

ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

Выпуск 20 (63) 2020



СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник
научных трудов
Донбасского государственного технического
института**

Сборник
Выходит 4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 20 (63) 2020

Collection of Scientific Papers of DonSTI

Collection
Publishing 4 times a year
Founded in June 1999
Issue 20 (63) 2020

Алчевск
2020

Распространение и тиражирование без официального разрешения ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» запрещено

УДК 622(06) + 669(06) + 69(06) + 65.011.56 +
+ 621.3 + 33 + 621.37 + 1

**Сборник научных трудов
Донбасского государственного
технического института**

Сборник

Выпуск 20 (63) 2020

**Основатель:
ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»**

*Свидетельство Министерства связи
и массовых коммуникаций ЛНР
о регистрации средства массовой информации
ПШ 000169 от 08.12.2020*

*Приказом Министерства образования и науки
Донецкой Народной Республики от 2 мая 2017 г.
№ 464 сборник научных трудов включён в Перечень
рецензируемых научных изданий, в которых
должны быть опубликованы основные научные
результаты диссертаций на соискание учёной
степени кандидата наук, на соискание учёной
степени доктора наук, утверждённый приказом
Министерства образования и науки Донецкой
Народной Республики от 1 ноября 2016 г. № 1134,
согласно приложению 1*

*Приказом МОН ЛНР № 911-ОД от 10.10.2018
сборник научных трудов ДонГТИ внесён в Перечень
рецензируемых научных изданий, в которых должны
быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание учёной степени
кандидата наук, на соискание учёной степени
доктора наук, утверждённый приказом
Министерства образования и науки Луганской
Народной Республики от 15 мая 2018 г. № 477-ОД*

*Рекомендовано учёным советом
ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»
(Протокол № 5 от 25.12.2020)*

Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ

Формат 60×84½
Усл. печат. л. 13,5
Заказ № 397
Тираж 100 экз.

Издательство не несёт ответственности за содержание
материала, предоставленного автором к печати

Адрес редакции, издателя и основателя:
ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, ЛНР
94204

E-mail: info@dstu.education
Web-site: http://www.dstu.education

ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕНТР,
ауд. 2113, т./факс 2-58-59
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя
и распространителя средства массовой информации
МИ-СГР ИД 000055 от 05.02.2016

Главный редактор

Куберский С. В. — к.т.н., проф., и. о. ректора

Заместитель главного редактора

Вишневецкий Д. А. — к.т.н., доц.

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.

Борщевский С. В. — д.т.н., проф.

Корнеев С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. А. — к.т.н., доц.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Зинченко А. М. — к.э.н., доц.

Зелинский А. Н. — к.т.н., проф.

Снитко С. А. — д.т.н., проф.

Должиков В. В. — к.т.н., доц.

Денищенко П. Н. — к.т.н., доц.

Шолух Н. В. — д. арх., проф.

Андрійчук Н. Д. — д.т.н., проф.

Пилавов М. В. — д.т.н., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной
коллекции

Для научных сотрудников, аспирантов,
студентов высших учебных заведений.

Язык издания:
русский, английский

Компьютерная вёрстка
Исмаилова Л. М.

© ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2020
© Чернышова Н. В., художественное
оформление обложки, 2020

НАУКИ О ЗЕМЈЕ

GEOSCIENCES

УДК 622.831.2

*д.т.н., проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)*

РАЗМЕРЫ И КОНФИГУРАЦИЯ ЗОНЫ ЗАПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ

Работа направлена на повышение достоверности и дальнейшее развитие методов прогноза проявлений горного давления в подземных выработках при образовании зон запредельных деформаций (ЗЗД). Впервые получено порождающее решение краевой задачи о равновесии разрушенных пород вокруг горной выработки с учетом возникающей в ЗЗД радиальной прочностной неоднородности пород. Показано, что прочность разрушенных пород в ЗЗД линейно зависит от радиальной (минимальной) компоненты тензора напряжений. Методом малого параметра решен ряд неосесимметричных задач горной геомеханики, установлены закономерности влияния на конфигурацию и размеры ЗЗД основных горнотехнических факторов. Результаты будут полезны при разработке новых методов прогноза горного давления и пересмотре нормативных материалов по обеспечению устойчивости выработок.

Ключевые слова: горная выработка, горное давление, запредельные деформации, методы расчета, устойчивость пород, конфигурация зоны разрушения, прочностная неоднородность, неосесимметричные факторы.

1 Актуальность проблемы и цель исследований

Расчет проявлений горного давления (ПГД) в подготовительных горных выработках является неотъемлемым атрибутом процесса проектирования для обеспечения безопасной и надежной их эксплуатации. Методы расчета ПГД претерпели долгую историю создания, развития и совершенствования, что отражено в многочисленных исследованиях и обширных обзорах отечественных и зарубежных ученых [1–5 и др.].

В настоящее время общепринято считать, что в условиях больших глубин, на которые повсеместно переходят рудники и шахты, из всех возможных многообразных форм ПГД (вывалы, своды естественного равновесия, продольно-поперечный изгиб и выпучивание слоев и др.) начинает преобладать разрушение пород в виде формирования зон запредельного деформирования (ЗЗД) пород вокруг всей выработки или на части ее породного контура.

ЗЗД вокруг выработки возникает, растет и принимает окончательную форму под влиянием многочисленных на нее влияющих неосесимметричных факторов. К та-

ким факторам в первую очередь следует отнести:

- разнокомпонентность исходного поля напряжений массива горных пород, т. е. его негидростатическое напряженно-деформированное состояние;
- анизотропию и неоднородность прочностных свойств пород вокруг выработки;
- массовые силы, действующие на породы внутри ЗЗД;
- отличие формы породного контура выработки от кругового очертания;
- неравномерность отпора (реакции) крепи на различных участках породного контура выработки.

При этом в подавляющем большинстве существующих методов расчета ПГД по умолчанию принималось, что влияющие на ЗЗД факторы являются осесимметричными или несущественными. Однако практика ведения горных работ и многочисленные шахтные инструментальные наблюдения показали, то форма ЗЗД претерпевает существенные искажения и чаще всего заметно отличается от круговой формы. А форма ЗЗД предопределяет амплитуду и изменчивость смещений пород

в выработку, распределение и интенсивность нагрузки на крепь.

Следовательно, для повышения достоверности и надежности расчетных методов прогнозирования ПГД необходимо установить размеры и форму ЗЗД и оценить влияние самых важных горно-геологических и горнотехнических факторов. Достижению этой цели и посвящена данная работа.

Особенностью проведенного исследования является изучение изменения формы ЗЗД для наиболее общего случая разрушения пород вокруг выработки на основе «порождающего» решения краевой задачи развития ПГД. Под порождающим решением мы понимаем исходное решение осесимметричной краевой задачи об образовании ЗЗД с учетом радиальной прочностной неоднородности внутри зоны разрушения.

Основная идея работы состоит в том, что полученное порождающее решение используется в качестве исходного с целью последующей коррекции путем использования метода малого параметра для каждого из возможных неосесимметричных факторов.

Объект исследования — зона разрушения и трещинообразования пород массива вокруг выработки, т. е. ЗЗД.

Предмет исследования — закономерности изменения формы ЗЗД при учете воздействия наиболее существенных неосесимметричных факторов.

Цель исследований — получение порождающего решения и разработка метода расчета конфигурации и размеров ЗЗД с учетом основных неосесимметричных факторов.

Основные задачи исследования:

– для получения порождающего решения дать обоснование расчетной схемы и получить решение осесимметричной краевой задачи об образовании ЗЗД вокруг выработки с учетом радиальной прочностной неоднородности пород в этой зоне;

– выполнить постановку и решение неосесимметричного класса задач методом малого параметра для учета важнейших, ранее неучтенных неосесимметричных факторов;

– произвести анализ и оценить степень влияния каждого из неосесимметричных факторов на форму ЗЗД.

2 Обоснование расчетной схемы задачи

Попытки разработать методы расчета параметров ЗЗД делались многими зарубежными и отечественными учеными начиная с середины прошлого века (Р. Феннер, А. Лабасс, Л. Уокер, Г. Шпакеллер, Ю. М. Либерман, Ю. З. Заславский и др.), подробный анализ их исследований можно найти во многих обзорах [1–5 и др.].

На ранних стадиях развития горной промышленности, на сравнительно малых глубинах H ведения горных работ, разрушение пород в окрестности горных выработок происходило в основном в виде образования сводов естественного равновесия [1].

С ростом глубины исходное напряженное состояние массива (рис. 1, *a*) претерпевает серьезные изменения: вертикальная компонента, равная весу вышележащей толщи пород $\sigma_z = \gamma H$, возрастает пропорционально глубине H , а боковые (горизонтальные) напряжения $\sigma_x = \sigma_y$ составляют лишь часть λ от вертикальных, с глубиной приближаясь к σ_z .

Соотношение между горизонтальными σ_x и вертикальными σ_z напряжениями в нетронутым горном массиве было названо коэффициентом бокового распора λ

$$\lambda = \sigma_x / \sigma_z \leq 1. \quad (1)$$

Своды естественного равновесия (СЕР) возникали в условиях «малых глубин», когда коэффициент бокового распора отвечал неравенству $\lambda < 1$. Это вызывало появление в кровле и (или) почве выработки растягивающих напряжений, и происходило разрушение пород в виде трещин разрыва (см. рис. 1, *b*).

Главная особенность «больших» глубин разработки, где зачастую напряженное состояние близко к гидростатическому $\lambda \approx 1$, состоит в том, что разрушение пород вокруг выработок происходит от напряже-

ний сжатия, приводящих к развитию трещин сдвига. Последние появляются вначале вблизи породного контура выработки, а затем распространяются далее в окружающий массив и образуют зоны разрушения и запредельных деформаций (ЗЗД).

Большинство ранее предложенных геомеханических моделей разрушения и деформирования пород вокруг горных выработок базировались примерно на одинаковых предпосылках и расчетных схемах (рис. 1, в). А именно, в нетронутом горном массиве действует гидростатическое исходное поле напряжений от веса вышележащих пород

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma H, \quad \lambda \approx 1. \quad (2)$$

где γ — плотность горных пород, кг/м³;
 H — глубина расположения горной выработки, м.

Вокруг круглой выработки при $\lambda \approx 1$ возникает осесимметричное плоско деформированное упругое поле напряжений в виде радиальной σ_r и окружной (тангенциальной) σ_θ компонент (см. рис. 1, в).

Расчетные формулы, полученные решением краевых осесимметричных задач при разных математических моделях массива пород, систематизированы в таблице 1.

Если постулировать, что порода в ЗЗД после разрушения становится близкой по свойствам к сыпучей среде, то ее прочность равна нулю $\sigma_c(r) = 0$, и получаем решение Р. Феннера. При допущении, что прочность внутри ЗЗД постоянна $\sigma_c(r) = Const$, получаем решение А. Лабасса, а пластичная среда была исследована в известной задаче А. Галина (табл. 1).

Анализ всех этих моделей показывает, что им присущ общий существенный недостаток — в них предполагается, что внутри ЗЗД породы однородны, т. е. после разрушения их прочностные свойства постоянны и не изменяются вдоль радиуса по мере удаления от контура выработки до границы ЗЗД. Такое несоответствие расчетных схем реальному поведению пород в ЗЗД приводит к необъяснимо большому разбросу расчетных радиусов зон разрушения и смещений пород для различных принятых ранее моделей их поведения.

На самом деле внутри ЗЗД прочность разрушенных пород весьма изменчива: она минимальна на контуре выработки и постепенно возрастает по мере приближения к внешней границе ЗЗД.

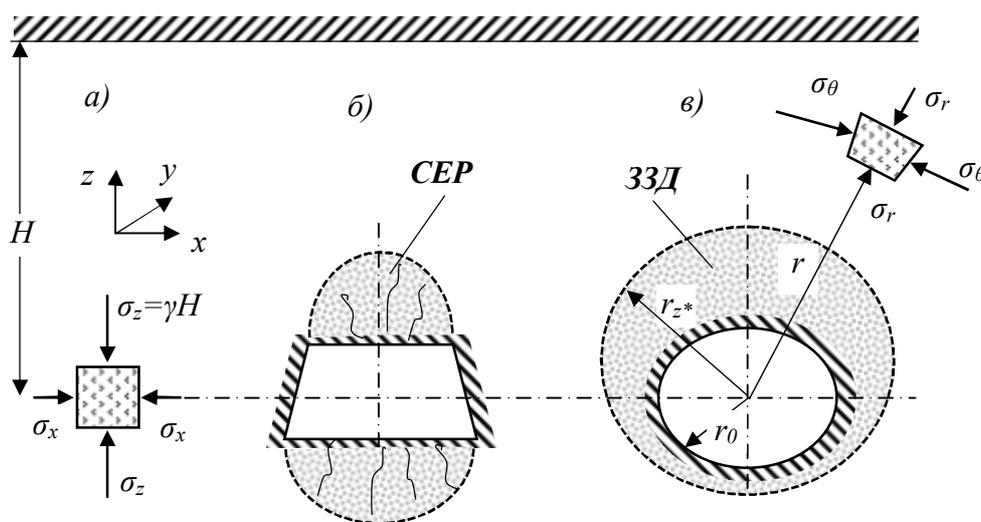


Рисунок 1 — Расчетные схемы ПГД вокруг выработки:
а) напряжения в массиве горных пород; б) свод естественного равновесия СЕР;
в) зона запредельных деформаций ЗЗД

Таблица 1

Параметры ЗЗД вокруг горной выработки для разных моделей горных пород

Модель среды в ЗЗД	Напряжения в ЗЗД $a \leq r \leq r_*$	Радиус ЗЗД r_* и смещения пород u в ЗЗД
1. Сыпучая $F_n = \sigma_\theta - A\sigma_r = 0$ (Р. Феннер)	$\sigma_r = q \left(\frac{r}{a} \right)^{A-1}$ $\sigma_\theta = Aq \left(\frac{r}{a} \right)^{A-1}$	$r_* = a \left[\frac{2p}{(A+1)q} \right]^{\frac{1}{(A-1)}}$ $u = \frac{r}{2G} (p - \sigma_r^*) \left(\frac{r_*}{r} \right)^{A+1}$
2. Идеально-пластичная $F_n = \sigma_\theta - \sigma_r - 2k = 0$	$\sigma_r = q + k \ln \frac{r}{a}$ $\sigma_\theta = q + k \ln \frac{r}{a} + 2k$	$r_* = a \exp \frac{p - k - q}{2 - k}$ $u = \frac{p - \sigma_r^*}{2G} \cdot \frac{r_*^2}{r}$
3. Идеально-связная $F_n = \sigma_\theta - A\sigma_r - \sigma_{сжс} = 0$ (А. Лабасс)	$\sigma_r = (q + c) \left(\frac{r}{a} \right)^{A-1} - c$ $\sigma_\theta = A(q + c) \left(\frac{r}{a} \right)^{A-1} - c$	$r_* = a \left[\frac{2(p + c)}{(A+1)(q + c)} \right]^{\frac{1}{(A-1)}}$ $u = \frac{p - \sigma_r^*}{2G} r \left(\frac{r_*}{r} \right)^{A+1}$
4. Связная, после разрушения — сыпучая $F_n = \sigma_\theta - A\sigma_r = 0$ (проф. Ю. М. Либерман)	$\sigma_r = q \left(\frac{r}{a} \right)^{A-1}$ $\sigma_\theta = A \left(\frac{r}{a} \right)^{A-1}$	$r_* = a \left[\frac{2p - \sigma_{сжс}}{(A+1)q} \right]^{\frac{1}{(A-1)}}$ $u = \frac{p - \sigma_r^*}{2G} r \left(\frac{r_*}{r} \right)^{A+1}$

Примечание: a — радиус выработки, $p = \gamma H$ — давление пород; q — отпор крепи; $A = (1 + \text{Sin} \rho) / (1 - \text{Sin} \rho)$; c, G — сцепление и модуль сдвига пород; r_*, σ_r^* — радиус границы ЗЗД и радиальное напряжение на ней; u — смещения пород на контуре выработки.

Поэтому целесообразно получить в качестве исходной модели поведения пород в ЗЗД новое решение, где этот принципиальный недостаток будет устранен. Только тогда можно принять это решение в качестве исходного — порождающего. Оно может служить основой для последовательного отказа от принятых в ней идеализаций, главной из которых следует считать осесимметричность. Остальные расчетные схемы, где не учитывается радиальная неоднородность прочности частично разрушенных пород в ЗЗД, будут охватываться предложенным порождающим решением как частные случаи.

3 Получение порождающего решения задачи об образовании ЗЗД

Пусть горная выработка круглой формы радиуса r_0 расположена на глубине H . Исходное напряженное состояние массива является гидростатическим, тогда все компоненты тензора напряжений равны давлению p вышележащей толщии пород. Так, для произвольно расположенной в массиве декартовой системы координат x, y, z для напряжений будет соблюдаться равенство (рис. 1, в)

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = p, \quad (3)$$

где p — давление вышележащей толщи горных пород $p = \gamma H$, Па ;

γ — усредненный по всей глубине H объемный вес пород, $\gamma \approx 25$ кН/м³.

На достаточно удаленном расстоянии от забоя протяженной выработки (не менее 3...4 ее радиусов r_0) массив находится в плоско деформированном состоянии. Если направить ось z по вертикали, ось y по горизонтали и ось x вдоль оси выработки, то в окрестности выработки деформации пород удовлетворяют равенствам $\varepsilon_x = Const$, ε_y , $\varepsilon_z = Var$.

Введем полярную систему координат r, θ с началом $r=0$ в центре выработки (см. рис. 1, в). Задача состоит в определении напряженно-деформированного состояния пород при образовании зоны запредельных деформаций вокруг выработки, на контуре которой установлена податливая крепь с постоянным отпором, равным $q = Const$.

До образования ЗЗД вокруг горной выработки действует упругое поле напряжений по известному из теории упругости закону (в полярной системе координат r, θ) для области $r_0 \leq r < \infty$

$$\left. \begin{matrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{matrix} \right\} = p \mp (p - q) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2; \quad \tau_{r\theta} = 0; \quad (4)$$

где σ_r , σ_θ и $\tau_{r\theta}$ — радиальное, тангенциальное (окружное) и касательное напряжения вокруг выработки.

При осевой симметрии нормальные напряжения являются главными, причем тангенциальное $\sigma_\theta = \sigma_1$ является максимальным, а радиальное $\sigma_r = \sigma_3$ — минимальным.

Если прочность горных пород σ_c на контуре горной выработки окажется меньше действующих напряжений (4), возникает ЗЗД, где породы полностью или частично разрушены, т. е. возникает прочностная неоднородность.

Для решения задачи о распределении напряжений σ_r , σ_θ в кольцевой ЗЗД вокруг круглой горной выработки радиуса r_0 , в которой установлена крепь постоянного сопротивления q , необходимо решить систему из двух уравнений:

а) уравнение равновесия в полярной системе координат r, θ при осевой симметрии

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0; \\ \tau_{r\theta} &= 0; \quad (r_0 \leq r < r_z), \end{aligned} \quad (5)$$

где r_z — радиус ЗЗД вокруг выработки, подлежащий определению;

б) уравнение состояния (прочности) разрушенной горной породы внутри ЗЗД при $(r_0 \leq r < r_z)$, которое принимаем в виде линейного паспорта прочности

$$\sigma_\theta = k_\rho \sigma_r + \sigma_c, \quad (6)$$

где σ_c — показатель прочности пород в ЗЗД на одноосное сжатие с учетом масштабного фактора;

k_ρ — коэффициент угла внутреннего трения пород, равный

$$k_\rho = (1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho), \quad 0 \leq k_\rho \leq 3;$$

где ρ — угол внутреннего трения пород, град., $0 \leq \rho \leq 30^\circ$.

На уравнении (6), несмотря на его кажущуюся простоту, следует остановиться подробнее ввиду его высокой важности. В отличие от всех ранее выполненных постановок подобных задач (см. табл. 1), когда прочность пород внутри ЗЗД всегда считали постоянной $\sigma_c(r) = Const$, мы отказываемся от такого упрощения.

На основании изучения поведения пород при запредельном деформировании, пришло понимание, что на самом деле прочность породы в ЗЗД σ_c изменяется вдоль радиуса от минимальной на контуре горной выработки до исходной (ненарушенной) на границе между ЗЗД и упругой зоной.

Вся сложность математической модели о развитии проявлений горного давления вокруг горной выработки состоит в правильном отражении этой важнейшей закономерности.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями запредельного деформирования и разрушения материалов и горных пород при их объемном нагружении в стабилометрах доказано, что изменение их прочности на ниспадающей ветви диаграммы полностью контролируется боковым подпором, т. е. минимальной компонентой объемного нагружения [6, 7 и др.].

Такая закономерность хорошо прослеживается на рисунке 2, где приведены результаты испытаний образцов угля при их многокомпонентном нагружении в стабилометре. Графики запредельного поведения угля в координатах «деформация — напряжение» $\varepsilon_1 - \sigma_1$ при разных значениях бокового давления σ_3 показывают почти прямо пропорциональную зависимость σ_1 от уровня минимального напряжения σ_3 (рис. 2).

Поэтому вполне обоснованно можно полагать, что остаточная прочность пород $\sigma_c(r)$ вдоль радиуса r в ЗЗД пропорциональна минимальной компоненте напряженного состояния, т. е. радиальному напряжению σ_r . В первом, достаточно приемлемом приближении вполне допустимо принять эту зависимость линейной

$$\sigma_c(r) = k_c \sigma_r, \quad (7)$$

где k_c — коэффициент сопротивления пород горному давлению, зависящий от условий разрушения пород внутри ЗЗД и определяемый из граничных условий развития области разрушения пород вокруг горной выработки.

Подставляя (7) в (6), получим искомое уравнение условия прочности пород в ЗЗД

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= k_p \sigma_r + \sigma_c(r) = k_p \sigma_r + k_c \sigma_r = \\ &= (k_p + k_c) \sigma_r. \end{aligned} \quad (8)$$

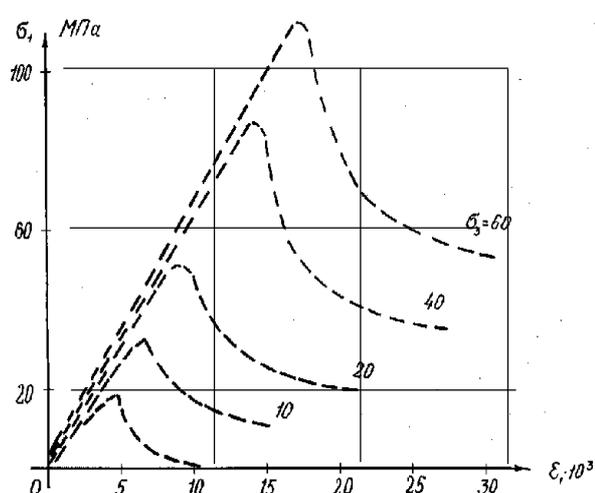


Рисунок 2 Диаграмма испытаний угля при трехосном сжатии (по данным ВНИМИ [6])

После подстановки (8) в исходное дифференциальное уравнение равновесия (5) и его интегрирования с учетом граничного условия (при $r = r_0$ $\sigma_r = q$) получим значения напряжений внутри ЗЗД

$$\begin{aligned} \sigma_r &= q \left(\frac{r}{r_0} \right)^\mu, \quad \sigma_\theta = (\mu + 1) q \left(\frac{r}{r_0} \right)^\mu, \quad (9) \\ \tau_{r\theta} &= 0, \quad (r_0 \leq r < r_z), \end{aligned}$$

где $\mu = k_p + k_c - 1$ — коэффициент, учитывающий сопротивление разрушению и суммирующий влияние коэффициентов k_p , k_c , он показывает степень сопротивления породы развитию ЗЗД вокруг выработки.

Чтобы найти граничный радиус ЗЗД r_z , воспользуемся условием равенства радиальных σ_r и тангенциальных σ_θ напряжений по обе стороны границы ЗЗД $r = r_z$, которые следует определить по уравнениям (4) и (9). После несложных преобразований получим искомую зависимость

$$r_z = r_0 \left[\frac{2p}{(\mu + 2)q} \right]^{1/\mu} = r_0 \left[\frac{2p - \sigma_c}{(k_p + 1)q} \right]^{1/\mu}. \quad (10)$$

Для определения значения коэффициента сопротивления k_c воспользуемся до-

полнительным условием, требующим, чтобы на границе с упругой областью прочность пород была равна исходному своему значению в массиве, т. е. $\sigma_c(r_z) = \sigma_c = k_c \sigma_r(r_z)$. Используя выражение (10), получим для коэффициента сопротивления k_c и коэффициента разрушения μ удобные формулы для определения по исходным данным

$$\begin{aligned} k_c &= (k_\rho + 1) \frac{\sigma_c}{2p - \sigma_c}; \\ \mu &= 2 \frac{(k_\rho - 1)p + \sigma_c}{2p - \sigma_c}. \end{aligned} \quad (11)$$

Из (11) можно установить пределы возможного изменения установленных коэффициентов. Так, эти пределы равны: $0 < k_c < \infty$ для коэффициента сопротивления и $k_\rho + 1 < \mu < \infty$ для коэффициента устойчивости μ , где нижний предел получен для сыпучей среды $\sigma_c = 0$, а верхний (при отсутствии ПГД в выработке) для обоих случаев одинаков и достигается при $2p - \sigma_c = 0$, т. е. когда ЗЗД не образуется.

Чтобы получить распределение напряжений вокруг выработки за пределами ЗЗД при $r > r_z$, используем известное решение теории упругости о напряжениях в окрестности подкрепленных круглых отверстий.

За контур отверстия мы принимаем границу ЗЗД r_z , на которой действует радиальное напряжение σ_{rz} , а его определим из ранее полученной зависимости (9) при $r = r_z$. Подставляя (10) в (9), получим для радиального подпора на границе r_z

$$\sigma_{rz} = q \left(\frac{r_z}{r_0} \right)^\mu = \frac{2p}{\mu + 2} = \frac{2p - \sigma_c}{k_\rho + 1} \quad (12)$$

при $(r = r_z)$.

Подставляя в (4) вместо отпора крепи q значение σ_{rz} из (12) и r_z вместо началь-

ного радиуса выработки r_0 , получим искомое распределение упругих напряжений за пределами ЗЗД

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{aligned} \right\} = p \left[1 \mp \frac{\mu}{\mu + 2} \left(\frac{r_z}{r} \right)^2 \right]; \quad (13)$$

$$\tau_{r\theta} = 0; (r_z \leq r < \infty).$$

Это распределение напряжений при возрастании радиуса $r \rightarrow \infty$ асимптотически стремится к уровню исходного напряженного состояния массива пород $\sigma_r = \sigma_\theta = p$. На границе ЗЗД сохраняется непрерывность радиальных и тангенциальных напряжений и смещений.

Более того, оказывается, что радиальное напряжение σ_{rz} на границе ЗЗД не зависит от размеров выработки и отпора q установленной в ней крепи. А если из уравнения (9) мы найдем такое значение отпора крепи, при котором ЗЗД не образуется, т. е. $r_z = r_0$, то это будет не что иное, как требуемая величина отпора (грузонесущей способности) идеально жесткой крепи, совпадающая с (12)

$$q_z = \sigma_{rz} = \frac{2p}{\mu + 2} = \frac{2p - \sigma_c}{k_\rho + 1}, (r_0 = r_z), \quad (14)$$

где q_z — минимальное значение отпора жесткой крепи, устанавливаемой в горной выработке, которое предотвращает возникновение ЗЗД.

Зависимость (14) дает верхнюю теоретическую границу для выбора отпора q жесткой крепи в горной выработке, которая прямо зависит только от исходного поля напряжений и от коэффициента устойчивости μ . Если порода не обладает прочностью, т. е. является идеально сыпучей средой, тогда $k_c = 0$ и коэффициент устойчивости принимает минимальное значение

$$\mu = k_\rho - 1 = \frac{2 \sin \rho}{1 - \sin \rho}.$$

Нижнюю границу отпора для податливой крепи можно считать минимальной грузонесущей способностью q_m , при возникновении ЗЗД она всегда должна быть больше нуля $q_m > 0$. При образовании ЗЗД горная выработка без крепи существовать не может и будет полностью разрушена, т. е. произойдет «завал» выработки.

Таким образом, нами получено порождающее решение осесимметричной плоской упругопластической задачи для находящейся в изотропном, гидростатически нагруженном массиве круглой выработки с равномерным отпором крепи.

Важным новым отличием решения является учет прочностной неоднородности при разрушении пород: в пределах ЗЗД прочность частично разрушенных пород (разупрочнения) изменяется прямо пропорционально радиальным напряжениям. Такая предложенная закономерность органически вытекает из поведения пород на ниспадающей ветви диаграммы нагружения, т. е. имеет убедительное экспериментальное обоснование.

Это позволило значительно улучшить учет особенностей реальных процессов разрушения пород в ЗЗД и стать достаточно достоверным базисом для дальнейших построений расчетных методов прогноза проявлений горного давления в выработках.

4 Исследование закономерностей влияния неосесимметричных факторов на ПГД

Основная идея решения неосесимметричного класса задач горной геомеханики состояла в следующем. Исследование закономерностей влияния неосесимметричных факторов на форму и размеры зоны неупругих деформаций производилось асимптотическим методом малого параметра путем последовательного отказа от принятых в порождающем решении (7–9) идеализаций расчетной схемы, которые, хотя и являются общепринятыми в подобного рода решениях, заметно снижают достоверность результатов расчетов.

Исследуемый неосесимметричный фактор вводился в порождающее решение с помощью малого параметра, как правило, в виде комплексного ряда Фурье. Сначала рассматривалось статическое равновесие пластической области вокруг отверстия в соответствии с уравнениями равновесия при плоской деформации в полярной системе координат

$$\begin{aligned}\sigma_{r,r} + r^{-1}(\tau_{r\theta,\theta} + \sigma_r - \sigma_\theta) &= -\varepsilon_r \gamma \sin \theta, \\ \tau_{r\theta,r} + r^{-1}(\sigma_{\theta,\theta} + 2\tau_{r\theta}) &= -\varepsilon_r \gamma \cos \theta,\end{aligned}$$

где запятой обозначено дифференцирование, а ε_r — малый параметр при учете сил гравитации.

Напряжения в пластической области представляли рядами по степеням малого параметра

$$\sigma_{ij} = \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon^k \sigma_{ij}^{(k)}, \quad (ij = r, \theta) \quad (15)$$

и выражали через функцию напряжений

$$\begin{aligned}\sigma_r^{(k)} &= r^{-1}U_{,r}^{(k)} + r^{-2}U_{,\theta\theta}^{(k)}, \\ \sigma_\theta^{(k)} &= U_{,rr}^{(k)}; \quad \tau_{r\theta}^{(k)} = -(r^{-1}U_{,\theta}^{(k)})_{,r},\end{aligned} \quad (16)$$

которая, в свою очередь, также вводилась в виде ряда разложения по степеням малого параметра из дифференциальных уравнений в частных производных второго или третьего порядка.

Решения этих дифференциальных уравнений получали в бесконечных рядах, комплексные коэффициенты которых определяли из граничных условий задачи. Затем задачу сводили к отысканию границы ЗЗД и функций Н. И. Мусхелишвили, голоморфных во всей плоскости вне границы и непрерывных вплоть до нее. Граничные значения этих функций определяли по функции в пластической области.

Конформно отображая внешность границы ЗЗД на внешность единичного круга с помощью функции в виде ряда по степеням малого параметра, воспользовавшись значениями функций Н. И. Мусхелишвили на

бесконечности и теоремой Ж. Лиувилля, определили искомые функции и неизвестные коэффициенты к ним, характеризующие форму упругопластической границы.

Используя принцип суперпозиции, действительный при учете первых степеней разложения по малому параметру, получили обобщенную формулу для определения конфигурации ЗЗД с учетом всех действующих неосесимметричных факторов (табл. 2).

$$z = \omega(\zeta) = r_*(\zeta + \sum_{j=1}^5 \varepsilon_j e^{i\theta_j} \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k^{(j)} \zeta^{1-k}), \quad (17)$$

где ζ — аффикс единичной окружности;

i — мнимая единица;

ε_j — малый параметр, соответствующий j -му фактору;

θ_j — угол отклонения оси симметрии j -го фактора от вертикали;

$\delta_k^{(j)}$ — коэффициент искажения формы ЗЗД для j -го фактора.

Решения неосесимметричных задач получены в достаточно общем виде для горных пород с ниспадающей ветвью диаграммы нагружения, а как частные случаи — для идеально пластичных материалов и сыпучих сред.

Общее качественное представление о влиянии изученных факторов на форму ЗЗД можно получить по рисунку 3, а количественный анализ показал следующее (см. табл. 2):

1. Негидростатичность исходного поля напряжений была учтена с помощью решения упругопластической задачи по методу, предложенному проф. А. Г. Протосеней (1972 г.). ЗЗД принимает форму эллипса, вытянутого по направлению действия минимального главного напряжения.

2. Прочностная анизотропия и неоднородность пород резко проявляется в слоистых массивах при наличии ориентированных систем трещин, ослаблений и неоднородных включений, а ее аналитическое представление получено разложением удельной силы сцепления породы в ком-

плексный ряд Фурье по окружному направлению. Коэффициенты разложения в ряд Фурье можно получить из полярных диаграмм прочности породы, построенных, например, с помощью портативного прибора для экспресс-испытаний горных пород ППЭИ-2м.

Форма ЗЗД представляет собой цилиндрическую поверхность с сечением, большая ось которой вытянута перпендикулярно напластованию горных пород. Степень «отклика» границы ЗЗД на возмущающее влияние прочностной анизотропии быстро затухает с возрастанием номера гармоники при разложении функции прочности в комплексный ряд Фурье. Поэтому в практических расчетах есть смысл рассматривать гармоники не выше третьего или четвертого порядка.

При номере гармоники $k=1$ прочностная анизотропия пород приобретает особый физический смысл прочностной неоднородности, под которой понимается изменение средневзвешенной прочности пород вокруг выработки по полярному углу. Решение позволяет оценить амплитуду конгруэнтного сдвига ЗЗД в сторону пород с пониженной прочностью. Степень влияния прочностной неоднородности весьма ощутима.

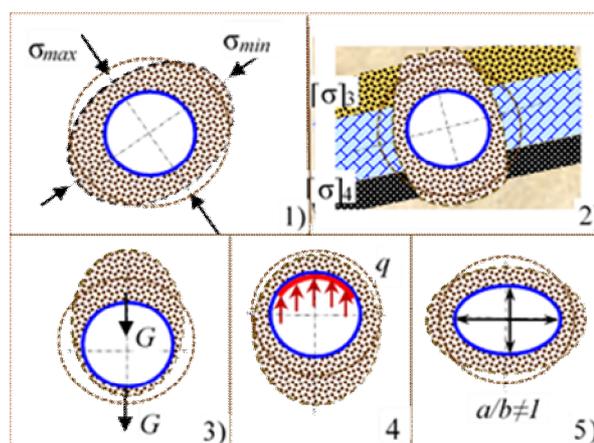


Рисунок 3 Изменения конфигурации ЗЗД под влиянием различных неосесимметричных факторов

3. При значительном развитии ЗЗД вокруг выработки собственный вес среды в пластической области приводит при малых значениях отпора крепи к сдвигу границы ЗЗД вверх по отвесной линии. Количественная оценка этого эффекта методом малого параметра для критической ситуации (обрушение пород) не вполне пригодна. Поэтому получена оценка сверху, позволяющая вычислить эффективный отпор крепи в кровле (-) и в почве (+) выработки

радиуса a , закрепленной крепью с конструктивным отпором q

$$q_* = q \pm \frac{\gamma \cdot a}{\mu - 1}. \quad (18)$$

Зависимость (18) дает очень важную в практическом отношении оценку минимальной грузонесущей способности крепи, устанавливаемой в выработке.

Таблица 2

Исследование формы зоны запредельных деформаций (ЗЗД) вокруг выработки

Возмущающий фактор и его аналитическое представление	Коэффициент формы границы ЗЗД
Разнокомпонентность (негидростатичность) исходного поля напряжений массива горных пород с коэффициентом бокового распора $\lambda \neq 1$	$\delta_2^{(1)} = \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda} (2 + \mu)$
Анизотропию и неоднородность прочностных свойств пород вокруг горной выработки учтем через переменную удельную силу сцепления $c(\theta) = \frac{\mu - A + 1}{A - 1} [1 + \varepsilon_2 f(\theta)];$ $f(\theta) = \sum_{-\infty}^{\infty} \omega_k e^{ik\theta}$	$\delta_k^{(2)} = -2 \frac{\mu - A + 1}{\mu(\mu + 1)(\mu + 2)} \frac{\omega_k}{k^2} \times$ $\times (M_k + 2 \operatorname{Re} N_{k^*} r_*^{-k})$
Массовые силы в зоне запредельных деформаций учитываем в виде дифференциального уравнения $\sigma_{r,r} + r^{-1} (\tau_{r\theta,\theta} + \sigma_r - \sigma_\theta) = -\varepsilon_3 \gamma \sin \theta$	$\delta_1^{(3)} = \frac{\gamma \cdot a}{2\mu \cdot q_* r_*} \frac{(\mu + 1)(\mu + 2)}{(\mu - 2)(2\mu - 1)};$ $q_* = q \pm \frac{\gamma \cdot a}{\mu - 1}$
Переменный отпор крепи по контуру горной выработки выразим в виде нормальных и касательных к контуру усилий $N = \sum_{-\infty}^{\infty} f_k e^{ik\theta}; T = \sum_{-\infty}^{\infty} \varphi_k e^{ik\theta};$ $f_k = f_{-k}; \varphi_k = -\varphi_{-k}$	$\delta_k^{(4)} = -\frac{2fk}{\mu p} \operatorname{Re}(M_{k^*} r_*^{\lambda_{k-2}})$
Некруговая (произвольная) форма контура выработки как функция текущего угла θ $r_0 = 1 + \varepsilon_5 f(\theta) = 1 + \varepsilon_5 \sum_{-\infty}^{\infty} w_k e^{ik\theta};$ $w_k = \pi^{-1} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) e^{ik\theta} d\theta$	$\delta_k^{(5)} = 4 \frac{\bar{w}_k}{\mu + 2} \operatorname{Re}(M_{k^*} r_*^{-\bar{\lambda}_k})$

4. Взаимодействие крепи с массивом при неравномерном ее отпоре удобно представить в виде вектора поверхностных усилий, разлагая нормальную и касательную его компоненты в ряд Фурье. При неравномерном отпоре крепи установлены следующие закономерности:

а) граница ЗЗД ближе к контуру выработки там, где вектор поверхностных усилий больше;

б) чем больше радиус ЗЗД, тем меньше влияние неравномерности отпора;

в) чем выше порядковый номер гармоники неравномерности отпора, тем меньше ее влияние на форму ЗЗД, что позволяет ограничиваться первыми тремя гармониками разложения вектора в ряд Фурье.

