

УДК 622.834: 622.862.3

И.В. ИОРДАНОВ, канд. техн. наук, Д.А. ЧЕПИГА, аспирант,
Н.Н. ВЛАСЕНКО, канд. техн. наук, С.В. ПОДКОПАЕВ, д-р техн. наук,
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» МОН Украины, г. Покровск

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БОКОВЫХ ПОРОД ПРИ ДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Цель. Целью данной работы является изучение движения боковых пород при действии динамических нагрузок, проявляющихся в результате обрушений кровли разрабатываемого угольного пласта, с учетом особенностей проявления горного давления в углепородном массиве, вмещающем горные выработки.

Методы исследований. Для изучения особенностей опасных проявлений горного давления в углепородном массиве, вмещающем горные выработки, были проведены лабораторные эксперименты на моделях из оптически чувствительных материалов и аналитические исследования, с привлечением основных положений прикладной механики, теории упругости и теории колебаний.

Научная новизна. В результате проведенных исследований впервые установлено, что при обрушении боковых пород в горную выработку и их соударении с породами непосредственной кровли, представленных в виде длинной балки, величина ударного импульса не зависит от массы ударяемого тела и не изменяется при постоянных значениях скорости и массы обрушившихся пород. В таких условиях, при расчете на устойчивость пород непосредственной кровли, критическая нагрузка всегда подобна разрушающей при расчете балок на изгиб.

Практическое значение. Рекомендуется, при разработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях, для предотвращения аварийных ситуаций от действия динамических нагрузок и повышения безопасности труда горнорабочих, ориентироваться на способ управления кровлей – закладкой выработанного пространства.

Ключевые слова: оптические материалы, динамическое напряжение, колебания, ударный импульс, критическая нагрузка, управление кровлей.

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. Общеизвестно, что при добыче полезных ископаемых в подземных условиях приходится считаться с целым рядом факторов, приводящих к повышенной опасности для людей и объектов. Опыт работы шахт Донбасса показывает, что с ростом глубины горных работ в углепородном массиве начинает проявляться такой негативный фактор как расслоение боковых пород, оказывающий существенное влияние на состояние горных выработок и приводящий к возможному травматизму, в результате обрушений нарушенной толщи пород. В реальных условиях разработки угольных пластов, подработанные и расслоившиеся породы основной кровли, оседающие на хаотически обрушенные слои непосредственной кровли, представляют собой блочный массив, состоящий из балок различной длины. Причем породы кровли, представленные в виде породной консоли, одновременно изгибаются и неконтролируемо перемещаются позади очистного забоя, создавая неблагоприятную геомеханическую обстановку в углепородном массиве, вмещающем горные выработки. Внезапность возникновения таких ситуаций содействует проявлению динамических нагрузок на породы кровли и почвы разрабатываемого пласта, обрушению и возможному завалу горных выработок.

Анализ исследований и публикаций. Изучение особенностей проявления горного давления в выработках на большой глубине [1] позволило установить, что характер его опасных проявлений определяется не только напряженным состоянием массива горных пород и их физико-механическими свойствами, но и спецификой формирования последнего, обусловившей неупругое деформирование при объемном сжатии, а так же способность деформироваться и разрушаться при разгрузке.

Как показало изучение процесса сдвижений и деформаций боковых пород [2], в зависимости от горно-геологических условий, зона расслоения боковых пород составляет по нормали к напластованию, в кровлю и почву разрабатываемого пласта, 4-8 м. Негативные последствия такой геомеханической обстановки могут проявляться в том, что расслоившиеся породы обрушаются и неконтролируемо перемещаются по длине лавы разрабатываемого угольного пласта. Характерной особенностью проявляющихся в подобных условиях динамических нагрузок, являются нестационарные колебания боковых пород [3]. На динамику и параметры такого процесса, в значительной степени влияет способ управления кровлей в лаве и охраны горных выработок.

Постановка задания. Для изучения движения боковых пород при действии динамических нагрузок, проявляющихся в результате обрушений кровли разрабатываемого угольного пласта, были изучены особенности проявления горного давления в углепородном массиве, вмещающем горные выработки, с использованием лабораторных экспериментов и аналитических исследований.

