрушения стойки возле крепи (до 0,5 м), контактная нагрузка, приложенная к проводнику в точке крепления к расстрелу, так же не вызывает существенного возрастания напряжений в концентраторах.

В то же время, приложение контактного усилия в пролете проводника, которое, вследствие его изгиба, вызывает скручивание расстрела вокруг продольной оси, резко меняет картину напряженно деформированного состояния его горизонтальных полок в окрестности отверстия-дефекта. Концентрация напряжений достигает 1.5-1.8 раз по сравнению с бездефектным расстрелом. Это показывает, что потеря сечения стойки двутаврового расстрела в области интенсивного притока агрессивной воды в стволах со значительными нарушениями вертикальности проводников, вызывающими появление повышенных динамических нагрузок, является очень существенным фактором возрастания риска спонтанного разрушения несущих расстрелов и выхода сосуда из колеи.

Ключевые слова: шахтный подъем, армировка шахтного ствола, динамика шахтных подъемных сосудов, система «подъемный сосуд – армировка шахтного ствола».

Армировка основных рудоподъемных стволов Украины состоит из несущих двутавровых расстрелов типа 36С и закрепленных на них вертикальных коробчатых проводников сечениями от 16х160х12 мм до 200х200х16 мм.

Техническое состояние армировки большинства рудных стволов Украины, находящихся в эксплуатации более 40-50 лет, характеризуется повышенным износом расстрельных балок, имеющих значительные коррозионные поражения вертикальных стоек и горизонтальных полок. Это вызвано двумя причинами: во-первых, замена расстрельных балок в действующем стволе очень трудоемкая операция, требующая длительной остановки работы подъема, во-вторых, действовавшими до 2017 года «Едиными правилами безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом» [1] контроль параметров расстрелов и нормативы на допустимые значения их износа, в отличие от проводников, не были предусмотрены. В Правилах безопасности угольных стволов такие нормативы не предусмотрены и в настоящее время [2].

Для проводников предусмотрена их замена при износе рабочих поверхностей до половины толщины стенки. Поэтому на предприятиях в первую очередь производится восстановление проводников армировки, а расстрелы продолжают эксплуатироваться, не редко до полной потери несущей способности.

Считается, что проводники принимают на себя всю ударную нагрузку со стороны сосудов, а на расстрелы передается только ее часть через узлы соединения. Однако при этом не учитывается, что подавляющее большинство отечественных стволов оборудовано двутавровыми расстрелами, у которых момент сопротивления в горизонтальной плоскости в 2 раз меньше, чем в вертикальной. Необходимость проведения экспертного обследования армировки при износе расстрелов свыше 20% впервые в Украине введена в Правилах безопасности в 2017 г. [3]. В связи с этим, возникает необходимость проведения научных исследований и разработки соответствующих методических документов, определяющих влияние различных видов дефектов расстрельных балок, их размеров и расположения на работоспособность армировки в целом.

Результаты многочисленных обследований с применением специальной динамической аппаратуры для измерения контактных нагрузок на армировку, и расчетов остаточных запасов прочности проводников и расстрелов с учетом их фактического износа показал, что в большинстве случаев самыми слабыми (наиболее нагруженным по напряжениям) звеньями армировки являются изношенные расстрелы. Это особенно характерно для стволов, находящихся в длительной эксплуатации свыше 30-40 лет [4]. Характерные картины потери сечения расстрелов, выявленные при проведении экспертных обследований стволов с участием автора статьи, приведены на рис.1. Видно, что армировка эксплуатируется при сочетании достаточно мало изношенных коробчатых проводников с основными расстрелами, имеющими значительные дефекты конструкции.