5. Учет некруговой формы отверстия показал, что граница ЗЗД в основном стремится повторить форму выработки и по мере роста ЗЗД довольно быстро приближается к круговой форме.

Исходя из особенности поведения решения, можно учесть возмущение контура выработки гармониками не выше четвертого порядка, чего вполне достаточно для практических расчетов. Область пригодности решения ограничена случаем границы ЗЗД и контура выработки.

Выполняя обобщение результатов исследований в этом направлении, можно заключить, что изученные факторы существенно различаются по своему влиянию на ЗЗД. Наиболее «дальнедействующими», а потому и важнейшими, являются разнокомпонентность исходного поля напряжения массива и прочностная анизотропия горных пород.

Неравномерность отпора крепи и некруговой контур выработки заметно сказываются на форме ЗЗД лишь при незначительном ее развитии, и их влияние быстро (по степенному закону) затухает по мере роста радиуса ЗЗД, что позволяет назвать их факторами «ближнего действия». Массовые силы в ЗЗД следует учитывать при незначительном конструктивном отпоре крепи и достаточном развитии ЗЗД.

Полученные 1...5 закономерности позволяют с учетом конкретных горно-геологических и горнотехнических условий нахождения горной выработки прогнозировать не только качественные, но и количественные показатели и особенности ПГД в выработках, что обеспечит надежность и долговечность их эксплуатации, повысит безопасность работ и снизит неоправданные издержки на их крепление, поддержание и ремонт, повысит эффективность подземных работ. Важным направлением дальнейших исследований становится пересмотр существующих и разработка новых отраслевых нормативных документов с учетом полученных научных результатов по прогнозированию ПГД в выработках, расположенных на больших глубинах разработки и находящихся в сложных горно-геологических условиях.

Выводы

Проведенные исследования позволили получить следующие новые научные результаты:

1. В настоящее время надежность и достоверность расчетных методов прогноза ПГД в выработках недостаточна, что во многом обусловлено несовершенством и примитивизмом принятых расчетных моделей.

2. Главным недостатком существующих модельных представлений и принятых идеализаций можно считать принимаемую по умолчанию гипотезу о неизменности прочностных свойств пород внутри ЗЗД и отсутствие учета влияния неосесимметричных факторов на размеры и конфигурацию ЗЗД.

3. На основании изучения поведения пород при запредельном деформировании впервые сформулирована и доказана закономерность о линейной зависимости в ЗЗД прочности от радиальной компоненты тензора напряжений.

4. Впервые решена краевая задача о равновесии ЗЗД вокруг выработки с учетом

радиальной прочностной неоднородности пород и получено порождающее решение о размерах ЗЗД и распределении напряжений в породном массиве вокруг одиночной протяженной горной выработки.

5. На основе полученного порождающего решения упругопластической задачи впервые сформулирован и решен с применением метода малого параметра ряд неосесимметричных задач горной геомеханики, установлены закономерности влияния на конфигурацию и размеры ЗЗД основных горнотехнических факторов: негидростатичности исходного поля напряжений, прочностной анизотропии и неоднородности горных пород, некруговой форма выработки, сил гравитации пород внутри ЗЗД.

6. Изучено влияние на конфигурацию ЗЗД различных неосесимметричных факторов, произведена их сравнительная оценка и сопоставление. Показано, что наиболее «дальнодействующими» являются негидростатичность исходного поля напряжений и прочностная неоднородность пород, менее значимо проявляются некруговая форма выработки и вес разрушенных пород в ЗЗД, а влияние отпора крепи тем больше, чем он ближе к критическому своему значению.

7. Дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск новых расчетных методов прогноза ПГД с целью пересмотра существующих и разработки новых отраслевых нормативных документов с учетом полученных научных результатов.

Библиографический список

1. Протодьяконов, М. М. Давление горных пород и рудничное крепление [Текст] / М. М. Протодьяконов. — М. — Л. : ОГИЗ, 1931. — 186 с.
2. Вопросы теории горного давления [Текст] : сб. переводов / под ред. проф. П. И. Городецкого, А. А. Борисова. — М. : Госгортехиздат, 1961. — 300 с.
3. Jovanović, P. Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorija [Text]. T. 2 / Petar Jovanović. — Beograd : Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta, 1994. — 316 str.
4. Заславский, Ю. З. Проявления горного давления в глубоких шахтах Донбасса [Текст] / Ю. З. Заславский. — М. : Недра, 1963. — 238 с.
5. Tajduś, A. Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projectowanie i budowa tuneli [Text] / Antoni Tajduś, Marek Gała, Krzysztof Tajduś. — Krakow : Akademia AGH, 2012. — 762 s.
6. Ставрогин, А. Н. Механика деформирования и разрушения горных пород [Текст] / А. Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня. — М. : Недра, 1992. — 224 с.
7. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст]. — Донецк : Норд-Пресс, 2008. — 207 с.

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. РПМ ДонНТУ Петренко Ю. А., к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТИ Шульгиным П. Н.

Статья поступила в редакцию 02.11.2020.

Prof. Litvinsky G. G. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

DIMENSIONS AND CONFIGURATION OF THE ZONE OF EXTREME DEFORMATIONS AROUND THE WORKING

The article is aimed at increasing the reliability and further development of methods for predicting the manifestations of rock pressure in underground workings during the formation of the extreme deformation zones (EDZ). For the first time, a generating solution of boundary problem of the equilibrium destroyed rocks around mine workings is obtained, considering the radial strength inhomogeneity of rocks that occurs in EDZ. It is shown that the strength of destroyed rocks in EDZ linearly depends on

the radial (minimum) component of the stress tensor. By the small parameter method there has been resolved a number of nonaxisymmetric problems of geomechanics, as well the regularities of influence on configuration and size of major EDZ mining factors were determined. The results will be useful in developing new methods for predicting rock pressure and reviewing regulatory materials for ensuring the stability of workings.

Key words: *mine working, rock pressure, extreme deformations, calculation methods, rock stability, destroy zone configuration, strength heterogeneity, nonaxisymmetric factors.*

УДК 622+528

*к.т.н. Ларченко В. Г.,
Коваленко Е. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ СО ДНА МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

Приведена усовершенствованная методика геометризации подводных месторождений полезных ископаемых (МПИ) на стадиях разведки и разработки. Рекомендовано одновременно с плавсредства спутниковым приемником определять плоские координаты, длиномером ДА-2 — глубину моря, а дночерпателем — пробы полезного ископаемого.

Ключевые слова: *маркшейдерское обеспечение, подводная разведка и разработка МПИ, спутниковый приемник, длиномер ДА-2, методика работ.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Более 70 % поверхности Земли занимают моря и океаны, донные отложения которых богаты залежами полезных ископаемых. Наиболее доступные для разработки залежи находятся на континентальном шельфе глубиной до 200 м и на материковом склоне глубиной от 200 м до 2400 м. На шельфовых россыпях в мире добывают около 80 % редкоземельных полезных ископаемых, значительную часть нефти и газа, железомарганцевых конкреций. США добывают со дна моря около 90 % платины. Индонезия, Таиланд добывают более 40 % касситерита (руда на олово) [1].

Разработка наиболее доступных континентальных залежей полезных ископаемых истощается. Ускорение освоения подводных залежей полезных ископаемых требует разработки особых приборов и методик маркшейдерских работ для обеспечения разведки и добычи глубоководных залежей полезных ископаемых на всех его этапах, то есть создания «морской маркшейдерии».

Основными этапами освоения подводного морского месторождения твердых полезных ископаемых являются: геологоразведочные работы, проектирование и строительство горнодобывающего предприятия (портового хозяйства, добычных плавсредств, обогатительной фабрики, бытовых и природоохранных сооружений);

разработка залежи; ликвидация горных работ.

Используемая методика маркшейдерских работ [1] при обеспечении освоения залежей полезных ископаемых при открытой разработке требует существенной доработки и применения современных маркшейдерских приборов, что является научной и практической задачей при подводной добыче полезных ископаемых.

Постановка задачи. Задачей работы является усовершенствование методики маркшейдерского обеспечения освоения залежей полезных ископаемых со дна морей и океанов.

Изложение материала и его результаты. Решение многих задач при разработке морских залежей требует применения методов морской геодезии, гидрографии, звуколокации, геофизики, навигации, гидроакустики и их маркшейдерского обеспечения. Акваториальные геологоразведочные работы выполняются с плавсредств и платформ геофизическим и буровым способами. Опробование донных залежей выполняют с помощью дночерпателей, гидрожелонков, вибротрубок и других устройств.

Добычу твердых полезных ископаемых подводным способом производят полигонами, разрезами, траншеями, добычными устройствами и установками: земснарядами, плавучими самоподъемными платформами с грейферным или землесосным обо-

рудованием, самоотвозными землесосными или грейферными земснарядами, подводными самоходными установками, драгами.

Для успешного обеспечения освоения подводных залежей полезных ископаемых на всех этапах маркшейдерской и геодезической службе необходимо создать прибрежную и мористую опорную сеть для решения инженерных задач: выноса с проекта в натуру и съемки фактического положения разведочных скважин, геометрических элементов сооружений; выполнения проектно-изыскательских работ при строительстве причалов, пульповодов, гидротехнических и природоохранных объектов; проектирования горных работ и мер охраны сооружений и окружающей среды от вредного влияния горных подводных разработок; подготовки маркшейдерской графической документации при съемке вскрышных и добычных горных выработок; подсчета и учета добычи, потерь и разубоживания полезного ископаемого.

Знаки на пунктах маркшейдерской акваториальной сети (МАС) применяются различной конструкции: свайные из труб в мелководной зоне; из металлических ферм; донные с гидроакустическим оборудованием.

Плановые координаты пунктов МАС определяют методом трилатерации IV класса или 1-го и 2-го разрядов. Расстояния между пунктами измеряют светодальномерами, высокоточными радионавигационными (РНС) и радиогеодезическими системами (РГС), позволяющими определять координаты акваториальных точек с погрешностью $\pm 1...3$ м. При глубоководных разработках залежей полезного ископаемого (ПИ) координаты X , Y донных центров, промерных точек на направлениях (галсах), добычных плавсредств, подводных горных выработок определяют гидроакустическим способом, суть которого состоит в том, что посылаемый от объекта съемки (драга, плавсредства) ультразвуковой сигнал принимается гидромяком на заданной частоте. Определяется время прохождения прямого и обрат-

ного сигнала, по которому вычисляют расстояние с погрешностью $\pm 1...10$ м.

Высотной основой на прибрежных акваториях служат пункты геометрического нивелирования I–IV классов. Средняя квадратическая погрешность определения высотных отметок прибрежных пунктов МАС относительно реперов высших классов не должна превышать $\pm 0,02$ м. [1].

Плановые координаты X , Y акваториальных точек определяют традиционными способами: прямыми, обратными, комбинированными угловыми или линейными засечками; при глубоководных разработках (более 500 м) — гидроакустическим.

Но с появлением спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и др., спутниковых приемников задача определения плановых координат геологоразведочных скважин, добычных плавсредств и иных объектов многократно упростилась ввиду явного преимущества их применения в сравнении с традиционной методикой [1].

При разработке подводных месторождений полезных ископаемых (МПИ) маркшейдерская служба горного морского предприятия должна иметь специальную документацию отведенного района работ [2]: схему прибрежных и акваториальных геодезических и маркшейдерских сетей; схему уровневых постов; каталог координат пунктов маркшейдерского обоснования и геологоразведочных выработок; проектно-плановую документацию развития горных работ; основные планы морских горных работ в масштабах 1:5000 и 1:2000 с показанными разведочными выработками, рельефом дна (в горизонталях, на морских участках в изобатах), надводной ситуации.

Эффективность подводной добычи ПИ зависит от точности изображения рельефа морского дна, подводных горных выработок, то есть необходимо знать с большей точностью высотную отметку Z точек морского дна и горных подводных выработок с определенными плановыми координатами X , Y .

$$Z = Z_y - H, \text{ м}, \quad (1)$$

где Z_y — высотная отметка уровня поверхности воды моря, определяется синхронно с измерением H по береговым футштокам и уровенным постами (м) с учетом отливов и приливов; H — глубина моря в определенной точке, м.

Глубина при съемке подводных объектов определялась лотом [1], а при больших глубинах — звуколокационным способом с погрешностью от 0,7 до 1,5 % H , что при глубине 500 м составляет $\pm 3,5 \div 7,5$ м. Такая погрешность не позволит обеспечить полноту добычи донных залежей полезных ископаемых.

Поэтому предлагаем для съемки рельефа морского дна (1) (рис. 1), разведки и оконтуривания залежи ПИ, подводных горных выработок (2) использовать длиномер ДА-2 (3) и спутниковый приемник (4), установленные на плавсредстве (катере) (5). Вместо груза-рейки на нижний конец проволоки (6) ДА-2 подвешивается башмак (7) массой 10 кг. Глубину моря H определим по разности отсчетов N по счетчику ДА-2 с точностью до 1 см из двух положений: N_0 — башмак (7) совпадает с уровнем воды (8), N_D — башмак (7) лег на дно моря (1).

$$H = N_D - N_{II} + \sum \Delta H, \text{ м}, \quad (2)$$

где $\sum \Delta H$ — сумма поправок, вычисляемая $\sum \Delta H = \Delta H_n + \Delta H_t + \Delta H_D + \Delta H_K$, м;

ΔH_n — поправка за диаметр проволоки d ДА-2

$$\Delta H_n = 0,001 \cdot \pi \cdot d(N_{II} - N_D), \text{ м}, \quad (3)$$

где d — диаметр проволоки, мм.; ΔH_t — поправка за тепловое расширение проволоки, вызванное разностью температуры при компарировании t_K и воды t_B при измерении

$$\Delta H_t = \alpha_{II}(N_{II} - N_D) \cdot (t_{CP} - t_K), \text{ м}, \quad (4)$$

где $t_{CP} = \frac{t_{II} + t_B}{2}$; t_{II} , t_B — температура

воздуха и воды при измерении; α_{II} — коэффициент линейного расширения металла проволоки (для стали $\alpha_{II} = 0,0000115$).

Поправка за тепловое расширение окружности диска, вызванное разностью температуры диска при компарировании и в момент измерений ΔH_{tD}

$$\Delta H_{tD} = \alpha_D(N_{II} - N_D) \cdot (t_D - t_K), \text{ м}, \quad (5)$$

где t_D и t_K — температура диска ДА-2 при измерении и при компарировании; ΔH_K — поправка за компарирование диска

$$\Delta H_K = (N_{II} - N_D) \cdot (l - 1), \text{ м}, \quad (6)$$

где l — длина окружности мерного диска по паспорту завода, м.

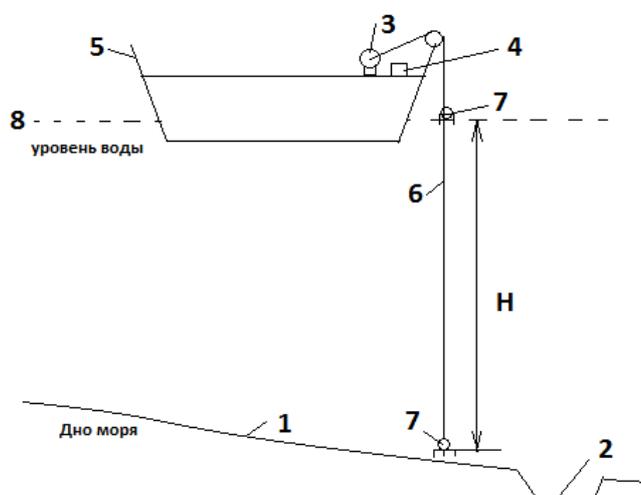


Рисунок 1 Схема измерения глубины моря

Точность измерения глубины дальномером ДА-2 составит до 10 см и зависит от плотности морского дна и формы башмака. Одновременно с измерением глубины определяем координаты точек X, Y, Z спутниковым приемником, точность которых зависит от количества отслеживаемых сигналов и конструктивных особенностей приемника. Приемник HiPer SR позволяет определять плановые координаты с точностью 10 мм + 1,0 мм/км от базового приемника, по высоте 15 мм + 1,0 мм/км. Для опробования донных отложений в точках замера одновременно целесообразно использовать дночерпатели или землесосное оборудование.

Передвигаясь на плавсредстве по направлениям (галсам) с заданным интервалом, определяем координаты точек морского дна X, Y, Z исследуемого участка и по анализу проб определяем наличие донных залежей полезных ископаемых. По этим данным традиционным способом [3] построим план рельефа морского дна с горизонталями (изобатами), где изолиниями отразим наличие или качественные параметры донных полезных ископаемых, оконтурим залежь. Анализ таких планов позволит сделать вывод о целесообразности бурения скважин, сгущения разведочной сети, перспективности участка.

Библиографический список

1. Ушаков, И. Н. Маркшейдерское дело [Текст] : учеб. для вузов / И. Н. Ушаков, Д. А. Казаковский и др. — М. : Недра, 1989. — 311 с.
2. Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ [Текст] / Минприроды РФ. — Новосибирск, СНИИГиМС, 1997. — 106 с.
3. Букринский, В. А. Геометризация недр. Практический курс [Текст] : учеб. для вузов / В. А. Букринский. — М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2004. — 333 с.

© Ларченко В. Г.

© Коваленко Е. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТИ Леоновым А. А.,
главным маркшейдером шахты им. XIX съезда КПСС Чабаном И. И.*

Статья поступила в редакцию 02.09.2020.

PhD in Engineering Larchenko V. G., Kovalenko E. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

SURVEYING SUPPORT FOR THE DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS FROM THE BOTTOM OF THE SEAS AND OCEANS

There has been given the improved method of geometrization of prospecting and development of subsea mineral deposits (MD). It is recommended to simultaneously determine the plane coordinates from the watercrafts with a satellite receiver, by the length gage ДА-2 — the sea depth, and by the bottom grab identify mineral samples.

Key words: *surveying support, subsea prospecting and development of mineral deposits, satellite receiver, length gage ДА-2, work technique.*

УДК 553.434

к.г.н. Шубин Ю. П.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, u0502823920@yandex.ru)

ОСОБЕННОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА, ГЕНЕЗИСА И КОНТРОЛЯ МЕДНОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ БАХМУТСКОЙ КОТЛОВИНЫ ДОНБАССА

Рассмотрены представления об образовании меднорудной минерализации формации медистых песчаников Бахмутской котловины Донбасса. Сравнение последней с аналогичными объектами СНГ в связи с актуализацией представлений о гидрогенном рудообразовании позволило переоценить разработанные критерии прогноза. Обнаруженные повышенные содержания свинца, цинка, серебра, золота в медных рудах, а также отмеченные нами концентрации осмия, иридия, платины, самария и тантала свидетельствуют о комплексном характере меднорудной минерализации, сопровождающейся накоплением благородных и редкоземельных элементов. Доизучение меденосности Бахмутской котловины Донбасса в связи с выявленными новыми фактическими данными по её рудоносности и развитой ныне теорией о гидрогенном меденакоплении позволит на новой теоретической и фактологической базе пересмотреть перспективы рудоносности структуры с учётом меняющейся конъюнктуры на минеральное сырьё.

Ключевые слова: медистые песчаники, сульфиды меди, гипотезы меденакпления, критерии рудоносности, комплексность руд, благородные и редкоземельные элементы.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Последние поисково-разведочные работы по изучению меденосности картамышской свиты Бахмутской котловины Донбасса проводились в 80-х годах XX века, а выводы о перспективах рудоносности делались на базе устаревших гипотез о рудообразовании.

Ранее преобладала сингенетическая осадочная точка зрения на генезис медного оруденения формации медистых песчаников (Яковлев Н. Н., Танатар И. И.). При этом Яковлев Н. Н. считал, что медь осаждалась в бухтах под влиянием сероводорода, продуцируемого бактериями. Танатар И. И. полагал, что образование сульфидов меди происходило в прибрежно-морских болотах за счёт восстановления её гниющими растительными остатками. Другие считали, что рудообразование протекало в результате перераспределения металлов, сорбированных глиной при диагенезе осадков (Лапкин И. Ю.).

То есть, ранние работы базировались на представлении об осадочном образовании медных руд, при котором литолого-фациальный фактор был главным факто-

ром, контролирующим медное оруденение. Такого же мнения придерживалась Сатпаева Т. А. на основе отсутствия тектонического контроля медной минерализации Бахмутской котловины, приуроченности оруденения к областям развития растительных остатков и рассеянного характера меднорудной минерализации [1].

Затем возникла диагенетически-конвекционная гипотеза рудообразования, основанная на допущении существования конвекционных потоков в красноцветных толщах, которые выщелачивали металлы из красноцветных толщ, переоткладывая их на восстановительном барьере в сероцветных горизонтах, обогащённых органическим веществом и пиритом биогенного происхождения (Jowett C. E., Ridzewski A.).

Некоторые геологи придерживались эндогенно-гидротермальной гипотезы рудоотложения (Яковкин И. С., Разумовский Н. К., отчасти Емец О. В.), основанной на том, что рудное вещество поступало с глубинным флюидом и отлагалось в благоприятной среде. Романов А. В. пришёл к этому же выводу на основании изучения Берестянского рудопроявления картамышской свиты.

Отдельные специалисты поддерживают концепцию о множественном источнике рудного вещества, приходя таким образом к выводу о полигенности месторождений формации медистых песчаников [2, 3]. Трубочёв А. И. полагает, что на каждом из таких месторождений можно выделить по крайней мере 2–3 процесса, приведших в конечном итоге к формированию рудных тел. Последующие наложенные процессы, в том числе и гидрогенные, вызывают мобилизацию, перемещение и отложение рудного вещества на восстановительном барьере. Разные геологические процессы и связанные с ними механизмы перераспределения металлов вносят свою лепту, но это не исключает необходимости вычленения на каждом меднорудном объекте формации медистых песчаников основного рудогенерирующего процесса, приведшего к формированию промышленных рудных тел. Понимание генезиса медных руд необходимо для разработки поисковых критериев по их выявлению.

В настоящее время главенствует гипотеза о гидрогенном образовании руд формации медистых песчаников [4, 5], источником рудного вещества при котором являются красноцветные и пестроцветные терригенные толщи прибрежных фаций моря, образовавшихся под влиянием поверхностных кислородсодержащих вод. При гидрогенезе существенное значение отводится деятельности хлоридных рассолов, обеспечивающих миграцию халькофилов на значительное расстояние. Принятие гидрогенной гипотезы рудообразования требует переосмысления старых и новых данных.

Постановка задачи. Устаревшие гипотезы рудообразования не позволяли объяснить все особенности локализации медных руд в медистых песчаниках картамышской свиты Бахмутской котловины Донбасса. Поэтому выработанные на их основе поисковые критерии на медное оруденение не всегда позволяли эффективно проводить поисковые работы на медные руды.

В связи с этим *цель* настоящей работы — установить вероятный механизм формирования залежей медных руд, приняв гидрогенную гипотезу рудообразования.

Объект исследования — меденосные отложения формации медистых песчаников Бахмутской котловины Донбасса.

Предмет исследования — процесс формирования залежей медных руд.

Задачи исследования:

- оценка возможных источников меди для рудообразования;
- определение потенциальных источников каменной соли для формирования рудоконцентрирующих рассолов;
- выявление источников формирования восстановительных сред, необходимых для рудоотложения.

Методика исследования. Синтез теоретических и практических достижений по генезису месторождений меди формации медистых песчаников и применение их результатов к таковым Бахмутской котловины Донбасса. Обобщение предыдущих исследований меденосности Бахмутской котловины Донбасса, авторских данных по вещественному составу медных руд с дальнейшей переоценкой поисковых критериев для корректировки методики поисково-разведочных работ.

Изложение материала и его результаты. Детальное описание геологического строения Бахмутской котловины Донбасса приведено в работе [2], поэтому здесь приводится общее описание.

Бахмутская котловина расположена на стыке Днепровско-Донецкой впадины и складчатого Донбасса (переход между платформенными и складчатыми структурами). Данное структурное положение схоже с многими месторождениями формации медистых песчаников. Так, Джекказганское месторождение расположено в краевой части Джекказганского прогиба (Чу-Сарысуйской впадины), в зоне перехода к примыкающей Кингирской брахиантиклинали. В то же время меденосность Приуралья приурочена к южной части

Предуральского краевого прогиба в зоне его сочленения с восточной окраиной Восточно-Европейской равнины.

Отложения южного крыла котловины погружаются под углом 4–30°, северного крыла — 8–10°. Примерно в центре котловины прослеживается Славянско-Артёмовская антиклиналь северо-западного простирания, являющаяся продолжением Северной антиклинали складчатого Донбасса.

Отложения картамышской свиты представлены чередующимися красноцветными и пестроцветными аргиллитами, алевролитами и песчаниками, зачастую фациально сменяющимися друг друга по простиранию [1]. Красноцветная меденосная формация картамышской свиты образована преимущественно в континентальных условиях предгорных и прибрежно-морских равнин в условиях слабоаридного климата (континентальная регрессивная, трансгрессивная и прибрежно-морская подформации). Мощность картамышской свиты увеличивается с севера на юг от 580 м до 1310 м. Внутри этой толщи развиты горизонты серых пород (Q_1 – Q_{12} мощностью 1–40 м), представленные преимущественно песчаниками и алевролитами, в которых локализовано медное оруденение. В северном направлении возрастает их карбонатность вплоть до формирования в серых горизонтах Q_8 – Q_{12} песчаных известняков мелководно-морских фаций, тогда как нижние горизонты серых пород представлены преимущественно осадками баров и подводных речных выносов. Характерной особенностью серых горизонтов является повышенное содержание органического вещества (более 0,5 %) и диагенетического пирита. В целом на всех месторождениях формации медистых песчаников имеется мощная толща красноцветов, содержащая горизонты сероцветов с меднорудной минерализацией.

Выше картамышской свиты залегают отложения нижнепермской галогенной формации (никитовская, славянская и краматорская свиты) суммарной мощностью до 1600 м. Общая мощность соляных пластов в них достигает 360 м, а отдельных

пластов соли — 50 м. Кроме того, отложения галогенной формации содержат гипсы, ангидриты, известняки и аргиллиты. Рассолы из данной толщи при поступлении их в толщу красноцветов могут выщелачивать и транспортировать металлы, что является весьма перспективным фактом для рудообразования.

Ниже картамышской свиты залегает многокилометровая толща карбона и девона. В прилегающих с запада областях Днепровско-Донецкой впадины отмечена насыщенность этих толщ углеводородами, а в верхнем девоне установлено наличие пластов каменной соли, образующих диапировые структуры. Флюиды с углеводородами могут служить прекрасными восстановителями, что является весьма перспективным явлением для рудообразования.

Характерной особенностью Днепровско-Донецкой впадины является насыщенность углеводородами, начиная с верхнего девона (фаменский ярус) и до перми, поэтому возможен приток углеводородов в зону рудоотложения из подстилающих толщ палеозоя. Не исключена при этом возможность попутного притока соединений серы, тем более отмечено некоторое утяжеление её изотопного состава в минералах меди [2].

На фоне общего западного погружения отложений картамышской свиты отмечается сеть субширотных надвигов южного падения, являющихся западным продолжением надвигов карбона Донбасса. Многие рудопроявления меди расположены вблизи таких разрывов (Картамышское рудопроявление вблизи Новозвановского надвига). Данные разломы могли служить путями миграции рассолов из соленосных толщ и растворов с углеводородами из девона.

Медносульфидная минерализация в пределах Бахмутской котловины Донбасса встречена не только в рудоносных горизонтах картамышской свиты нижней перми, но и в карбонатных породах выщелачивающих никитовской и славянской свит.

Рудные тела ориентированы в виде плоскостной линзообразной и лентообразной форм

под углом 40–90° к простиранию вмещающих пород. Отдельные рудопроявления содержат несколько ярусов оруденения, кулисообразно смещённых в плане (Картамышское рудопоявление — Q₃, Q₄, Q₅). Кроме того, рудные тела внутри серых зон залегают несогласно с их границами, т. е. под некоторым углом к кровле и подошве пластов, что характерно для большинства стратиформных месторождений. Этот факт не могли объяснить с позиций ранних гипотез.

Для карбонатных горизонтов картамышской свиты и низов никитовской свиты характерна существенно свинцово-цинковая минерализация (рудопоявление Серебрянское, Суходольское, Однобоковское), которая тяготеет к северным частям рудоносной зоны, окаймляющей Бахмутскую котловину на востоке, сменяя существенно её меднорудную часть, расположенную на юго-востоке. Для наиболее крупного Берестянского рудопоявления вслед за халькопиритовой зоной отмечена галенитовая зона, а затем сфалеритовая. Для этого рудопоявления отмечена и вертикальная зональность рудной минерализации: на горизонте Q₈ картамышской свиты P_{1кт} преобладает медная минерализация, на залегающем выше горизонте Q₁₀ — свинцовая, на Q₁₁ и Q₁₂ — цинковая [1].

Аналогичный характер рудной минерализации отмечен на Джекказганском месторождении на фоне общей восстановленности рудоносных горизонтов.

Для меднорудной минерализации Бахмутской котловины Донбасса отмечена региональная зональность минерализации, заключающаяся в том, что в северо-западном направлении халькозиновая (?) минерализация последовательно сменяется борнитовой, а затем халькопиритовой [1, 6].

Рудная минерализация серых горизонтов неравномерная, обычно вкрапленная. Наиболее распространёнными рудными минералами является глобулярный пирит, марказит, халькозин, борнит, халькопирит и джарлеит [2]. Сульфиды замещают карбо-

натный и глинистый цемент вмещающих пород, а также остатки растительного материала. Наиболее обогащённое оруденение встречено в крупнозернистых песчаниках. Последовательность отложения рудных минералов рассмотрена в работе [2], для минералов меди она включает следующий обобщённый ряд: халькозин 1 → борнит → халькопирит → халькозин 2 → джарлеит → дигенит → ковеллин. Гидротермальный генезис халькозиновой минерализации, нехарактерной для медистых песчаников, требует повторного изучения образцов, в которых он ранее был диагностирован.

Изучение рудоносности Бахмутской котловины установило связь меденосности с проницаемыми горными породами, а также дорудными складчатыми и разрывными дислокациями, наличием мощных красноцветных толщ, подстилающих рудоносные горизонты (серые зоны), связь медного оруденения с определённым стратиграфическим горизонтом, единой меднорудной минерализацией (халькозин, борнит, халькопирит). Сходные признаки меденосности характерны также для медистых песчаников Приуралья и Джекказгана.

В рудоносных сероцветных песчаниках (полимиктовых, граувакко-кварцевого состава) картамышской свиты отмечены процессы растворения терригенного материала и переработки цемента [10]. Процесс растворения кластического материала сопровождается его замещением кремнистосерицитовыми агрегатами, параллельно с этим происходит серицитизация и гидрослюдизация глинистого цемента песчаника серых зон. Помимо этого, в цементе песчаника развивается хлорит (шамозит) и происходит полная перекристаллизация карбонатов. Сульфиды меди замещают материал цемента, что свидетельствует об эпигенетическом характере рудной минерализации.

В последнее десятилетие проведено повторное изучение химического состава горных пород серых медьсодержащих зон картамышской свиты при помощи современных лабораторных методов исследова-

ний вещества (21 анализ), единичные измерения изотопного состава серы и кислорода наложенной на вмещающие горные породы минерализации [2, 7]. Эти исследования несколько изменили представления об образовании меднорудной минерализации, однако не позволили авторам прийти к однозначным выводам о генезисе, а значит, о перспективах рудоносности изучаемого объекта.

По нашим уточнённым данным для Картамышского рудопроявления меди весь проанализированный «халькозин» оказался на самом деле джарлеитом. Джарлеит образуется по сравнению с халькозином в принципиально иных физико-химических условиях (температура образования менее 93 °С). Минераграфические методы, применяемые ранее массово для диагностики сульфидов, не позволяют уверенно различать эти два минерала, поэтому нам видится необходимость проверки случаев ранее выполненной диагностики халькозина в составе меднорудной минерализации изучаемого объекта.

Область распространения меднорудной минерализации юго-восточной части Бахмутской котловины Донбасса непосредственно примыкает к краевой части соленосного бассейна. Непроницаемые глинистые слои глинисто-соленосных осадочных толщ (никитовская, славянская и краматорская свиты) лишь после протекания тектонических процессов (литификация, развитие складчатых и разрывных нарушений) могли стать проницаемыми, обеспечивая вертикальную миграцию хлоридных соединений в сероцветные горизонты картамышской свиты.

Поэтому циркуляция рассолов в красноцветном комплексе могла обеспечиваться благодаря длительной миграции хлоридных соединений из вышележащих глинисто-соленосных осадочных толщ (никитовская, славянская и краматорская свиты). Попадая в серые горизонты, хлоридные рассолы могли выщелачивать медь из вмещающей породы и превращать красно-

цветы в сероцветы, а затем сбрасывать металлоносную нагрузку на контакте с диагенетическим пиритом и углефицированной растительной органикой, рассеянными в серых горизонтах, а также в местах встречи движущегося металлоносного рассола с восходящими потоками углеводородов (возможно, содержащих серу) из нижележащих толщ палеозоя. Поэтому рудные тела серых горизонтов картамышской свиты зачастую простираются под острым углом к простиранию вмещающих горных пород [1], трассируя возможный фронт встречи рудоносных рассолов с восстановительными геохимическими барьерами как внутрипластовой природы (углефицированная органика, пирит, углеводороды), так и мигрирующими восстановителями из перекрывающих и подстилающих отложений (участки сероводородного, углеводородного заражения).

Для территории Бахмутской котловины Донбасса Лурье А. М. связывал перспективы обнаружения медных руд с участками фациальных переходов сероцветных отложений в красноцветные.

Характерной особенностью пластово-эксплуатационных месторождений меди в их краевых низкосульфидных частях являются повышенные содержания благородных металлов [4]. При исследовании песчаника с медным оруденением рудопроявления Кислый Бугор в восьми пробах содержания золота составили 0,10–0,22 г/т (лаборатория благородных металлов ИГМР НАН Украины) [8], а по результатам рентгеноспектрального анализа (г. Алчевск, лаборатория АМК, спектрометр ARL 9900, аналитик Тарасов Н. В.; Dunaujvaros, ISD DUNAFERR Co. Ltd, спектрометр ARL 8410-131, аналитик Eva Denes) в халькозиновых рудах Картамышского рудопроявления содержания осмия достигли 0,18 г/т, иридия — 0,15 г/т, платины — 0,1 г/т, самария — 0,14 г/т, тантала — 0,62 г/т, золота — 0,04 г/т, серебра — 0,25 г/т. В сероцветных рудоносных зонах установлены повышенные содержания

палладия (0,6 г/т) и родия (0,21 г/т) [7]. Серебро показало устойчивую геохимическую связь с меденосностью отложений (включения акантита в халькозине, по данным Суцук Е. Г.), на основании чего были рассчитаны приблизительные ресурсы серебра для наиболее перспективных рудопроявлений. Аналогичная тенденция концентрации серебра (до 0,1 г/т) и золота (до 0,002 г/т) отмечена для рудопроявлений меди оренбургского Предуралья [9].

В начале XXI века всё ещё серьёзно рассматривается осадочно-диагенетическая теория образования медных и свинцово-цинковых руд Бахмутской котловины Донбасса [6]. Принятие гидрогенной концепции рудообразования для целей прогнозирования медного оруденения требует пересмотра методологии геологических исследований, а также пересмотра и корректировки критериев оценки и прогноза меденосности в пределах Бахмутской котловины Донбасса. Особое значение приобретают данные о геохимической подвижности элементов, о типах рудоосаждающих барьеров, структурно-геологических, литолого-фациальных и минералого-геохимических условиях рудонакопления. Важнейшее значение при этом имеют исследования вещественного состава руд и околорудных изменений пород, стадийности минералообразования, состава газовой-жидких включений в минералах, изотопного состава элементов (прежде всего свинца, серы сульфидов и сульфатов), установление возраста оруденения и источника рудного вещества. Так, анализ $\delta^{34}\text{S}$ сульфидной минерализации, а также $\delta^{13}\text{C}$ керогена сероцветных рудоносных зон Гладосовского и Гуртинского рудопроявлений меди позволили выявить закономерности изменения этих показателей для рудоносных и безрудных зон и предложить их в качестве поисковых критериев на медное оруденение в сероцветных горизонтах картамышской свиты [7].

Сложность прогнозирования гидрогенного медно-полиметаллического оруденения состоит в том, что подобное оруденение лока-

лизуется в осадочных толщах, но является эпигенетическим к вмещающим породам. Неопределённость временного разрыва между осадконакоплением и рудообразованием вынуждает критически относиться к общепринятым формационным и литолого-фациальным данным рудоносности для месторождений сингенетического осадочного генезиса, к которым ранее относили медно-рудные объекты рассматриваемой структуры.

Прогнозирование медных месторождений на региональном уровне включает очерчивание границ развития медистых песчаников и сланцев, выделение наиболее перспективных интервалов в стратиграфическом разрезе, палеотектонические, палеоклиматические и палеогидрогеологические реконструкции. Несульфидная, более растворимая форма нахождения меди в красноцветных отложениях способствует её выщелачиванию хлоридными рассолами, необходимыми при гидрогенном сульфидообразовании [4]. Фациально и структурно независимая зональность рудной минерализации, связанная с направлениями палеопотоков металлоносных рассолов и рудоосаждающих агентов, чрезвычайно важна при поисках руд гидрогенного генезиса.

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Принимая гипотезу о гидрогенном рудообразовании, медистые песчаники — осадочно-метасоматические руды, образовавшиеся на фронте восстановления рудоносных вод с участием восстановителей, как внутрипластовых, так и фильтрующихся по разрывным нарушениям в восходящих потоках замыканий осложненных купольных структурах.

2. Медные руды отлагались после формирования общего структурного плана. Характер размещения рудопроявлений относительно мезозойских толщ позволяет предполагать юрский возраст медных руд.

3. Картирование участков рудоносных горизонтов с наиболее восстановительными условиями позволяет выделять площа-

ди, перспективные на обнаружение медно-рудных тел.

4. Комплексный характер меднорудной минерализации, включающий сопутствующие цветные и благородные металлы, а также редкоземельные элементы, требует соответствующего комплексного подхода при изучении вещественного состава меднорудных объектов Бахмутской котловины Донбасса и связанной с ним переоценки перспектив их использования.

5. Наличие самой Бахмутской котловины, а также соленосного бассейна в наиболее прогнутаой её части можно рассматривать как важный косвенный критерий существования гидрогенных рудообразующих систем, проникавших в подстилающие проницаемые, прежде всего песчаные, горизонты.

В дальнейшем необходимо выяснить связь между разными гидрогенными рудообразующими процессами, а также их соотношениями с геотектоническим режимом и палеоклиматическими условиями. Применительно к формации медистых песчаников Бахмутской котловины Донбасса необходимо выяснить роль внутрипермской заальской фазы складчатости и пфальской фазы складчатости в мобилизации гидрогенных систем (рассольно-эксфильтрационных) и рудного вещества. Реконструкция гидрогенных рудообразующих систем должна включать определение источника рудного вещества, самих подземных вод, путей их движения, разгрузки и вероятных областей рудоотложения.