Изложение материала и результаты. Исходя из задачи исследований, для изучения состояния боковых пород при различных способах управления кровлей и охраны штреков, нами были выполнены лабораторные исследования на моделях из оптических материалов. Исследования проводились на экспериментальных моделях, в которых моделируемая глубина принималась равной $H=800$ м и $H=1200$ м, угол падения пласта, соответственно, $\alpha=10^\circ$ и $\alpha=60^\circ$, мощность пласта $m=1,0$ м. Мощность пород непосредственной почвы в случае крутого залегания пласта, составляла 2 м, основной кровли - 3 м, а пород кровли - 4 м. При пологом залегании угольного пласта, мощность пород непосредственной кровли и почвы составляла 4 м. При этом породы кровли и почвы по своим свойствам соответствовали породам типа глинистый сланец средней устойчивости. В качестве оптически чувствительного материала использовали игдантин. Моделирование выполнялось в соответствии с рекомендациями [4,5].

При решении рассматриваемой задачи с помощью оптического метода, нами была установлена исходная картина распределения напряжений в массиве, которая формируется во вмещающих породах в первый период времени после выемки угля. Результаты моделирования представлены на рис. 1а,б.

На рис. 1 изображены изолинии главных касательных напряжений в углепородном массиве при крутом залегании угольного пласта с подготовительной выработкой, охраняемой накатными кострами из шпал при способе управления кровлей в лаве удержанием на кострах (а) и охране штрека широкой податливой опорой, в виде закладки выработанного пространства (б).

Как видно из рис. 1а при способе управления кровлей удержанием на кострах, в окрестности штрека максимальная концентрация напряжений приурочена к области изгиба породных слоев. Породы кровли и почвы изгибаясь, обгрызают оставленные над штреком охранные сооружения. Очевидно, имея ограниченную податливость (до 10%) и малые размеры (в натуре $2,0 \times 2,0$ м), накатные костры выполняют роль опоры в окрестности которой концентрируются напряжения. Причем, расстояние между опорами и их податливость, определяют величину касательных напряжений в боковых породах из-за неравномерного изгиба породных слоев.

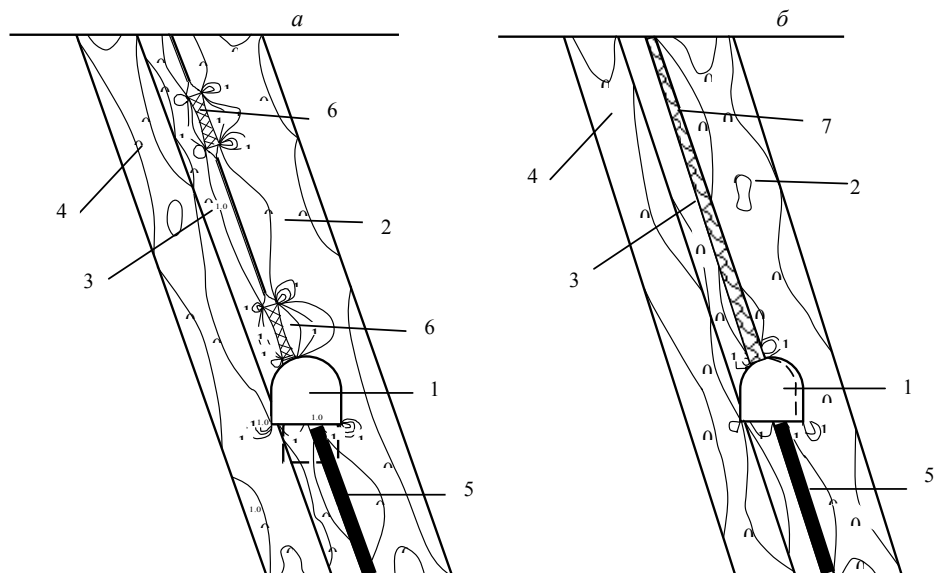


Рис. 1. Статическое поле касательных напряжений на глубине 1200м в окрестности подготовительной выработки с крутым залеганием угольного пласта при способе управления кровлей: а - полным обрушением; б - закладкой выработанного пространства. 1 – подготовительная выработка; 2 – кровля угольного пласта; 3 – непосредственная почва; 4 – основная почва угольного пласта; 5 – угольный пласт; 6 – накатные костра из шпал; 7 – закладочный массив – широкая податливая полоса

Совершенно иная исходная картина распределения напряжений в углепородном массиве имеет место при наличии в окрестности штрека податливой опоры, представленной в виде закладочного массива (рис. 1б). Экспериментально установлено, что при податливости до 40% создается минимальная концентрация напряжений в массиве. Однако, при этом, следует отметить незначительное (до 5-10%) уменьшение сечения поддерживаемой подготовительной выработки, произошедшее в результате плавного прогиба боковых пород из-за усадки закладочного массива.