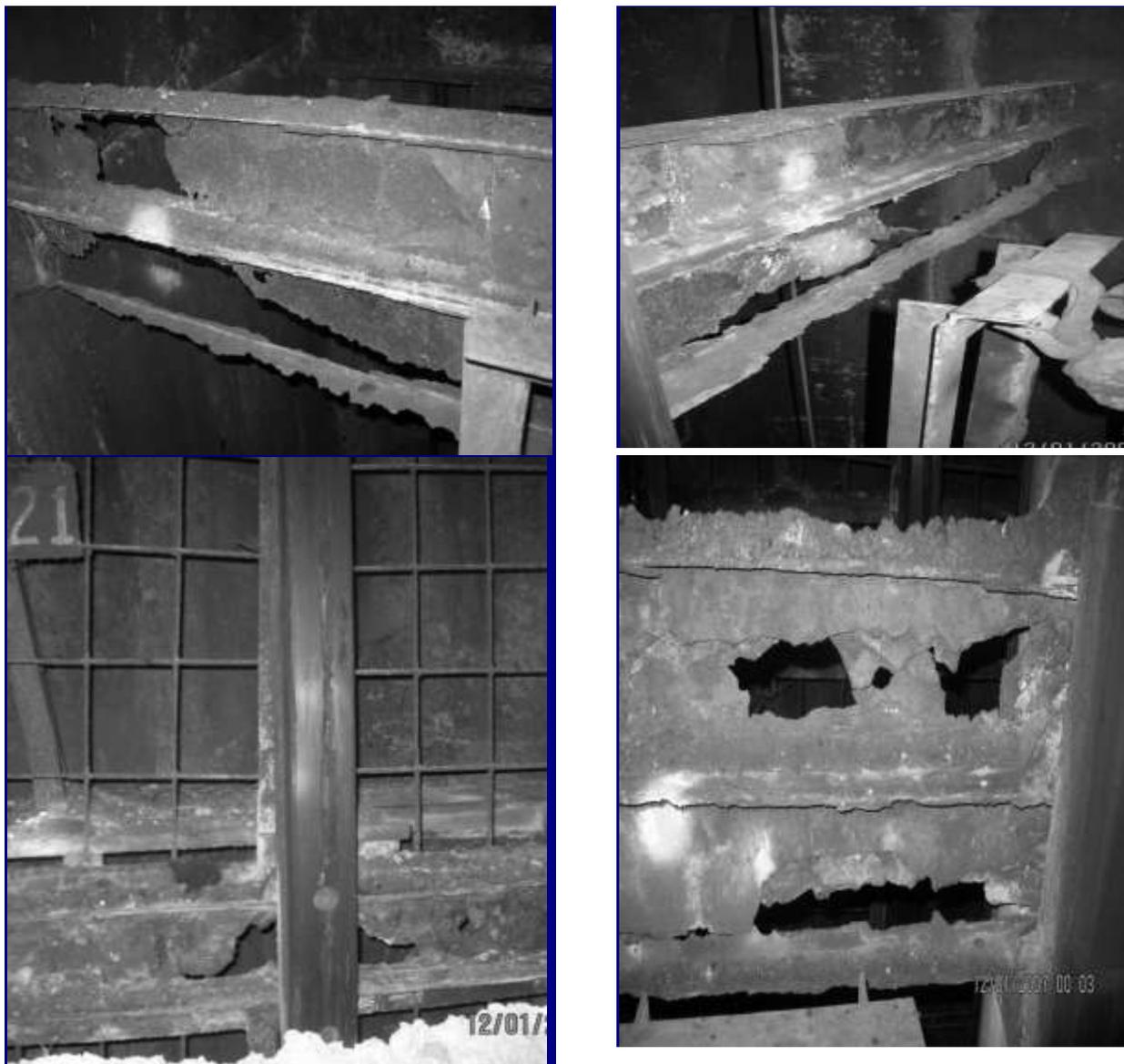


Рисунок 1 - Характерные дефекты расстрелов армировки

В большинстве основных рудников Украины расстрелы имеют двутавровый профиль. В то же время неохваченным положениями нормативной документации, а также в научной литературе остается вопрос о допустимых значениях остаточной толщины горизонтальных полок и вертикальных стенок основных расстрелов в условиях интенсивной стволовой коррозии под действием динамических нагрузок со стороны подъемных сосудов с учетом их различных возможных комбинаций. На практике, оценить степень нагруженности расстрелов при работе подъемных сосудов можно только путем выполнения комплекса работ, которые включают в себя измерения фактических динамических нагрузок, поярусные измерения износа стенок проводников и расстрелов, деформационно-прочностные расчеты всех элементов армировки.

Для оперативной оценки уровня технического состояния армировки необходимо иметь предельно допустимые оценки параметров износа в зависимости от параметров динамического нагружения. Эта задача может быть решена на основе рассмотрения общего напряженно-деформированного состояния проводников и расстрелов под действием динамических нагрузок, передающихся на расстрел со стороны проводников в области их взаимного соединения. Для этого необходима разработка соответствующих математических моделей и методик расчета, учитывающих неоднородность износа расстрелов армировки по их длине и его влияние на параметры сложного напряженно-деформированного состояния ее при динамическом нагружении со стороны подъемных сосудов.