Библиографический список

2. Ємець, О. В. *Етапи формування стратиформних рудопроявів міді типу «red-bed» у північно-західному Донбасі: результати мінералогічних та геохімічних досліджень [Текст]. Ч. 1 / О. В. Ємець // Мінерал. журн. — 2008. — № 4 (30). — С. 77–90.*
3. Трубочёв, А. И. *Генетические модели формирования руд медистых песчаников и сланцев [Текст] / А. И. Трубочёв // Вестник ЧитГУ. — 2010. — № 7 (64). — С. 106–113.*
4. Кисляков, Я. М. *Гидрогенное рудообразование [Текст] / Я. М. Кисляков, В. Н. Щеточкин. — М. : ЗАО «Геоинформмарк», 2000. — 610 с.*
5. Шумлянський, В. А. *Гидрогенное рудообразование в фанерозое Украины [Текст] / В. А. Шумлянський, Е. Г. Суцук, О. М. Ивантишина, Е. И. Деревская, Т. В. Дудар, М. В. Безуглая // Институт геохімії навколишнього середовища : зб. наук. пр. — К., 2003. — С. 82–105.*
6. *Металічні і неметалічні корисні копалини України. Том. I. Металічні корисні копалини [Текст] / Д. С. Гурський та ін. // Київ — Львів : Центр Європи, 2005. — 785 с.*
7. Ємець, О. В. *Етапи формування стратиформних рудопроявів міді типу «red-bed» у північно-західному Донбасі: результати мінералогічних та геохімічних досліджень [Текст]. Ч. 2 / О. В. Ємець, М. В. Жикаляк, П. Ф. Решетарський // Мінерал. журн. — 2009. — № 1 (31). — С. 63–82.*
8. Панов, Б. С. *Первые сведения о золоте в медистых песчаниках Донбасса [Текст] / Б. С. Панов, В. И. Алёхин, А. А. Юшин // Сб. науч. Трудов ДонНТУ. — Донецк : Изд-во ДонНТУ, 2003. — Вып. 56. — С. 133–135.*
9. Волков, А. В. *Геохимические особенности и условия образования медистых песчаников оренбургского Предуралья [Текст] / А. В. Волков, И. А. Новиков, А. А. Разумовский // Литосфера, 2018. — Т. 18. — № 4. — С. 593–606.*
10. Беспалов, И. М. *Вторичные преобразования в медистых песчаниках Донбасса [Текст] / И. М. Беспалов, Л. И. Федоровская // Литология и полезные ископаемые. — 1968. — № 5 — С. 43–51.*

© Шубин Ю. П.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТИ Леоновым А. А., к.г.-м.н., с.н.с. ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН Шумиловым И. Х.

Статья поступила в редакцию 01.09.2020.

PhD in Geological Sciences Shubin Yu. P. (DonSTI, Alchevsk, LPR, u0502823920@yandex.ru)

FEATURES OF THE MATERIAL COMPOSITION, GENESIS AND CONTROL OF COPPER-ORE MINERALIZATION OF THE DONBASS BAKHMUT BASIN

Ideas about the origination of copper-ore mineralization of the formation of cupriferous sandstones in the Donbass Bakhmut basin are considered. Comparison of the latter one with similar objects of the CIS in connection with the actualization of ideas about hydrogenic oreogenesis allowed us to reevaluate the developed prediction criteria. The previously disclosed high concentrations of lead, zinc, silver, and gold in copper ores, as well as the high concentrations of osmium, iridium, platinum, samarium, and tantalum, that we have noticed, indicate the complex nature of copper-ore mineralization, accompanied by the accumulation of noble and rare earth elements. Additional appraisal of copper-bearing of the Donbass Bakhmut basin in connection with the identified new evidence for its ore-bearing content and the current developed theory of hydrogenic copper accumulation will allow for a new theoretical and factual basis to reconsider the prospects of ore-bearing of Bakhmut basin in the light of fluid market for minerals.

Key words: *cupriferous sandstones, copper sulfides, copper accumulation hypotheses, ore-bearing criteria, ore complexity, noble and rare earth elements.*

УДК 622.281.74

Дрипан П. С.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, dripanps@mail.ru)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УСТОЙЧИВОСТИ И ПРОЧНОСТИ АНКЕРА ПРИ ЗАКРЕПЛЕНИИ ПОРОДНОГО МАССИВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗКИ

Дан краткий анализ существующих способов и конструкций анкерной крепи. Предложен новый способ закрепления породного массива горной выработки анкером большего диаметра, чем диаметр шпура, при воздействии на него статической и ударной нагрузок. Приведены математические модели устойчивости и напряженно-деформированного состояния анкера и породного массива, которые позволят выбрать параметры устройства, обеспечивающие надежное закрепление породного массива.

Ключевые слова: породный массив, анкер, шпур, нагрузка, деформация, напряжение, математическая модель.

1 Актуальность и цель исследований

Одним из перспективных направлений решения задачи по обеспечению устойчивости выработок (особенно забойной их части) при ведении подготовительных работ на шахтах является установка анкерной крепи сразу после выемки породы в забое. Технологичность и высокий уровень механизации при ее возведении позволяют не только повысить темпы работ, но и обеспечить высокий уровень безопасности производства. Наибольшее распространение в условиях шахт Донецкого угольного бассейна получили сталеполимерные анкеры [1], технология установки которых и параметры крепи определяются в соответствии с действующими нормативными документами [2, 3]. Однако до 50 % стоимости установки таких анкеров составляют затраты на ампулы с полимерными смолами, с помощью которых анкеры закрепляются в шпурах. В этой связи исследования, направленные на разработку технологий и конструкций анкеров, устанавливаемых безраспорным (бесклеевым) способом, являются перспективными и актуальными.

В настоящее время в мировой практике применяются многочисленные безраспорные конструкции анкеров, такие как винтовые, анкеры «Сплит-Сет» и «Свеллекс», трубчатые взрывораспорные анкеры и т. д. [4]. Однако они не получили широкого примене-

ния в практике из-за необходимости изготовления анкеров из высокопрочных упругих сталей и дорогого оборудования для установки. Предложенный в США способ установки анкеров путем их силового вдавливания в породный массив с помощью гидравлической установки не нашел промышленного использования по тем же причинам, а также из-за невозможности обеспечить необходимое пространственное расположение устанавливаемого анкера [5].

В ДонНТУ был предложен и запатентован способ закрепления породного массива стальным анкером с большим диаметром, чем диаметр направляющего шпура [6].

В связи с тем, что применяемые для этого анкеры имеют значительную длину при малом диаметре, в процессе установки анкеров в породный массив возможна потеря их устойчивости, а в дальнейшем — прочности, в том числе и горных пород при действии ударной нагрузки.

Цель исследования — раскрытие закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «анкер — породный массив» при установке бесклеевым способом на контуре горной выработки стального анкера с большим диаметром, чем диаметр направляющего шпура, под действием статической и ударной нагрузок, с учетом сопротивлений его перемещению в осевом направлении и бо-

ковой поверхности, а также протекающих волновых процессов для обоснования параметров устройства, обеспечивающих надежное закрепление породного массива.

Идея работы состоит в использовании теорий устойчивости и упругости для обоснования параметров анкера и породного массива при его закреплении под действием нагрузки.

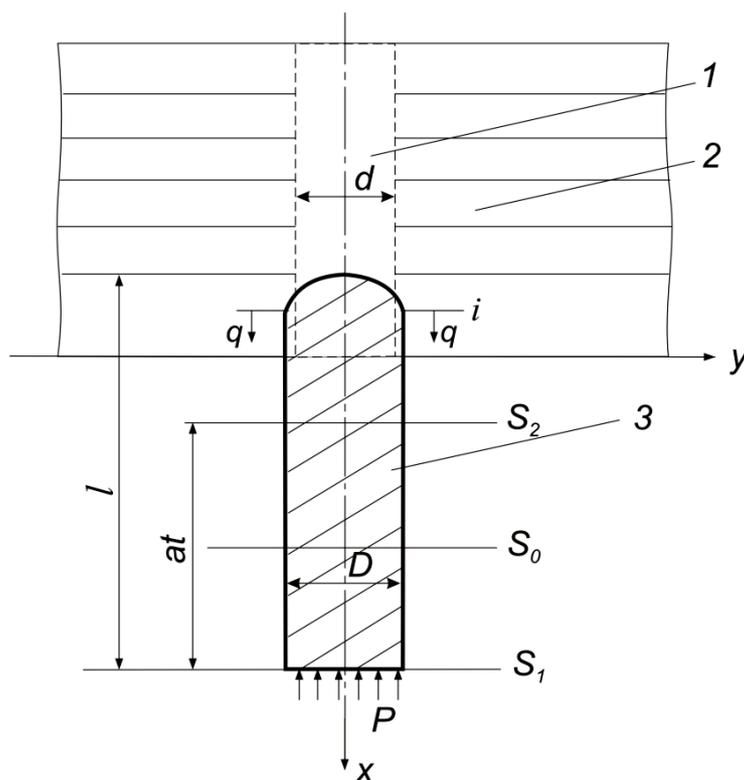
Объектом исследования являются закономерности изменения устойчивости и НДС анкера и породного массива, вмещающего горную выработку при установке бесклеевым способом на ее контуре стального анкера с большим диаметром, чем диаметр направляющего шпура, под действием нагрузки, а **предметом** — геометрические параметры и механические характеристики анкера и породного массива.

Исходя из выше изложенного, **задачами исследований** являются:

– разработка математической модели устойчивости анкера при его установке в породный массив;

– разработка математической модели НДС анкера и породного массива под действием статической и ударной нагрузок с учетом возникающих сопротивлений перемещению по длине, боковой поверхности анкера и волновых процессов.

Рассмотрим расчетную схему установки анкера большего диаметра, чем направляющий шпур, под действием нагрузки, когда он испытывает сопротивление перемещению в осевом направлении в месте контакта с породой, а его боковая поверхность — в виде трения со стенками шпура (рис. 1).



1 — шпур; 2 — горный массив; 3 — анкер; i , S_0 , S_1 , S_2 — сечения анкера; D , d — диаметры анкера и шпура соответственно; q — контактная нагрузка между анкером и горными породами; P — внешняя нагрузка

Рисунок 1 Расчетная схема установки анкера в горный массив с учетом осевого сопротивления и сил трения по боковой его поверхности

При исследованиях будут использованы следующие критерии устойчивости и прочности для напряжений, представленные в виде функциональных зависимостей от параметров соответственно

$$\sigma_{\sigma} = f_1(P, E, D, l, \mu) \leq \sigma_{nc}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} = f_2(P, v_0, a, E, E_n, \nu, \nu_n, D, d, l_0, l_u, m, m_1, \gamma, f, H, t) \leq \sigma_{nc}, \quad (2)$$

где σ_{σ} , σ_{nc} — эквивалентное напряжение устойчивости и предел пропорциональности (прочности на сжатие) материала анкера, МПа;

P — внешняя нагрузка, Н;

v_0 , a — скорости анкера в момент удара, звука в материале анкера соответственно, м/с;

E , E_n — модули упругости материала анкера и породного массива соответственно, МПа;

ν , ν_n — коэффициенты Пуассона материала анкера и породного массива соответственно;

D , l , d , l_u — диаметр, длина анкера, диаметр и длина шнура соответственно, м;

μ — коэффициент длины, зависящий от способа крепления концов анкера;

l_0 — длина окружности анкера, м;

m , m_1 — массы анкера и ударного устройства соответственно, кг;

γ — удельный вес материала анкера, Н/м³;

f — коэффициент трения между материалом анкера и массивом горных пород;

H — расстояние между ударным устройством и анкером, м;

t — время, с.

2 Математическая модель устойчивости анкера при установке в породный массив

При начальной нагрузке ударного устройства, при контакте более прочного анкера с менее прочными породами возникает вопрос об определении его таких параметров, как длина, диаметр, модуль упругости

материала, предел прочности при сжатии, которые обеспечивают его устойчивость.

Критическую силу по теории потери устойчивости Эйлера определяют из дифференциального уравнения изогнутой оси анкера, справедливой для любого его сечения, в пределах которого продольная нагрузка неизменна.

Для анкера с постоянной жесткостью используется дифференциальное уравнение устойчивости [7, 8]. При этом критическая сила равна

$$P_{кр} = \frac{4\pi^2 EI}{(\mu l)^2}, \quad (3)$$

где E — модуль упругости материала анкера, Н/м²;

I — момент инерции сечения анкера, м⁴.

Коэффициент μ примем равным единице для расчетной схемы с граничными условиями: шарнирное крепление в ударном устройстве и в опоре при входе анкера в массив горных пород.

Формулой (3) можно пользоваться при условии, что гибкость анкера λ , определяемая выражением

$$\lambda = \frac{1}{(I/F)^{1/2}} > \lambda_{\sigma} = \pi(E/\sigma_{nc})^{1/2}, \quad (4)$$

где F — площадь сечения анкера, м².

Приведенные выше соотношения относятся к случаям потери устойчивости в упругой области, т. е. справедливы при условии, что вплоть до достижения критического состояния максимальные напряжения не превышают предела пропорциональности материала.

Если условие (4) не выполняется, то потеря устойчивости анкера наступит при напряжениях, превосходящих это значение. Тогда, при расчете устойчивости анкера с первоначальной прямолинейной осью, критическое напряжение определяют по формуле Эйлера

$$\sigma_{\sigma} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \quad (5)$$

где λ — гибкость анкера, определяется из выражения

$$\lambda = \frac{l}{r_{\min}}, \quad (6)$$

r_{\min} — наименьший радиус инерции поперечного сечения, м;

$$r_{\min} = \left(\frac{I_{\min}}{F} \right)^{1/2},$$

I_{\min} — наименьший момент инерции поперечного сечения анкера, м⁴.

Если

$$\sigma_{\text{э}} > \sigma_{\text{нц}}, \quad (7)$$

то потеря устойчивости происходит за пределами пропорциональности.

Критической гибкостью называют величину $\lambda_{\text{э}}$ (7), которая зависит только от свойств материала анкера, значения которой для различных сталей являются справочными.

Если $\lambda > \lambda_{\text{э}}$, то потеря устойчивости анкера происходит в пределах пропорциональности материала, что должно выполняться при расчетах.

3 Математическая модель напряженно-деформированного состояния анкера с учетом волновых процессов

Для описания процесса закрепления анкера в породный массив воспользуемся теорией продольного удара, впервые изложенной в работе Сен-Венана и уточненной в дальнейшем Бусинеском [9].

Каждому сечению анкера соответствует координата, выражающая его местоположение относительно поверхности удара. После удара каждое сечение вертикально переместится на величину U , зависящую от времени t . При этом U — функция независимых переменных x, t , деформация $\varepsilon_x = \partial U / \partial x$, а упругие напряжения $\sigma_x = E \frac{\partial U}{\partial x}$, $\frac{\partial U}{\partial t}$ — скорость перемещения каждого сечения во времени.

При упругом состоянии анкера должно быть соблюдено условие

$$E \cdot \frac{v_0}{a} \leq \sigma_{\text{нц}}. \quad (8)$$

Уравнение движения анкера имеет вид [9]

$$a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (9)$$

где $a = \sqrt{\frac{Eg}{\gamma}}$ — скорость распространения деформации вдоль анкера, т. е. скорость звука;

g — ускорение силы тяжести, м/с².

При продвижении анкера в породный массив его верхний конец испытывает постоянное напряжение, равное отношению нагрузки P , деленной на площадь сечения смятия пород массива, S , м², то есть P/S , где $S = \pi d l_{\text{ш}} (k_0 - 1)$; $k_0 = D/d$.

Начало его движения совпадет с моментом достижения прямой волны его верхнего основания. При этом напряжения в его нижней части будут постоянными и равными

$$\sigma_x = E \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=0} = -\frac{P}{S}. \quad (10)$$

Считаем, что анкер зажат боковыми породами и удерживается в них трением, равномерно распределенным по его боковой поверхности. Нижний конец анкера не испытывает сопротивления, т. е. в нашем случае $P = 0$. Сила трения действует только в случае движения соответствующей части анкера вверх. В силу малости поперечного сечения по сравнению с длиной анкера считаем, что сопротивление анкера в виде силы, приходящейся на единицу его объема, равно

$$q_v = \frac{l_0 q}{S}, \quad (11)$$

где $l_0 = \pi D$, м;

q — контактная нагрузка, действующая на боковую поверхность анкера, Н/м².

Дифференциальное уравнение движения имеет вид [10]

$$a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + k_1 a^2 = \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (12)$$

где k_1 принимает следующие значения:

- 1) $k_1 = 0$ при $at + x < \ell$;
- 2) $k_1 = \frac{\ell_0 \cdot q}{S \cdot E}$ при $at + x > \ell$.

Тогда деформация нижнего конца анкера имеет вид

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=0} = -2v_0 \cdot e^{\frac{-at}{k\ell}} + ap. \quad (13)$$

Здесь k — отношение массы ударного инструмента m к массе анкера m_1 , то есть m/m_1 .

Время закрепления анкером породного массива определяем из выражения

$$T = -\frac{k\ell}{a} \cdot \ln \left(\frac{pa}{v_0} \right). \quad (14)$$

Перемещение нижнего конца анкера при его остановке ($t = T$)

$$(U)_{x=0}^{T=0} = k\ell \cdot \left[p \cdot \left(1 - \ln \frac{pa}{\ell v_0} \right) - \frac{2v_0}{a} \right]. \quad (15)$$

Путь L , пройденный нижним концом анкера (глубина проникновения) до его остановки

$$L = 2kl \left(\frac{v_0}{a} + k_1 l \right) \left(1 - e^{-\frac{aT}{kl}} \right) - 2(k_1 l + p) a T. \quad (16)$$

Полученные формулы позволяют, зная T и L , определить неизвестные величины k_1 и p и наоборот.

4 Исследования прочности анкера и вмещающих пород под действием нагрузки с учетом коэффициента динамичности

Приведенный выше метод решения задачи позволяет определить одноосное его

НДС и максимально возможное значение статической или динамической (ударной) нагрузки при сравнении максимальных напряжений с их предельными значениями. Однако он не дает ответ на вопрос, какие напряжения возникают в горных породах, которые не должны разрушаться, за счет чего анкер удерживается в шпуре.

Для решения этих вопросов рассмотрим упругие деформации анкера и массива горных пород при плоском напряженном состоянии.

При установке анкера на сопрягаемых с массивом контактных поверхностях вследствие упругих деформаций возникает давление и соответствующее ему трение, обеспечивающее необходимую их неподвижность.

Используем методы расчета на прочность сопрягаемых деталей (вал — отверстие), используемых в сопротивлении материалов и, в частности, машиностроении [11].

Разность между размерами направляющего шпура и анкера определяет характер их соединения — так называемую посадку, то есть степень их неподвижности.

Зная статическую нагрузку

$$P_{ст} = q\pi D l f, \quad (17)$$

можно определить ее динамическую величину, действующую на анкер ударным устройством.

Контактная нагрузка в нашем случае имеет вид

$$q = \frac{\delta}{k_0 d \left(\frac{1}{E} c_1 + \frac{1}{E_n} c_2 \right)}; \quad (18)$$

$$c_1 = \frac{1 + (k_0^2)^{-1}}{1 - (k_0^2)^{-1}} - \nu;$$

$$c_2 = \frac{1 + k_2^2}{1 - k_2^2} + \nu_n,$$

где δ — разница между диаметрами анкера и шпура, мм;

k_2 — отношение диаметра поверхности контакта к диаметру зоны влияния анкера (принимая $k_2 = 1/5$).

Как правило, наибольшие радиальные σ_r и тангенциальные σ_t напряжения возникают у внутренней поверхности породного массива, а наибольшее эквивалентное напряжение σ_3 равно их разности, которая определяется по зависимости

$$\sigma_3 = \sigma_r - \sigma_t = \frac{2q}{1 - (k_0^2)^{-1}} \leq \sigma_{нц}. \quad (19)$$

Известно, что несущая способность анкера [1, 2] определяется прочностью закрепления его в шпуре. Для этого производят контрольные извлечения анкеров из шпуров с помощью специальной установки.

При извлечении анкеров из горного массива необходимо приложить нагрузку (21) в обратном направлении.

Вышеприведенные зависимости для исследования напряженного состояния горного массива получены при действии на анкер статической нагрузки, когда она медленно нарастает от нуля до своего максимального значения и сжимает анкер на величину δ_{cm} [12].

Статическое и динамическое перемещение на сжатие определяют соответственно по зависимостям

$$\delta_{cm} = \frac{P_{cm}}{c}; \quad \delta_d = k_d \delta_{cm}, \quad (20)$$

где $c = EF/l$ — жесткость анкера, Н/м.

С учётом линейной связи между напряжением и деформацией, различных модулей упругости анкера и горных пород при статическом (индекс «с») и ударном (индекс «д») действии нагрузок связь между соответствующими напряжениями имеет вид

$$\sigma_d = k_d \sigma_{cm},$$

$$k_d = 1 + \left(1 + \frac{2H}{\delta_{cm}}\right)^{1/2}. \quad (21)$$

Имея в виду, что $H = v_0^2/2g$ (v_0 — скорость устройства в начале удара), коэффициент динамичности представим в виде

$$k_d = 1 + \left(1 + \frac{v_0^2}{g\delta_{cm}}\right)^{1/2}. \quad (22)$$

Если $H = 0$, то есть сила прикладывается внезапно, то согласно выражению (21) коэффициент динамичности $k_d = 2$. Если расстояние между ударным устройством и анкером H значительно больше δ_{cm} , то при его определении в выражениях под корнем вторым слагаемым по сравнению с единицей можно пренебречь. Тогда выражение (21) примет вид

$$k_d = 1 + \left(\frac{2H}{\delta_{cm}}\right)^{1/2}. \quad (23)$$

Таким образом, приведенные зависимости позволяют определить геометрические параметры и механические характеристики анкера, необходимые для закрепления породного массива с помощью статической или ударной нагрузки. Они позволяют учесть воздействие на анкер в процессе установки силы осевого сопротивления, бокового трения и волновых процессов, выбрать параметры устройства для установки, обеспечивающие необходимую нагрузку на анкер, устойчивость и прочность вмещающих пород.

Получены результаты исследований контактного давления q , статической P_{cm} нагрузки, а также максимальных эквивалентных напряжений σ_3 от соотношения диаметров анкера и шпура k_0 , механических характеристик горных пород, которые приведены на рисунках 2–4.

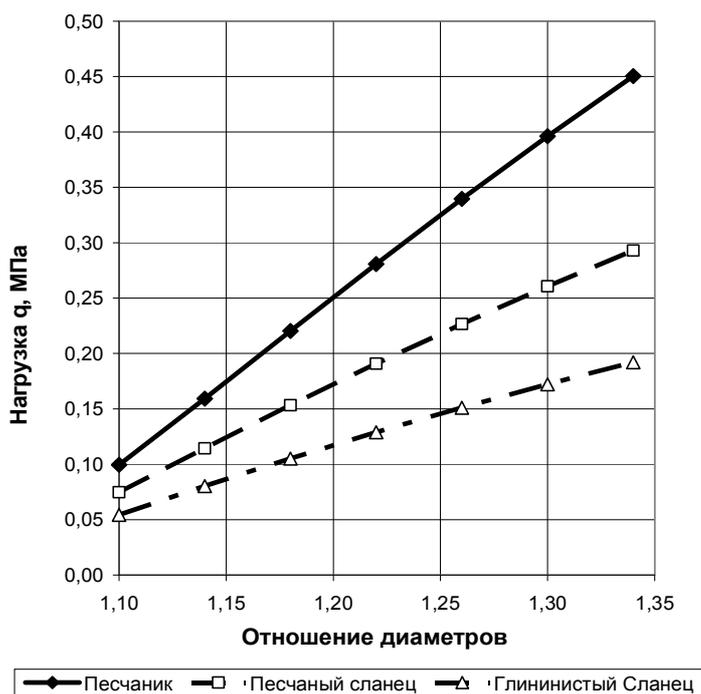


Рисунок 2 Зависимость контактной нагрузки q от соотношения $k_0 = D/d$ (диаметров анкера и шпура и модулей упругости пород E_n)

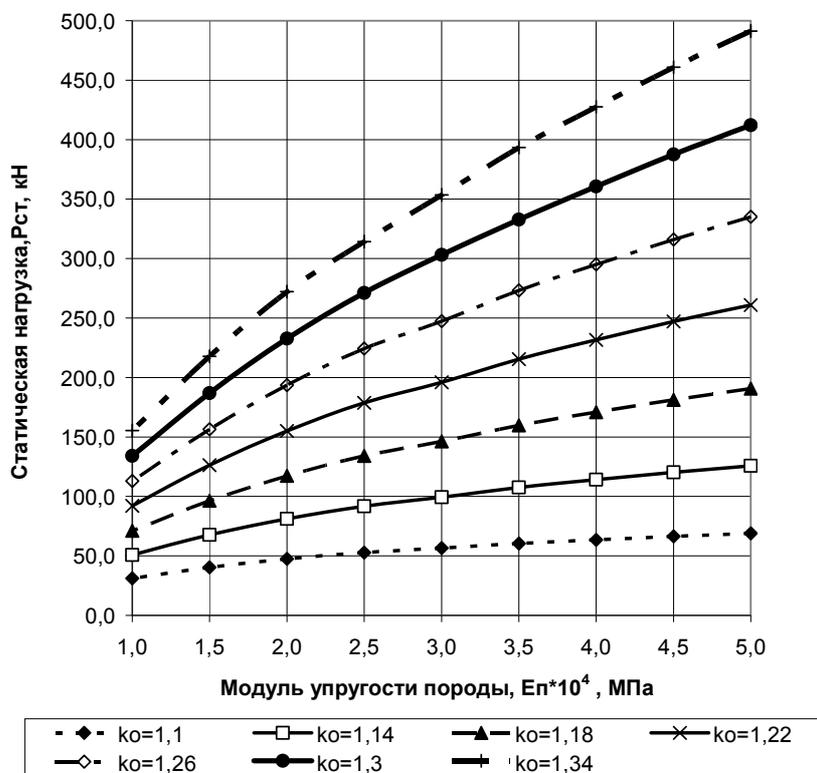


Рисунок 3 Зависимость статической нагрузки $P_{ст}$ от модулей упругости пород E_n и отношения диаметров анкера и шпура $k_0 = D/d$

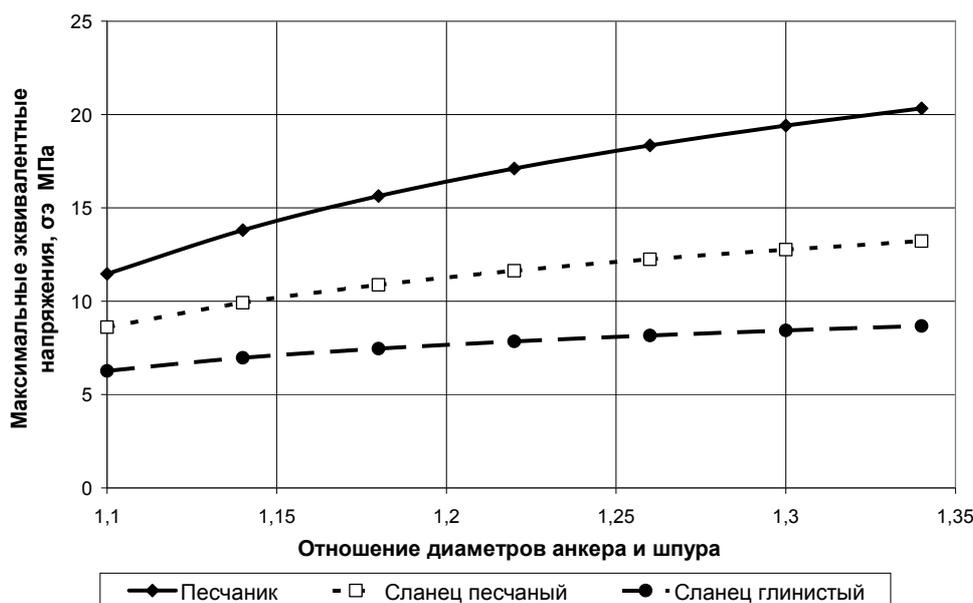


Рисунок 4 Зависимость максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{э}$ от соотношения $k_0 = D/d$ (диаметров анкера и шпура) и модулей упругости пород E_n

Результаты исследований на устойчивость анкеров показывают, что она обеспечивается для геометрических размеров (длин и диаметров), используемых на практике и изготовленных из стали не меньше марки 4.

Из рисунков следует: зависимость контактного давления q песчаника от соотношения диаметров k_0 , по сравнению с приведенными менее прочными породами, является более нелинейной, их значения практически пропорциональны механическим характеристикам горных пород; статическая нагрузка $P_{ст}$ имеет более выраженный нелинейный характер с увеличением k_0 , модулей упругости; максимальные эквивалентные напряжения, возникающие в горных породах, не превышают своих предельных значений при принятых значениях k_0 .

Выводы:

1. Наибольшее распространение в условиях шахт Донецкого угольного бассейна получили сталеполимерные анкера, технологию закрепления породного массива

которых и параметры крепи определяют в соответствии с действующими нормативными документами. Однако до 50 % стоимости установки таких анкеров составляют затраты на ампулы с полимерными смолами, с помощью которых анкера закрепляются в шпурах.

2. Предложен новый способ закрепления породного массива, который заключается в использовании анкера большего диаметра, чем диаметр шпура, под действием нагрузки.

3. Приведены математические модели устойчивости анкера при закреплении породного массива горной выработки, которые позволяют определить его геометрические параметры и механические характеристики, а также НДС анкера и породного массива с учетом осевого сопротивления, бокового трения и волновых процессов — выбрать параметры устройства, обеспечивающие необходимую нагрузку на анкер, надежное закрепление породного массива.

4. Получены основные результаты исследований для максимального контактного давления, статической нагрузки и эквивалентных напряжений, возникающих в

горных породах, последние из которых не превосходят своих предельных значений.

5. Приведенные результаты исследований будут использованы в дальнейшем для определения НДС системы «анкер — породный массив» с учетом статической, ударной нагрузок и волновых процессов, полученных в лабораторных и шахтных условиях, обоснования параметров устройства, обеспечивающих надежное закрепление породного массива, прочность и устойчивость горных выработок угольных шахт.

6. Лабораторные испытания по закреплению моделей металлических анкеров в реальных породах с помощью статической нагрузки показали их хорошую сходимость с результатами теоретических расчетов (расхождение не превышает 15 %).

Так, например, при установке анкера диаметром 11 мм в шпур диаметром 10 мм ($k_0 = 1,1$), пробуренный в песчанике ($E_n = 35,6 \cdot 10^9$ Па), фактическая величина статической нагрузки составила 78 кН при расчетном значении 67 кН.

Более подробные результаты лабораторных испытаний будут представлены в последующих публикациях.

7. Выполненные предварительные расчеты ожидаемого экономического эффекта от применения предложенного способа установки анкера показали, что только за счет сокращения затрат на материалы он составит от 2500 до 3500 руб. на 1 пог. м выработки.

Библиографический список

1. Булат, А. Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт [Текст] / А. Ф. Булат, В. В. Виноградов. — Днепропетровск : Вильпо, 2010. — 372 с.
2. СОУ 10.1.05411357.010:2014. Система обеспечения надежного и безопасного функционирования горных выработок с анкерным креплением. Общие технические требования. — 84 с.
3. СТП (02070826) (26319481). Методика определения параметров анкерных породоармирующих систем для обеспечения устойчивости горных выработок [Текст] / Н. Н. Касьян [и др.]. — Донецк — Доброполье, 2010. — 27 с.
4. Широков, А. П. Теория и практика применения анкерной крепи [Текст] / А. П. Широков. — М. : Недра, 2012. — 381 с.
5. Харрелл, М. В. Новый гидравлический способ установки анкерных болтов [Текст] / М. В. Харрелл // Mining Congress Journal. — 1971. — № 6.
6. Пат. 55763 Украина, МПК E 21 D 20/00. Способ установки анкера / Н. Н. Касьян, А. О. Новиков, Ю. А. Петренко, П. С. Дрипан, И. Н. Шестопалов, С. Ю. Гладкий, Д. Д. Выговский ; заявитель и патентообладатель Донецкий нац. техн. ун-т. — № и200901503 ; заявл. 23.02.2009 ; опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12. — 6 с.
7. Прочность. Устойчивость. Колебания [Текст]. Т. 1 / под общ. ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. — М. : Машиностроение, 1968 — 831 с.
8. Дрипан, П. С. Устойчивость анкера при установке в породный массив под действием динамической нагрузки [Текст] / П. С. Дрипан // Респиратор : научный вестник НИИГД. — Донецк, 2019. — № 3 (56). — С. 37–45.
9. Дворников, Л. Г. Анализ и обобщение закономерностей внедрения инструмента в горные породы при ударном воздействии [Текст] / Л. Г. Дворников, И. А. Жуков // Матер. XVI науч.-практ. конф. по проблемам механики и машиностроения. — Новокузнецк : Сиб. ГИУ, 2006. — С. 225–229.
10. Новиков, А. О. Математическая модель внедрения анкера в породный массив под нагрузкой [Текст] / А. О. Новиков, П. С. Дрипан // Респиратор : научный вестник НИИГД. — Донецк, 2018. — № 3 (55). — С. 91–101.
11. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин [Текст] : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шор, Г. Б. Иосимыч. — М. : Машиностроение, 1993. — 702 с.

12. Дрипан, П. С. Ударная нагрузка при установке в породный массив [Текст] / П. С. Дрипан // Респиратор : научный вестник НИИГД. — Донецк, 2019. — № 4 (56). — С. 65–71.

© Дрипан П. С.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТИ Литвинским Г. Г., д.т.н., проф., зав. каф. СЗПСиГ ДонНТУ Борщевским С. В.

Статья поступила в редакцию 12.08.2020.

Dripan P. S. (*DonNTU, Donetsk, DPR*)

MATHEMATICAL MODELS OF ANCHOR STABILITY AND STRENGTH AT ROCK MASS ATTACHMENT UNDER LOAD

A brief analysis of existing methods and structures of anchor support is given. A new method is proposed for attachment the rock mass of mine working with anchor of a larger diameter than the drill hole when it is exposed to static and instantaneous loads. Mathematical models of stability and stress-strain state of the anchor and rock mass are given, the results of which will allow choosing the device parameters that ensure reliable attachment of rock mass.

Key words: *rock mass, anchor, drill hole, load, strain, stress, mathematical model.*

**МЕТАЛЛУРГИЯ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**METALLURGY
AND MATERIAL SCIENCES**

УДК 621.77

к.т.н. Денищенко П. Н.,
Макаганюк А. С.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, alexandr_jes@mail.ru)

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРПОВИДНОСТИ РАСКАТА ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ

Работа посвящена физическому моделированию серповидности раската при толстолистовой прокатке с учетом уширения в четырехвалковой клети. Проверена сходимость физической модели серповидности раската с математической моделью.

Ключевые слова: толстолистовая прокатка, четырехвалковая клеть, серповидность, само-выравнивание вытяжек по ширине раската, уширение.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Качество металлопродукции является наиболее важным показателем конкурентоспособности производства. Черная металлургия должна продолжать расширение выпуска наукоемкой высокоэкономичной металлопродукции на основе внедрения новейших технических разработок [1]. Главное внимание должно уделяться расширению производства и повышению качества прогрессивных видов металлопродукции. К ним в первую очередь относится листовой прокат.

Наиболее актуальной проблемой при толстолистовой прокатке является получение требуемых размеров и формы листов. Улучшение рассматриваемых показателей обеспечивает более высокий уровень технологических и потребительских свойств, что способствует качеству и конкурентоспособности исследуемого вида металлопродукции. Однако, несмотря на имеющиеся успехи в области улучшения прямолинейности прокатываемых листов, некоторые принципиально важные вопросы остаются малоизученными.

В работе [2] представлена математическая модель, разработанная на основе вариационного принципа возможных изменений деформированного состояния (принцип Журдена). Решение уравнения Эйлера — Пуассона с подстановкой входной неравномерности в строки Фурье позволило получить выражение для коэффи-

циентов, учитывающих влияние поперечных смещений металла на уменьшение выходной неравномерности для каждой гармоники [3].

В связи с наличием ряда принятых допущений, которые могут снижать точность разработанной математической модели, возникает необходимость ее экспериментального подтверждения.

Постановка задачи. Работа посвящена проверке математической модели серповидности раската [2] при толстолистовой прокатке с учетом уширения в четырехвалковой клети. В этой связи необходимо проведение опытной прокатки на лабораторном четырехвалковом стане 200/500/400 кафедры ОМДиМ ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ».

В связи с этим **целью** настоящей работы является физическое моделирование серповидности раската при толстолистовой прокатке и проверка сходимости результатов физической модели с математической моделью [2].

Объект исследования — технологический процесс прокатки толстолистовой стали с неравномерной толщиной на выходе из валков четырехвалковой клети.

Предмет исследования — очаг пластической деформации металла неравномерной толщины на выходе из валков и с неравномерным распределением продольного и поперечного течения.

Задачи исследования:

– разработка физической модели серповидности раската при толстолистовой прокатке;

– оценка сходимости физической и математической моделей.

Методика исследования. С целью подтверждения адекватности разработанной математической модели были проведены исследования методом физического моделирования (масштаб моделирования $m=4,5$). Данный масштаб был определен из соотношения диаметров рабочих валков на стане 3000 Филиала № 12 ЗАО «ВТС» ($D_p=900$ мм) и на лабораторном стане кафедры ОМДиМ ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» ($D_p=200$ мм) (рис. 1).

Перед прокаткой образцам с помощью механической обработки придавались строго прямоугольные сечения толщиной H , шириной B , длиной L .

При прокатке образцы толщиной H обжимали со средним обжатием Δh_{cp} с поперечной разнотолщиной, равной δ , на каждой стороне образца (слева $\Delta h_{cp}-\delta/2$, справа $\Delta h_{cp}+\delta/2$). Поперечная разнотолщина при прокатке создавалась перекосом верхних рабочего и опорного валков при помощи раздельного перемещения нажимных винтов $\delta=h_n-h_l$, где h_l и h_n — толщины левой и правой сторон образца после прокатки.

После опыта сравнивали удлинения правой стороны образца и левой (по ходу прокатки). Разница в длинах между левой и правой кромками после прокатки ($\Delta L=L_l-L_{pr}$) говорит о наличии серповидности; L_l , L_{pr} — длины соответственно левой и правой кромок после прокатки (рис. 2).

Изложение материала и его результаты. В качестве факторов использовались безразмерные величины: $\Delta h_{cp}/B$, H/B , δ/B .