Такая же геомеханическая обстановка, как было установлено в результате проведения экспериментов, имеет место и в случае пологого залегания угольного пласта ($\alpha=10^\circ$), когда горная выработка охраняется накатными кострами из шпал или широкой податливой опорой, в виде закладочного массива, с усадкой до 40 %.

Применительно к решаемой задаче, следует учитывать анализ результатов исследований [6], когда было доказано, что концентрация напряжений в углепородном массиве приводит к пластическим деформациям, а с течением времени, в местах концентрации сжимающих и растягивающих напряжений имеет место разгрузка (разрушение) осадочного массива. Подтверждением этого является анализ механических процессов, имеющих место в углепородном массиве с горной выработкой [7], поскольку напряженное состояние горных пород по мере удаления от контура выработки изменяется от состояния близкого к обобщенному растяжению и сдвигу, до состояния сжатия в глубине массива.

В сложных горно-геологических условиях разработки угольных пластов, когда возможны внезапные обрушения боковых пород, необходимо учитывать динамический вид нагружения горных выработок при расчетах их устойчивости. Для этого в полученное решение соответствующей задачи вводится динамический коэффициент [8-11].

На рис. 2 породы непосредственной кровли разрабатываемого угольного пласта представлены в виде балки длиной l , (м).

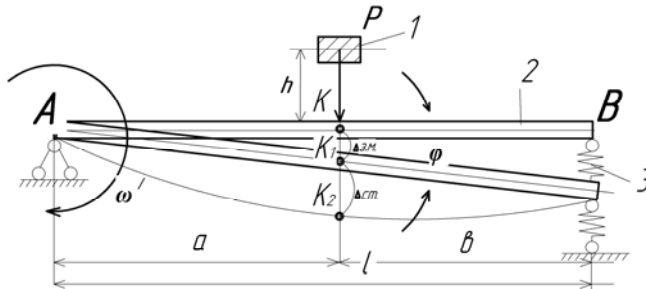


Рис. 2. Расчетная схема к определению напряженно-деформированного состояния пород непосредственной кровли пласта при опирании балки на податливую опору. φ – угол отклонения балки, (рад); 1 – $P=mg$, (Н) вес обрушившихся пород; 2 – балка, длиной l , (м); 3 – податливая опора, жесткостью C , (Н/м)

Считаем, что в одном случае балка свободно лежит на двух опорах, а в другом, для уменьшения действия удара, свободно

бодный конец балки опирается на податливую опору В, жесткостью C , (Н/м) (см. рис.2). С высоты h , (м) на балку падает груз массой m , (кг).

Для случая, когда балка лежит на двух опорах, динамический коэффициент K_d , согласно [8,9,14] равен

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{cm}}}, \quad (1)$$

где Δ_{cm} – статический прогиб балки под действие веса обрушившихся пород, м.

Ранее было установлено [14], чем меньше величина статического прогиба, тем жестче балка, а следовательно, тем быстрее остановится падающий груз после касания. С тем, чтобы уменьшить негативные воздействия динамических нагрузок, применяют податливые опоры [8].

Исходя из приведенной схемы (рис. 2) при наличии податливой опоры на свободном конце балки полное перемещение точки K , в месте соударения породы о балку, соответствует величине полного перемещения балки (прогиб несущей конструкции) в точке удара. Динамическая составляющая Δ_n , (м) прогиба несущей конструкции балки отражает динамическую добавку $\Delta_{3,м}$, (м) по отношению к статическому действию нагрузки. Тогда, с учетом этого, динамический коэффициент при ударе K_d можно определить как

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{cm} + \Delta_{3,м}}}, \quad (2)$$

а величину наибольших динамических напряжений σ_{\max}^{∂} , (МПа) в сечении балки – по выражению

$$\sigma_{\max}^{\partial} = \sigma_{\max}^{cm} \cdot K_{\partial}, \quad (3)$$

где σ_{\max}^{cm} - величина максимальных напряжений при действии статических нагрузок, МПа.