Для уточнения реальной картины распределения напряжений в расстрелах армировки при действии нагрузки со стороны подъемного сосуда рассмотрим тестовую задачу для армировки с двутавровым расстрелом сечением профиля 36С длиной 5 м с проводником коробчатого сечения 160x160x12 мм, шаг армировки 4 м. На рис. 2 представлена твердотельная модель участка армировки из пяти ярусов расстрелов и проводников в системе Cosmos Works. Достаточность учета в модели такого количества пролетов для инженерных расчетов доказана в работах [4, 5]. Дальнейшее увеличение числа учитываемых ярусов практически не сказывается на значениях напряжений в сечениях проводника и расстрела в точке нагружения.

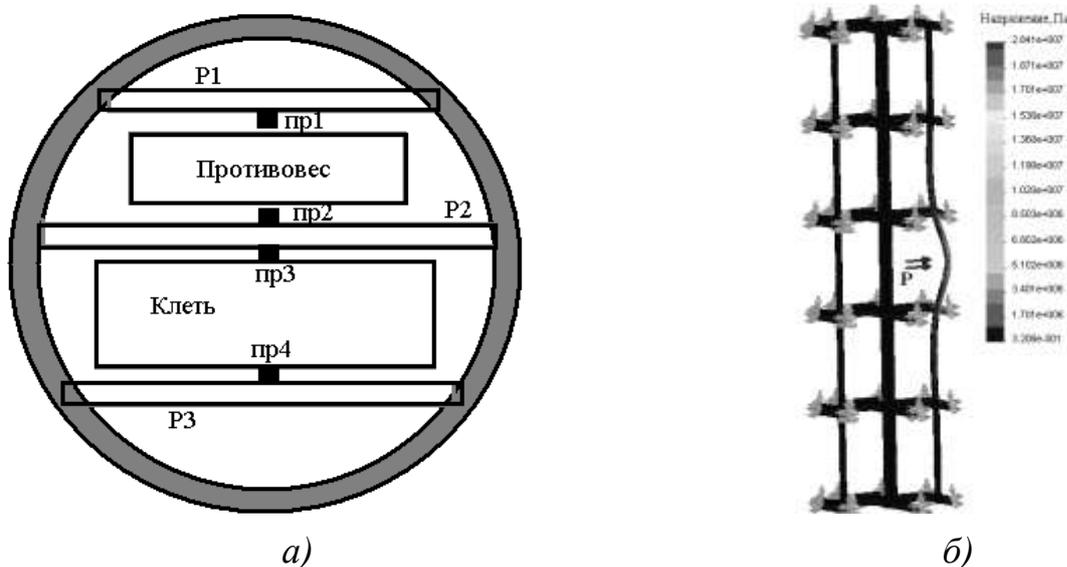


Рисунок 2 - Сечение ствола (а), твердотельная модель участка армировки (б)

Рассматриваются варианты, когда усилие приложено к проводнику в лобовой плоскости в ярусе и выше срединного расстрела в пролете, так как в последнем случае на расстрел передается не только изгибающее усилие в горизонтальной плоскости, но и скручивающий момент от лобового прогиба проводника. Оба конца расстрелов имеют жесткое закрепление в лунках крепи. Для изучения влияния неравномерности износа двутаврового расстрела по его длине на распределения напряжений под действием силы, передающейся на

него со стороны проводника, рассмотрим различные варианты потери целостности вертикальной стойки. В зависимости от климатических условий и водопритока в стволе стойка может иметь участки резкой потери сечения как вблизи крепи, так и вблизи места крепления проводника. Кроме того, горизонтальные полки так же могут иметь потерю сечения неравномерного характера по длине расстрела.

Достаточно часто встречается картина потери сечения вертикальных стоек двутавровых балок, в то время как горизонтальные полки в значительной мере сохраняют свое сечение, которое, главным образом, обеспечивает несущую способность расстрелов под действием горизонтальных динамических нагрузок со стороны подъемных сосудов.