Использовались образцы из технического чистого свинца марки С1 (ГОСТ 3778–98).

Исходные размеры заготовок приведены в таблице 1.

Откликом служило отношение $\Delta L/B$, которое представляет собой суммарный тангенс угла поворота торца раската в го-

ризонтальной плоскости $\varphi = \varphi_n + \varphi_z$ (рис. 2), где φ_n , φ_z — углы поворота переднего и заднего торцов раската соответственно; b — ширина образца после прокатки ($b=B+\Delta b$); ΔL_n , ΔL_z — разница в удлинениях кромок на переднем и заднем торцах ($\Delta L = \Delta L_n + \Delta L_z$).

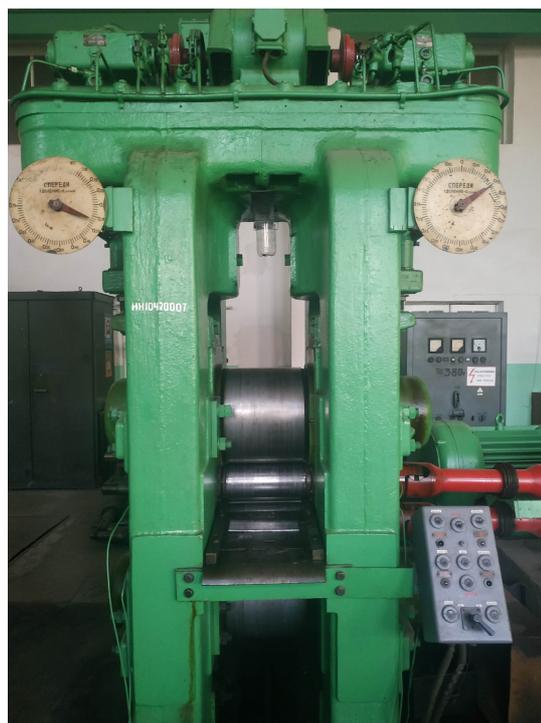


Рисунок 1 Лабораторный стан 200/500/400 кафедры ОМДиМ

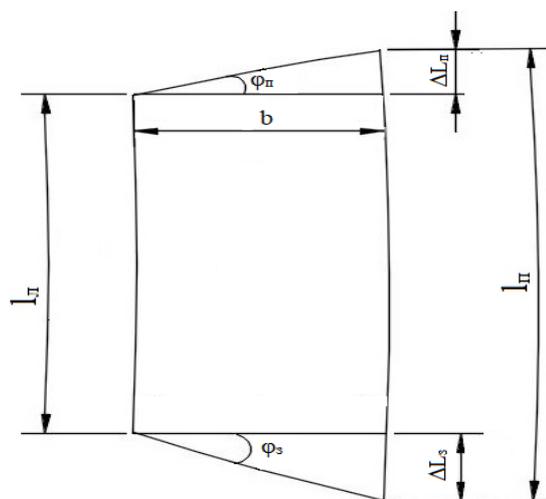


Рисунок 2 Схема измерения серповидности

Таблица 1

Размеры исходных заготовок

№	H _л , мм	H _п , мм	B, мм	L _л , мм	L _п , мм
1.1	12,41	12,41	271	108	108
1.2	12,40	12,40	271	108	108
1.3	12,42	12,42	271	108	108
2.1	2,02	2,02	355	109	109
2.2	2,01	2,01	356	106	105,5
2.3	2,00	2,00	356	104	105
3.1	12,49	12,49	356	110	109
3.2	12,50	12,50	356	109	109
3.3	12,50	12,50	356	109	109
4.1	2,02	2,02	271	100	100
4.2	2,03	2,03	271	102	100
4.3	2,01	2,01	271	100	100
5.1	7,18	7,18	311	109	108,5
5.2	7,20	7,20	314	109	108,5
5.3	7,21	7,21	314	109	109

Примечание: H_л и H_п — исходные толщины левой и правой сторон заготовки; L_л и L_п — исходные длины левой и правой сторон заготовки.

С целью минимизации числа опытов применили план дробного факторного эксперимента ДФЭ 2^{3-1} . Для проверки линейности получаемого уравнения регрессии ставили также опыт в центре плана (на нулевом уровне). Матрица плана эксперимента представлена в таблице 2.

Так как используется двухуровневый план эксперимента, факторы принимают два значения: верхнего (+) и нижнего (-) уровней. Поэтому нужно знать, какие физические значения безразмерных параметров Π_1 , Π_2 , Π_3 соответствуют уровням (+) и (-). Для этого производим кодирование факторов. Результаты кодирования представлены в таблице 3.

Таблица 2

Матрица плана эксперимента

X ₁ = H/B	X ₂ = Δh _{ср} /B	X ₃ = δ/B	X ₁	X ₂	X ₃
0,03511	0,00365	0,00062	+	+	+
0,00562	0,00154	0,00062	-	-	+
0,03511	0,00154	0,00008	+	-	-
0,00562	0,00365	0,00008	-	+	-
0,02037	0,00260	0,00035	0	0	0

Таблица 3

Кодирование факторов

Уровни и интервалы варьирования факторов	$\Pi_1 = H/B$	$\Pi_2 = \Delta h_{ср}/B$	$\Pi_3 = \delta/B$
Верхний уровень (Π _g = +1)	0,03511	0,00365	0,00062
Нижний уровень (Π _g = -1)	0,00562	0,00154	0,00008
Нулевой уровень (Π _g = 0)	0,02037	0,00260	0,00035
Интервал варьирования	0,01475	0,00105	0,00027

На основании полученных данных рассчитываем уравнение регрессии для факторов в безразмерном виде, используя следующие формулы.

Связь между кодированными (X_i) и натуральными (Π_i) значениями факторов выражается соотношением

$$X_i = (\Pi_g - \Pi_{g0}) / \Delta g. \quad (1)$$

Вычисление оценок коэффициентов регрессии a_i и свободного члена a_0 производим методом наименьших квадратов с использованием зависимостей

$$a_0 = 1/N \cdot \sum_{i=1}^N Y_i, \quad (2)$$

$$a_i = 1/N \cdot \sum_{i=1}^N X_g Y_i, \quad (3)$$

где i — номер опыта; g — номер фактора; N — число опытов плана ДФЭ 2^{3-1} ; Y_i — значение отклика в опыте.

Таким образом, уравнение регрессии в кодированных значениях факторов имеет вид

$$Y = -0,0005 - 0,102X_1 + 0,015X_2 + 0,092X_3. \quad (4)$$

Пределы изменения переменных исследуемого процесса представлены в таблице 4.

Таблица 4
Размеры образцов после прокатки

№	h _л , мм	h _п , мм	b, мм	l _л , мм	l _п , мм
1.1	11,2	11,1	272	118	120
1.2	11,2	11,1	274	118	120
1.3	11,2	11,1	274	118	120
2.1	1,56	1,51	356,0	148	150
2.2	1,56	1,51	356,5	142	143
2.3	1,56	1,51	357,0	141	142
3.1	11,3	11,1	358,0	116	120
3.2	11,32	11,15	358,0	117,5	122
3.3	11,31	11,1	358,0	118	119
4.1	1,48	1,28	272,0	131	153
4.2	1,48	1,28	272,0	133	163
4.3	1,48	1,28	273,0	132	157
5.1	6,35	6,24	314,0	123	126
5.2	6,35	6,24	315,0	123	127
5.3	6,35	6,24	313,0	124	126

Для перехода к натуральным значениям факторов производилось декодирование уравнения регрессии (4) с использованием соотношения (1). В результате численные значения коэффициентов регрессии a_i и свободного члена a_0 изменились, и уравнение регрессии в натуральных значениях факторов имеет вид

$$\frac{\Delta L}{B} = -0,099 - 6,930 \frac{H}{B} + 87,4 \frac{\Delta h_{cp}}{B} + 56,624 \frac{\delta}{B} \quad (5)$$

Статистическая обработка экспериментальных данных производилась в соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения» [3]. Статистические характеристики уравнения регрессии сведены в таблицу 5.

Проверка воспроизводимости эксперимента показала, что опыты являются равноточными: табличное значение критерия Кокрена при уровне значимости $\alpha=0,05$, числе степеней свободы $\nu=2$ и количестве независимых оценок дисперсии $k=4-G^T=0,7679$ больше эмпирического G^3 . Следовательно, гипотеза об однородности ряда дисперсий подтверждается.

Значимость R , проверенная по t-критерию Стьюдента и F-критерию Фишера, показала, что гипотеза о равенстве коэффициента множественной корреляции нулю отвергается и связь считается статистически значимой.

Сравнением расчетных и экспериментальных значений в центре плана установлено, что расхождение составляет 6,50 %.

Следовательно, линейные модели являются достаточно хорошей аппроксимацией исследуемой функции.

Проверка значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента показала, что при $\alpha=0,05$ все они значимы (расчетные значения коэффициентов больше табличного).

Из таблицы 5 видно, что значения $S_{ад}^2$ существенно меньше S_y^2 , поэтому величины S и ε определяются погрешностью эксперимента (то есть S_y^2), а не погрешностью аппроксимации. Проверка адекватности модели по F-критерию Фишера показала достаточно хорошее соответствие полученной модели экспериментальным данным: расчетное значение F-критерия не превышает табличного значения: $F_{5\%} = 19,0$ при $\nu_1 = 2$ и $\nu_2 = 2$. Коэффициент множественной детерминации $R_d > 0,75$; следовательно, модель работоспособна.

Проверка правильности вычислений коэффициентов регрессии производилась подстановкой в уравнения регрессии значений X_i опытов. Полученные значения Y соответствуют значениям откликов в опытах с точностью до ошибок округления.

Таблица 5
Статистические характеристики уравнения регрессии

G^3	F^3	R_d	$S_{ад}^2$	S	$\varepsilon, \%$	S_y^2
0,6695	0,0064	0,998	$8,1 \cdot 10^{-8}$	6,50	4,93	$0,12 \cdot 10^{-4}$

Примечание: G^3 — рассчитанное значение критерия Кокрена; F^3 — рассчитанное значение критерия Фишера; R_d — коэффициент множественной детерминации; $S_{ад}^2$ — дисперсия адекватности; S — максимальное отклонение; ε — средняя относительная погрешность; S_y^2 — значение дисперсии воспроизводимости.

На рисунке 3 приведены графики зависимости суммарного угла поворота торцов раската $\Delta L/B$, полученные при различных значениях поперечной разнотолщинности δ/B , вариации значения среднего абсолютного обжатия $\Delta h/B$ и начальной толщины H/B , согласно плану эксперимента. Также был проведен сравнительный анализ между значениями, полученными в ходе опытов (плоскости 2, 3, 5), и рассчитанными по математической модели (плоскости 1, 4, 6).

Математическая модель, представленная в [2], с более точными коэффициентами вытяжки получена с учетом уширения

$$v_{л, n} = v_{вх} \left[1 + f \frac{h_x - H}{\Delta h} \cdot \frac{B_x - B}{\Delta b} + \varphi \frac{H - h_x}{\Delta h} \cdot \frac{b - B_x}{\Delta b} \right], \quad (6)$$

$$\Delta L_{л, n} = \frac{L \cdot h_0 \cdot v_{л, n} \cdot B_0}{l \cdot h_1 \cdot v_{ср} \cdot B_1}, \quad (7)$$

$$v_{ср} = \frac{v_{л} + v_{н}}{2}, \quad (8)$$

где $v_{л}$, $v_{н}$ — скорости выхода левой и правой кромок раската из валков, получаемые при расчете из формулы (6);

$v_{вх}$ — скорость задачи раската в валки;

f , φ — входные и выходные неравномерности скоростей течения металла;

h_1 — выходная толщина раската;

h_x , B_x — толщина и полуширина раската в нейтральном сечении;

Δh , Δb — абсолютное обжатие и полууширение;

$\Delta L_{л, n}$ — удлинение сторон раската, рассчитывается для каждой стороны отдельно;

$v_{ср}$ — средняя скорость выхода металла из валков.

Для проверки сходимости результатов, получаемых при помощи математической модели [2], были рассчитаны удлинения сторон раската с размерами согласно пла-

ну эксперимента. В ходе проверки правильности расчетов результаты расчетов сравнивали с данными, полученными при помощи физической модели. Для этого результаты опытов были умножены на исходный масштаб моделирования. Результаты проверки сведены в таблицы 6–7.

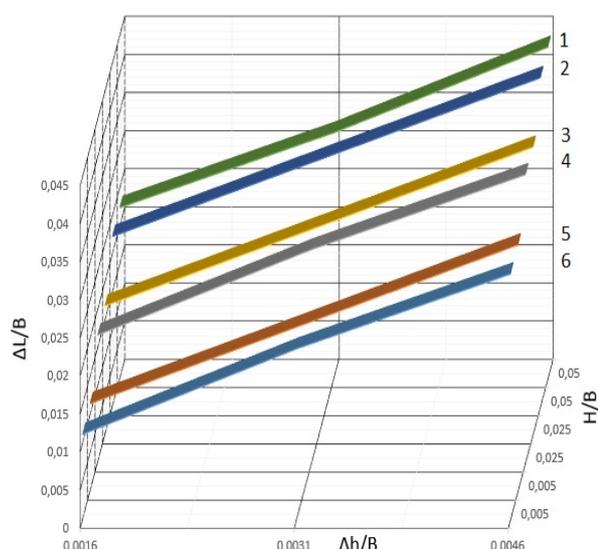


Рисунок 3 Зависимость суммарного угла поворота торцов раската при $H/B = (0,00562...0,03511)$, $\Delta h_{ср}/B = (0,00154...0,00365)$ и $\delta/B = (0,00008...0,00062)$, рассчитанных по математической (1, 4, 6) и физической (2, 3, 5) моделям

Таблица 6
Сравнение экспериментальных и полученных значений удлинения левой кромки

H, мм	Δh, мм	Δb, мм	L _з , мм	L _п , мм	Δ, %
55,85	5,90	2,25	540,00	542,00	0,37
55,80	5,85	6,75	540,00	537,00	-0,56
55,89	5,94	6,75	540,00	538,00	-0,37
9,09	2,30	2,25	675,00	654,00	-3,11
9,05	2,25	1,13	643,50	633,00	-1,63
9,00	2,21	2,25	639,00	617,00	-3,44
56,21	6,26	4,50	540,00	555,00	2,78
56,25	6,08	4,50	549,00	547,00	-0,36
56,25	6,30	4,50	535,50	550,00	2,71
9,09	3,33	2,25	688,50	704,00	2,25
9,14	3,38	2,25	733,50	721,00	-1,70

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Продолжение таблицы 6

H, мм	Δh , мм	Δb , мм	L_3 , мм	L_p , мм	Δ , %
9,05	3,29	4,50	706,50	697,00	-1,34
32,36	4,28	6,75	567,00	560,00	-1,23
32,40	4,32	2,25	571,50	564,00	-1,31
32,45	4,37	2,25	567,00	565,00	-0,35

Примечание: L_3 , L_p — удлинения, полученные экспериментальным и расчетным путем; Δ — относительная погрешность.

Таблица 7

Сравнение экспериментальных и полученных значений удлинения правой кромки

H, мм	Δh , мм	Δb , мм	L_3 , мм	L_p , мм	Δ , %
55,85	5,45	2,25	531,00	536,00	0,94
55,80	5,40	6,75	531,00	532,00	0,19
55,89	5,49	6,75	531,00	533,00	0,38
9,09	2,07	2,25	666,00	634,00	-4,80
9,05	2,03	1,13	639,00	612,00	-4,23
9,00	1,98	2,25	634,50	605,00	-4,65
56,21	5,36	4,50	522,00	538,00	3,07
56,25	5,31	4,50	528,75	538,00	1,75
56,25	5,36	4,50	531,00	538,00	1,32
9,09	2,43	2,25	589,50	615,00	4,33
9,14	2,48	2,25	598,50	618,00	3,26
9,05	2,39	4,50	594,00	608,00	2,36
32,36	3,78	6,75	553,50	547,00	-1,17
32,40	3,83	2,25	553,50	552,00	-0,27
32,45	3,87	2,25	558,00	555,00	-0,54

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. В ходе проведения экспериментальных исследований методом планируемого эксперимента в лабораторных условиях получена работоспособная физическая модель

серповидности раската при толстолистовой прокатке.

2. Модель учитывает неравномерное распределение деформаций по ширине очага деформации и поперечное течение металла в очаге пластической деформации. Установлен рост суммарного угла поворота торцов раската в исследованном диапазоне: $H/B = (0,00562...0,03511)$, $\Delta h_{cp}/B = (0,00154...0,00365)$ и $\delta/B = (0,00008...0,00062)$ при увеличении перекося валков.

3. Полученное регрессионное уравнение, аппроксимированное линейной функцией, с достаточной точностью описывает разность удлинений торцов полосы по ширине раската применительно к условиям толстолиствого стана 3000 Филиала № 12 ЗАО «ВТС».

4. Статистическая обработка результатов эксперимента показала значимость коэффициентов регрессии, работоспособность и адекватность модели, достаточную воспроизводимость экспериментальных данных. Данную модель можно использовать для прогнозирования серповидности раскатов с учетом уширения в условиях толстолиствого стана 3000 Филиала № 12 ЗАО «ВТС» и на аналогичных толстолистовых станах.

5. Проведенными расчетами подтверждена сходимость разработанных физической и математической моделей серповидности раската при толстолистовой прокатке: максимальная относительная погрешность не превышает 4,8 %.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку модели серповидности с учетом температурного градиента по ширине раската.

Библиографический список

1. Семенов, В. В. Совершенствование техники и технологии производства черных металлов — основной фактор устойчивого развития отрасли и повышения ее инвестиционной привлекательности [Текст] / В. В. Семенов, В. А. Углов // Черная металлургия. — 2018. — № 6. — С. 3–12.

2. Денищенко, П. Н. Математическое моделирование серповидности раската при толстолистовой прокатке с учётом уширения [Текст] / П. Н. Денищенко, А. С. Макаганюк // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2020. — Вып. 61. — С. 77–83.

3. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента [Текст] / Г. И. Красовский. — Минск : Изд. БГУ, 1982. — 300 с.

© Денищенко П. Н.

© Макаганюк А. С.

Рекомендована к печати д.т.н., доц., зав. каф ОМД ДонНТУ Снитко С. А., к.т.н., доц., пом. нач. СПЦ Филиала № 12 ЗАО «ВТС» по технологии Чичкан А. А.

Статья поступила в редакцию 26.11.2020.

PhD in Engineering Denishchenko P. N., Makaganiuk A. S. (*DonSTI, Alchevsk, LPR, alexander_jes@mail.ru*)

PHYSICAL MODELING OF THE HOT-ROLLED BREAKDOWN CAMBER DURING THICK-SHEET ROLLING

The work is devoted to physical modeling of the hot-rolled breakdown camber during thick-sheet rolling considering widening in a four-high stand. The convergence of physical model of the hot-rolled breakdown camber with mathematical model was verified.

Key words: *thick-sheet rolling, four-high stand, camber, self-alignment of cogging back along the width of rolling, widening.*

УДК 669.162

к.т.н. Диментьев А. О.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, dimentev@inbox.ru),
к.т.н. Карпов А. В.
(ЛГТУ, г. Липецк, РФ),
Блинов А. М.
(Филиал № 12 ЗАО «Внешторгсервис», г. Алчевск, ЛНР)

УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛИ ЧУГУНА С ЗАДАНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ, ПРОИЗВЕДЕННОГО В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Проведено исследование по определению изменения содержания кремния в чугуна на протяжении выпуска продуктов плавки из доменной печи объемом 1386 м³ Филиала № 2 ЗАО «Внешторгсервис». В результате определено, что выпускаемый сплав можно разделить на два вида: с высоким содержанием кремния (первая половина выпуска) и с низким (вторая половина выпуска).

На основании этого авторами предложено для увеличения среднегодового объема чугуна с заданным содержанием кремния в середине выпуска продуктов плавки, опираясь на результаты химического состава первой пробы сплава, выпускаемый чугун направить в пустой ковш или миксеровоз, что позволит повысить долю качественной по содержанию кремния продукции на 1–4 %/год при условии несоответствия $[Si]$ от 0 до 0,21 %.

Ключевые слова: доменная печь, горн, содержание кремния в чугуна, выпуск продуктов плавки, качество чугуна.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Для современных условий кислородно-конвертерного передела химический состав чугуна должен отвечать требованиям, которые определяют массовую долю основных элементов в сплаве. В Российской Федерации его химический состав задается согласно ГОСТ 805–95: кремний 0,4–0,9 %, фосфор — не более 0,15 % и сера — не более 0,020 %.

Зарубежные металлурги уже давно считают достаточно серьезной проблемой снижение содержания кремния в передельном чугуна, полученного в доменной печи, так как при организации технологии выплавки необходимо одновременно сохранять благоприятные условия для десульфурации сплава [1–4].

Особенно актуальна данная проблема для шихтовых условий металлургических предприятий Донбасса, работающих на высокосернистом коксе, полученном из донецких углей. Применить зарубежный опыт на них невозможно, так как эконо-

мически нецелесообразно пренебрегать увеличением содержания серы в чугуна на 50–100 % [1].

Постановка задачи. Разработать предложения по увеличению доли чугуна с заданным содержанием кремния, произведенного в доменной печи, для дальнейшего его использования в кислородно-конвертерном переделе.

Методика исследования. Определение и анализ изменения содержания кремния в чугуна на протяжении выпуска продуктов плавки из доменной печи путем отбора семи проб жидкого сплава через равные промежутки времени на литейном поле металлургического агрегата.

Изложение материала и его результаты. В доменной печи восстановление кремния в основном происходит при контакте жидкого чугуна с первичным шлаком и с твердым углеродом кокса при достаточно высоких температурах. Процесс протекает в несколько этапов с образованием летучего промежуточного моноокси-

да кремния. Поэтому контакт между чугуном и газом способствует увеличению доли кремния в накапливаемом сплаве. Чем выше расположена зона плавления (когезии) в печи, тем продолжительнее этот контакт и, соответственно, выше температура продуктов плавки [1–4].

Однако в горне восстановленный кремний может повторно окисляться при движении капель чугуна через слой шлака, содержащий более 1 % FeO.

На доменных печах с двумя чугунными лётками, расположенными обычно под углом 60° , в противоположной от лётки части горна после окончания выпуска продуктов плавки остается значительное количество шлака. Накапливаемый в этой части металлоприемника чугун будет иметь в своем составе меньше восстановленного кремния, чем в районе чугунных лётки [5].

До 80-х годов XX столетия уровень чугуна и шлака в горне доменной печи оценивали на основе опытных данных и балансовых расчетов. Поэтому считалось, что для продуктов плавки он изменяется равномерно по всей площади металлоприемника в течение всего выпуска.

Разработанная в ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» система контроля состояния горна позволила установить, что уровень чугуна и шлака ме-

няется неравномерно по сечению горна и зависит от состояния коксовой насадки и физико-химических свойств продуктов плавки. В течение первых 10–15 мин после вскрытия канала чугунной лётки из горна печи вытекает только чугун. В этот период времени в результате турбулентности потока в секторе металлоприемника около канала лётки образуется так называемая депрессионная воронка. В слое шлака она также образуется, только гораздо большего размера [6, 7].

Физическое моделирование движения шлака в горне доменной печи, проведенное проф. Новохатским А. М., показало, что линии тока направлены в сторону канала чугунной лётки, а линии равных скоростей в вертикальной и горизонтальной плоскости расположены по окружности, образуя в объеме шаровую поверхность. Центром этой поверхности является начало лётки в печи. Сверху поверхность расчечена зеркалом шлака, а снизу — зеркалом чугуна (рис. 1, а) [8].

Однако у авторов работы [3] траектории движения чугуна в металлоприемнике в период выпуска продуктов плавки отличаются, так как они рассматривали их при «сидящем на лещади» «тотермане» и при «плавающем» (рис. 1, б) соответственно сверху и снизу.

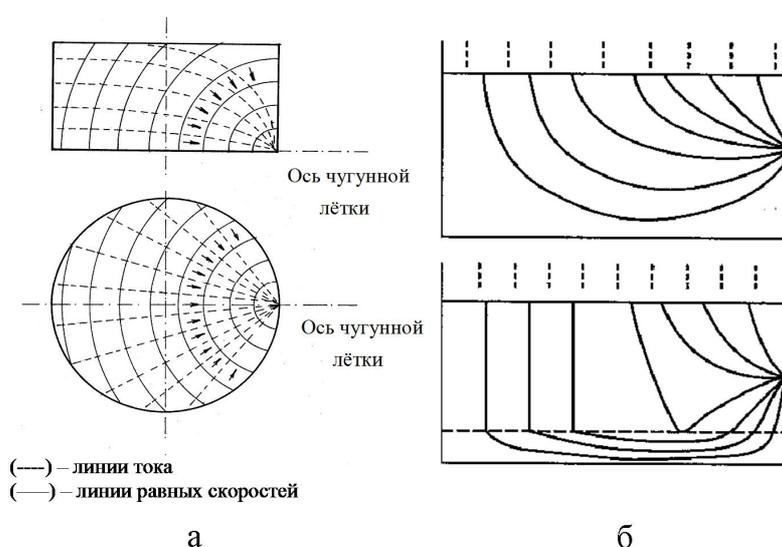


Рисунок 1 Линии тока движения продуктов плавки в горне доменной печи

Таким образом, на основании проведенного анализа литературных данных был сделан вывод, что слой чугуна в доменной печи после открытия чугунной летки изменяется практически равномерно по окружности горна до уровня оси выпускного канала с образованием небольшой депрессионной воронки. После этого, согласно рассмотренным линиям тока, должна возрасти доля чугуна в общем объеме, проходящего через так называемый мертвый слой, что, вероятно, отразится на химическом составе выпускаемого сплава и может быть зафиксировано в процессе выпуска продуктов плавки.

С этой целью на доменной печи объемом 1386 м³ Филиала № 2 ЗАО «Внешторгсервис» проведено исследование по определению содержания кремния в чугуне ([Si]) на протяжении выпуска продуктов плавки, где в течении периода между открытием и закрытием чугунной летки семь раз отбирались пробы жидкого сплава через равные промежутки времени на пяти выпусках. Результаты представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

Как видно на рисунке 2, изменение содержания кремния в чугуне на разных выпусках неоднозначно, однако в целом можно отметить постепенное уменьшение [Si], причем разница между начальным и конечным значениями колеблется в больших пределах от 0,02 до 0,22 %.

На выпусках № 2, № 4 и № 5 изменения [Si] практически не наблюдается, а на

выпусках № 1 и № 3 видно, что содержание кремния в чугуне сразу после открытия чугунной летки растет, а ближе к ее закрытию снижается. На рисунке 3 представлены графики, построенные по усредненным значениям доли кремния в сплаве.

В результате выпускаемый чугун из доменной печи в течение выпуска продуктов плавки можно разделить по содержанию кремния на два вида: с высоким (период I) и с низким (период II). Разница средних значений рассматриваемой величины составляет 0,11 % и 0,21 % для выпусков № 2, № 4, № 5 и № 1, № 3 соответственно.

В связи с этим в середине выпуска продуктов плавки на основании химического состава первой пробы можно разделить чугун по содержанию кремния, организовав его разливку в разные ковши или миксеровозы. Таким образом, половина выпущенного сплава может иметь заданное качество, при условии несоответствия от 0 до 0,21 % (для доменной печи объемом 1386 м³ Филиала № 2 ЗАО «Внешторгсервис», на других печах эта величина может отличаться).

Проведенный анализ посуточных данных работы доменной печи одного из ведущих предприятий СНГ за период около 2,5 лет показал, что предложенные мероприятия по организации выпуска чугуна могут позволить увеличить долю качественной по содержанию кремния продукции на 1–4 % (на этом предприятии сделан упор по выполнению данного критерия качества).

Таблица 1

Изменение содержания кремния в чугуне в течение выпуска продуктов плавки

Номер пробы	Выпуск № 1	Выпуск № 2	Выпуск № 3	Выпуск № 4	Выпуск № 5
1	0,74	1,08	1,3	0,89	1,04
2	1,03	1,02	1,38	0,86	1,04
3	1,04	1,07	1,23	0,94	1,03
4	0,68	0,99	1,18	0,91	1,02
5	0,62	0,92	1,06	0,9	1
6	0,58	0,92	1,09	0,91	0,94
7	0,61	0,93	1,08	0,87	0,94

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

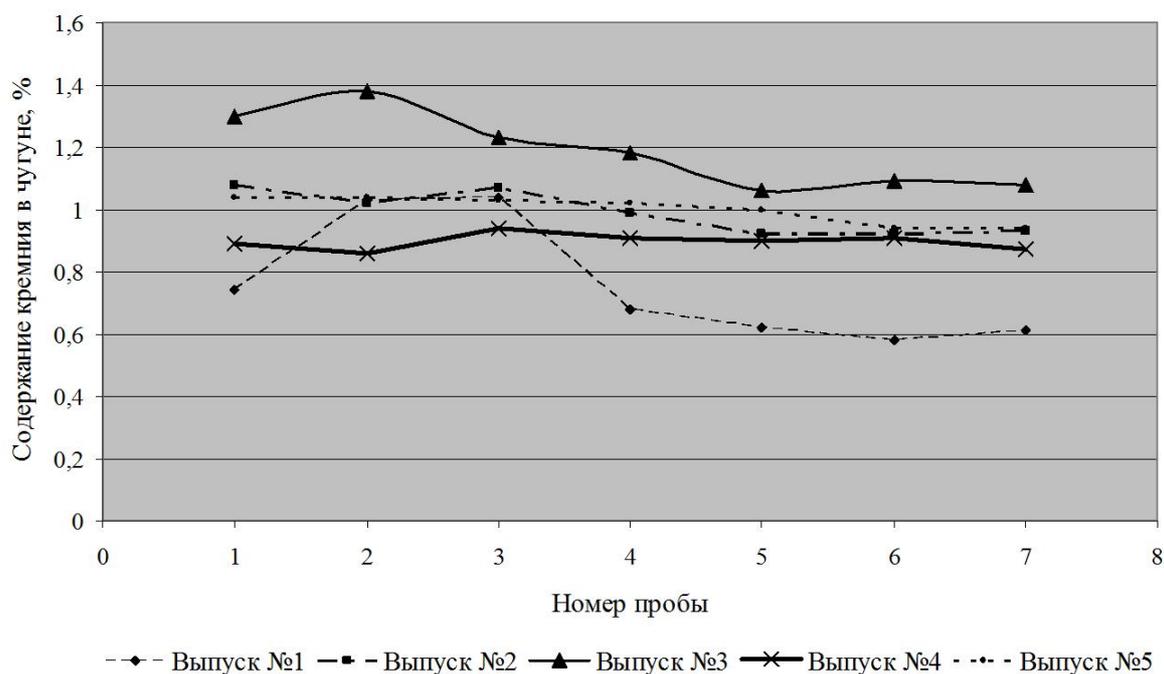


Рисунок 2 Изменение содержания кремния в чугуна в течение выпуска продуктов плавки на доменной печи объемом 1386 м³ Филиала № 2 ЗАО «Внешторгсервис»

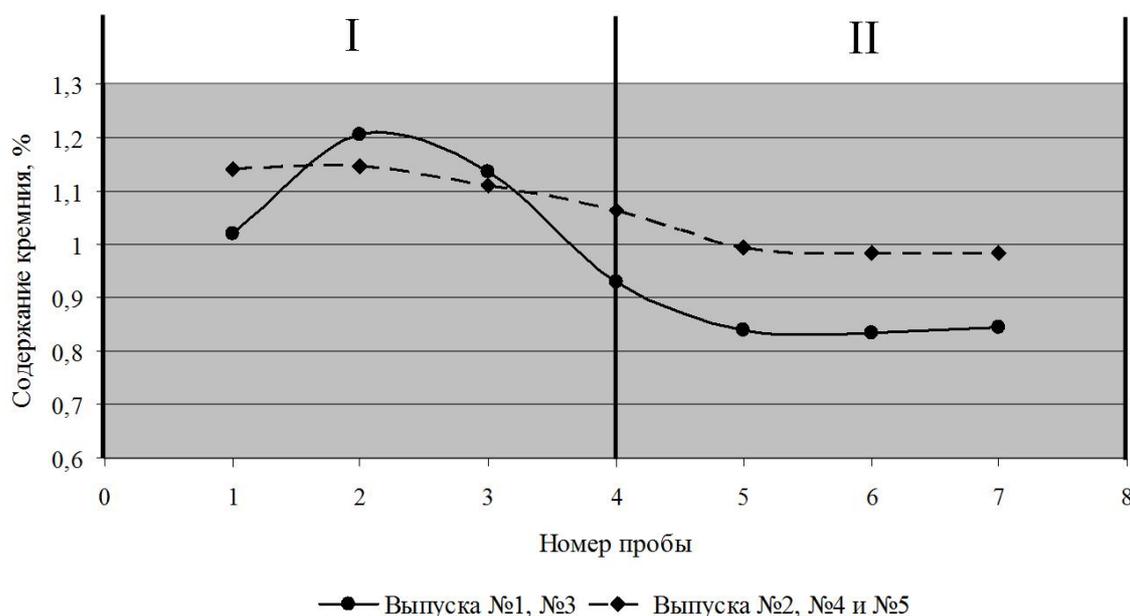


Рисунок 3 Изменение усредненных значений содержания кремния в чугуна в течение групп выпусков продуктов плавки на доменной печи объемом 1386 м³ Филиала № 2 ЗАО «Внешторгсервис»

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. В течение выпуска продуктов плавки из доменной печи чугун по химическому

составу можно разделить на два вида: с высоким содержанием кремния (первая половина выпуска) и с низким (вторая половина выпуска).

2. Для увеличения доли чугуна с заданным содержанием кремния, произведенного в доменной печи с двумя чугунными летками, с целью в дальнейшем использовать его в кислородно-конвертерном переделе предлагается при необходимости в середине выпуска продуктов плавки (обычно это около 30 минут после открытия летки), на основании химического состава первой пробы, выпускаемый чугун направить в пустой ковш или миксеровоз, что позволит

повысить долю качественной по содержанию кремния продукции на 1–4 %/год при условии несоответствия [Si] от 0 до 0,21 %.

3. В дальнейшем целесообразно провести эксперименты по апробированию предложенного способа на литейном поле действующей доменной печи, оборудованной двумя чугунными летками, а также изучить изменение содержания других химических элементов, входящих в состав чугуна, в течение выпуска продуктов плавки.

Библиографический список

1. Иноземцев, Н. С. Основы технологии доменной плавки [Текст] : учебное пособие / Н. С. Иноземцев, С. А. Дубровский, В. А. Дудина и др. — Липецк, 2006. — 128 с.
2. Геердес, М. Введение в современный доменный процесс [Текст] / М. Геердес, Х. Токсонеус, К. ван дер Влит ; пер. с англ. И. Ф. Курунов. — Липецк, 2004. — 131 с.
3. Вегман, Е. Ф. Металлургия чугуна [Текст] / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев и др. ; под ред. Ю. С. Юсфина. — [3-е изд.]. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. — 774 с.
4. Готлиб, А. Д. Доменный процесс [Текст] / А. Д. Готлиб. — М. : Металлургия, 1966. — 504 с.
5. Новохатский, А. М. Анализ влияния режима выпусков на дренажные условия в горне доменной печи [Текст] / А. М. Новохатский, А. О. Диментьев, Г. Д. Михайлюк, А. В. Карпов // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск, 2013. — Вып. 41. — С. 86–93.
6. Новохатский, А. М. Система контроля состояния горна доменной печи [Текст] / А. М. Новохатский, Г. Д. Михайлюк // Черные металлы. — 2012. — № 8. — С. 13–17.
7. Новохатский, А. М. Особенности работы горна доменной печи при выпуске чугуна и шлака через канал чугунной лётки [Текст] / А. М. Новохатский // Металл и литье Украины. — 2009. — № 1. — С. 9–12.
8. Новохатский, А. М. Изучение закономерностей движения расплавов в горне доменной печи [Текст] / А. М. Новохатский // Сб. научн. трудов. ДонГТУ. — 2002. — Вып. 15. — С. 207–213.

© Диментьев А. О.

© Карпов А. В.

© Блинов А. М.

Рекомендована к печати к.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТИ Куберским С. В., к.т.н., доц. каф. МТ ЛГТУ Шипельниковым А. А.

Статья поступила в редакцию 15.10.2020.

PhD in Engineering Dimentev A. O. (DonSTI, Alhevsk, LPR, dimentev@inbox.ru),

PhD in Engineering Karpov A. V. (LSTU, Lipetsk, the Russian Federation),

Blinov A. M. (Branch № 12 ZAO «Vneshtorgservis» (Closed Joint-Stock Company), Alhevsk, LPR)

INCREASING THE PROPORTION OF CAST IRON WITH A GIVEN SILICON CONTENT PRODUCED IN THE BLAST FURNACE

A study was carried out to determine changes of silicon content in cast iron during the output of melting products from the blast furnace of Branch № 2 ZAO «Vneshtorgservis» with a volume of 1386 m³. As a result, it was determined that the produced alloy can be divided into two types: with a high silicon content (the first half of output) and with a low one (the second half of output).

The authors therefore proposed in order to increase the average annual amount of cast iron with a given amount of silicon in the middle of output of melting products based on chemical composition of the first alloy sample, to head the produced cast iron into the empty ladle or torpedo ladles that will allow to increase the proportion of high-quality content silicon production by 1–4 %/year, in case of discrepancy [Si] from 0 to 0,21 %.

Key words: *blast furnace, hearth, silicon content in cast iron, output of melting products, quality of cast iron.*

УДК 620.92:669

*к.т.н. Петров П. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР),
к.э.н. Ульяницкая О. В.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)*

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В работе выполнен комплексный анализ технико-экономических показателей использования энергоносителей в металлургическом производстве и обоснована важность замены их дорогостоящих компонентов альтернативными источниками. Представлены энергоэкономические показатели твердых материалов и газов, применяемых в качестве топлива.

Ключевые слова: дорогостоящие компоненты энергоносителей, кокс, альтернативные источники энергоресурсов, пылеугольное топливо, сопутствующие газы.

Высокая энергоемкость металлургической отрасли обусловила активный поиск возможностей снижения потребления высококалорийных, но дорогостоящих энергоносителей практически на всех пределах металлургического производства.

Повышенные энергетические затраты в черной металлургии обусловлены главным образом уровнем потребления и стоимостью природного газа и кокса на одну тонну выплавленного чугуна [1].

Снижение себестоимости основного продукта доменной плавки — приоритетный показатель конечной цены и конкурентоспособности товарной продукции предприятия на рынках металла.

Дороговизна и неминуемая истощенность источников природного газа, нефти, углей способствуют активному исследованию возможностей использования возобновляемого растительного сырья в качестве энергоносителя для нужд промышленных отраслей, в том числе и металлургического производства.