В результате проведенных исследований, нами установлено, что для балок, длина которых не превышает 30 м, размещение на их свободном конце податливой опоры, ослабляет эффект удара и уменьшает величину действующих в ее сечении напряжений на 30-35 % (по сравнению со случаем с неподвижной шарнирной опорой).

В динамических задачах, в частности в задачах о колебаниях, положение точек рассматриваемой системы изменяется с течением времени, и установленные координаты являются функциями времени [12,13]. Поэтому основная задача динамического исследования состоит в нахождении этих функций, т.е. в определении закона движения системы.

В случае, когда породы непосредственной кровли представлены в виде балки, один конец которой опирается на податливую опору, колебания рассматриваемой системы, согласно рекомендаций [13], можно представить в виде следующего уравнения

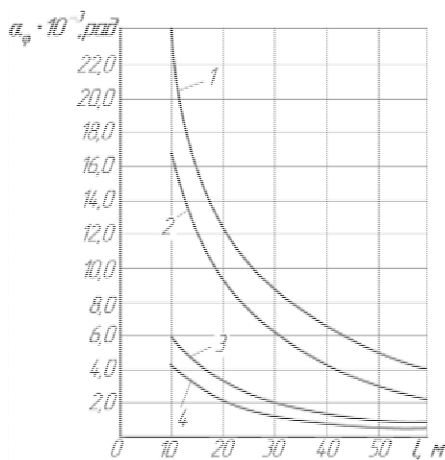
$$\varphi = \alpha_{\varphi} \sin pt = \frac{\omega'}{p} \sin pt, \quad (4)$$

где α_{φ} - амплитуда колебаний, рад; p – круговая частота колебаний, 1/с; ω' - угловая скорость балки после удара, 1/с; t – время, с.

Круговую частоту колебаний p , (1/с) можно определить с учетом жесткости податливой опоры C , (Н/м²), как в [3,19].

На рис. 3 показано изменение амплитуды колебаний балки α_{φ} , (рад) от ее длины l , (м). Одновременно учитывалось место соударения обрушенных пород с балкой относительно опор А и В. В случае, когда $a=0,9l$ соударение происходило ближе к податливой опоре В. При $a=0,2l$ событие совершалось ближе к жесткому закреплению балки, т.е. опоре А (см. рис. 2).

Рис. 3. Изменение амплитуды колебаний балки α_{φ} , (рад) от ее длины l , (м) при различных значениях коэффициента восстановления при ударе k : $k=0,7$ – кривые 1,3; $k=0,2$ – кривые 2,4; при $a=0,9l$ – кривые 1,2; при $a=0,2l$ – кривые 3,4



В результате выполненных исследований установлено, что во всех рассматриваемых случаях, амплитуда колебаний балки уменьшается с увеличением ее длины (см. рис. 3). Однако наибольшие отклонения колеблющегося тела от положения равновесия имеют место при ударе, близком к упругому, когда $k=0,7$ и $a=0,9l$ (рис.3, кривая 1). В случае, когда удар считается близким к неупругому ($k=0,2$), размах колебаний уменьшается на 25-30% (рис.3, кривая 2). Очевидно и то, что при увеличении длины балки с $l=10$ м до $l=60$ м, амплитуда уменьшается почти в 4 раза за счет демпфирования колебаний (наличия податливой опоры) и, когда при больших значениях статического прогиба, динамические перемещения меньше [8].

При внезапных обрушениях расслоившихся боковых пород в горную выработку, необходимо принимать во внимание нагрузку, отличающуюся от обычной прежде всего внезапностью ее приложения и кратковременностью действия [12-14]. Величину ударного импульса, при этом, можно определить по выражению [15,16]

$$S = \frac{m \cdot m_1}{m + m_1} v \cos \alpha. \quad (5)$$

где m – масса балки (наклонной площадки), кг; m_1 – масса обрушившихся боковых пород, кг; v – скорость соударения твердых тел, м/с; α – угол падения пласта, град.