На рис. 3. приведена эпюра распределения напряжений (K_n – относительный коэффициент концентрации напряжений) в расстреле под действием силы, действующей на проводник в рамках соответствии с моделью рис.2, сила приложена в ярусе.

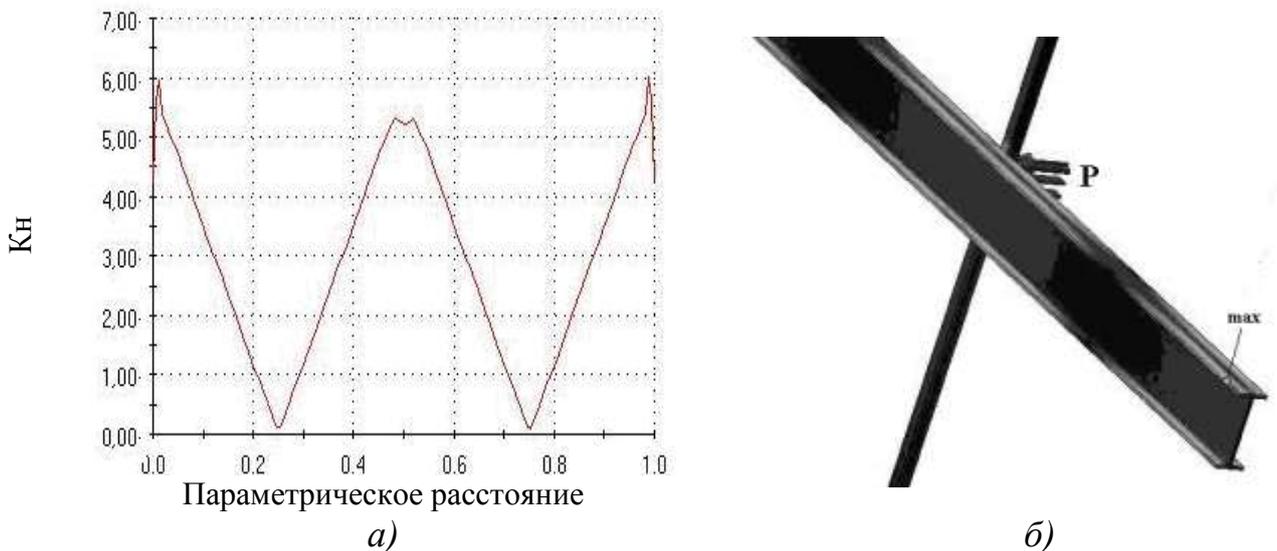


Рисунок 3 - Эпюра распределения напряжений по длине расстрела (а), твердотельная модель (б). Расстрел и проводник не имеют дефектов

Видно, что наиболее нагруженными являются сечения по концам расстрела в месте заделки в крепь и непосредственно в месте крепления проводника. Причем, напряжения в крайних волокнах горизонтальных полок расстрела в местах заделки несколько больше напряжений под проводником.

Из рис. 3 видно, что наибольшие по модулю напряжения реализуются в окрестности заделки расстрела в крепи ствола. Отсюда следует, что при наличии водопритока по стенкам ствола эти сечения вследствие коррозии будут ослаблены в большей степени, чем в других точках по длине расстрельной балки. Второй зоной концентрации напряжений является место крепления проводника к расстрелу, котором величина напряжений почти такого же уровня, как в месте заделки.

Рассмотрим эту же задачу в условиях приложения силы в пролете проводника на 1/4 шага армировки выше области крепления к расстрелу. График на рис. 4а показывает, что влияние в случае отсутствия дефектов расстрела скручивание при ударе башмака сосуда по проводнику выше яруса практически не приводит к увеличению напряжений в сечениях расстрела.