Так, в работах [2–5] акцентируется, что биотопливо, пригодное для замены коксовой мелочи в агломерационном производстве, можно получить из отходов сельского хозяйства, пищевой промышленности, лесозаготовок и деревообработки.

Результаты экспериментального исследования по введению в состав аглошихты лужги подсолнечных семян представлены в

публикации [5]. Как достоинство этого материала авторы отмечают достаточно низкое содержание золы (2,7 %), экологичность, энергетическую способность (16500÷17850 кДж/кг), примерно равную энергоемкости древесины и торфа (табл. 1).

При этом эксперимент показал, что введение лужги в шихту не оказывает существенного влияния на качественные характеристики готового агломерата. Даже в экономически развитых странах ведутся активные поиски оптимальных источников биотоплива для агломерационного процесса [2, 3]. Следует отметить, что упомянутые работы находятся ещё на исследовательском этапе и стабильного промышленного использования пока не получили. Видимо, для крупных металлургических комбинатов биоресурсы как энергоисточники ещё недостаточно эффективны.

Безусловным направлением инновационной технической политики на ближайшую перспективу в металлургической отрасли является повышение эффективности производства высококачественной продукции при значительном ресурсосбережении за счет использования альтернативных тепловых источников. К альтернативным относят побочные (нефтекокс, угольная пыль, биоресурсы), а также сопутствующие металлургическим процессам вещества: коксовый, доменный и конвертерный газы.

Таблица 1

Теплотворная способность некоторых высококалорийных твердых материалов

№	Наименование материала	Теплотворная (энергетическая) способность*	
		ккал/кг	кДж/кг
1	Антрацит	7850÷8350	32804÷34903
2	Графит	7790	32562
3	Каменные угли	5200÷7300	21736÷30514
4	Кокс	5600÷7200	23408÷30096
5	Древесные топливные брикеты	4200÷4400	17560÷18393
6	Торф	3000÷4500	12540÷18810
7	Нефтяной кокс	7900÷8200	33022÷34276
8	Лузга семян подсолнечника	4007÷4850	16750÷17850

*По данным, предоставленным проф. Ульяницким В. Н.

Интересен результат анализа использования нефтяного кокса в составе пылеугольного топлива (ПУТ) для вдувания в доменные печи [6]. Содержание исследований связано с процессом выплавки чугуна в ДП № 4 и № 5 Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК). Исходным сырьем для получения нефтяного кокса являются всевозможные остатки от добычи и переработки нефти: гудроны, полугудроны, крекинг-остатки, смолы пиролиза и др.

Согласно ГОСТ 22898–78, вырабатывают нефтяные коксы восьми марок. Семь из них малосернистые: 0,2÷1,7 % серы, зольность 0,15÷0,6 %, плотность 2,04÷2,08 т/м³, теплотворная способность 7900 ÷ 8200 ккал/кг (табл. 1). Исследования проводились для вариантов использования нефтекокса при пошаговом изменении его содержания в угольно-коксевой смеси от 10 до 100 % (шаг 10 %).

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением доли нефтяного кокса полнота сгорания смеси ПУТ монотонно снижается. При доле нефтяного кокса 50 % в смеси ПУТ возникает вероятность неровного хода доменной печи. Реализация компенсирующих мероприятий (повышения теоретической температуры горения) позволяет получить минимальный расход металлургического кокса при содержании 10÷30 % нефтекокса в смеси ПУТ. Кроме того, реализация мероприятий

по сохранению на нужном уровне серы в чугуне приведет к увеличению расхода металлургического кокса.

Таким образом, введение нефтяного кокса в состав пылеугольного топлива потребует компенсирующих мероприятий, неоднозначно сказывающихся на ходе плавки и состоянии доменной печи.

Однако важнейшим направлением энергоресурсосбережения в технологии выплавки чугуна является практика экономии кокса (наиболее дорогой энергосоставляющей доменной плавки), обусловленная применением дополнительных видов топлива как заменителей части кокса. Наиболее весомым дополнительным источником является пылеугольная составляющая — ПУТ.

Ещё во второй половине XX века активно велись работы над проблемами снижения расхода природного газа и металлургического кокса при одновременном повышении его качества, а также над заменой части кокса ПУТ в структуре теплоносителей доменной плавки.

Сокращение запасов коксующихся углей обусловило исследования по изысканию рационального состава концентрата углей Донбасса для производства кокса и, соответственно, ПУТ. Известно, что основным показателем эффективности использования углей в качестве ПУТ является полнота их сгорания в фурменной зоне доменной печи [7].

Для полного сгорания ПУТ в доменной печи очень важным является выбор углей. Чем выше содержание углерода, тем больше выделяется теплоты и выше коэффициент замещения кокса [8].

Комплексная оценка эффективности вдувания ПУТ позволила установить, что использование антрацитов в доменной плавке по тепловым показателям в 1,7 раза эффективнее тощих и в 2,2 раза эффективнее газовых углей.

Однако использование антрацитов менее эффективно, чем использование тощих углей, прежде всего, из-за высокой заготовительной стоимости топлива.

Аналитическими расчетами определены максимальные значения размеров частиц ПУТ из углей: марки А — 20 мкм, марки Т — 24 мкм, марки Г — 29 мкм, которые сгорают практически полностью в фурменной зоне доменной печи [6]. Из этого следует, что антрацит необходимо подвергать измельчению до более мелких фракций, чем угли менее твердые.

Однако дробление антрацита до столь мелких фракций из-за его высокой твердости сопровождается повышением удельной энергоемкости процесса измельчения и ускоряет изнашивание рабочего инструмента мельницы [9]. Длительность рабо-

чей кампании размалывающих элементов мельниц обусловлена абразивными свойствами обрабатываемого материала и противоизносной стойкостью рабочих поверхностей валков и сегментов помольного стола. Для анализа использовали антрацит, добываемый горными предприятиями Донбасса.

Важной характеристикой прочностных свойств антрацита является его ударная прочность на сбрасывание. Результаты опыта свидетельствуют о различии показателя кусковатости (табл. 2), а значит, и прочности у антрацитов Донбасса.

Наибольшей ударной прочностью, как следует из таблицы 2, обладают угли поставщиков под № 5, 6 и 7. Самая низкая величина прочности у антрацита черного предприятия «София Бродская».

Другой важной механической характеристикой процесса является его прочность на сжатие. Для исследования использовали образцы кубической формы, размером ребра каждого 40, 30, 20 и 15 мм. Испытанию на сжатие [10] подвергали четыре пробы образца каждого размера.

Анализ результатов таблицы 3 свидетельствует об отсутствии определенной закономерности процесса разрушения образцов антрацита.

Таблица 2

Данные кусковатости проб антрацита после испытания их сбрасыванием

№	Поставщик антрацита	Средний диаметр кусков проб, мм			
		до испытаний	после испытаний	Величина уменьшения среднего диаметра после сбрасывания	
				абсолютная, мкм	относительная, %
1	«София Бродская»	50,0	32,0	18	64,0
2	Постниково	50,0	34,4	15,6	68,8
3	ЦОФ «Нагольчанская»	50,0	36,2	13,8	72,4
4	Красный Луч	50,0	37,0	13,0	74,0
5	«Ровенькиантрацит»	50,0	39,2	10,8	78,4
6	Дарьевка	50,0	39,3	10,7	78,6
7	Лобовские Копи	50,0	40,1	9,9	80,2
Средневзвешенные величины			36,88	13,1	73,8

Таблица 3

Значение прочности на сжатие для различных размеров проб антрацита

№ образца	Размер ребра образца, мм	Напряжения, при которых разрушились пробы, МПа					Усредненная величина
		Номер опыта					
		1	2	3	4		
1	40	2,1	0,9	3,6	2,2	2,200	
2	30	2,5	1,5	2,1	1,0	1,775	
3	20	0,9	1,2	0,5	1,3	0,975	
4	15	1,0	1,2	1,1	2,1	1,350	

Разброс показателей прочности на сжатие составил от 0,5 МПа до 3,6 МПа. Если рассматривать усредненные величины напряжений начала разрушения, то с уменьшением размера проб образцов № 1, 2 и 3 показатель усредненной величины заметно снижается соответственно на 2,2, 1,775 и 0,975 МПа. Однако для пробы образца № 4 (размер 15 мм) показатель усредненной величины прочности почти на 39 % выше, чем у образца № 3.

Все 16 опытов на исследованных образцах дали среднеарифметическую величину напряжения начала разрушения антрацита, равную 1,575 МПа. Следует предположить, что эта величина должна с некоторыми допущениями приниматься в расчетах как энергоемкости процесса измельчения антрацитовых углей, так и оценки влияния ее на износные характеристики рабочего инструмента мельниц [9].

Наилучшие показатели достигаются при вдувании в доменную печь угольных смесей, содержащих до 60 % легковоспламеняемого угля (марка Г), остальное — высококалорийные угли марок А, АС, Т. При низком качестве сырья предпочтительное соотношение упомянутых марок углей в ПУТ должно быть соответственно 80:20 % [9]. Однако металлургическое предприятие часто готовит смесь для ПУТ из доступных и недорогих углей. Например, в Филиале № 12 ЗАО «Внешторгсервис» (ВТС) пылеугольный концентрат состоит из 94,92 % марки КС и 5,08 % марки АС. Кроме того, рекомендуемые в качестве ПУТ смеси и концентраты должны иметь содержание золы не более 10÷12 %, серы — 1,5÷2,0 %, влаж-

ность не должна превышать 10÷12 %, размер (диаметр) вдуваемых в доменную печь частиц ПУТ варьируется в пределах от 30 до 200 мкм [8, 11].

Начало освоения технологии использования ПУТ в доменной плавке на ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (АМК) пришлось на лето 2009 года. Первоначальные показатели были следующие (на ДП 3000 м³): расход ПУТ 130 кг/т чугуна и потребление кокса 480 кг/т чугуна. Природный газ был сведен до минимума.

Проектом инновационного перевооружения комбината предусматривалось за счет использования ПУТ во всех печах доменного цеха получить экономию энергоресурсов в 241,3 тыс. т условного топлива (теплотворная способность 7000 ккал/кг). В натуральных величинах это составляло 607,5 тыс. т кокса и 784,8 млн м³ природного газа. Однако последовавшие в Донбассе события отрицательно сказались на реализации планов предприятия.

В нынешних условиях персонал доменного цеха филиала № 12 ЗАО «ВТС» активно работает над усовершенствованием системы приготовления и использования ПУТ. При этом особое внимание уделяется тем параметрам доменной плавки, которые способствуют повышению энергоэффективности применения пылеугольного топлива. Расход его на тонну выплавленного чугуна составляет 117÷120 кг, а в себестоимости чугуна доля ПУТ не превышает 30 %.

В число важных направлений экономии энергоресурсов в металлургии входит использование газов как сопутствующих

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

продуктов процессов производства кокса, чугуна и стали [12]. Лишь в XXI веке технологию использования этих газов в качестве энергоносителей для выработки электроэнергии внедрили на ПАО «АМК». Предприятие совместно с японской фирмой Sumitomo реализовало проект парогазовой установки по выработке электроэнергии из смеси коксового, доменного и конвертерного газов.

Компонентный состав газов, их средневзвешенная величина в смеси даны в таблице 4.

Парогазовая установка производит электроэнергию путем прямой переработки газовых отходов коксохимического и металлургического производств. Проектная мощность каждого из трёх блоков станции 151,5 МВт. Суммарная мощность установки более 450 МВт, чего с избытком достаточно для покрытия собственной потребности в электроэнергии. Залогом этому должна быть стабильная работа предприятия.

Основные характеристики используемых газов для выработки электроэнергии представлены в таблице 5.

Таблица 4

Средневзвешенные качественные показатели химического состава газов, используемых в филиале № 12 ЗАО «Внешторгсервис»*

№	Наименование компонента газа	Процентное содержание химических компонент			
		доменный	кокосый	конвертерный	средневзвешенная смесь
1	Азот	51,67	3,6	24,2	45,53
2	Водород	3,64	54,8	0,5	6,66
3	Двуокись углерода	17,15	2,7	18,1	16,30
4	Окись углерода	24,85	6,6	57,2	27,15
5	Метан	0,2	24,6	0	1,79
6	Ацетилен	0	3,2	0	0,21
7	Кислород	0,2	0,9	0	0,23

* По данным, предоставленным проф. Ульяницким В. Н.

Таблица 5

Параметры и показатели расхода смешиваемых газов на один энергоблок газотурбинной установки

Наименование параметра	Единица измерения	Газ			
		доменный	кокосый	конвертерный	средневзвешенная смесь
Расход	Нм ³ /час	228500 (макс. 250×10 ³)	18200 (макс. 21×10 ³)	3000	276700
Температура подачи:	°С				
расчетная		30	30	30	30
минимальная		10	10	10	10
максимальная		40	40	40	40
Давление подачи	кПа	8	12	8	
Низшая теплотворная способность	ккал/м ³	750÷790	4050÷4100	1700÷1790	1050÷1090

Из таблицы 5 следует, что показатель теплотворной способности смеси газов $1050 \div 1090$ ккал/м³, а часовой расход на одном энергоблоке 276700 м³ (доменного 240 тыс. м³, коксового 25 тыс. м³ и конвертерного 15 тыс. м³). На производство 1 кВт·ч электроэнергии расходуется 0,263 кг условного топлива, что на 25 % меньше, чем на традиционных тепловых станциях. Кроме экономической выгоды, технология прямой переработки металлургических газов оказывает благотворное влияние на экологическую среду самого предприятия и окружающего пространства.

Основные энергоэкономические характеристики газа для выработки электроэнергии даны в таблице 6.

Анализ показателей таблицы 6 свидетельствует, что по теплотворной способно-

сти доменный газ в 5,2 раза уступает коксовому и в 2,24 раза конвертерному. Примерно в той же пропорции определена отпускная цена 1000 м³ газа для выработки электроэнергии. Теплотворная способность смеси этих же газов (1050 ккал/м³) в 3,9 раз меньше коксового, в 1,66 раза конвертерного, но в 1,35 раза выше доменного.

Обобщая полученные результаты исследований по альтернативным источникам энергоресурсов, следует заключить, что для современной металлургической отрасли пока основными видами топлива являются высококалорийные углеродосодержащие материалы. Решение задачи состоит в том, чтобы значительно снизить их потребление, заменяя более эффективными альтернативными энергоносителями.

Таблица 6

Энергоэкономические показатели газов, используемых на электростанции филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис»

Газ	Выход газа на единицу продукции	Усредненная энергоемкость, ккал/м ³	Цена за 1000 м ³ , руб.	Удельный показатель энергоемкости к природному газу*
Доменный	1890 м ³ /т чугуна	780	153	0,098
Коксовый	470 м ³ /т кокса	4075	800	0,51
Конвертерный	152 м ³ /т стали	1745	343	0,22

*Усредненная энергоемкость природного газа принята 8000 ккал/м³.

Выводы:

1. Анализ результатов потребления металлургическими предприятиями топлива и энергии свидетельствует о необходимости использования пылеугольного топлива с целью частичного отказа от дорогостоящего природного газа и существенного снижения расхода кокса на единицу продукции доменного цеха.

2. Опыт использования ПУТ показал его более высокую эффективность на доменных печах большого размера. Подача пылеугольного топлива более 120 кг на

тонну чугуна для печей малых и средних объемов обусловила повышенный температурный режим плавки, что отрицательно сказывается на системе охлаждения печи.

3. На экономико-экологические показатели металлургических предприятий положительное влияние оказывает использование энергетических возможностей доменного, коксового и конвертерного газов для выработки относительно дешевой электроэнергии на специальной газотурбинной установке.

Библиографический список

1. Мороз, А. Я. Использование энергоносителей в производстве продукции на металлургических и коксохимических предприятиях Донецкой области в 2011 году [Текст] / А. Я. Мороз,

И. Т. Резниченко, С. Н. Тушико // *Металлургические процессы и оборудование*. — Донецк, 2012. — № 1 — С. 12–16.

2. Михайлов, В. Г. Биотопливо в агломерационном процессе [Текст] / В. Г. Михайлов и др. // *Современная металлургия нового тысячелетия* : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. — Липецк : Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2016. — С. 132–137.

3. Mousa, E. A. Iron ore sintering process with biomass utilization [Text] / E. A. Mousa, A. Babich, D. Senk // In : *Proceeding : METEC & 2nd ESTAD*. — Düsseldorf, Germany, 2015.

4. *Alternate Carbon Sources for Sintering of Iron Ore (Acasos)* [Text] / Roland Pietruck [ets.] / — Luxembourg Office of the European Union, 2013. — 71 p.

5. Исследование технологических свойств растительных отходов как альтернативного экологического топлива [Текст] / Л. И. Калашишникова и др. // *Вектор науки ТГУ*. — Тольятти, 2011. — № 4. — С. 32–34.

6. Титов, В. Н. Теоретический анализ применения нефтяного кокса в качестве пылеугольного топлива [Текст] / В. Н. Титов, Л. С. Ивлева // *Современная металлургия нового тысячелетия* : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. — Липецк : Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2016. — С. 258–264.

7. Аносов, В. Г. Исследование процесса горения пылеугольного топлива в фурменной зоне доменной печи [Текст] / В. Г. Аносов, Д. А. Лаптева // *Металлургия*. — Запорожье, 2011. — Вып. 23. — С. 16–31.

8. Калинчак, В. В. Оценка доли выгорания частиц пылеугольного топлива в фурменном очаге [Текст] / В. В. Калинчак, Ю. А. Зинченко, А. С. Черненко, Р. Д. Куземко // *Металл и литье Украины*. — 2013. — № 12. — С. 9–16.

9. Ульяницкий, В. Н. Оценка изношенных характеристик рабочих инструментов валково-тарельчатых мельниц для приготовления пылеугольного топлива [Текст] / В. Н. Ульяницкий, П. А. Петров, О. В. Ульяницкая, С. П. Еронько // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — Вып. 13 (56). — С. 129–135.

10. Новохатский, А. М. Проблемы замены кокса альтернативными видами топлива и пути их решения [Текст] : монография / А. М. Новохатский, А. В. Карпов. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 182 с.

11. Расчет и оценка эффективности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива в условиях ПАО «ММК им. Ильича» [Текст] / В. С. Бойко, С. А. Матвиенков, С. Л. Ярошевский, А. В. Кузин, В. В. Климанчук, В. А. Струтинский // *Металл и литье Украины*. — 2012. — № 2–3. — С. 7–11.

12. Ульяницкая, О. В. Анализ использования и экономии энергоносителей на предприятиях металлургического комплекса Украины [Текст] / О. В. Ульяницкая, Н. В. Коваленко // *Вісник Дніпропетровського університету. Сер. : Економіка*. — 2014. — Т. 22. — Вип. 8 (2). — С. 89–94.

© Петров П. А.

© Ульяницкая О. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. ТМиИК ЛГУ им. В. Даля Витренко В. А.

Статья поступила в редакцию 13.07.2020.

PhD in Engineering Petrov P. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR), PhD in Economics Ulianitskaia O. V. (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR)

EFFICIENCY OF USING ALTERNATIVE ENERGY SOURCES IN METALLURGY

The complex analysis was made for technical and economic indices of using energy carriers in metallurgy and the importance of replacing their high-priced elements by alternative sources. There have been given the energy and economic indices of solid materials and gases used as a fuel.

Key words: high-priced elements of energy carriers, coke, alternative sources of energy resources, pulverized fuel, fossil gases.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**MECHANICAL ENGINEERING
AND MACHINE SCIENCE**

УДК 621.876.212

д.т.н. Корнеев С. В.,
к.т.н. Доброногова В. Ю.,
Захаров О. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

НАГРУЗКИ В ШАРНИРНОМ МЕХАНИЧЕСКОМ СОЕДИНЕНИИ ТИПА «ФЛЕКСКО» РЕЗИНОТКАНЕВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

Приводятся результаты компьютерного моделирования в программном комплексе ANSYS Workbench напряженно-деформированного состояния шарнирных механических стыков типа «Флекско» резинотканевых конвейерных лент при прохождении ими обводного барабана. Для типичных условий эксплуатации установлены коэффициенты концентрации напряжений и запасы прочности в элементах механического стыка.

Ключевые слова: конвейерная лента, шарнирное механическое соединение, моделирование, напряженно-деформированное состояние, концентратор напряжений, запас прочности.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Конвейерные ленты участков шахтных конвейеров, как правило, соединяются встык механическим способом: заклепками внахлестку, проволочными или П-образными скобами, а также пластинами в сочетании с болтами или заклепками. Наиболее совершенными являются заклепочные пластинчатые (Rivet Solid Plate) и болтовые пластинчатые (Bolt Solid Plate) соединения типа «Флекско» (рис. 1). В механических стыках равномерно распределенная нагрузка в ленте сосредотачивается в болтовых или заклепочных соединениях. Прочность ленты, ослабленной сквозными отверстиями под болт или заклепку, которые к тому же являются концентраторами напряжений, остается крайне низкой, причем механизм ее разрушения под нагрузкой изучен недостаточно. Вместе с тем в отраслевых стандартах обозначен нижний допустимый предел прочности механического стыка — 60 % от прочности целой ленты [1]. В работе [2] обосновывается компьютерная модель и получены некоторые результаты исследования напряженно-деформированного состояния механических стыков ленты на участках трассы, где она выполаживается. Аналогичная модель [3] разработана для исследования изогнутой на обводном бара-

бане резинотканевой конвейерной ленты с неразъемным механическим соединением. Изгибные нагрузки составляют 5 % от растягивающих нагрузок. Установлены расчетные коэффициенты концентрации напряжений и запасы прочности ленты в зоне стыка. Коэффициент концентрации ленты с неразъемным механическим соединением равен 1,3. Запасы прочности ленты в зоне стыка по основе составляют 6, а по утку, соответственно, 6,6, что не превышает нормативного запаса прочности [1]. Результаты исследования указывают на недостатки неразъемных соединений. В частности, при достаточно длинных соединительных пластинах вследствие перекоса болтов в отверстиях в ленте возникают дополнительные области напряжения, что снижает запас прочности стыка. С этой точки зрения, и не только, менее жесткой представляется конструкция разъемных (шарнирных) механических соединений, позволяющих снизить изгибные нагрузки на конвейерную ленту и пластины, увеличить запасы прочности. Однако в количественном плане поведение шарнирных стыков на приводных и различного рода обводных барабанах и их преимущества остаются недостаточно исследованными. Также очевидно, что есть необходимость в определении оптимального сочетания гео-

метрических параметров соединения, таких как диаметр болта (заклепки), шаг и схема (однорядная, двухрядная, шахматная и т. д.) установки соединительных элементов, при которых достигаются наибольшие прочность и долговечность стыка.

Целью работы является адаптация разработанного в работах [2, 3] метода компьютерного исследования с применением программного комплекса ANSYS Workbench напряженно-деформированного состояния механических соединений резиноканевых конвейерных лент для шарнирных соединений типа «Флекско» и установление коэффициентов концентрации напряжений и запасов прочности ленты в области стыка для случая прохождения им обводных барабанов.

Изложение материала и результатов исследования. В программном комплексе ANSYS Workbench разработана модель ленты с шарнирным механическим соединением (МС) на обводном барабане (рис. 2). В процессе моделирования к

концам ленты будет приложена изгибающая и растягивающая нагрузка, в результате которой лента изогнется вокруг обводного барабана.

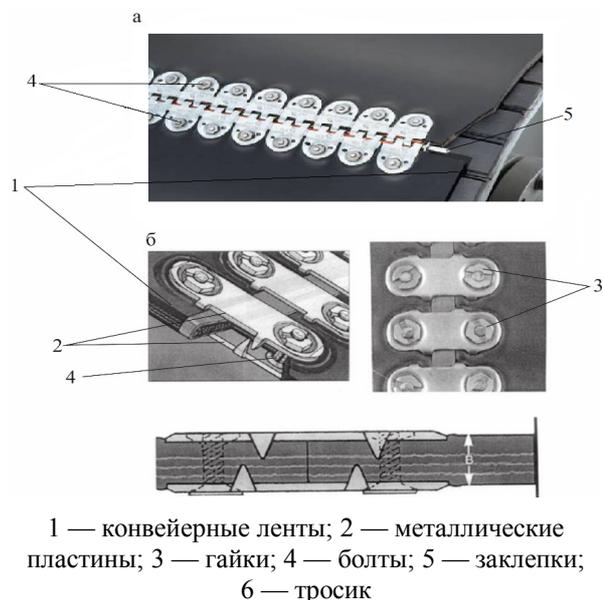


Рисунок 1 Конструкция разъемного (а) и неразъемного (б) механических соединений конвейерных лент типа «Флекско»

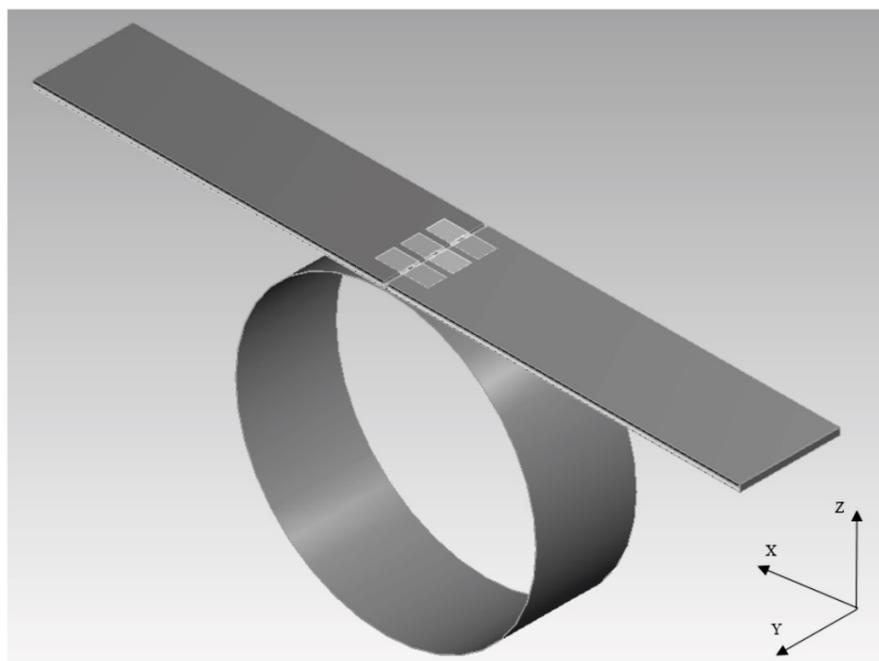


Рисунок 2 Геометрическая модель обводного барабана и ленты с шарнирным механическим соединением

При построении модели принимаются следующие положения:

1) резинотканевая лента — слоистая композиция из упругих ортотропных тканевых прокладок, изотропных резиновых прослоек и обкладок;

2) барабан и элементы механического соединения — абсолютно твердые тела;

3) с целью сокращения продолжительности компьютерного моделирования фрагмент стыка представляется в виде двух продольных отрезков ленты шириной 0,2 м, соединенных между собой тремя П-образными скобами и пропущенным через них металлическим тросиком;

4) на свободные концы ленты действует равномерно распределенная по ширине ленты изгибающая сила S , направленная вдоль оси конвейера.

В ANSYS Workbench приняты следующие допущения:

1) элементы системы «лента — барабан» моделируются объемными трехмерными конечными элементами (КЭ) в виде призм и тетраэдров;

2) между КЭ прокладок и КЭ окружающих их прослоек и обкладок осуществляется связь типа Bonded;

3) между поверхностями нижней обкладки и барабана, металлическими пластинами механического соединения и обкладками ленты, внутренней поверхностью пластин и тросом принимается контакт типа Frictional;

4) резиновые обкладки и прослойки ленты представляются в виде двухпараметрической модели Муни — Ривлина, которая обычно используется для описания гиперупругих материалов. Модель определяется материальными коэффициентами C_{10} и C_{01} в зависимости «напряжение — деформация». Значения коэффициентов, полученные расчетным путем на основании известных экспериментальных зависимостей «нагрузка — деформация»: $C_{10} = 0,66$ МПа, $C_{01} = 0,324$ МПа [4].

При моделировании принимаются следующие исходные данные: ширина отрезков

ленты EP800/4 — 0,2 м, число прокладок $n=4$, обкладочная резина класса А; изгибающее усилие, действующее на отрезок ленты вдоль оси конвейера на первом этапе нагружения, — 10 Н; растягивающее усилие S , прикладываемое к концам отрезка ленты по окончании изгиба, — 15 кН ($\approx 10\%$ от прочности отрезка ленты); параметры тканевой прокладки ленты: модули упругости по осям x , y и z : $E_x = 1,45 \cdot 10^8$ Па, $E_y = 6 \cdot 10^7$ Па, $E_z = 6 \cdot 10^7$ Па; модули сдвига по осям x , y и z : $G_x = 2,85 \cdot 10^8$ Па, $G_y = G_z = 1,14 \cdot 10^8$ Па; коэффициенты Пуассона: для тканевой прокладки по основе $\mu_{тo} = 0,275$ и по утку $\mu_{тy} = 0,135$, для резины — $\mu_p = 0,4$; прочность тканевых прокладок по основе $[\sigma]_x$ и по утку $[\sigma]_y$ равна соответственно 166,7 и 45,8 МПа; толщина тканевых прокладок $\delta_n = 1,2$ мм; толщина резиновых прослоек (сквиджей) $\delta_c = 0,5$ мм; диаметр барабана $D = 500$ мм.

Тип исследуемых шарнирных МС — Flexco Bolt Solid Plate. Диаметр стержней d и шаг их установки l принимаются равными соответственно 11 и 50 мм.

Моделирование проходит в два этапа: на первом этапе к концам ленты прикладывается изгибающая сила; на втором этапе по окончании изгиба к ленте прикладывается растягивающее усилие. Такой подход позволяет избежать значительной динамики процесса деформирования модели, получить данные отдельно при изгибе ленты и при ее изгибе с растяжением, а также установить соотношение между этими составляющими. В результате моделирования на каждом этапе определялись нормальные и касательные напряжения на площадках, нормальных к осям x , y и z локальной системы координат.

На рисунке 3 отражено положение ленты после первого этапа моделирования. На рисунке 4 показано распределение нормальных напряжений σ_x в прокладках ленты вокруг центрального отверстия, полученных при изгибе. В прокладках наблюдаются зоны растяжения ($\sigma_x > 0$) и сжатия ($\sigma_x < 0$). Наибольшему напряжению при изгибе подвер-

гается верхняя прокладка, наибольшие напряжения растяжения $\sigma_{x \text{ изг}}$ возникают на поверхности отверстия и достигают 0,79 МПа (в неразъемном МС это значение составляет 1,03 МПа). Нижняя прокладка в

свою очередь при изгибе ленты на обводном барабане подвергается сжатию. При давлении стержня на тканевые прокладки в них образуется зона сжатия, максимальное напряжение в этой зоне достигает $-0,54$ МПа.

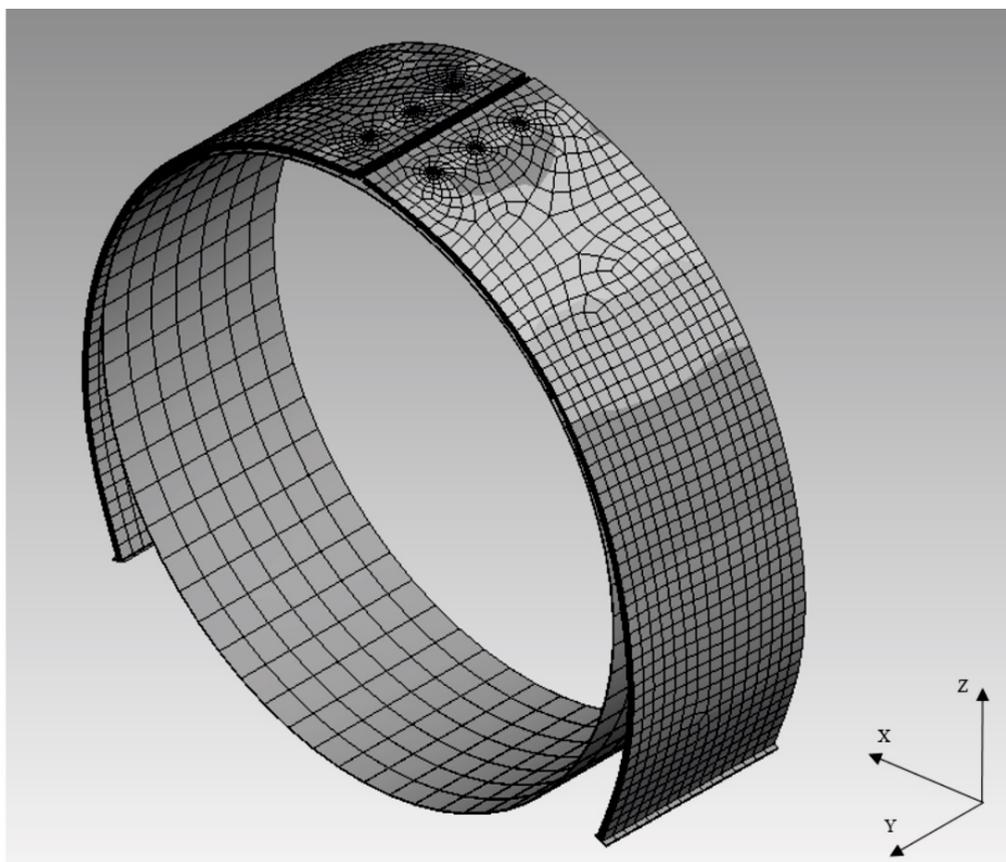


Рисунок 3 Положение ленты с разъемным (шарнирным) соединением, изогнутой на обводном барабане

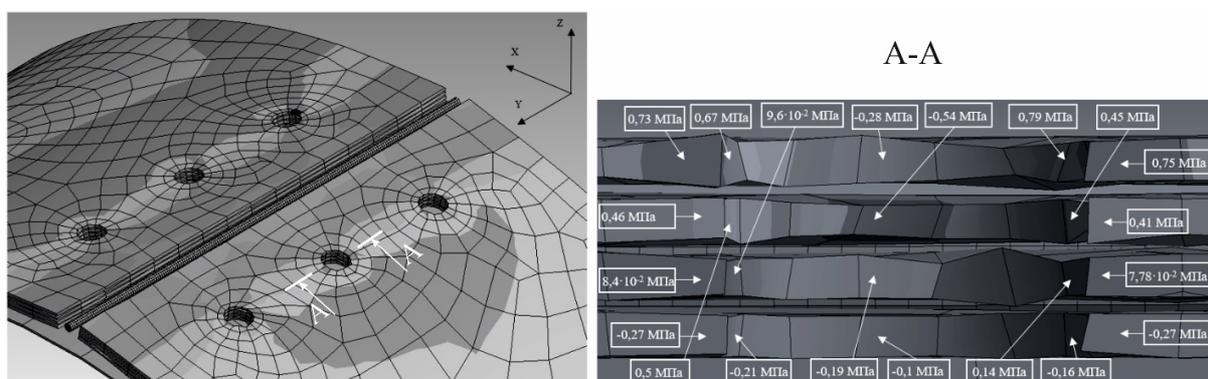


Рисунок 4 Распределение напряжений σ_x (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе на обводном барабане

На рисунке 5 отображена аналогичная картина распределения напряжений σ_y вокруг центрального отверстия. Максимальное значение напряжения $\sigma_{y \text{ изг}}$ в области растяжения составляет 0,15 МПа (в неразъемном МС, соответственно, 0,4 МПа). При чистом изгибе ленты на обводном барабане с использованием разъемного (шарнирного) соединения изгибные напряжения примерно в 1,5 раза меньше аналогичных напряжений, полученных при использовании П-образных неразъемных механических соединений [3]. Уменьшение изгибных напряжений объясняется тем, что конструкция разъемного МС с более короткими пластинами, соединенными шарнирами, позволяет существенно уменьшить перекосы болтов относительно оси отверстий в ленте.

На рисунках 6 и 7 показаны результаты второго этапа моделирования — растяжения изогнутой на обводном барабане ленты со стыком под воздействием приложенной к концам ленты и распределенной по ее ширине силы, равной 15 кН. Максимальные напряжения $\sigma_{x \text{ max}}$ (см. рис. 6), равные 21,36 МПа, наблюдаются на поверхности отверстия в верхней прокладке (в неразъемном МС, соответственно, 24,7 МПа).

Для определения наибольшего напряжения $\sigma_{x \text{ раст}}$ от растяжения по основе, при условии соблюдения принципа суперпозиции усилий, необходимо из максимального

суммарного напряжения $\sigma_{x \text{ max}}$, полученного на втором этапе нагружения, вычесть изгибные напряжения $\sigma_{x \text{ изг}}$, полученные на первом этапе моделирования

$$\sigma_{x \text{ раст}} = \sigma_{x \text{ max}} - \sigma_{x \text{ изг}}. \quad (1)$$

В рассматриваемом случае при $\sigma_{x \text{ max}} = 21,36$ МПа и $\sigma_{x \text{ изг}} = 0,75$ МПа получается $\sigma_{x \text{ раст}} = 20,61$ МПа.

Составляющая напряжения от изгиба ленты по основе составляет 3,5 % от суммарной нагрузки (изгиб с растяжением), что в данном случае позволяет пренебречь изгибными нагрузками по основе.

Коэффициент концентрации напряжений в верхней прокладке

$$k_x = \sigma_{x \text{ max}} / \sigma_{x \text{ p}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{x \text{ p}}$ — расчетное нормальное напряжение в сечении прокладки плоскостью yz , проходящей через оси отверстий.

Расчетное нормальное напряжение

$$\sigma_{x \text{ p}} = \frac{S}{\delta_{\text{п}} n (B - 3d)} + \sigma_{x \text{ изг}}. \quad (3)$$

где m — число болтов (заклепок) в рассматриваемом сечении ленты.

В данном случае $k_x = 1,1$.