Используя выражение (5) установлены зависимости, отражающие изменение величины ударного импульса при соударении падающего тела с балкой, с учетом изменения ее длины. В качестве влияющих на этот процесс параметров, которые нами изменялись, были выбраны ско-

рость соударения падающего твердого тела и его масса. В результате выполненных исследований было установлено, что при длинных балках величина ударного импульса не изменяется при постоянных значениях скорости и массы обрушившихся на балку боковых пород. В таких условиях, при соударении твердых тел, когда расслоившиеся породы основной кровли ударяются о балку – породы непосредственной кровли, величина ударного импульса остается постоянной и не зависит от массы ударяемого тела.

При этом породы непосредственной кровли разрабатываемого угольного пласта должны деформироваться в установленных пределах, когда выполняются соответствующие условия прочности для определённого типа и вида нагружения боковых пород. Величину критических напряжений в таком случае, определяют исходя из формулы Эйлера [9].

Однако ее применение имеет ряд ограничений, которые должны учитывать момент потери устойчивости балки, когда действующие в любом ее сечении напряжения не превышают предела пропорциональности. В тех случаях, когда такие условия не выполняются, разрушение балок будет происходить от действующих изгибных напряжений.

Для таких условий пределы применимости формулы Эйлера, можно установить исходя из понятия предельной гибкости балки, величина которой зависит от физико-механических свойств пород непосредственной кровли, т.е.

$$\lambda_{np} = \pi \sqrt{E/[\sigma_{изг}]}, \quad (6)$$

где $[\sigma_{изг}]$ - предел прочности пород непосредственной кровли на изгиб, Н/м²; E - модуль упругости пород непосредственной кровли, Н/м².

Очевидно, что для рассматриваемых условий, с учетом формулы Эйлера, при расчете на устойчивость пород непосредственной кровли, в результате обрушений боковых пород в выработку, критическая нагрузка всегда подобна разрушающей, при расчете балки на изгиб.

Учитывая динамические критерии разрушения боковых пород, величину напряжений, возникающих в балке при соударении расслоившихся пород при их обрушении, можно определить как в [17,18]

$$\sigma = v \cdot \cos \alpha \sqrt{E\rho/2} \quad (7)$$

где v – скорость соударения твердых тел, м/с; α – угол падения пласта, град; ρ – плотность пород непосредственной кровли, кг/м³.

С использованием выражения (7) можно установить зависимость изменения величины напряжений в породах непосредственной кровли – балки, с учетом вариации скорости соударения твердых тел. Эта зависимость позволит определить величину критических напряжений, при которых происходит потеря устойчивости пород непосредственной кровли при различной скорости соударения обрушившихся пород. Не исключено, что напряжения, возникающие в ударяемом теле с учетом значений скоростей соударения более $v=15-30$ м/с, могут существенно изменить механические характеристики пород кровли и оказать существенное влияние на природу разрушения боковых пород.

Таким образом, при разработке угольных пластов на больших глубинах в результате расслоения боковых пород, опасность возникновения аварийных ситуаций исходит от обвалов и обрушений пород кровли.

При определенных параметрах породной консоли и отсутствии ее эффективного подпора со стороны выработанного пространства, при действии внезапных динамических нагрузок, вероятность завала горных выработок всегда возрастает.

Применение закладки выработанного пространства в таких условиях позволит существенно изменить геомеханическую обстановку в окрестности поддерживаемых в углепородном массиве горных выработок и улучшить состояние боковых пород, а также повысить безопасность труда горнорабочих и ведения горных работ.

Выводы и направление дальнейших исследований. При разработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях, для предотвращения аварийных ситуаций в результате обрушения расслоившейся породной толщи, вмещающих горные выработки, необходимо ориентироваться на способ управления кровлей – закладкой выработанного пространства.

Это позволит повысить безопасность труда горнорабочих и эффективность отработки угольных пластов на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях.