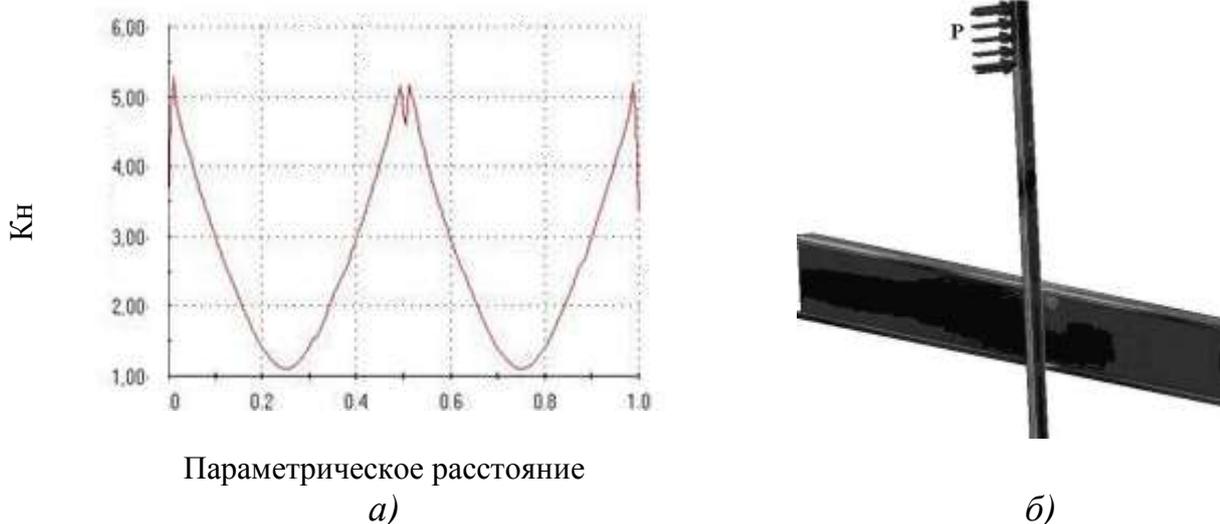


Рисунок 4 - Эпюры распределения напряжений в двутавровом расстреле: (а)- эпюра напряжений (б) - твердотельная модель системы «расстрел-проводник». Расстрел и проводник не имеют дефектов.

Рассмотрим влияние дефекта, показанного на рис. 1, на распределение напряжений по длине расстрела и, соответственно, несущую способность конструкции в месте закрепления проводника. Дефект моделируем отверстием в стойке проводника длиной 500 мм от края заделки в крепи.

Из рис. 5 видно, что наличие отверстия привело к незначительному повышению напряжений в его окрестности в случае приложения силы в ярусе армировки.

Рассмотрим, как изменится напряжено-деформированное состояние системы «расстрел-проводник» при смещении действующей силы в пролет проводника. Рис. 6 показывает, что в этом случае за счет потери расстрелом жесткости на скручивание, вызванного отсутствием стойки, произошло увеличение концентрации напряжений возле крепи в 1.5 раза по сравнению со случаем приложения силы в ярусе и в 1.8 раза по сравнению с таким же нагружением целого расстрела.

Соответственно, если дефект в виде отверстия распространяется на значительную длину расстрела, например, как это показано на рис. 1, то концентрация напряжений достигает еще большей величины.

При нарушении вертикальности проводников ударно-циклическое нагружение проводников сосудов происходит по всей длине пролета между ярусами. Как показывают многочисленные исследования наибольшее значение контактная нагрузка получает именно при подходе башмака к ярусу из-за