Фактический коэффициент запаса прочности прокладки по основе

$$n_x = [\sigma]_x / k_x \sigma_{x \text{ p}} = 166,7 / 1,1 \cdot 19,7 = 7,6. \quad (4)$$

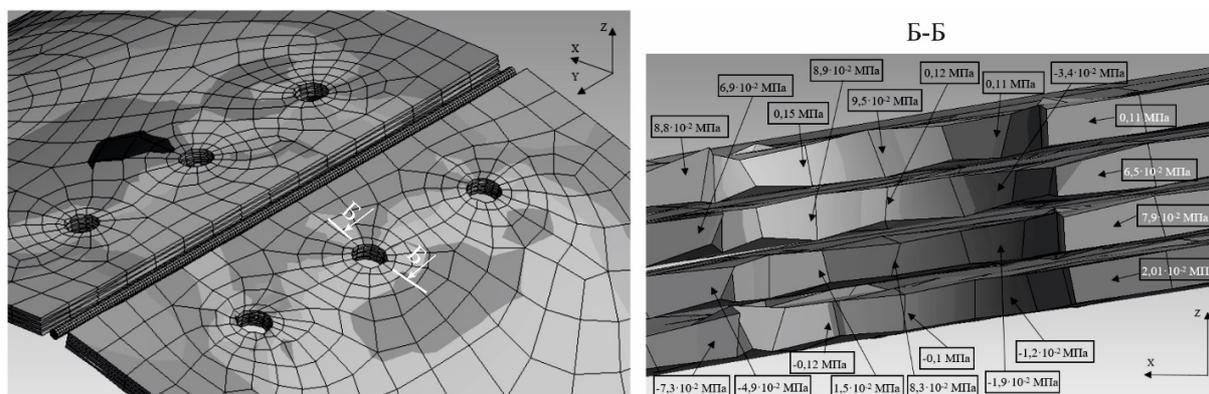


Рисунок 5 Распределение напряжений σ_y (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе на обводном барабане

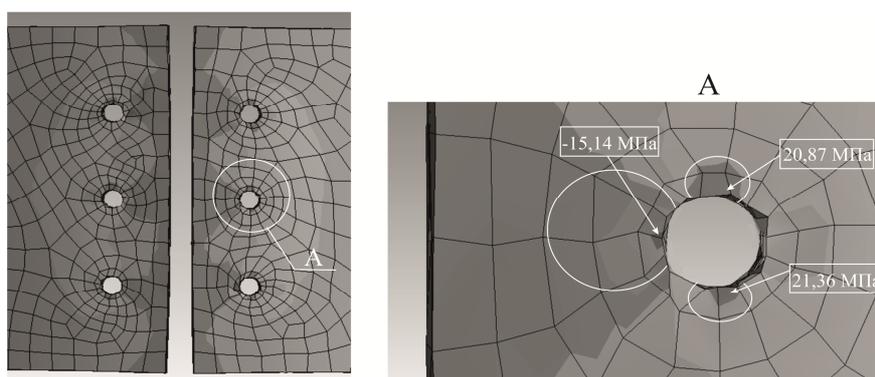


Рисунок 6 Распределение напряжений σ_x (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе и растягивающей нагрузке на обводном барабане

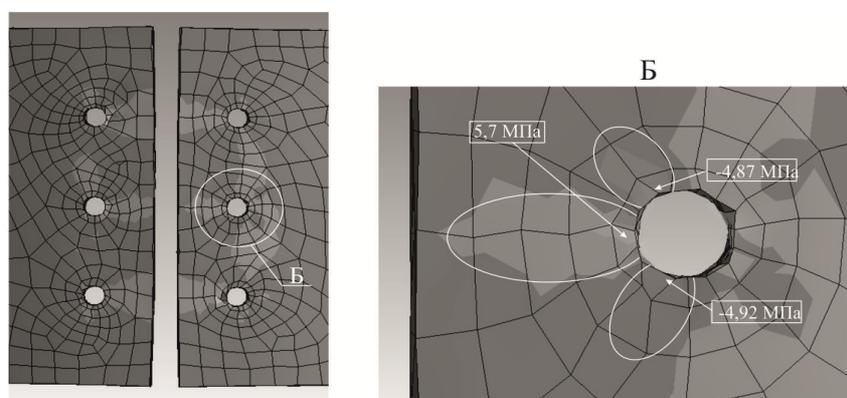


Рисунок 7 Распределение напряжений σ_y (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе и растягивающей нагрузке на обводном барабане

Полученный запас прочности по основе разъемного МС в 1,2 раза больше, чем в случае неразъемного МС ($n_x=6$) [3]. Запас прочности разъемного МС, впрочем, как и неразъемного, не превышает нормативного запаса прочности МС $n_{н-мс}$, который должен составлять не менее 60 % нормативного запаса прочности ленты n_n (обычно n_n равно 8...10), т. е. $n_{н-мс}=5...6$.

Напряжение от растяжения по утку определяется аналогичным образом

$$\sigma_{y \text{ раст}} = \sigma_{y \text{ max}} - \sigma_{y \text{ изг}} \quad (5)$$

$$\sigma_{y \text{ раст}} = 5,7 - 0,15 = 5,55 \text{ МПа.}$$

Составляющая напряжения от изгиба ленты по утку составляет 2,6 % от суммарной нагрузки (изгиб вместе с растяже-

нием), что также позволяет пренебречь изгибными нагрузками по утку.

Фактический коэффициент запаса прочности прокладки по утку

$$n_y = [\sigma]_y / \sigma_{y \text{ max}} = 45,8 / 5,7 = 8. \quad (6)$$

Выводы и направления дальнейших исследований. В типичных условиях эксплуатации изгибные напряжения по основе и по утку, полученные в случае применения шарнирных механических соединений типа «Флекско», составляют 3,5 % и 2,6 % от суммарной нагрузки при изгибе и растяжении, что в 1,5 раза меньше по сравнению с аналогичными напряжениями, полученными в случае неразъемных механических соединений. В случае шарнирного соединения напряжения при изгибе соизмеримы с погрешностями моде-

лирования, поэтому при расчетах напряженно-деформированного состояния элементов стыка ими можно пренебрегать.

Коэффициент концентрации напряжений по основе верхней прокладки конвейерной ленты, полученный при ее растяжении и изгибе на обводных барабанах, в случае применения болтовых шарнирных механических соединений типа «Флекско» составляет 1,1, что на 18 % меньше, чем в случае применения неразъемных соединений того же типа. Коэффициент запаса прочности верхней прокладки по основе в случае шарнирного механического соединения равен 7,6, тогда как в случае неразъ-

емного соединения — минимально допустимому значению 6. Таким образом, применение шарнирных механических соединений является предпочтительным не только с позиций технологичности процесса монтажа-демонтажа стыка, но и с точки зрения обеспечения необходимых запасов прочности.

В дальнейшем предполагается проведение аналогичных исследований напряженно-деформированного состояния в элементах механического соединения при прохождении им приводных барабанов и оптимизация геометрических параметров стыка для повышения запасов прочности его элементов.

Библиографический список

1. ДСТУ 10124183643.001–2003. Змикання та ремонт гумовотканевих конвеєрних стрічок рознімними з'єднувачами. Вимоги до технології виконання [Текст]. — Чинний від 2003-10-14. — Київ : Мінпаливенерго України, 2003. — 46 с.

2. Моделирование напряженно-деформированного состояния механических стыков конвейерных лент [Текст] / С. В. Корнеев, В. Ю. Доброногова, В. П. Долгих, О. В. Захаров // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — Вып. 54. — С. 101–109.

3. Моделирование с применением ANSYS Workbench напряженно-деформированного состояния резиноканевой конвейерной ленты с механическим стыком при изгибе на обводных барабанах [Текст] / С. В. Корнеев, В. Ю. Доброногова, В. П. Долгих, О. В. Захаров // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2020. — Вып. 61. — С. 101–109.

4. Корнеев, С. В. Коэффициенты модели Муни — Ривлина в пакете программ ANSYS Workbench, полученные для обкладочной резины шахтных конвейерных лент [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2014. — Вып. 42. — С. 45–49.

© Корнеев С. В.

© Доброногова В. Ю.

© Захаров О. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТИ Леоновым А. А., к.т.н., доц., зав. каф. ЭиТС СИПИМ ЛНУ им. В. Даля Петровым А. Г.

Статья поступила в редакцию 26.11.2020.

Doctor of Technical Sciences Korneev S. V., PhD in Engineering Dobronogova V. Yu., Zakharov O. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

LOADS IN “FLEXCO” TYPE SWIVEL MECHANICAL JOINT OF FABRIC-PLY CONVEYOR BELTS

There have been given the results of computer simulation in the ANSYS Workbench software of stress-strain state of “Flexco” type swivel mechanical joints of fabric-ply conveyor belts when they pass the bend pulley. For typical operating conditions, stress concentration factors and strength reserves in mechanical joint elements are established.

Key words: conveyor belt, swivel mechanical joint, modeling, stress-strain state, stress concentrator, strength margin.

УДК 621.774.3

д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ошовская Е. В.,
Ковалёва О. А.,
к.т.н. Ткачёв М. Ю.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ РЕЗА ТРУБЫ КЛИНОВЫМ НОЖОМ

Приведены методика и результаты экспериментальных исследований условий формирования очага деформации в зоне силового воздействия клинового ножа на трубу в начальной стадии процесса ее разделения на части, при которых исключается смятие торцевых поверхностей разрезаемого на ножницах полого профиля.

Ключевые слова: тонкостенная труба, клиновой нож, напряженно-деформированное состояние, сила резания, смятие, поперечное сечение.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Процесс поперечной резки тонкостенной трубы ножом, перемещающимся перпендикулярно ее продольной оси, включает три стадии: частичное смятие поверхности полого профиля, внедрение в его тело режущей кромки ножа и относительный сдвиг разделяемых элементов. При этом пластическая деформация поверхности трубы в зоне силового воздействия ножа развивается по-разному в зависимости от формы его режущей кромки [1, 2], наружного диаметра и толщины стенки, а также прочностных свойств материала разрезаемого металлического профиля [3, 4].

Постановка задачи. Целью данной работы является изучение условий формирования очага деформации в зоне реза тонкостенной трубы в начальной стадии процесса ее разделения на части клиновым ножом.

Изложение материала и его результаты. Результаты анализа данных, полученных в ходе специально проведенных экспериментов, свидетельствуют о необходимости использования схемы комбинированной резки тонкостенной трубы с предварительным ослаблением ее поперечного сечения в месте внедрения ножа. В про-

тивном случае, независимо от геометрической формы режущего инструмента, торцевая часть полого профиля будет в различной степени деформирована. Для сравнения на рисунке 1 приведены фотографии образцов тонкостенной трубы, разделенной на части при различных схемах резки.

Тонкостенная труба, представляющая собой замкнутую цилиндрическую оболочку, при полярно симметричном силовом воздействии ножа в начальный момент реза подвергается деформации, в результате которой ее верхняя выпуклая часть изгибается вдоль оси переменным моментом, вызываемым поперечной силой. В кольцевом направлении она испытывает растяжение или сжатие, а также чистый изгиб моментом, не зависящим от угловой координаты [5]. Поэтому полученная опытным путем информация о форме и размерах очага деформации, формирующегося в зоне реза тонкостенной трубы с момента касания ее поверхности клиновым ножом до начала внедрения его режущей части в тело полого профиля, послужит основой при теоретическом обосновании силовых параметров ножниц, конструируемых для применения как в потоке трубосварочного стана, так и в условиях заготовительных производств.

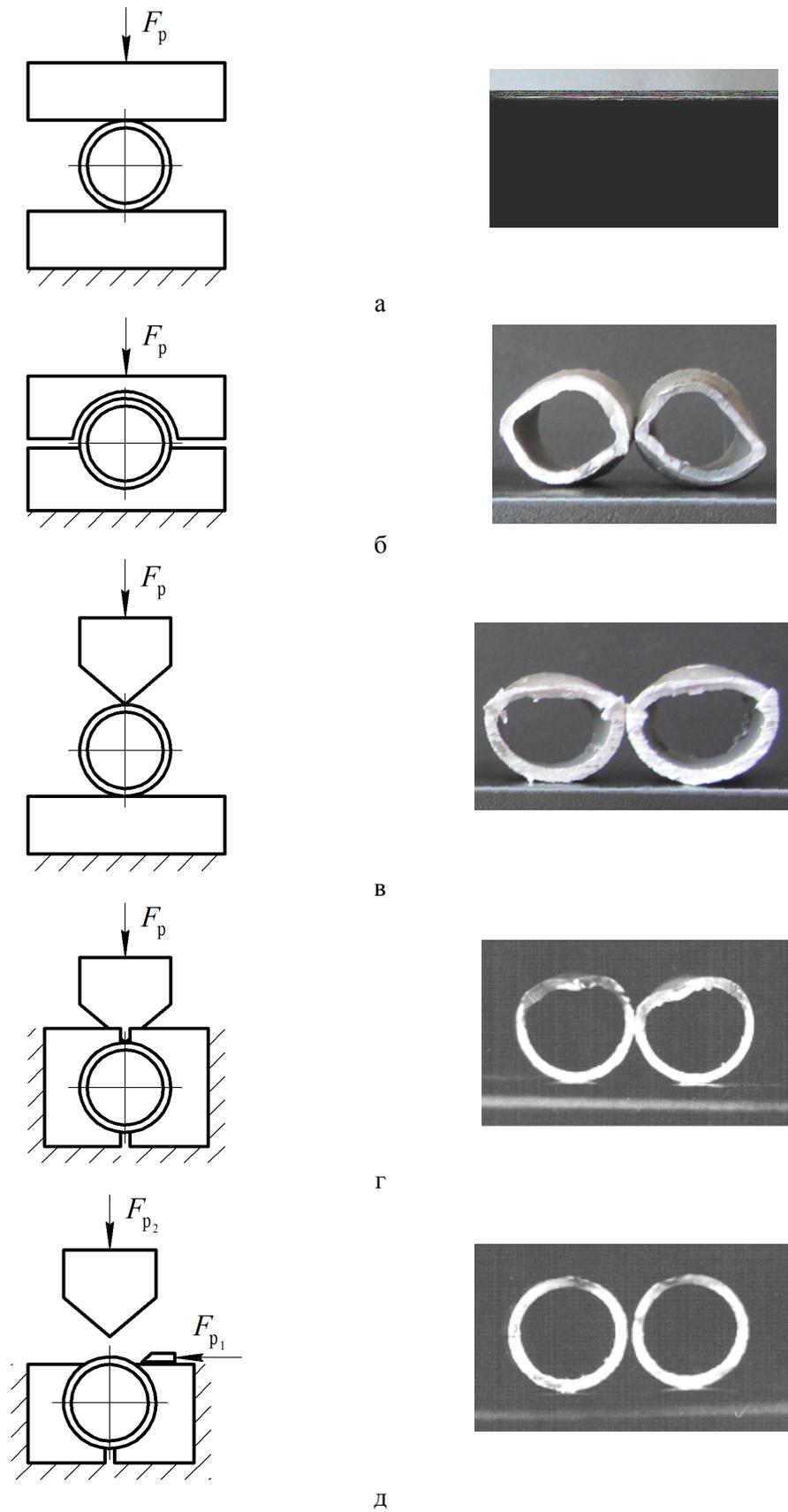


Рисунок 1 Состояние торцовых частей трубы при различных схемах разделения ее на части

Проведение экспериментальных исследований с целью получения целостной картины силового взаимодействия режущего инструмента с разделяемым на части тонкостенным полым профилем предполагает наличие специальных установок и контрольно-измерительной аппаратуры, позволяющих с требуемой точностью фиксировать значения технологических и силовых параметров процесса резки металлических труб.

Для получения опытным путем информации о форме и размерах очага деформации, формирующегося в зоне реза тонкостенной трубы с момента касания ее поверхности клиновым ножом, разработали и изготовили стенд, включающий силовой режущий блок и измерительную систему. Силовой режущий блок, конструкция которого показана на рисунке 2, включает опорную пластину 1, несущую рамку 15, посредством резьбового соединения связанную с нижними концами вертикальных стяжек 8 и 12. Верхние концы этих стяжек жестко соединены со специальной гайкой 10, имеющей трапецеидальную резьбу и находящуюся в зацеплении с нажимным

винтом 9. Между самими стяжками размещен с возможностью относительного перемещения в вертикальном направлении суппорт 5, удерживающий клиновым нож 13, под которым на несущей рамке 15 закреплена сменная разрезная втулка 14. На суппорте 5 соосно с клиновым ножом 13 установлена месдоза 6 с компенсирующей медной вставкой 7, имеющей в своей верхней торцевой поверхности углубление в виде полусферы. Такое же углубление имеется на нижнем торце нажимного винта 9, благодаря чему он посредством стального шарика 11 фиксирует соосное положение компенсирующей вставки 7 и обеспечивает равномерную передачу нагрузки на месдозу 6. К стяжке 8 посредством планки 3, имеющей возможность относительного перемещения и фиксации в нужном положении, прикреплен стрелочный индикатор 2, контактирующий своим подвижным стержнем 4 с консольной накладкой суппорта 5 и позволяющий при соответствующей настройке контролировать ход клинового ножа 13 относительно сменной разрезной втулки 14, а значит, и размещаемого внутри нее образца тонкостенной трубы.

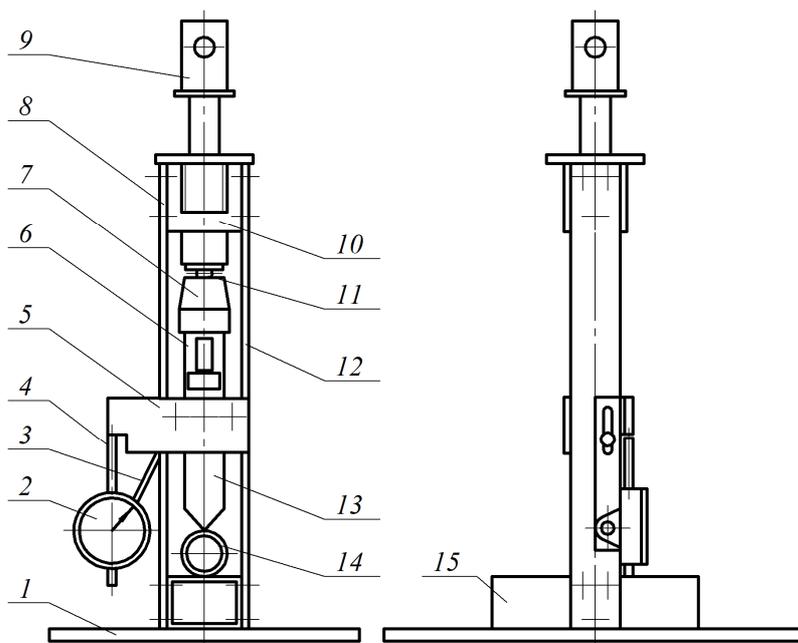


Рисунок 2 Конструкция силового режущего блока испытательного стенда

Контрольно-измерительная система, также входящая в состав испытательного стенда, предназначена для получения информации о силовом воздействии клинового ножа на тонкостенную трубу. Система содержит месдозу, экранированный кабель для ее электрической связи с усилителем переменного тока, а также показывающий прибор, отображающий значения фиксируемого аналогового сигнала.

Месдоза конструктивно выполнена в виде полого стального цилиндра, на наружной поверхности которого с помощью специального клея закреплены четыре фольговых тензодатчика, соединенные по мостовой схеме. Причем два из них размещены вдоль образующей цилиндра и являются рабочими, а два других — в кольцевом направлении, т. е. служат для температурной компенсации моста сопротивлений.

В качестве инструментария испытательного стенда подготовлен сменный комплект разрезных втулок для труб с разным наружным диаметром (фото на рис. 3). В теле каждой втулки выполнены два резьбовых отверстия, благодаря которым их последовательно можно с помощью винтов фиксировать на несущей рамке под клиновым ножом силового режущего блока, а также поперечно расположенная прорезь для входа клинового ножа.



Рисунок 3 Сменный комплект разрезных втулок для фиксации труб различного диаметра на несущей рамке режущего блока

В ходе проводимых исследований на испытательном стенде (фото на рис. 4) для каждого контрольного образца по показаниям индикатора фиксировали прогиб верхней выпуклой поверхности трубы, при котором начинается внедрение режущей кромки клинового ножа в ее тело, а также с помощью месдозы, подключенной к усилителю, отмечали соответствующее значение силы, необходимой для формирования в этом случае очага деформации [6]. Полученную информацию использовали для теоретического обоснования силовых параметров процесса реза труб клиновым ножом.

Как показали результаты экспериментов, очаг деформации в зоне воздействия клинового ножа на трубу силой P имеет форму, близкую к кругу с радиусом $R_{оч}$ (рис. 5). Разобьем этот круг на n равных секторов, угол которых составит $\frac{2\pi}{n}$. Длина каждого отрезка dx , на которые разбит периметр очага деформации тела трубы

$$dx = R_{оч} \frac{2\pi}{n} = \frac{6,28}{n} R_{оч}. \quad (1)$$

Нагрузка со стороны ножа на каждый из выделенных секторов

$$P_i = \frac{P}{n}. \quad (2)$$

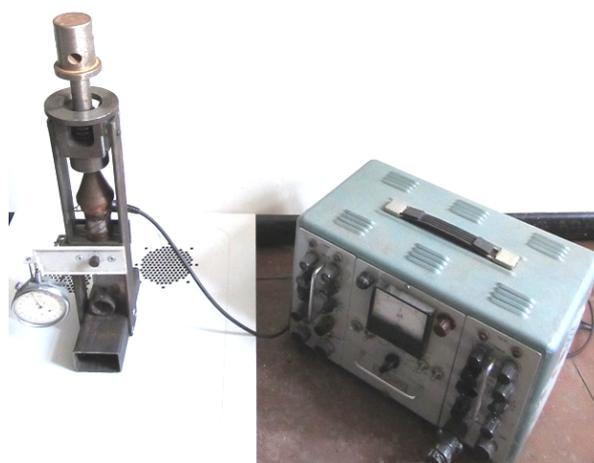


Рисунок 4 Испытательный стенд, подготовленный к проведению исследований

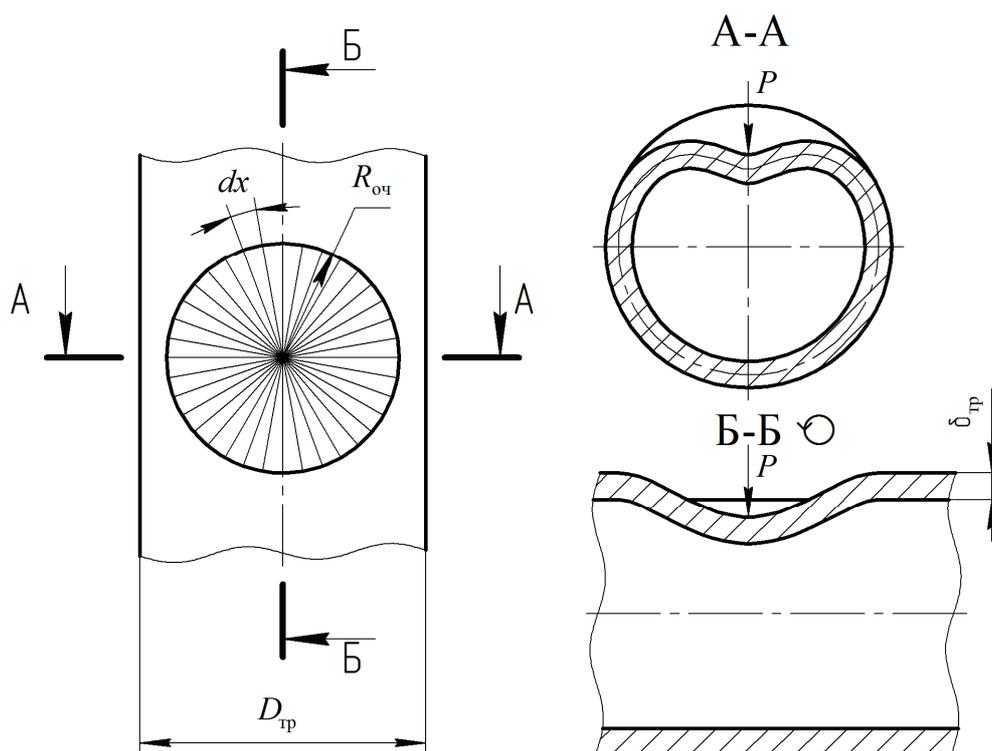


Рисунок 5 Форма очага деформации тонкостенной трубы в зоне силового воздействия клиновидного ножа

Каждый из секторов подвергается воздействию изгибающего момента

$$M_{из_i} = P_i R_{оч} = \frac{P}{n} R_{оч}. \quad (3)$$

Напряжения в теле трубы в каждом из выделенных секторов, вызванные изгибом, составят

$$\sigma_{из_i} = \frac{M_{из_i}}{W_i}, \quad (4)$$

где W_i — момент сопротивления сечения стенки трубы выделенного сектора.

$$W_i = \frac{dx \cdot \delta_{тр}^2}{6} = \frac{6,28 R_{оч} \delta_{тр}^2}{6n} = \frac{1,05 R_{оч} \delta_{тр}^2}{n}. \quad (5)$$

Тогда

$$\sigma_{из_i} = \frac{P R_{оч} n}{1,05 R_{оч} \delta_{тр}^2 n} = \frac{P}{1,05 \delta_{тр}^2}. \quad (6)$$

Напряжения сдвига при внедрении клиновидного ножа в тело трубы

$$\tau_{ср} = \frac{P}{F_{ср.т}}, \quad (7)$$

где $F_{ср.т}$ — суммарная площадь срезаемых слоев материала трубы.

Значение $F_{ср.т}$ в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рисунке 6

$$F_{ср.т} = F_1 + 2F_2, \quad (8)$$

где F_1 — площадь прямоугольника в плоскости сдвига $OCC'O'$;

F_2 — площадь треугольника в плоскостях сдвига OAB и $O'A'B'$.

Принимая конструктивно

$$\delta_n = k_n \delta_{тр}, \quad (9)$$

где k_n — коэффициент пропорциональности, равный 1...1,5,

$$F_1 = \delta_n \delta_{тр} = k_n \delta_{тр}^2. \quad (10)$$

Принимая угол $\alpha = 90^\circ$, в первом приближении

$$F_2 \approx 0,5\delta_{\text{тр}} \cdot 2\delta_{\text{тр}} \approx \delta_{\text{тр}}^2. \quad (11)$$

Тогда

$$F_{\text{ср.т}} = k_n \delta_{\text{тр}}^2 + 2\delta_{\text{тр}}^2 = (k_n + 2)\delta_{\text{тр}}^2. \quad (12)$$

Подставив полученное выражение в формулу (7), получим

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{P}{(k_n + 2)\delta_{\text{тр}}^2}. \quad (13)$$

Сопоставляя выражения (6) и (13), можно сделать заключение о том, что при одной и той же нагрузке со стороны ножа на трубу напряжения, вызываемые изгибом, минимум в три раза превышают значения напряжения сдвига. Поэтому при порезке тонкостенной трубы клиновым

ножом по одностадийной схеме неизбежна деформация торцевых частей разрезанного полого круглого профиля, так как внедрению ножа в тело трубы предшествует образование вогнутости ее поверхности. Для устранения смятия торцевой части трубы необходима двухстадийная ее резка, предполагающая предварительное ослабление стенки профиля в зоне силового воздействия на него клинового ножа. Уменьшения жесткости стенки трубы можно достичь путем выполнения на ее верхней выпуклой части лыски, как показано на рисунке 7.

При этом минимальную толщину стенки трубы в зоне реза следует назначать с учетом коэффициента ослабления поперечного сечения $K_{\text{о.с.}}$ разделяемого на части полого профиля.

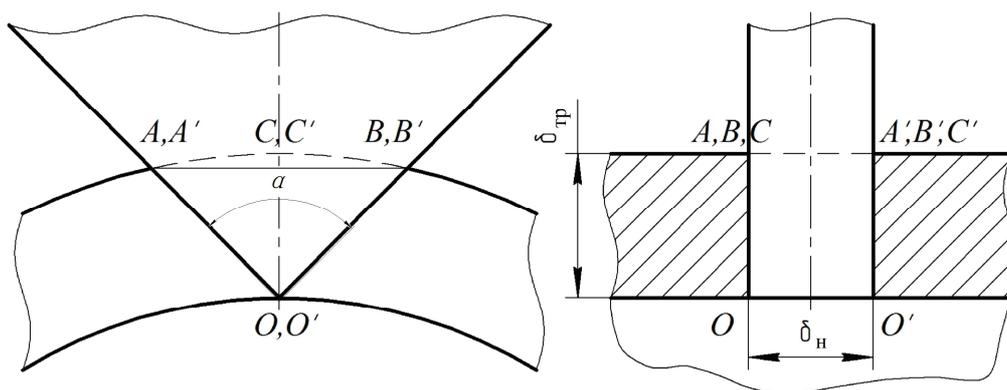


Рисунок 6 Расчетная схема для определения суммарной площади среза материала при внедрении клинового ножа в тело трубы

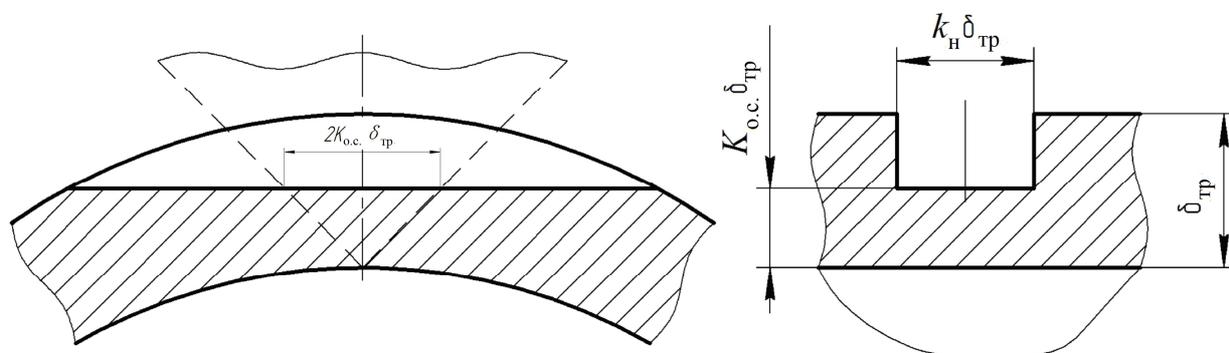


Рисунок 7 Расчетная схема для определения минимального значения коэффициента $K_{\text{о.с.}}$

Учитывая, что для материала трубы предельные напряжения при изгибе и сдвиге [7] составляют $\sigma_{из} = 0,6\sigma_B$ и $\tau_{ср} = 0,7\sigma_B$, минимальное значение коэффициента $K_{о.с.}$ можно определить исходя из условия равенства силы $P_{и}$, изгибающей перемычку, и силы $P_{ср}$, срезающей ее.

Изгибающий момент, действующий на перемычку

$$M_{и} = 0,5P_{и}K_{о.с.}\delta_{тр} = 0,6\sigma_B W.$$

Откуда

$$P_{и} = 1,2(\sigma_B W) / (K_{о.с.}\delta_{тр}).$$

Здесь W — момент сопротивления поперечного сечения перемычки

$$W = k_H \delta_{тр} (K_{о.с.}\delta_{тр})^2.$$

Тогда

$$P_{и} = (1,2\sigma_B k_H \delta_{тр} K_{о.с.}^2 \delta_{тр}^2) / (K_{о.с.}\delta_{тр}) = 1,2\sigma_B k_H K_{о.с.} \delta_{тр}^2.$$

Принимаем $k_H = 1,5$,

$$P_{и} = 1,8\sigma_B K_{о.с.} \delta_{тр}^2.$$

Сила сдвига

$$P_{ср} = \tau_{ср} F = 0,7\sigma_B F.$$

Суммарная площадь срезаемого сечения

$$F = 2(0,5 \cdot 2K_{о.с.}\delta_{тр}K_{о.с.}\delta_{тр}) + K_{о.с.}\delta_{тр}K_H\delta_{тр} = 2K_{о.с.}^2\delta_{тр}^2 + 1,5K_{о.с.}\delta_{тр}^2.$$

$$P_{ср} = 0,7\sigma_B (2K_{о.с.}^2\delta_{тр}^2 + 1,5K_{о.с.}\delta_{тр}^2).$$

При равенстве $P_{и}$ и $P_{ср}$

$$1,8\sigma_B K_{о.с.} \delta_{тр}^2 = 0,7\sigma_B (2K_{о.с.}^2\delta_{тр}^2 + 1,5K_{о.с.}\delta_{тр}^2).$$

После преобразования получим

$$1,4K_{о.с.}^2 - 0,75K_{о.с.} = 0.$$

Поскольку один из коэффициентов данного квадратного уравнения равен нулю, то

$$K_{о.с.} = \frac{0,75}{1,4} = 0,54.$$

Это значение коэффициента позволяет при заданной толщине стенки $\delta_{тр}$ предварительно рассчитать требуемую толщину срезаемого слоя $h_{ср}$, при которой гарантированно устраняется смятие торцевых частей трубы, разрезаемой на мерные длины клиновым ножом

$$h_{ср} = \delta_{тр} - K_{о.с.}\delta_{тр} = \delta_{тр}(1 - K_{о.с.}) = 0,46\delta_{тр}. \quad (17)$$

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований были использованы при расчете летучих ножниц, предназначенных для применения в потоке трубосварочного стана при порезке тонкостенных полых профилей на мерные длины [8], а также малогабаритных стационарных ножниц с механическим приводом, рекомендуемых к эксплуатации в условиях заготовительных производств машиностроительных предприятий [9].

Выводы и направление дальнейших исследований. Предложенная методика расчета параметров процесса поперечной резки на части тонкостенных труб клиновыми ножами пригодна для инженерных расчетов при проектировании новых эффективных ножниц, позволяющих исключить смятие торцевых частей производимой трубной продукции. Дальнейшие исследования следует продолжить с целью обеспечения качественной резки широкого сортамента полых профилей.

Библиографический список

1. Лыжников, Е. И. Технологические и силовые параметры резки труб плоским ножом [Текст] / Е. И. Лыжников, Е. К. Дунда // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. — 2013. — № 1. — С. 137–140.
2. Лыжников, Е. И. Особенности технологического процесса резки труб плоским ножом [Текст] / Е. И. Лыжников, Е. К. Давыденко // Обработка материалов давлением. — 2013. — № 2 (35). — С. 142–146.
3. Боровик, П. В. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей [Текст] / П. В. Боровик, П. А. Петров // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2013. — № 5. — С. 41–44.
4. Еронько, С. П. Теоретические и экспериментальные исследования силовых параметров процесса резки тонкостенных труб клиновыми ножами [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Вестник ДонНТУ. — 2016. — № 5. — С. 15–21.
5. Шевченко, Ф. Л. Механика упругих деформируемых систем. Ч. 2. Сложное напряженное состояние [Текст] / Ф. Л. Шевченко. — К. : ИСИО, 1998. — 240 с.
6. Лабораторный стенд для исследования начальной стадии процесса резания тонкостенных труб клиновым ножом [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса : сб. тр. 6-й Межд. науч.-практ. конф. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк : ДонНТУ, 2020. — С. 40–45.
7. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие [Текст] / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. — М. : Машиностроение, 1975. — 488 с.
8. Еронько, С. П. Разработка и экспериментальные исследования гидравлических летучих ножниц для резки тонкостенных труб [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев, О. А. Ковалева // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2019. — № 17 (60). — С. 89–97.
9. Механические ножницы для качественной резки тонкостенных труб на заготовки [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. — 2019. — Т. 17. — № 11. — С. 502–507.

© Еронько С. П.
 © Ошовская Е. В.
 © Ковалёва О. А.
 © Ткачёв М. Ю.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТИ Куберским С. В.,
 д.т.н, проф. каф. МОЗЧМ им. В. Я. Седуша ДонНТУ Сидоровым В. А.**

Статья поступила в редакцию 16.11.2020.

**Doctor of Technical Sciences Yeronko S. P., PhD in Engineering Oshovskaya Y. V.,
 Kovaleva O. A., PhD in Engineering Tkachov M. Yu. (DonNTU, Donetsk, DPR)
 STUDYING THE CONDITIONS OF DEFORMATION AREA FORMATION IN PIPE
 CUTTING ZONE WITH WEDGE KNIFE**

There have been given the method and results of experimental studies of conditions of deformation area formation in force impact zone of wedge knife on pipe in the initial stage of its separation into parts, at which collapsing of butt ends of hollow profile cut on shears is excluded.

Key words: thin-walled pipe, wedge knife, strain-stressed state, cutting force, collapsing, cross section.

УДК 669.02/.09:004.422.422:159.9.078

*к.т.н. Вишневский Д. А.,
Бондарь Н. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР),
д.т.н. Сотников А. Л.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*

ИСПЫТАНИЯ НОСИМОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Представлена методика мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами. Проведен эксперимент на действующем предприятии носимого устройства и программного продукта «Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами», который показал повышение безотказности машины непрерывного литья заготовок на 21,81 %.

Ключевые слова: *человеческий фактор, отказы машин, психофизиологическая активность, безотказность металлургического оборудования.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одним из важнейших элементов в машиностроительном и металлургическом производстве является надежность механического оборудования. Надежность является комплексным свойством, которое, в зависимости от назначения объекта и условий его применения, включает в себя безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность или определенные сочетания этих свойств.

По причинам возникновения отказы оборудования можно разделить на:

- отказы вследствие конструктивных дефектов;
- отказы вследствие технологических дефектов;
- отказы вследствие эксплуатационных дефектов;
- отказы вследствие постепенного старения (износа);
- отказы в результате влияния человеческого фактора (в том числе нарушения трудовой дисциплины и культуры производства).

Любой из этих видов отказов приводит к снижению ресурса работы, увеличению материальных затрат на изготовление и

эксплуатацию и ТОИР технологического оборудования.

Функционирование сложных систем, к которым относятся технологические линии и агрегаты, системы контроля, автоматизации и управления и т. д., без самого важного элемента — человека — невозможно. Общеизвестным фактом является большое влияние на безотказность оборудования человеческого фактора. Так, по разным источникам [1–3], от 30 до 45 % отказов технических систем напрямую или косвенно связано с человеческим фактором или с ошибками, которые совершает человек в процессе управления, обслуживания и эксплуатации технологических линий и агрегатов.

Если некоторых отказов на данный момент избежать нельзя, то снизить вероятность их появления в результате минимизации человеческого фактора, который представляет совокупность эмоциональных, интеллектуальных, мотивационных, физиологических, волевых и других качеств личности, обеспечивающих адекватное восприятие ситуации, выполнение предписанных функций в заданных режимах работы человека с другими людьми и техникой в процессе выполнения трудовых обязанностей, вполне возможно.

Международная организация труда считает убытки в 200 млрд долларов по причине человеческого отказа ежегодно [4]. В связи с вышесказанным качественный состав кадров предприятия должен стоять по важности на одном уровне с технической модернизацией производства.

Анализ причин аварий, выхода из строя оборудования и производственного травматизма на производстве показал, что в подавляющем большинстве нештатные ситуации происходят не из-за технических неисправностей, а из-за неудовлетворительной организации производства работ. Для управления данным процессом необходимо учитывать причины ошибок персонала, способы влияния на аварийные ситуации [5].

Постановка задачи. Один из возможных вариантов повышения безотказности металлургического оборудования — это снижение человеческих отказов.

В связи с этим сотрудниками кафедры «Машины металлургического комплекса» ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» было разработано носимое устройство и программный продукт «Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами» для контроля за психофизиологическим состоянием операторов металлургической отрасли, инициировано начало исследований психофизиологического состояния операторов металлургической отрасли.

Изложение материала и его результаты. Эксперимент проводился на одном из предприятий ЗАО «Внешторгсервис».