Список літератури

1. Николин В.И. Снижение травматизма от проявлений горного давления / В.И. Николин, С.В. Подкопаев, А.В. Агафонов, Н.В. Малеев. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 232 с.
2. Селезень А.Л. Поддержание подготовительных выработок при разработке крутых угольных пластов / А.Л.Селезень, А.Г.Томасов, В.Ф.Андрушко – М.: Недра, 1977. – 205с.
3. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Унвер – М.: Машиностроение, 1985. – 472с.
4. Методические указания по изготовлению моделей из оптически чувствительных материалов для исследования проявлений горного давления. – Л.: ВНИМИ, 1970. – 180 с.
5. Хаимова-Малькова Р.И. Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. – Наука, 1970. - 194 с.
6. Баклашов И.В. Деформируемость и разрушение породных массивов / И.В. Баклашов – М.:Недра, 1988. – 271с.
7. Норель Б.К. Изменение механической прочности угольного пласта в массиве / Б.К. Норель – М.: Наука, 1983. – 201 с.
8. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер – М.: Наука, 1979. – 560с.
9. Циглер Ф. Механика твердых тел и жидкостей. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 912с.
10. Gross D., Ehlers W., Wriggers P, Schroder I, Muller R. Dynamics – Formulas and Problems: Engineering Mechanics. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, 2017. – 249p. – ISBN: 3662534363
11. Varuh H. Applied Dynamics. Taylor Francis Group. LLS., 2015. – 872p. – ISBN:148225073X
12. Richard F.E., Whitman R.V. Comparison of footing vibration with theory. – I. Soil Mech. And Found. Div. ASCE, 1967. - №93,6 – p.143-168
13. Ильин М.М. Теория колебаний / М.М. Ильин, К.С. Колесников, Ю.С. Саратов – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 271 с.
14. Подкопаев С.В., Иорданов И.В., Чепига Д.А. О динамических нагрузках при внезапных обрушениях боковых пород // Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва. – Науково-виробничий журнал: Кременчуцький нац. ун-т ім. М.Остроградського: Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип.2(18) – с.99-112.
15. Тригуб А.М., Штагер Е.В. Приближенные способы оценки коэффициента восстановления при соударении твердых тел // Современные наукоемкие технологии. – 2014. - №5. – 1. – с.91-93; URL: <https://www.top.technologies.ru/ru/article/view?id=33723>.
16. Ginsberg I. Engineering Dynamics. Cambridge University Press. 2008. – 726p. – ISBN:0521883032.
17. Кочетков А.В., Федоров П.В. Некоторые вопросы теории удара // Наукоедение. Интернет-журнал. №5. 2013 – с.1-15 / <http://publ.naukovedemie.ru>
18. Лапшин В.В. Удар тела о препятствие // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. – Вып.12. – 17с. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1134.html> DOI: 10.18698/2308-6033-2013-12-1134.
19. Bottega W.I. Engineering Vibrations. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. – 727 p. – ISBN: 0849334209

Рукопись поступила в редакцию 07.04.17

УДК 624.012.45

П.І. ГЕРБ, канд. техн. наук., доц., О.І. ВАЛОВОЙ, канд. техн. наук., проф.
Криворізький національний університет

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ ГЗК, ЯК ЗАПОВНЮВАЧА В БЕТОНАХ, ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ПРИ ПІДСИЛЕННІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

Мета. Метою даної роботи є порівняння експериментальних і розрахункових значень ширини розкриття тріщин підсиленних у розтягнутій зоні залізобетонних балок на відходах збагачення залізних руд при малоциклових навантаженнях.

Методи дослідження. Для експериментальних досліджень були виготовлено п'ять серій залізобетонних балок з бетону на відходах збагачення залізних руд. Всі серії балок, крім першої, були попередньо навантажені зусиллям яке становило 0,7...0,8 від руйнівного навантаження першої серії. Після чого балки були розвантажені та підсилені нарощуванням у розтягнутій зоні шаром бетону. Балки підсилювалися нарощуванням у розтягнутій зоні шаром бетону на відходах збагачення залізних руд.

Наукова новизна. вперше отримано експериментальні дані щодо тріщиностійкості підсиленних у розтягнутій зоні згинальних залізобетонних елементів з бетону на заповнювачах із відходів збагачення залізних руд, які зазнають дії малоциклових навантажень високих рівнів. Виявлено закономірність характеру утворення й розкриття тріщин від