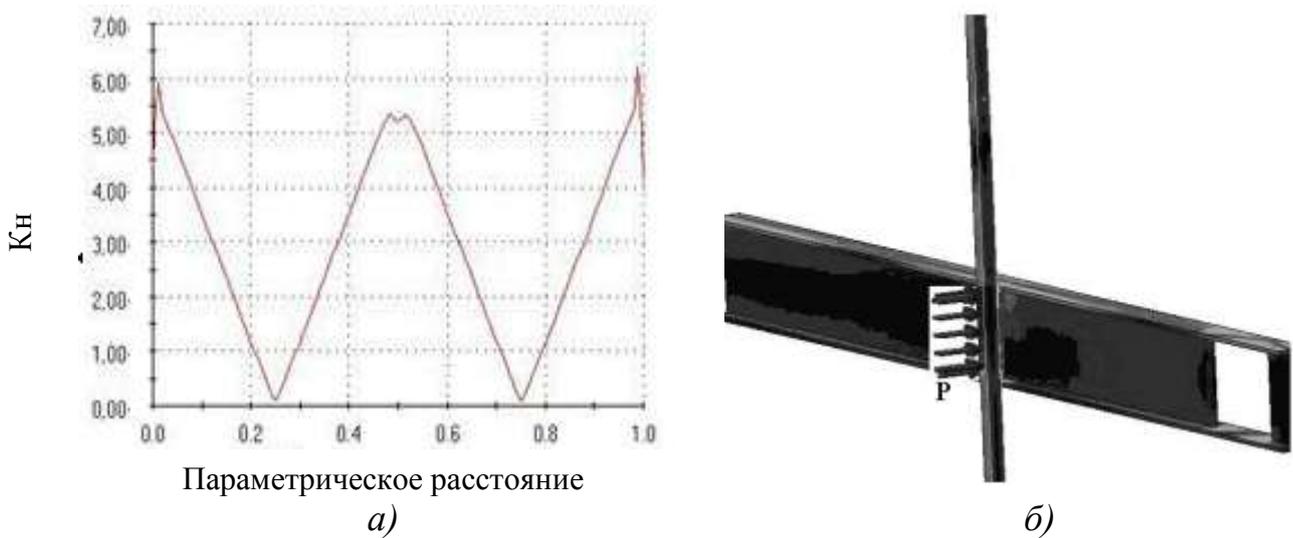


Рисунок 5 - Эпюры распределения напряжений в двухтавровом расстреле в зависимости от его дефектов: эпюра напряжений (а); твердотельная модель системы «расстрел - проводник» с дефектом стойки расстрела в окрестности крепления (б). Сила приложена в ярусе армировки.

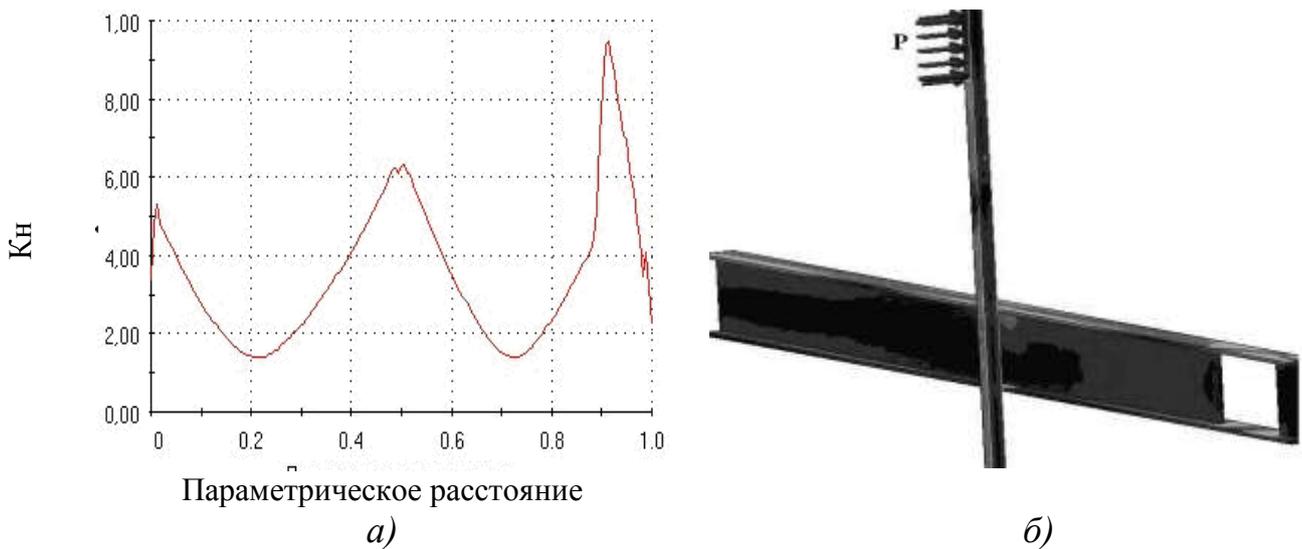


Рисунок 6 - Эпюры распределения напряжений в двухтавровом расстреле в зависимости от его дефектов: эпюра напряжений (а); твердотельная модель системы «расстрел - проводник» с дефектом стойки расстрела в окрестности крепления (б)

переменной жесткости проводников по длине пролета (жесткость в пролете меньше жесткости в точке крепления к расстрелу). Таким образом, потеря сечения стойки двухтаврового расстрела является очень существенным фактором возрастания риска спонтанного разрушения несущих расстрелов и потери зацепления сосуда с проводниками.