В эксперименте участвовали три оператора машин непрерывного литья заготовок. Участники эксперимента дали личное согласие на снятие и обработку показателей психофизиологического состояния. Эксперимент длился один календарный год.

Каждому из участников эксперимента были присвоены номера и выданы носимые устройства, которым присвоены аналогичные номера. Контроль вели при помощи программы «Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами» [6, 7].

За данный период под авторским наблюдением были выявлены следующие прецеденты, представленные в таблице 1.

Собрана статистика отказов машины непрерывного литья заготовок за 2018 год. Отказов — 133, простоев — 1032 часа.

В 2019 году носимое устройство тестировалось под авторским контролем, и при критических ситуациях программный продукт давал рекомендации.

Собрана статистика отказов машины непрерывного литья заготовок за 2019 год. Отказов — 88, простоев — 710 часов.

На рисунке 1 представлена гистограмма отказов МНЛЗ за 2018 год.

Из представленных гистограмм (рис 1, 2) видно, что количество отказов снизилось по каждому месяцу при сравнении двух годов. При проведении анализа в 2019 году первый и второй месяц года (рис. 2) не учитываем, так как МНЛЗ практически не работала. Сравнительный анализ начинаем с третьего месяца.

Таблица 1

Фиксация завышенных психофизиологических параметров тестируемых

№ п/п	Причины временного отстранения от выполняемой работы	Количество отстранений
1	Завышенный показатель КГР перед началом работы	5
2	Завышенный пульс во время работы	5
3	Повышенная температура перед работой	4
4	Завышенный показатель КГР во время работы	3
5	Завышенный пульс перед работой	3
6	Повышенная температура во время работы	3
Итого		23

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

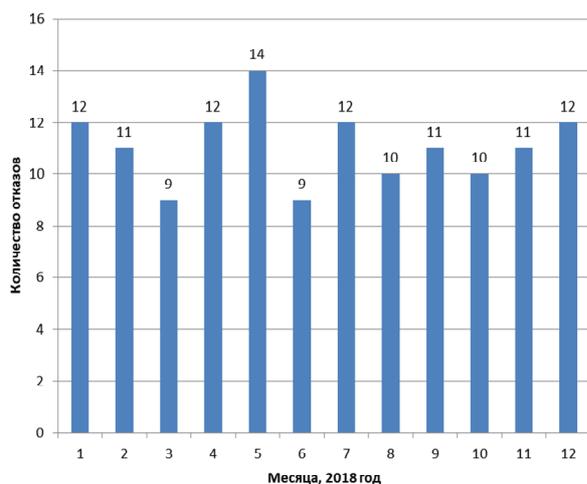


Рисунок 1 Количество отказов МНЛЗ до тестирования разработанной системы

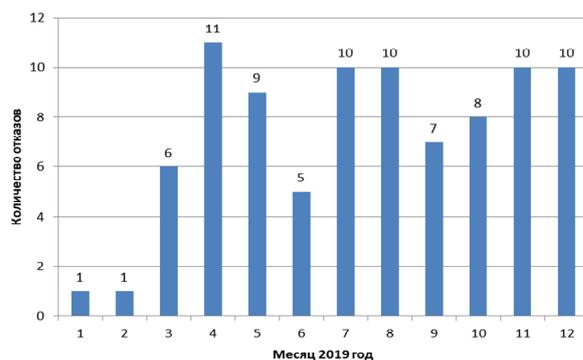


Рисунок 2 Количество отказов МНЛЗ в период тестирования разработанной системы

В 2018 году, за исключением первых двух месяцев, количество отказов МНЛЗ составило 110. В 2019 году, за исключением первых двух месяцев, количество отказов МНЛЗ — 86. Количество выпущенной продукции в 2018 году составило 1,2 млн тонн, в 2019 году — 1,3 млн тонн, что на 100000 т больше, чем в 2018 году. Это объясняется меньшим количеством простоев, которое сократилось на 322 часа (без учета первых двух месяцев как в 2018, так и 2019 году).

В 2019 году количество отказов снизилось на

$$N = 100 - \frac{86 \cdot 100}{110} = 21,81 \%$$

Использование данной системы дало положительный результат и повысило безотказность машины на 21,81 %.

Приведем два примера временного отстранения операторов от работы.

К необходимости временно отстранить испытуемого № 2 от работы привела завышенная частота сердечных сокращений (до 142 ударов в минуту).

На мониторе появились сообщение и данные о повышенном ЧСС испытуемого № 2 (рис. 3). На рисунках 4–6 представлены графики КГР, частоты сердечных сокращений и температуры испытуемого.

Дата	Время	КГР	Пuls	t тела	t окруж.	X	Y
19/11/2019	14:56:02	22.03	141	37.86	7.00	7 404	5 050
19/11/2019	14:55:52	22.00	140	37.79	7.00	7 404	5 050
19/11/2019	14:55:32	22.00	142	37.79	7.00	7 404	5 050
19/11/2019	14:55:02	22.08	140	37.87	7.00	7 404	5 050
19/11/2019	14:54:32	22.80	133	37.74	7.00	7 404	5 050
19/11/2019	14:54:02	22.80	130	37.62	7.00	7 404	5 050
19/11/2019	14:53:32	24.30	124	37.66	7.00	7 404	5 050
19/11/2019	14:53:02	26.30	122	37.64	7.00	7 404	5 050
19/11/2019	14:52:32	27.08	118	37.41	7.00	7 404	5 050
19/11/2019	14:52:02	29.40	115	37.37	7.00	7 404	5 050

Рисунок 3 Окно программы «Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами» с фиксацией скачка ЧСС испытуемого № 2

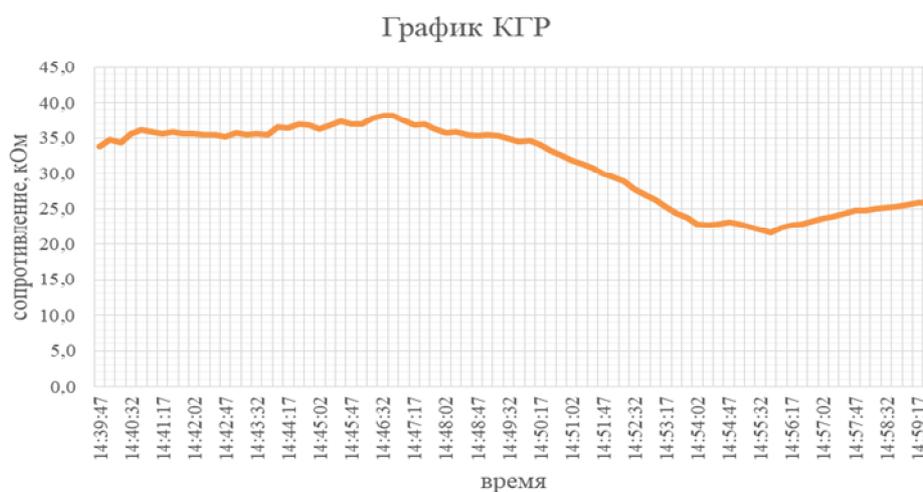


Рисунок 4 График КГР испытуемого № 2

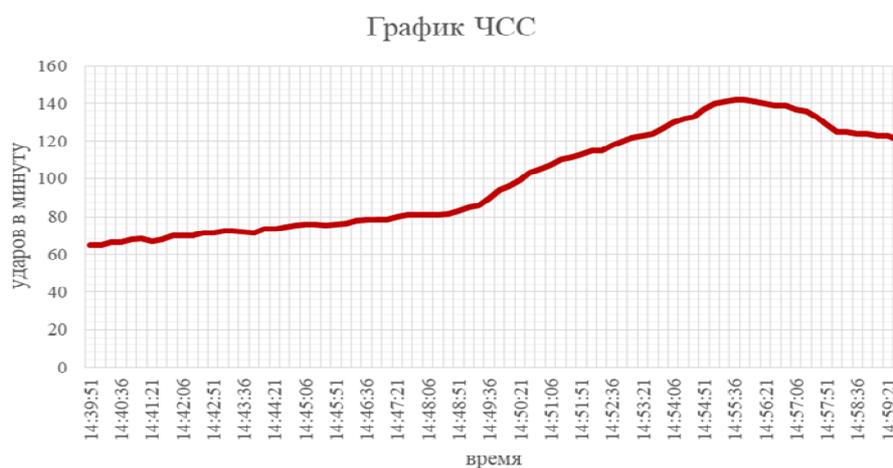


Рисунок 5 Частота сердечных сокращений испытуемого № 2



Рисунок 6 Температура испытуемого № 2

Испытуемого № 2 временно отстранили от работы, доставили к медперсоналу.

Данный эксперимент показал, что «Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами» снимает показания, обрабатывает и выдает сообщения оператору для принятия решений.

Согласно обработанной статистике отказов оборудования в момент проведения наблюдений за период 2019 года, количество отказов машины сократилось на 30 отказов.

Выводы. Разработанное устройство в комплексе с программным продуктом, внедряемое в производство, позволит:

- определить предсменное психофизиологическое состояние рабочего, тем самым сократить вероятность чрезвычайных ситуаций из-за человеческого фактора еще до того, как рабочий войдет в производственный процесс;

- отслеживать изменения психофизиологической активности сотрудника при рабочем процессе в режиме реального времени, принимая своевременные меры по противодействию негативным эффектам от влияния психофизиологических изменений у сотрудников предприятия;

- позволит выявить появление стресса у рабочих в результате нервного и эмоционального перенапряжения при выполнении своих производственных задач и принять меры по предупреждению его долгосрочных последствий и их влияния на эффективность труда;

- определять степень производственной усталости на различных стадиях ее развития у сотрудников предприятия, что обеспечит устранение развития утомления во времени, а также не допустит глубоких стадий утомления и переутомления у сотрудников;

- использовать устройство в комплексе с программным продуктом в качестве трекера производственной активности сотрудника при выполнении своих обязанностей в режиме реального времени;

- обеспечить косвенное наблюдение за рабочим с целью противодействия промышленному шпионажу, диверсиям и т. д.;

- выступать в виде средства своевременного оповещения персонала на основе реализации возможности обратной связи;

- повысить безотказность машины непрерывного литья заготовок.

Библиографический список

1. Либерман, А. Н. *Техногенная безопасность: человеческий фактор* [Текст] / А. Н. Либерман. — СПб. : ВИС, 2006. — 103 с.

2. Обознов, А. А. *Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики* [Текст]. Вып. № 6 / А. А. Обознов, А. Ю. Акимова, Р. В. Агузумынц. — К. : Институт психологии РАН, 2014. — 528 с.

3. Самсонкин, В. Н. *Моделирование в самоорганизующихся системах* [Текст] / В. Н. Самсонкин, В. А. Друзь, Е. С. Федорович. — Донецк : Заславский А. Ю., 2010. — 103 с.

4. *A fuzzy approach to the evaluation of human factors in ultrasonic nondestructive examinations* [Text] / Jesús Domech Moré, Ari Sauer Guimarães, Geraldo Bonorino Haxéo, Ricardo Tanscheit // *Journal of Industrial Engineering International*. — 2007. — P. 5.

5. Вишневский, Д. А. *Расчет надежности оборудования и производственного риска причинения вреда здоровью кузнеца-штамповщика* [Текст] / Д. А. Вишневский // *Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы : материалы V всероссийской научно-практической конференции* / Рубцов. индустр. ин-т (филиал) ФГБОУ ВПО «Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова». — Рубцовск, 2015. — С. 103–111.

6. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами* / Д. А. Вишневский, А. П. Жильцов, В. А. Козачишин и др. —

№ 2019616921 Российская Федерация ; заявка № 2019615644 ; дата поступления 20 мая 2019 г. ; дата регистрации 30 мая 2019 г.

7. Вишневский, Д. А. Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами [Текст] / Д. А. Вишневский, Б. А. Сахаров, Н. А. Бондарь // Инновационные перспективы Донбасса : материалы 5-й международной научно-практической конференции. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк : ДонНТУ, 2019. — С. 143–146.

© Вишневский Д. А.

© Бондарь Н. А.

© Сотников А. Л.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. ТМиИК ЛГУ им. В. Даля Витренко В. А.

Статья поступила в редакцию 02.10.2020.

PhD in Engineering Vishnevskiy D. A., Bondar N. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR), Doctor of Technical Sciences Sotnikov A. L. (DonNTU, Donetsk, DPR)

WEARABLE DEVICE TESTING FOR DETERMINING PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE OF METALLURGICAL INDUSTRY OPERATOR

Method of monitoring psychophysiological state of metallurgical industry operator by software is presented. An experiment was conducted at the operating enterprise of the wearable device and software product “System for monitoring the psychophysiological state of metallurgical industry operator with software”, showed an increase in reliability of the continuous casting machine by 21,81 %.

Key words: *human factor, machine failures, psychophysiological activity, failure-free metallurgical equipment.*

УДК 669.14

*д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ткачёв М. Ю.,
Пономарёва Е. А.,
Цыхмистро Е. С.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЫЧКИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ НА ВХОДЕ В КАНАЛ КОВШОВОГО ЗАТВОРА

Предложена математическая модель реализации режима нагружения перемычки сферической формы, образующейся на поверхности стартовой смеси, которой заполнен канал огнеупорного стакана в сталеразливочном ковше. Корректность предложенной модели проверена в экспериментальных условиях при помощи лабораторного стенда для испытания прочностных характеристик элементов, имитирующих перемычку. Полученная информация может быть использована как научная база для проектирования устройств, обеспечивающих гарантированное начало разливки из ковшей, которые оборудованы шибберными системами.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, шибберный затвор, стакан-коллектор, стартовая смесь, перемычка, разливка стали.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Использование шибберных затворов для регулируемого слива жидкой стали из разливочного ковша, как известно, предполагает во время его подготовки к приему металла очередной плавки заполнение канала ковшового стакана так называемой стартовой смесью — мелкодисперсным материалом, который не должен спекаться при температуре 1600...1650 °С, смачиваться расплавом и уплотняться под действием ферростатического давления [1]. Благодаря указанным свойствам данная смесь при первом открытии шибберного затвора в момент совмещения отверстий его огнеупорных плит должна высыпаться из сталевыпускного канала ковша для начала беспрепятственного истечения жидкого металла. Однако на практике по ряду причин не удается достичь 100%-ой вероятности начала разливки в штатном режиме из-за наличия над входным отверстием канала ковшового стакана перемычки, образующейся из слоев спекшейся смеси или затвердевшей стали и способной выдерживать действующую на нее силу тяжести столба расплава высотой до 5 м.

В этом случае прибегают к прожиганию перемычки кислородом, подаваемым по изогнутой металлической трубке, вводимой снизу через канал стакана-коллектора. Использование с этой целью кислорода влечет за собой нарушение целостности поверхности стенок выпускного канала и образование значительного количества оксидных включений, что в конечном итоге способствует ухудшению условий организации струи, истекающей из ковша стали, и загрязнению ее нежелательными примесями. Поэтому одним из направлений исследований, связанных с повышением эффективности функционирования шибберных затворов разливочных и литейных ковшей, является поиск новых технологических решений, которые позволили бы избежать появления твердой корочки в верхнем слое стартовой смеси, находящейся в канале разливочного стакана, или минимизировать дополнительные издержки, обусловленные применением специальных устройств и приспособлений, разрушающих имеющуюся перемычку одновременно с открыванием ковшового затвора [2].

Постановка задачи. Результаты анализа информации, опубликованной за последнее десятилетие в технической литературе, а также описаний изобретений, запатентованных в ряде промышленно развитых стран [3–7], позволили выявить три основных пути обеспечения начала разлива стали без промывания кислородом канала сталеразливочного ковша:

- за счет подбора новых составов стартовых смесей с ингредиентами, препятствующими их спеканию при контакте с жидкой сталью;

- благодаря формированию с помощью специальных приспособлений на свободной поверхности сыпучего материала в зоне размещения разливочного узла ковша лунок или углублений, профиль которых обеспечивает снижение несущей способности образующейся перемычки;

- посредством размещения в канале стакана-коллектора специальных пружинных катапульт, срабатывающих после полного открывания затвора и выталкивающих вверх металлические стержни, оказывающие динамическое силовое воздействие на образовавшуюся перемычку.

Существенное многообразие предлагаемых решений отмеченной проблемы можно объяснить отсутствием информации о реальных условиях протекания гидродинамических, тепловых и других процессов в зоне расположения огнеупорного гнездового блока разливочной системы ковша. В связи с этим при разработке мероприятий, призванных обеспечить беспрепятственное истечение жидкой стали после высыпания из канала затвора стартовой смеси, исследователи исходили из гипотетических предположений о прочности перемычки. Это связано с отсутствием по известным причинам возможности визуального наблюдения за поведением верхнего слоя сыпучего материала, подвергающегося воздействию падающей с высоты нескольких метров струи металла, из-за чего нельзя установить истинные форму и размеры образовавшейся короч-

ки, а также картину ее разрушения на отдельные фрагменты в случае наносимого снизу удара металлическим элементом, выбрасываемым вверх вдоль канала ковшового стакана пружинной катапульты. Кроме того, части разбиваемой перемычки уносятся потоком металла, т. е. не могут быть отобранными для последующего контроля толщины образовавшегося твердого слоя и его прочностных характеристик. Данные обстоятельства побуждают к комплексному использованию методов математического и физического моделирования для качественной и количественной оценок значения параметров исследуемого процесса.

Изложение материала и его результаты. При разработке математической модели исходили из того, что перемычка, образующаяся над входным отверстием канала ковшового стакана, представляет собой в первом приближении осесимметричную оболочку в виде полусферы (рис. 1). Нагрузкой на нее является равномерно распределенное давление жидкой стали, нормальное к поверхности. При этом толщина оболочки δ настолько мала, что она не может воспринимать изгибающие напряжения и практически не работает на сжатие из-за потери устойчивости. В этом случае в теле корочки могут возникать только растягивающие напряжения в кольцевом σ_t и меридиональном σ_m направлениях [8].

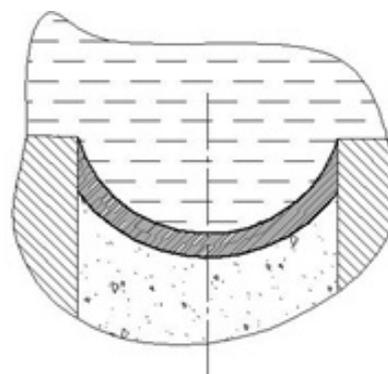


Рисунок 1 Форма образующейся перемычки на входе в сталевыпускной канал ковша

Рассмотрим находящийся в равновесии малый элемент оболочки, вырезанный бесконечно близкими меридиональными и кольцевыми сечениями. На данный элемент (рис. 2) действуют растягивающие силы в кольцевом направлении

$$F_t = \sigma_t \delta R_m d\varphi,$$

в меридиональном направлении

$$F_m = \sigma_m \delta R_t d\beta,$$

а также нормальная сила

$$F_n = PR_m d\varphi R_t d\beta.$$

Проецируя отмеченные силы на нормаль к выделенную элементу, получим

$$-PR_m d\varphi R_t d\beta = 0.$$

Так как оболочка имеет форму полусферы с радиусом R_c , принимаем

$$R_m = R_t = R_c.$$

Тогда

$$2\sigma_t \delta R_c d\varphi \cdot \sin \frac{d\beta}{2} + 2\sigma_m \delta R_c d\beta \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} = PR_c^2 d\varphi d\beta.$$

Заменяя синусы углами, получим

$$2\sigma_t \delta R_c d\varphi d\beta + 2\sigma_m \delta R_c d\beta d\varphi = PR_c^2 d\varphi d\beta$$

или

$$\frac{\sigma_t}{R_c} + \frac{\sigma_m}{R_c} = \frac{P}{\delta}.$$

Для сферы $\sigma_t = \sigma_m = \sigma$, поэтому

$$\frac{\sigma}{R_c} + \frac{\sigma}{R_c} = \frac{P}{\delta}$$

или

$$\sigma = \frac{PR_c}{2\delta}. \quad (1)$$

Здесь P — статическое давление жидкой стали в разливочном ковше в зоне размещения его стакана

$$P = \rho_c g H_c,$$

где ρ_c — плотность жидкой стали, равная 7000 кг/м^3 ;

g — ускорение силы тяжести, $9,8 \text{ м/с}^2$;

H_c — высота столба жидкого металла над ковшовым стаканом, м.

Задаваясь значениями σ для стали при температуре начала ее кристаллизации, а также ферростатического давления P и радиуса канала ковшового стакана R_c , по формуле (1) рассчитали минимальные толщины перемычек, при которых начало разливки не может пройти в штатном режиме (данные табл. 1).

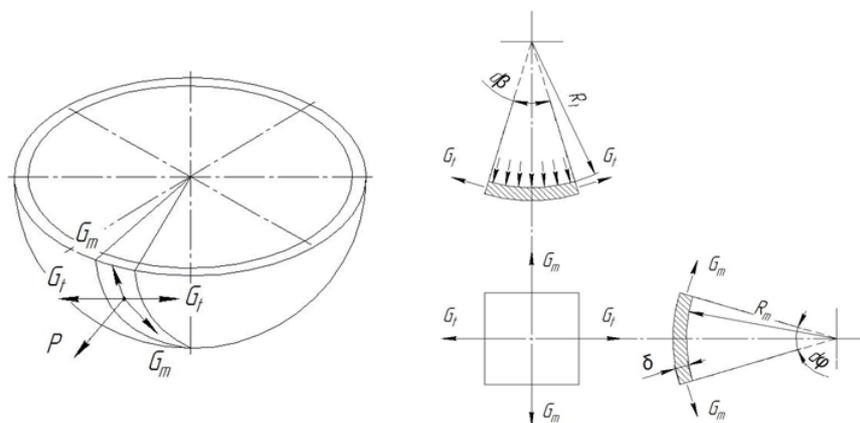


Рисунок 2 Схема для определения напряжений в теле оболочки

Таблица 1

Расчетные значения минимальной толщины корочки, выдерживающей давление столба стали при открытии затвора сталеразливочного ковша

Вместимость ковша, т	Высота столба металла в ковше, м	Ферростатическое давление, МПа	Радиус канала ковшового стакана, мм	Толщина перемычки на входе в канал ковшового стакана при различной прочности ее материала, мм		
				$\sigma=20$ МПа	$\sigma=30$ МПа	$\sigma=40$ МПа
100	3,0	0,21	25	0,13	0,09	0,07
150	3,5	0,25	30	0,19	0,13	0,09
200	4,0	0,29	35	0,25	0,17	0,13
250	4,5	0,32	40	0,32	0,21	0,16
300	5,0	0,36	45	0,41	0,27	0,20

Экспериментальную проверку корректности результатов расчета провели с использованием ранее предложенной методики, подробно описанной в работе [9]. Для решения поставленной задачи спроектировали и изготовили лабораторный стенд, схематично показанный на рисунке 3. Он включает опорную рамку 1 с вертикально установленным на ней огнеупорным разливочным стаканом 10. На верхнюю торцевую поверхность этого стакана опирается цилиндрический кессон 4, прижимаемый к стакану крышкой 6, имеющей форму диска, и посредством четырех шпилек 2 с гайками 5, связанной с опорной рамкой 1. В полости кессона над входным отверстием канала разливочного стакана на его верхней торцевой поверхности с обеспечением герметичности можно уста-

навливать имитаторы перемычки 3, имеющие различную форму и толщину. В центральное резьбовое отверстие крышки 6 вкручен тройник для подключения манометра 7 и трубки 8, подающей в полость кессона воздух от компрессора 9.

В качестве материала для изготовления имитаторов перемычки было решено использовать свинец, который в твердом состоянии обладает такими же реологическими свойствами, как и сталь сразу же после образования кристаллической структуры, т. е. при температуре ниже равновесной [10], что соответствует условиям появления твердой металлической перемычки над поверхностным слоем стартовой смеси во время заполнения жидким металлом разливочного ковша.

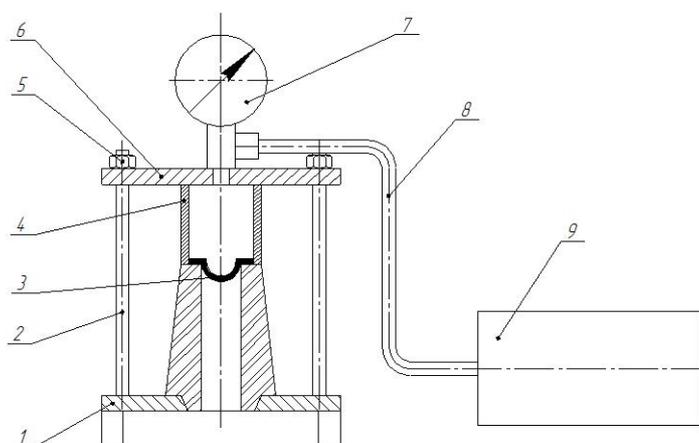


Рисунок 3 Схема лабораторного стенда

Форма, наружный диаметр и толщина имитаторов перемычек должны выбираться с учетом того, что комбинации указанных геометрических характеристик в реальных условиях могут быть различными из-за действия таких факторов, как вместимость разливочного ковша, температура и скорость циркуляции жидкой стали в зоне расположения его выпускного канала. Поэтому методом литья изготовлен комплект свинцовых перемычек вогнутой формы (рис. 4) с толщиной стенок сферических частей 0,5, 1 и 1,5 мм для стаканов с диаметром канала 60, 70 и 80 мм. Пробные опыты на изготовленном стенде (рис. 5) провели по следующей методике.

На верхнюю торцевую часть разливочного стакана наносили тонкий слой специального пластического материала, обеспечивающего герметичное прилегание к ней размещаемого сверху имитатора перемычки. После этого на стакан устанавливали кессон, который прижимали к огнеупору посредством трех шпилек, затягивая на их верхних резьбовых концах гайки. Затем, подключив к тройнику связанный с компрессором гибкий шланг, предварительно проверяли собранную систему на герметичность. Для этого осуществляли пробный пуск компрессора и после создания в кессоне избыточного давления воздуха порядка 0,01 МПа выключали его. Неподвижное состояние стрелки манометра свидетельствовало о наличии герметичности, в противном случае по слышимому характерному свисту воздуха устанавливали место его выхода из кессона в окружающее пространство и устраняли обнаруженную неплотность. Затем повторно запускали компрессор и фиксировали по положению стрелки манометра значение давления, при достижении которого она резко возвращалась в исходное (начальное) положение, что свидетельствовало о разрушении имитатора перемычки.

По окончании каждого опыта стенд разбирали для извлечения испытанного образца и изучения характера его разру-

шения. В качестве примера на рисунке 6 показана вогнутая перемычка диаметром 80 мм с остаточными повреждениями, наступившими при воздействии на нее избыточного давления, соответствующего условиям начала разлива стали из 250-тонного ковша.



Рисунок 4 Внешний вид свинцовой перемычки



Рисунок 5 Подготовленный к проведению эксперимента лабораторный стенд



Рисунок 6 Характер разрушения свинцового имитатора перемычки толщиной 0,5 мм под действием избыточного давления, эквивалентного давлению столба жидкой стали высотой 5 м

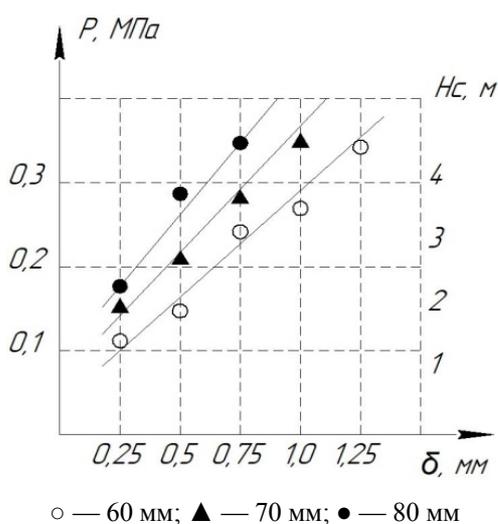


Рисунок 7 Зависимость давления, вызывающего разрушение свинцовой перемычки, от ее толщины при различном диаметре канала ковшового стакана

После завершения всего запланированного комплекса лабораторных опытов при различных возможных комбинациях диаметров каналов ковшовых стаканов и гео-

метрических параметров имитаторов перемычек в результате обработки полученных данных построили графики зависимостей (рис. 7), позволяющих установить для конкретных условий разливки значение толщины образующейся металлической корки, при которой потребуется ее разрушение внешним силовым воздействием.

Выводы и направление дальнейших исследований. Полученные расчетные и экспериментальные данные о прочностных характеристиках имитатора корки, образующейся на входе в сталевыпускной канал разливочного ковша во время слива в него жидкого металла из печи или кислородного конвертера, послужат в качестве исходной информации при проектировании специальных устройств, обеспечивающих возможность начала разливки в штатном режиме при первом открывании ковшового шиберного затвора.

Библиографический список

1. Пилюшенко, В. Л. Бесстопорная разливка стали [Текст] / В. Л. Пилюшенко, С. П. Еронько, В. Н. Шестопалов. — К. : Техніка, 1991. — 179 с.
2. Еронько, С. П. Разливка стали: Оборудование. Технология [Текст] / С. П. Еронько, С. В. Быковских. — К. : Техніка, 2003. — 216 с.
3. Земляной, К. Г. Стартовые смеси нового поколения [Текст] / К. Г. Земляной, А. А. Куровский // Новые огнеупоры. — 2008. — № 1. — С. 23–24.
4. Thermal insulating materials for sliding gate valves of ladles and tundishes [Text] / S. A. Suvorov [et al.] // Металлург. — 2001. — № 3. — С. 44–45.
5. Brevet 2467651 (7926505) France, IPC B23K7/00, B22D41/10. Dispositif pour déboucher l'orifice de coulée d'un récipient métallurgique [Texte] / J. Ch. Daussan, G. Daussan, A. Daussan. — Date de dépôt 25.10.1979 ; publié 30.04.1981, Bul. № 18.
6. Pat. 5167902 USA, IPC B22D41/22. Device for piercing an obstruction in a well-block opening of a ladle for transporting molten steel [Text] / W. A. McCray, M. D. Cope, T. J. Connors, A. Cszaszar. — Filed 19.07.1991 ; published 01.12.1992.
7. Pat. 102005010842 Bundesrepublik Deutschland, IPC B22D41/46, B22D41/44. Katapult zum Öffnen des Kanals einer Stahlgießpfanne [Text] / B. D. Jacob. — Anmeldetag 07.03.2005 ; offenlegungstag 14.09.2006.
8. Шевченко, Ф. Л. Механика упругих деформируемых систем [Текст] Ч. 1. Напряженно-деформированное состояние стержней / Ф. Л. Шевченко. — К. : ИСИО, 1993. — 280 с.
9. Стенд для прочностных испытаний имитаторов перемычек, блокирующих выпускной канал ковша в начале разливки [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса : сб. тр. 5-й Межд. научн-практ. конф. в 6 томах. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — 2019. — С. 40–47.

10. Выдрин, В. Н. О реологических свойствах стали и свинца [Текст] / В. Н. Выдрин, Л. М. Агеев // Известия Академии наук СССР. Металлургия. — 1967. — № 2. — С. 104–106.

© Еронько С. П.
© Ткачёв М. Ю.
© Пономарёва Е. А.
© Цыхмистро Е. С.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТИ Куберским С. В.,
д.т.н, проф. каф. ОПМ ДонНТУ Ченцовым Н. А.*

Статья поступила в редакцию 16.11.2020.

**Doctor of Technical Sciences Yeronko S. P., PhD in Engineering Tkachyov M. Yu.,
Ponomaryova Ye. A., Tsykhmistro Ye. S. (DonNTU, Donetsk, DPR)**

**THEORETICAL AND MODEL EXAMINATION OF STRENGTH PARAMETERS OF
JUMPER BAR FORMED AT ENTRANCE TO A LADLE GATE CHANNEL**

A mathematical model of implementing the loading mode of ball shaped jumper bar formed on the surface of filler sand that fill nozzle channel in pouring ladle, is proposed. The accuracy of the proposed model was verified in experimental conditions using a laboratory bench for testing the strength characteristics of elements that simulate a jumper bar. The obtained information can be used as a scientific basis for designing devices that ensure the guaranteed beginning of casting from ladles fitted with slide systems.

Key words: casting ladle, slide gate, nozzle-collector, filler sand, jumper bar, steel teeming.

УДК 621(3.016+926.323)

к.т.н., доц. Власенко Д. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ВАЛКОВЫХ ДРОБИЛКАХ С РИФЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ БАНДАЖЕЙ

Предложен аналитический способ определения энергосиловых параметров процесса дробления в валковой дробилке с рифленой поверхностью бандажей валков. На основании формулы Ньютона — Лейбница и теоремы Лагранжа о среднем значении функции на ее отрезке аналитически обоснована зависимость усилия дробления с учетом функции распределения материала по рабочей поверхности рифленого бандажа валка на дуге захвата куска материала. Обосновано значение фактической площади контакта, учитывающее условия контактного взаимодействия куска материала с поверхностью валика сетки бандажа валка при его перемещении в рабочем пространстве на дуге очага деформации. Предложены зависимости для определения результирующих сил при дроблении материала с учетом зависимости распределения материала по рабочей поверхности валков и рифлей на дуге захвата, окружной и нормальной сил на поверхности валиков сетки бандажей, а также результирующих сил, включающих в себя силы, возникающие при дроблении о рабочую поверхность бандажей и рифлей.

Ключевые слова: дробление, валковая дробилка, рифленый валок, площадь контакта, усилие дробления, окружная сила, нормальная сила.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Валковые дробилки [1–3] применяются для мелкого и среднего дробления материалов с различными физико-механическими свойствами, реализуемого за счет наложения на дробимый кусок материала сжимающих воздействий, возникающих между рабочими поверхностями бандажей [3–5].

На металлургических предприятиях для фракционной подготовки различных видов твердого топлива, используемого в агломерационном процессе, наибольшее распространение получили четырехвалковые дробилки [3–5]. При этом качество дробленых каменных углей и кокса, зависящее от многочисленных факторов, существенно сказывается на удельном расходе данного сырья в процессе спекания агломерата, производительности процесса, качестве и прочностных характеристиках готового аглоспека, а также количестве вредных выбросов в атмосферу [4–6].

Четырехвалковые дробилки (типа ДЧГ), получившие наибольшее распространение в

условиях агломерационного производства, в достаточной степени отвечают требованиям, предъявляемым технологическими условиями процесса подготовки сырья [1, 5]. Однако в процессе дробления материала в валковых дробилках возникают дополнительные энергозатраты, связанные с попаданием в рабочее пространство кусков размерами, превышающими допустимые; при этом не обеспечивается условие захвата материала валками и происходит их проскальзывание относительно поверхности бочки [5]. В данных условиях разрушение большей части куска осуществляется за счет истирания, а не раздавливания, что приводит к перенасыщению продукта частицами мелкодисперсной фракции, а также вызывает интенсивное изнашивание рабочей поверхности валка.

Для повышения эффективности процесса дробления материала в четырехвалковых дробилках применяют машины комбинированного типа, где на рабочую поверхность верхних валков наносят сетку, состоящую из продольных и поперечных

валиков (рифлей) [6, 7]. Это позволяет реализовать условие захвата кусков материала размерами, превышающими верхний предел фракции, при котором обеспечивается их захват в рабочее пространство гладкими валками. При этом рабочую поверхность бандажей нижней пары валков оставляют гладкой.

Энергосиловые показатели дробильно-измельчительного оборудования определяются следующими параметрами: усилием дробления, возникающим при деформации и разрушении материала в процессе измельчения; крутящим моментом, зависящим от момента сопротивления, возникающего на валу исполнительного органа, а также потребной мощностью привода, обеспечивающей устойчивую работу дробильной машины.

Ранее весьма детально затрагивался вопрос определения энергосиловых показателей валковых дробилок с гладкими валками. В данном направлении проводилось большое количество исследований, отраженных в научных работах [2–4, 8–12].

При использовании рифленой поверхности бандажей валков существенно меняются условия контактного взаимодействия массива материала с поверхностью бандажей в рабочем пространстве валков. В данном случае в системе сил, действующей на валок, возникают тангенциальные и радиальные составляющие от силы дробления при взаимодействии материала с рабочей поверхностью валиков рифленого бандажа.

Исходя из вышесказанного, зависимости, предложенные в научных работах [2–4, 8–12], не могут быть использованы для определения основных энергосиловых параметров процесса дробления материала валковыми дробилками с рифленой поверхностью бандажей, что, в свою очередь, не дает возможности определить рациональные конструктивные и технологические параметры отдельных узлов и механизмов валковой дробильной машины комбинированного типа.

Поэтому изучение самого процесса измельчения материала и анализ его основных параметров с целью повышения качества фракционной подготовки сырья и эффективности дробильных машин является актуальным и значительно влияет на показатели процесса агломерации железорудных материалов.

Постановка задач. Задачами данного исследования является математическое моделирование взаимодействия массива материала с рабочей поверхностью валка в процессе его дробления и определение основных энергосиловых параметров процесса дробления каменно-рудных материалов в валковой дробилке с рифлеными валками аналитическим методом: силы дробления с учетом зависимости распределения материала по рабочей поверхности валков и рифлей на дуге захвата; окружной (тангенциальной) и нормальной (радиальной) сил на поверхности валиков сетки бандажей, возникающих при взаимодействии с порцией сырья; результирующих сил, включающих в себя силы, возникающие при дроблении о рабочую поверхность бандажей и рифлей.

Изложение материала и его результаты. Для математического моделирования процесса дробления материала при контактном взаимодействии куска измельчаемого материала с рабочей поверхностью рифленых бандажей валков в процессе дробления необходимо принять следующие допущения:

- материал измельчаемой частицы материала — однородный, сплошной, изотропный и физико-механически линейный (при этом обладающий максимально возможными прочностными характеристиками);
- отдельный кусок дробимого материала условно представляется в виде шара;
- контактирующие поверхности валка и куска материала предполагаются совершенно гладкими;
- кусок материала при контактном взаимодействии с поверхностями рифленых верхних валков воспринимает равнознач-

ные нагрузки от пары валков и при этом не вращается относительно своей оси симметрии.

Схема контактного взаимодействия дробимого куска материала 2 с поверхностью валка 1 и валков сетки 3 представлена на рисунке 1.

При определении различных энергосиловых параметров процесса дробления в валковых дробилках с рифлеными валками в процессе контактного взаимодействия с порцией измельчаемого материала в рабочем пространстве необходимо в первую очередь определить силы, действующие на валок. Для этого предложена математическая модель, основанная на уточненной методике определения энергосиловых параметров процесса измельчения в валковых дробилках [12].

Для адаптации данной методики [12] в условиях процесса дробления материала в дробилке с рифлеными валками рассмотрим процесс измельчения как динамическую систему, в которой возникает сила

дробления $F_{др}$ и сила трения материала $F_{тр}$ о поверхность бандажа и валиков.