Исследуем вклад жесткости расстрела в общую опорную жесткость участка армировки, подвергающегося динамическому воздействию. Для этого рассмотрим две расчетные схемы, являющиеся частными случаями схемы, представленной на рис. 2б. Первый случай представляет собой самостоятельно

нагружаемый силой расстрел, изолированный от верхнего и нижнего пролетов проводника. В этом случае мы получим прогиб расстрела в точке крепления к проводнику без учета влияния выше и ниже лежащих пролетов проводника, связанного с остальными ярусами армировки.

Во втором случае рассмотрим схему без учета действия расстрела в нагружаемом ярусе. Физически это соответствует случаю полной потери расстрелом несущей способности в области крепления проводника. Можно считать, что это в значительной мере моделирует случаи износа расстрелов, представленные на рис.1. В этом случае деформируется пролет проводника длиной, равной двойному шагу армировки.

Полученные результаты расчетов при единичной нагрузке 10 кН сведены в Табл. 1.

Таблица 1 - Прогибы расстрела и проводника при действии силы, приложенной в ярусе

Нагружаемая система	«Расстрел – проводник»	«Расстрел»	«Проводник двойной длины»
Прогиб, мм	4,14	4,23	37,0

Полученные данные показывают, что в данном примере полная потеря несущей способности проводника увеличивает податливость яруса только на 2.2%, в то время, как потеря несущей способности даже одного расстрела увеличивает ее в 8.9 раза. Такое положение приводит к тому, что на участке действия повышенных лобовых динамических нагрузок на армировку с расстрелами, потерявшими значительную часть несущей способности (жесткости), резко возрастает динамическое уширение колеи, риск выхода сосуда из зацепления с проводниками и аварии с тяжелыми последствиями.

Полученные результаты показывают, что самыми нагруженными звеньями в армировке являются расстрелы. Для обеспечения безопасности работы подъема они должны подвергаться контролю целостности, деформационно-прочностному анализу одновременно с проводниками, а в случае значительного коррозионного износа немедленно заменяться новыми в порядке плановых ремонтных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом. - М.: Недра, 1977. - 223 с.
2. Ильин, С.Р. Механика шахтного подъема / С.Р. Ильин, С.С. Ильина, В.И. Самуся. - Днепропетровск: НГУ, 2014 – 247 с. Режим доступа: http://gm.nmu.org.ua/ru/Naukovi%20publikazii/naukovi_publicazii.php
3. Правила безпеки під час розробки родовищ рудних та нерудних корисних копалин підземним способом // Затверджено Наказом Міністерства соціальної політики України 23.12.2016 № 1592, Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 30 січня 2017 р. за № 129/29997. Офіційний вісник України від 17.03.2017. - 2017 - № 22.
4. Ильина, С.С. Экспериментальные исследования жесткости роликовых направляющих, армировки и математическое моделирование влияния неполного контакта боковых роликовых катков с проводниками на колебания шахтного подъемного сосуда / С.С. Ильина // Стальные канаты: сб. научн. тр. / МАИСК. - Одесса: Экология, 2010. – Вып. 10. - С. 79 - 102.

5. Дубинин, М.В. Конечноэлементное моделирование напряженно-деформированного состояния жесткой армировки стволов под действием эксплуатационных нагрузок со стороны подъемных сосудов / М.В. Дубинин, В.И. Дворников // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромышленного оборудования: сб. научн. тр. – Пермь: Изд. ПНИПУ, 2014. - С. 55 - 60.

REFERENCES

1. *Edinye pravila bezopasnjsti pri razrabotke rudnykh, nerudnykh i rossypnykh mestorozhdeniy podzemnym sposobom* [Unified safety rules in the development of ore, non-ore and placer deposits with underground method] (1977), Nedra, Moscow, SU.
2. Iljin, S.R., Iljina, S.S. and Samusya, V.I. (2014), *Mekhanika shakhtnogo podyema* [Mechanics of mine hoist], Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Ministry of Social Politics of Ukraine (2017), *Pravyla bezpeky pid chas rozrobky rodovyshch rudnykh ta nerudnykh korysnykh kopalyn pidzemnym sposobom* [Safety rules for the development of ore deposits and nonmetallic minerals underground], (2017), Official Bulletin of Ukraine dated March 17, Vol. 22, Kiev, Ukraine.
4. Iljina, S.S. (2010), «Experimental studies of stiffness of roller directors, reinforcement and mathematical modeling of the influence of incomplete contact of side rollers with guides on oscillations of mine lifting vessel», *Steel ropes*, no. 10, pp. 79 – 102.
5. Dubinin, M.V. and Dvornikov, V.I. (2014), «Finite element modeling of the stress-strain state of straight reinforcement of shafts under the action of operating loads on the side of lifting vessels», in *Aktualnye problemy povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gorno-shakhtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniya* [Actual problems of increasing the efficiency and safety of mining and oilfield equipment operation], Perm, Russia, pp. 55 – 60.