На первом этапе математического моделирования определим силы, возникающие при контактом взаимодействии сырья с рабочей поверхностью валиков в процессе его измельчения. Для этого рассмотрим расчетную схему сил (рис. 1, вид А), возникающих при дроблении материала о рифли сетки валка (рис. 2).

Представим элементарную силу $\partial F_{др}$, действующую на элементарную поверхность валика валка дробилки, как произведение давления (напряжения), возникающего в материале при его разрушении (прямо пропорционально зависящее от предела прочности материала), и площади элементарной площадки контакта материала с валиком сетки ∂S_{κ}

$$\partial F_{др} = \sigma_m \partial S_{\kappa}, \quad (1)$$

где σ_m — предел прочности дробимого материала на сжатие, МПа.

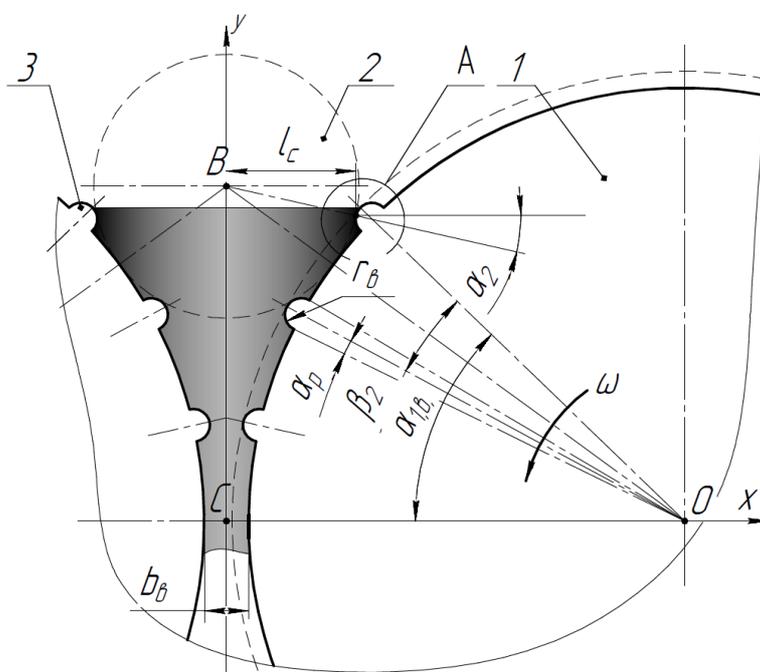


Рисунок 1 Расчетная схема для определения условий контактного взаимодействия материала с поверхностью бандажей и валков сетки при его измельчении в рабочем пространстве валковой дробилки с рифлеными валками

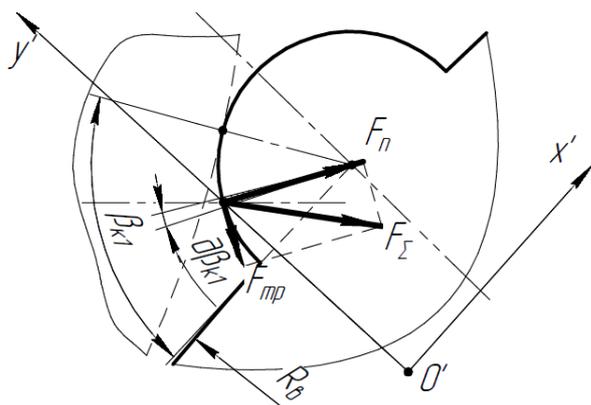


Рисунок 2 Схема сил, возникающих при дроблении материала о рифли валика

При этом площадь элементарной площадки контакта определяется как

$$\partial S_k = B_k \partial L_\partial, \quad (2)$$

где B_k — ширина элементарной площадки контакта порции материала с поверхностью валика валика дробилки, м; ∂L_∂ — длина элементарной дуги захвата материала в зоне очага деформации материала, м

$$\partial L_\partial = r_\partial \partial \beta_{k1}, \quad (3)$$

где r_∂ — радиус валика сетки банджа, м; $\partial \beta_{k1}$ — элементарный угол на дуге захвата, рад.

При этом сила трения материала об элементарную площадку поверхности валика, возникающая при дроблении, определяется как

$$\partial F_{тp} = \mu_m \partial F_{dp}, \quad (4)$$

где μ_m — коэффициент трения дробимого материала по материалу банджа валика.

В этом случае систему сил, возникающих при дроблении и действующих на поверхность валика банджа валика в подвижной системе координат $x'Oy'$, ориентированных относительно центра вращения валика (рис. 2), можно представить как проекции сумм элементарных сил на элементарных площадках на осях x' и y' на

длине дуги контактного взаимодействия материала с поверхностью валика, на которой происходит процесс разрушения материала. При этом предполагаем, что взаимодействие происходит на поверхности валика в секторе от основания валика до его вершины и в первом приближении соответствует углу $\frac{\pi}{2}$

$$\left\{ \begin{aligned} F_x &= \Sigma \partial F_x = \\ &= p \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\cos \beta_{k1} - \mu_m \sin \beta_{k1}) \partial \beta_{k1}; \\ F_y &= \Sigma \partial F_y = \\ &= p \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\mu_m \cos \beta_{k1} + \sin \beta_{k1}) \partial \beta_{k1}, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где p — удельная сила на площадке контакта, Н

$$p = \sigma_m B_k r_\partial. \quad (6)$$

Для определения средней величины суммы проекций сил на осях x' и y' воспользуемся формулой конечных приращений (теоремой Лагранжа о среднем значении функции [13]). На основании результатов аналитического решения формул (5, 6) с использованием данного метода зависимости для определения среднего значения составляющих сил $\bar{F}_{x,y}$ (в проекциях на координатные оси) будут выглядеть следующим образом

$$\bar{F}_x = \frac{2p(1-\mu_m)}{\pi}. \quad (7)$$

$$\bar{F}_y = \frac{2p(1+\mu_m)}{\pi}. \quad (8)$$

При дальнейшем определении силовых параметров процесса дробления материала о поверхность валика (при разрушении порции материала), исходя из характера распределения нормальных и касательных сил по поверхности рифлей в подвижной

системе координат $x'Oy'$, необходимо определить угол, характеризующий точку приложения равнодействующей силы от удельной силы в процессе деформации материала рифлями для тангенциальной и нормальной сил — их условные «центры тяжести» поверхности контакта (рис. 3).

Для дальнейшего моделирования необходимо определить углы положения «центров тяжести» в подвижной системе координат $x'Oy'$:

– для тангенциальной силы \bar{F}_x

$$\alpha_{к.ср.х} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \beta_{k1} (\cos \beta_{k1} - \mu_m \sin \beta_{k1}) d\beta_{k1}}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} (\cos \beta_{k1} - \mu_m \sin \beta_{k1}) d\beta_{k1}}; \quad (9)$$

– для нормальной силы \bar{F}_y

$$\alpha_{к.ср.у} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \beta_{k1} (\mu_m \cos \beta_{k1} + \sin \beta_{k1}) d\beta_{k1}}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} (\mu_m \cos \beta_{k1} + \sin \beta_{k1}) d\beta_{k1}}. \quad (10)$$

Решение зависимостей (9, 10) с помощью численных методов дает следующие результаты:

– для окружной составляющей сил

$$\alpha_{к.ср.х} = \frac{0,43}{\mu_m - 1} + 1; \quad (11)$$

– для нормальной составляющей сил

$$\alpha_{к.ср.у} = \frac{0,43}{\mu_m + 1} + 0,57. \quad (12)$$

На следующем этапе моделирования необходимо определить условия распределения порции материала по поверхности валков.

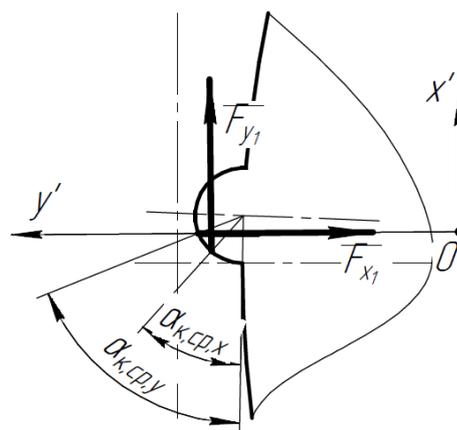


Рисунок 3 Положение сосредоточенных нормальных и касательных сил на поверхности валика в подвижной системе координат

Для определения ширины элементарной площадки контакта материала с поверхностью валика бандажа B_k необходимо использовать методику, предложенную в работе [12].

Для четырехвалковых дробилок комбинированного типа необходимо учитывать условия, определяющие порцию дробимого материала, загружаемую в рабочее пространство верхних валков, которая не может превышать пропускную способность нижних валков (в том числе дробилки в целом).

При этом условии ширину элементарной площадки контакта материала с поверхностью валика в плоскости межвалкового зазора («плоскость выгрузки» материала) верхней пары можно определить следующим образом

$$B_k = B_{раб} k_B, \quad (13)$$

где $B_{раб}$ — рабочая ширина поверхности контакта материала с бандажами нижней пары валков в плоскости межвалкового зазора с предельно допустимой пропускной способностью дробилки, м [12]; k_B — коэффициент, учитывающий отношение ширины элементарной площадки контакта материала с рабочей поверхностью бандажей

верхних и нижних валков с учетом пропускной способности дробилки, скорости вращения валков, величины межвалкового зазора и объема материала, вытесняемого валиками сетки из массива, находящегося в рабочем пространстве дробилки, который определяется из следующего уравнения

$$b_n n_n B_{раб} = b_n n_n B_{к.в.} - \frac{\pi^2 n_n r_n^2 B_{раб}}{\beta_2}, \quad (14)$$

где n_n — число оборотов нижней пары валков дробилки, об/мин; b_n — межвалковый зазор нижней пары, м; b_n — межвалковый зазор верхней пары, м; β_2 — угол между центрами окружностей соседних валиков сетки бандажей (шаг валиков), рад [6]; n_n — число оборотов верхней пары валков, об/мин.

Тогда коэффициент, определяющий отношение рабочей ширины площадки контакта материала в плоскости межвалкового зазора верхнего валка к той же ширине нижнего,

$$k_B = \frac{\pi^2 n_n r_n^2 + b_n n_n \beta_2}{b_n n_n \beta_2}. \quad (15)$$

Учитывая вышесказанное и используя свойство аддитивности площадей (формула Ньютона — Лейбница), интегрируемых на одном и том же отрезке функции [13], контактная площадь материала с рабочей поверхностью бандажей в первом приближении на основании методики, предложенной в работе [12], определяется как определенный интеграл от зависимости ширины элементарной площадки на длине дуги очага деформации

$$S_{к.б.} = \int_0^{\alpha_{1.б.}} R_n B_n d\alpha = \frac{2k_B b_n R_n B_{раб} \arctg \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{1.б.}}{2} \right) \frac{\sqrt{b_n (4R_n + b_n)}}{b_n} \right)}{\sqrt{b_n (4R_n + b_n)}}, \quad (16)$$

где R_n — радиус рабочей поверхности бандажа валка (радиус впадин рифлей); $\alpha_{1.б.}$ — угол сектора очага деформации в рабочем пространстве дробилки с рифлеными валками

$$\alpha_{1.б.} = \alpha_1 + \frac{\beta_2}{2}, \quad (17)$$

где α_1 — угол контакта материала для гладких валков [2, 3, 6].

Наибольшие нагрузки в процессе дробления возникают в том случае, когда ближнее основание (по направлению вращения) одного из валиков (в дальнейшем — «опорный» валик) находится в «плоскости выгрузки». В то же время необходимо учитывать, что очаг деформации разделен на несколько чередующихся секторов, включающих в себя участки с гладкой поверхностью бандажа и следующие за ними поперечно расположенные валики сетки (рис. 4).

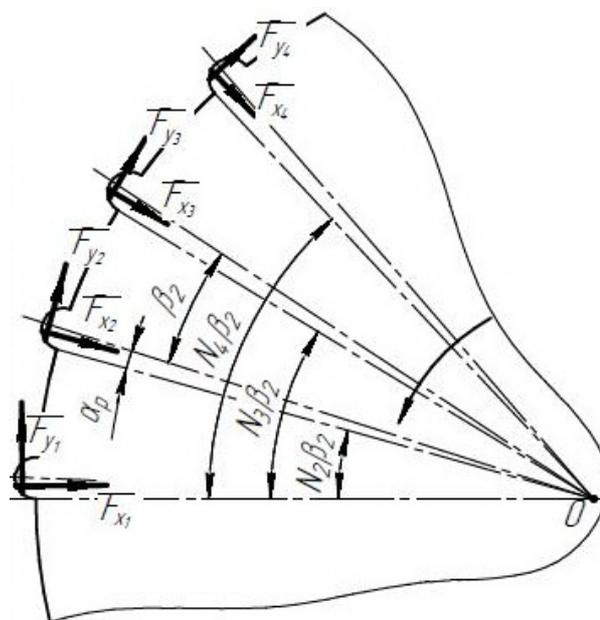


Рисунок 4 Положение рифлей валков и проекций сил для определения предельного значения силы сопротивления

Число таких секторов будет зависеть от количества поперечных валиков сетки, находящихся в секторе дуги очага деформации

$$N_{\epsilon} = \frac{\alpha_{1.\epsilon}}{\beta_2}. \quad (18)$$

При расчетах принимаем целое число валиков, находящихся в секторе дуги очага деформации.

Для упрощения расчетов введем следующие обозначения:

– коэффициент, определяющий конструктивно-технологические параметры

$$\lambda_{\kappa} = \frac{\sqrt{b_{\epsilon}(4R_{\epsilon} + b_{\epsilon})}}{b_{\epsilon}}; \quad (19)$$

– угол между центром симметрии «опорного» валика и осью определенной рифли сетки с порядковым номером N_{ϵ_i} в

$$S_{\kappa.p.i} = \int_{\beta_{N_i}}^{\beta_{N_i} + \alpha_p} R_{\epsilon} B_{\kappa} d\alpha = \frac{2v_{\epsilon} k_B R_{\epsilon} B_{pa\delta} \left(\arctg \left(\lambda_{\kappa} \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_p - \beta_{N_i}}{2} \right) \right) + \arctg \left(\lambda_{\kappa} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_{N_i}}{2} \right) \right) \right)}{\lambda_{\kappa}}, \quad (22)$$

где α_p — половина угла сектора окружности поверхности валков, занимаемого одним валиком сетки (определяется из схемы (рис. 1))

$$\alpha_p = \arccos \left(1 - \frac{r_{\epsilon}^2}{2R_{\epsilon}^2} \right). \quad (23)$$

Тогда зависимости (7, 8) выглядят следующим образом:

– для нормальной (радиальной) составляющей сил

$$\bar{F}_{x_i} = \frac{2\sigma_m S_{\kappa.p.i} (1 - \mu_m)}{\pi}; \quad (24)$$

– для окружной (тангенциальной) составляющей сил

$$\bar{F}_{y_i} = \frac{2\sigma_m S_{\kappa.p.i} (1 + \mu_m)}{\pi}. \quad (25)$$

системе отсчета относительно «плоскости выгрузки»

$$\beta_{N_i} = (N_{\epsilon_i} - 1)\beta_2; \quad (20)$$

– отношение длин окружностей валика и бандажа на угловом секторе между основаниями рифли, учитывающее длину поверхности рифли — площадки контакта на участке распределения материала на валике сетки

$$v_{\epsilon} = \frac{r_{\epsilon}\pi}{2R_{\epsilon}\alpha_p}. \quad (21)$$

Тогда, с учетом зависимостей (1, 6–8, 12, 14, 15, 18, 19–21), площадь контакта валика сетки бандажа с определенным порядковым номером в секторе очага деформации материала на угле $\alpha_{1.\epsilon}$ в точке приложения равнодействующей определяется следующим образом

Суммарную силу дробления о рабочую поверхность бандажа можно определить как

$$F_{\partial.\delta.} = \sigma_m \left(S_{\kappa.\delta.} - \sum_1^N S_{\kappa_i} \right). \quad (26)$$

В этом случае результирующая (суммарная) окружная (тангенциальная) составляющая относительно подвижной системы координат $x'Oy'$ силы дробления определяется как

$$F_{\tau} = F_{mp.\delta.} + \sum_1^N \bar{F}_{x_i}, \quad (27)$$

где $F_{mp.\delta.}$ — сила трения поверхности валка о дробимый материал

$$F_{mp.\delta.} = \mu_m F_{\partial.\delta.}. \quad (28)$$

Результирующая нормальная (радиальная) составляющая относительно подвижной

ной системы координат $x'Oy'$ силы дробления

$$F_r = F_{\text{д.б.}} + \sum_1^N \bar{F}_{y_i}. \quad (29)$$

Выводы и направление дальнейших исследований. В работе предложена математическая модель процесса взаимодействия дробимого материала с рифленой поверхностью бандажей в валковой дробилке. На основании данной модели получен способ определения энергосиловых параметров процесса дробления материала, а именно окружной (тангенциальной) и нормальной (радиальной) сил на поверхности валков

сетки бандажей, возникающих при взаимодействии с порцией сырья, а также результирующих сил, включающих в себя силы, действующие при взаимном контакте с рабочей поверхностью бандажей и рифлей.

Дальнейшими перспективами в исследовании процесса дробления различных материалов в валковых дробилках с рифлеными валками являются математическое описание и определение моментов сопротивления от сил трения, возникающих при дроблении материала и в подшипниковых опорах, а также требуемой мощности привода валковой дробилки при установившемся режиме работы.

Библиографический список

1. *Treatise on Process Metallurgy. Vol. 3. Industrial Processes [Text] / Editor in Chief S. Seetharaman. — Elsevier, 2014. — 1751 p.*
2. Клушанцев, Б. В. *Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации [Текст] / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. — М. : Машиностроение, 1990. — 320 с.*
3. Борщев, В. Я. *Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы [Текст] / В. Я. Борщев. — Тамбов : ТГТУ, 2004. — 75 с.*
4. Egbe, E. A. P. *Design, Fabrication and Testing of a Double Roll Crusher [Электронный ресурс] / E. A. P. Egbe, O. A. Ohugboji // International Journal of Engineering Trends and Technology. — 2016. — Vol. 35. — № 11. — Режим доступа: <https://www.ijettjournal.org/2016/volume-35/number-11/IJETT-V35P303.pdf> (03.09.2020).*
5. Власенко, Д. А. *Комплексный анализ особенностей эксплуатации дробильно-измельчительного оборудования в агломерационном производстве [Текст] / Д. А. Власенко // Инновационные перспективы Донбасса. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк : ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2019. — Т. 3 — С. 150–154.*
6. Власенко, Д. А. *Математическое моделирование процесса захвата материала рифлеными валками валковой дробилки [Текст] / Д. А. Власенко // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — № 18 (61). — С. 122–130.*
7. Пат. 188107 Российская Федерация, МПК В02С 4/30. *Валок четырехвалковой дробилки / А. П. Жильцов, Г. А. Билан, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко, Р. С. Мележик ; заявитель и патентообладатель ЛГТУ. — № 2018134232 ; заявл. 27.09.2018 ; опубл. 28–03–2019, Бюл. № 10. — 3 с. : ил.*
8. Fernández-González, D. *Iron Ore Sintering: Raw Materials and Granulation [Электронный ресурс] / D. Fernández-González, I. Ruiz-Bustanza, J. Mochón, C. González-Gasca, L. F. Verdeja // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review — 2017. — Vol. 38. — № 1. — P. 36–46. — Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08827508.2016.1244059> (10.10.2020).*
9. Плановский, А. Н. *Процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А. Н. Плановский, В. Н. Рам, С. З. Каган. — М. : Химия, 1967. — 848 с.*
10. Lieberwirth, H. *Dynamics in double roll crushers [Text] / H. Lieberwirth, Ph. Hillmann, M. Hesse // Minerals Engineering. — Elsevier Ltd., 2016. — P. 60–66.*
11. Rashidi, S. *A Review of the Modeling of High Pressure Grinding Rolls [Text] / S. Rashidi, R. K. Rajamani, D. W. Fuerstenau // Powder and Particle Journal. — KONA, 2017. — Vol. 34. — P. 125–140.*

12. Власенко, Д. А. Уточненная методика определения энергосиловых параметров процесса измельчения в валковых дробилках [Текст] / Д. А. Власенко // Вестник ДонНТУ. — Донецк : ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2020. — № 3 (21). — С. 3–9.

13. Тер-Крикоров, А. М. Курс математического анализа [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. М. Тер-Крикоров, М. И. Шабунин. — [3-е изд.]. — М. : Бином. Лаборатория знаний, 2015. — 672 с.

© Власенко Д. А.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ПГМ ДонГТИ Левченко Э. П.,
д.т.н., зав. каф. АТ ЛГУ им. В. Даля Замотой Т. Н.**

Статья поступила в редакцию 23.10.2020.

Vlasenko D. A. (*DonSTI, Alchevsk, LPR*)

ANALYTICAL APPROACH FOR DETERMINING POWER PARAMETERS OF GRINDING PROCESS IN ROLLER CRUSHERS WITH WAVED SURFACE OF SLEEVES

There has been proposed the analytical approach for determining power parameters of crushing process in a roller crusher with waved surface of sleeves. Based on the Newton — Leibniz formula and Lagrange's theorem on the average value of a function on its segment, the dependence of the crushing force is analytically justified considering the function of distributing material over the operating surface of the waved surface of sleeves on the arc of capturing a piece of material. The value of the actual contact area is justified, taking into account the conditions of contact interaction of the piece of material with the surface of roll mesh of the roll sleeve when it moves in the operating space on the arc of deformation zone. Dependencies are proposed for determining the resulting forces at material crushing considering dependence of material distribution over operating surface of rolls and ruffles on arc of capturing, circumferential and direct forces on surface of sleeve mesh roll, as well as resulting forces including forces arising at crushing against operating surface of sleeves and ruffles.

Key words: *crushing, roller crusher, waved roll, contact area, crushing force, circumferential force, direct force.*

ТРЕБОВАНИЯ
к рукописям научных статей в сборник научных трудов
государственного образовательного учреждения
высшего образования Луганской Народной Республики
«Донбасский государственный технический институт»

Научные статьи, предоставляемые в редакцию, должны соответствовать требованиям ВАК МОН ДНР (Приложение 1 к правилам формирования в уведомительном порядке перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (п. 4)) и базовым издательским стандартам по оформлению статей по ГОСТ 7.5–98 «Журналы, сборники, информационные издания».

Сборник научных трудов издаётся не менее 4 раз в год. Сборник формирует информационный отдел: 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, ДонГТИ; тел./факс: (06442) 2-68-87, e-mail: info@dstu.education (тема: для редакции сборника научных трудов ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»); секретарь редакционной коллегии Скомская Светлана Анатольевна.

Сборник содержит следующие разделы: «Науки о земле», «Металлургия и материаловедение», «Машиностроение и машиноведение», «Строительство и архитектура».

Представляемые в статье материалы должны быть актуальными, отвечать новым достижениям науки и техники, иметь практическую значимость, соответствовать направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

Название статьи должно быть лаконичным и понятным, включать в себя объект и предмет исследований, иметь прямое отношение к области исследований и её результатам.

Обязательные элементы статьи:

- 1) постановка проблемы, обоснование её актуальности;
- 2) анализ последних исследований и публикаций по данной проблеме, вскрытие их недостатков и противоречий;
- 3) выделение не решённых ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;
- 4) формулирование цели, идеи, объекта и предмета исследований, постановка задач исследований;
- 5) описание и обоснование принятой методики исследований;
- 6) изложение основного материала теоретических и (или) экспериментальных исследований с обоснованием достоверности полученных научных результатов;
- 7) выводы о научной новизне и практической ценности результатов, направление дальнейших исследований.

По решению редколлегии в каждом номере сборника может быть опубликовано не более одной статьи обзорного характера, включающей большую часть рекомендованных выше основных элементов.

Редакция оставляет за собой право отклонять рукописи обзорного и компилятивного характера с нечётко сформулированными научными результатами, новизна и достоверность которых недостаточно обоснованы.

Результаты работы не должны предоставляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, несоблюдение действующих стандартов и недостоверность приведённых в статье данных полностью несут авторы статьи.

Статья должна сопровождаться:

- внутренней и внешней рецензиями;

– лицензионным договором с автором(и).

Текст статьи предоставляется на электронном носителе и в печатном виде, сопроводительная документация только в печатном виде.

Рекомендуемое количество авторов статьи — до 3-х человек. При необходимости, по решению редколлегии, количество авторов может быть увеличено до 5-ти.

Языки предоставления статей: русский, английский.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Текст рукописи статьи от 5 до 10 страниц в книжной ориентации на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с полями: верхнее, нижнее — 27 мм; левое, правое — 24 мм. Различать колонтитулы чётных и нечётных страниц: от края до верхнего колонтитула — 2 см; от края до нижнего колонтитула — 2 см. Страницы не нумеруются. Рукопись статьи оформляется с применением редактора **MS Word в формате, полностью совместимом с Word 97–2003**: шрифт — Times New Roman, размер — 12 пт, интервал — одинарный, выравнивание — по ширине, абзацный отступ — 0,5 см.

Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **активирована**. Весь материал подаётся в чёрно-белом оформлении (без градиентов серого или цветовой палитры).

Не допускается использование списков (маркированных и нумерованных) и элементов «Надпись». **Запрещено использование стилей!**

Оформление статей

Статья подаётся отдельным файлом «*Статья.doc*».

УДК проставляется вверху, выравнивание по левому краю, шрифт полужирный, без абзацного отступа. УДК можно определить самостоятельно с помощью классификатора <https://teacode.com/online/udc>. Проверить корректность расшифровки известного УДК можно здесь — <http://scs.viniti.ru/udc/Default.aspx>.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, разделённые пробелом. С новой строки в круглых скобках через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. Шрифт полужирный, курсив, выравнивание по правому краю, без абзацного отступа.

С новой строки — название статьи. Выравнивание по центру, шрифт Arial, полужирный, видоизменение — все прописные, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца — 12 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. **Не допускается** набор всего названия заглавными буквами (Caps Lock).

С новой строки — краткая аннотация на языке статьи: размер шрифта — 11 пт, курсив. В аннотации сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

После аннотации с новой строки — ключевые слова (6–8 слов на языке статьи), курсивом, размером 11 пт, интервал после абзаца — «Авто». Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

С новой строки — текст статьи в **две колонки** одинаковой ширины, промежуток между колонками — 0,5 см.

Слова «рисунок» и «таблица» при упоминаниях в тексте пишутся полностью (пример: «... на рисунке 2 ...»), а в ссылках в конце предложения — сокращённо в скобках (примеры: «... схема инвертора (рис. 2).», «... получены экспериментальные данные (табл. 4).»).

После текста статьи полужирным шрифтом размером 11 пт располагается заголовок «Библиографический список»: интервал перед абзацем — 12 пт, после абзаца — 8 пт, выравнивание по левому краю.

Библиографический список оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления» размером 11 пт, курсивом и должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Рекомендованное количество ссылок — не более восьми источников с датой их издания не ранее чем 20 лет назад.

Оформление аннотаций отдельным файлом

Аннотация и ключевые слова дополнительно подаются на языке статьи отдельным файлом «*Аннотация.doc*», размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

Не допускается внедрение в текст аннотации объектов (формул, рисунков и т. д.).

Оформление рефератов отдельным файлом

Реферат подаётся на языке статьи отдельным файлом «*Реферат.doc*»: размер шрифта — 11 пт, без абзацного отступа, выравнивание — по левому краю. Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **выключена**.

Фамилия, имя, отчество оформляются полужирным шрифтом.

С новой строки — учёная степень, должность.

С новой строки — название подразделения.

С новой строки через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

Через интервал повторить данные для каждого автора.

Через интервал — название статьи (полужирным начертанием).

Через интервал — текст реферата. Реферат объёмом от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель, методика, результаты, научная новизна, практическая значимость. Фразы «**Цель.**», «**Методика.**», «**Результаты.**», «**Научная новизна.**», «**Практическая значимость.**» (для статьи на русском языке); «**Aim.**», «**Technique.**», «**Results.**», «**Scientific novelty.**», «**Practical significance.**» (для статьи на английском языке) размещаются с новой строки и выделяются полужирным начертанием. Реферат не должен повторять название статьи.

Не допускается внедрение в текст реферата объектов (формул, рисунков, и т. д.).

Рисунки

Рисунки вставляются в текст единым объектом и могут быть представлены:

– *растровыми форматами* — gif, tiff, jpg, bmp и им подобными (качество 300 dpi);

– *векторными форматами* — emf, wmf (графики, диаграммы).

Рисунки, выполненные в программах Corel, CAD, Word и др., переводятся в один из описанных выше форматов, предпочтительно векторный.

Графический материал следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые, или на следующей странице. Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте и нанесены слева направо, сверху вниз. Перед рисунком интервал 12 пт. Выравнивание по центру, ширина в одну колонку (большие рисунки располагают на ширину страницы вверху или внизу). Рисунки размещают в тексте (не в таблицах), обтекание рисунка — «в тексте». Все рисунки подаются дополнительно отдельными файлами.

Допускается размещение пояснительных данных под иллюстрацией (подрисуночный текст) с выравниванием по центру, без абзацного отступа, размером 10 пт.

Под каждым рисунком (подрисуночным текстом) располагается надпись в формате «Рисунок № Название» с выравниванием по центру без абзацного отступа, интервалом перед и после абзаца — «Авто», размером шрифта 11пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. Статья не должна заканчиваться рисунком. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема статьи.

Формулы

Абзац, содержащий формулы, должен иметь следующие параметры: выравнивание по левому краю, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца 6 пт, позиции табуляции — 3,93 см по центру (для расположения формулы) и 7,85 см по правому краю (для расположения номера формулы). Формулы целиком (включая размерности) выполняются с помощью редактора формул **Microsoft Equation 3** или **MathType** математическим стилем, обычное начертание шрифта (нормальный), со следующими размерами:

Full (обычный).....	12 pt
Subscript/Superscript (крупный индекс)	9 pt
Sub-Subscript/Superscript (мелкий индекс)	7 pt
Symbol (крупный символ).....	14 pt
Sub-Symbol (мелкий символ).....	12 pt
Формат	по центру
Междустрочный интервал	200 %

Недопустимо масштабирование и размещение формул в табличном формате. В одном блоке формулы, попадающем на границу колонок, допускается только одна строка (многострочные формулы разбиваются на блоки).

Упоминание элементов формул в тексте статьи также выполняется в редакторе формул.

Двоеточие перед формулой не ставится, независимо от правил пунктуации.

Таблицы

Все таблицы располагаются после упоминания в тексте и должны иметь нумерационный заголовок и название (размер шрифта 11 пт). Нумерационный заголовок (*Таблица 1*) выравнивается по правому краю над таблицей, курсив, интервал перед абзацем — 12 пт. С новой строки помещают название выравниванием по центру, без абзацного отступа, с запретом автоматического переноса слов в абзаце; интервал после абзаца — 6 пт.

Таблица выравнивается по центру контейнера, в книжной ориентации, шириной в 1 колонку (большие таблицы располагаются на ширину страницы вверх или вниз). Текст в таблице оформляется размером шрифта 11 пт или 12 пт без абзацного отступа. **Не допускается** заливка ячеек таблицы цветом. **Запрещается** располагать таблицу в альбомной ориентации. После таблицы отступается один интервал.

СОДЕРЖАНИЕ**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

<i>Литвинский Г. Г.</i> РАЗМЕРЫ И КОНФИГУРАЦИЯ ЗОНЫ ЗАПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ	5
<i>Ларченко В. Г., Коваленко Е. В.</i> МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ СО ДНА МОРЕЙ И ОКЕАНОВ	18
<i>Шубин Ю. П.</i> ОСОБЕННОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА, ГЕНЕЗИСА И КОНТРОЛЯ МЕДНОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ БАХМУТСКОЙ КОТЛОВИНЫ ДОНБАССА	23
<i>Дрипан П. С.</i> МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УСТОЙЧИВОСТИ И ПРОЧНОСТИ АНКЕРА ПРИ ЗАКРЕПЛЕНИИ ПОРОДНОГО МАССИВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗКИ	31

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Денищенко П. Н., Макаганюк А. С.</i> ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРПОВИДНОСТИ РАСКАТА ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ	43
<i>Диментьев А. О., Карпов А. В., Блинов А. М.</i> УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛИ ЧУГУНА С ЗАДАННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ, ПРОИЗВЕДЕННОГО В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ	50
<i>Петров П. А., Ульяницкая О. В.</i> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	56

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Захаров О. В.</i> НАГРУЗКИ В ШАРНИРНОМ МЕХАНИЧЕСКОМ СОЕДИНЕНИИ ТИПА «ФЛЕКСКО» РЕЗИНОТКАНЕВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ	65
<i>Еронько С. П., Ошовская Е. В., Ковалёва О. А., Ткачёв М. Ю.</i> ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ РЕЗА ТРУБЫ КЛИНОВЫМ НОЖОМ	72
<i>Вишневский Д. А., Бондарь Н. А., Сотников А. Л.</i> ИСПЫТАНИЯ НОСИМОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ	80
<i>Еронько С. П., Ткачёв М. Ю., Пономарёва Е. А., Цыхмистро Е. С.</i> ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЫЧКИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ НА ВХОДЕ В КАНАЛ КОВШОВОГО ЗАТВОРА	86
<i>Власенко Д. А.</i> АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ВАЛКОВЫХ ДРОБИЛКАХ С РИФЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ БАНДАЖЕЙ	93

CONTENT**GEOSCIENCES**

<i>Litvinsky G. G.</i> DIMENSIONS AND CONFIGURATION OF THE ZONE OF EXTREME DEFORMATIONS AROUND THE WORKING	5
<i>Larchenko V. G., Kovalenko E. V.</i> SURVEYING SUPPORT FOR THE DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS FROM THE BOTTOM OF THE SEAS AND OCEANS	18
<i>Shubin Yu. P.</i> FEATURES OF THE MATERIAL COMPOSITION, GENESIS AND CONTROL OF COPPER-ORE MINERALIZATION OF THE DONBASS BAKHMUT BASIN	23
<i>Dripan P. S.</i> MATHEMATICAL MODELS OF ANCHOR STABILITY AND STRENGTH AT ROCK MASS ATTACHMENT UNDER LOAD	31

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES

<i>Denishchenko P. N., Makaganiuk A. S.</i> PHYSICAL MODELING OF THE HOT-ROLLED BREAKDOWN CAMBER DURING THICK-SHEET ROLLING	43
<i>Dimentev A. O., Karpov A. V., Blinov A. M.</i> INCREASING THE PROPORTION OF CAST IRON WITH A GIVEN SILICON CONTENT PRODUCED IN THE BLAST FURNACE	50
<i>Petrov P. A., Ulianitskaia O. V.</i> EFFICIENCY OF USING ALTERNATIVE ENERGY SOURCES IN METALLURGY	56

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Korneev S. V., Dobronogova V. Yu., Zakharov O. V.</i> LOADS IN "FLEXCO" TYPE SWIVEL MECHANICAL JOINT OF FABRIC-PLY CONVEYOR BELTS	65
<i>Yeronko S. P., Oshovskaya Y. V., Kovaleva O. A., Tkachov M. Yu.</i> STUDYING THE CONDITIONS OF DEFORMATION AREA FORMATION IN PIPE CUTTING ZONE WITH WEDGE KNIFE	72
<i>Vishnevskiy D. A., Bondar N. A., Sotnikov A. L.</i> WEARABLE DEVICE TESTING FOR DETERMINING PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE OF METALLURGICAL INDUSTRY OPERATOR	80
<i>Yeronko S. P., Tkachyov M. Yu., Ponomaryova Ye. A., Tsykhmistro Ye. S.</i> THEORETICAL AND MODEL EXAMINATION OF STRENGTH PARAMETERS OF JUMPER BAR FORMED AT ENTRANCE TO A LADLE GATE CHANNEL	86
<i>Vlasenko D. A.</i> ANALYTICAL APPROACH FOR DETERMINING POWER PARAMETERS OF GRINDING PROCESS IN ROLLER CRUSHERS WITH WAVED SURFACE OF SLEEVES	93

Distribution and replication is forbidden without official allowance of SEI HE "DonSTI"

**UDC 622(06) + 669(06) + 69(06) + 65.011.56 +
+ 621.3 + 33 + 621.37 + 1**

**Collection of scientific papers
of Donbass State Technical Institute**

Collection
Issue 20 (63) 2020

**Establisher:
SEI HE "DonSTI" (LPR)**

*Certificate of the Ministry of Communications
and Mass Media of the LPR
for mass media registration PI 000169
dated 08.12.2020*

*By order of the Department of Education and Science
of the Donetsk People's Republic of 2 May 2017
№ 464 the Collection of scientific papers is being
offered in the list of peer-reviewed scientific editions
with required publications of the main scientific PhD
and Doctor's thesis results, approved by an order of
the Department of Education and Science of
the Donetsk People's Republic of 1 November 2016
№ 1134, according to annex 1*

*By order of the Department of Education and Science
of the Lugansk People's Republic № 911-OD
of 10.10.2018 the Collection of scientific papers of
DonSTI is being offered in the list of peer-reviewed
scientific editions with required publications of the
main scientific PhD and Doctor's thesis results,
approved by an order of the Department of Education
and Science of the Lugansk People's Republic
of 15 May 2018 № 477-OD*

*Recommended by academic council
of SEI HE "DonSTI"
(Record № 5 dated 25.12.2020)*

Added to scientometrical database of RSCI

Format 60×84½
Conventional printed sheet 13,5
Order № 397

Circulation 100 copies

Publishing office is not responsible for material
content giving by author for publishing

Address of editorial office, publishing and establishing:
SEI HE "DonSTI"

Lenin avenue, 16, Alchevsk, LPR
94204

e-mail: info@dstu.education
web-site: <http://www.dstu.education>

PUBLISHING AND PRINTING CENTER
room 2113, tel/fax 2-58-59

Certificate of State registration for mass media
publisher, owner and distributor
MI-SGR ID 0000055 dated 05.02.2016

Editor-in-chief

Kuberskyi S. V. — PhD in Engineering, Prof.,
Acting Rector

Deputy Editor-in-chief

Vishnevskiy D. A. — PhD in Engineering, Asst. Prof.

Editorial board:

Litvinskiy G. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Borshchevskiy S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Korneyev S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Leonov A. A. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Kharlamov Yu. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Zinchenko A. M. — PhD in Economics, Asst. Prof.
Zelinskyi A. N. — PhD in Engineering, Prof.
Snitko S. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Dolzhikov V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Denischenko P. N. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Sholukh N. V. — Doctor of Arch., Prof.
Andriyчук N. D. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Pilavov M. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Bondarchuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Psiuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Skomskaya S. A. — secretary to the editorial board

For research scientists, PhD seekers, students of
higher educational institutions.

Issue language:
Russian, English

Computer layout
Ismailova L. M.

© SEI HE "DonSTI", 2020
© Chernyshova N. V., graphic cover
design, 2020