Об авторе

Ильина Светлана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры горной механики, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, svetailjina@gmail.com

About the author

Iljina Svetlana Sergeevna, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor in the Department of Mining Mechanics, State Higher Educational Institution «National Mining University» (SHEI “NMU”), Dnepr, Ukraine, svetailjina@gmail.com

Анотація. У статті поставлено і вирішено задачу моделювання дефектів розстрілів армування шахтних стволів з коробчатими провідниками. Наведено результати обстежень, які показують характерні типи дефектів розстрілів при тривалій експлуатації в умовах агресивного шахтної середовища. Методом твердотільного моделювання в системі SolidWorks - Simulation виконано дослідження впливу наявності руйнування ділянки вертикальної стійки двутавра в місці закладення в кріплення ствола при збереженні нормативних геометричних параметрів горизонтальних стійок під дією лобових динамічних навантажень з боку підйомної посудини на його напружено-деформований стан. Показано, що в системі «розстріл - провідник» з бездефектними розстрілами зміна точки прикладання зусилля практично не призводить до суттєвого підвищення напружень в зонах концентрації біля кріплення і під провідником. Крім того, при наявності руйнування стійки біля кріплення (до 0,5 м), контактне навантаження, прикладене до провідника в точці кріплення до розстрілу, так само не викликає істотного зростання напружень в концентраторах.

У той же час, додаток контактного зусилля в прольоті провідника, яке, внаслідок його вигину, викликає скручування розстрілу навколо поздовжньої осі, різко змінює картину напружено деформованого стану його горизонтальних полиць в околиці отвору-дефекту. Концентрація напружень досягає 1.5-1.8 разів у порівнянні з бездефектне розстрілом. Це показує, що втрата перетину стійки двутаврового розстрілу в області інтенсивного припливу агресивної води в стволах зі значними порушеннями вертикальності провідників, що викликає появу підвищених динамічних навантажень, є дуже суттєвим фактором зростання ризику спонтанного руйнування несучих розстрілів і виходу посудини з колії.

Ключові слова: шахтний підйом, армування шахтного ствола, динаміка шахтних підйомних посудин, система «підйомна посудина - армування шахтного ствола».

Annotation. In the article, the author poses and solves a problem of modeling defects of buntons in the shaft equipment with box guides. Results of surveys showed typical kinds of defects in the buntons at their long-term operation in conditions of aggressive mine environment. With the help of solid-modeling method in the SolidWorks-Simulation system, the author investigated effect of vertical double-T section crippling, which occurs in the bearing beam in the point of its embedding into the shaft lining at preserved standard geometric parameters of horizontal racks while being under the effect of frontal dynamic load caused by the cage, on its stressed-deformed state. It is shown that in the "bunton - guide" system with defect-free bunton, change of the point of force application practically does not lead to significant increase of stresses in concentration zones near the lining and under the guide. Besides, in case when rack is crippled near the lining (up to 0.5 m), contact load applied to the guide in the point of its fixing to the bunton also does not cause any significant increase of stresses in the concentrators.

At the same time, contact force applied to the span of the guide, which, due to its bending, causes twisting of the bunton around the longitudinal axis, sharply changes stress-strain state of its horizontal bridges near the hole-defect: stress concentration is 1.5-1.8 times higher in comparison with the defect-free bunton. This fact shows that loss of the cross section in the double-T rack in the area with intensive inflow of aggressive water into the shafts with significant disturbances of the guide verticality, which cause increase of dynamic loads, is a very critical factor, which increases risk of spontaneous destruction of the bearing buntons and derailing of cage.

Keywords: mine lift, shaft equipment, profile of rail guides, wear of rail guides, "cage-shaft equipment" system

Статья поступила в редакцию 28.11.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук А.П. Круковским.